

Diplomarbeit

**Substitutionspotential von ausgewählten
alternativen Kraftstoffen am Energiebedarf des
Verkehrs in der EU 2030**

Christoph Brunner

Institut für Fahrzeugtechnik
Technische Universität Graz
Vorstand: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. W. Hirschberg



Begutachter: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. W. Hirschberg
Betreuer: Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. C. Buksnowitz

Graz, im Juli 2011

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird untersucht, wie groß der Energiebedarf im Verkehrssektor der EU nach heutigem Datenmaterial im Jahr 2030 sein wird und welcher Anteil daran durch ausgewählte alternative Treibstoffe unter den berücksichtigten Einflüssen gedeckt werden könnte. Dabei werden die Verbrauchseinsparungspotentiale durch moderne bzw. alternative Antriebe und Verbrennungsverfahren sowie durch die Elektrifizierung von KFZ berücksichtigt.

Der Verkehrssektor ist heute zu über 96 % vom fossilen Energieträger Erdöl abhängig [1, S.8], dieser Umstand verursacht bedeutende wirtschaftliche Risiken. Biotreibstoffe aus Biomasse bieten einen möglichen Ansatz, diese Abhängigkeit zu verringern und gleichzeitig durch den verringerten Kohlendioxidausstoß (CO_2 Emissionen) einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Bestimmend für den Energieverbrauch des Verkehrs sind neben sozialen und ökonomischen Faktoren vor allem technische Parameter wie z.B. die Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren oder die Möglichkeit zur Einsparung von Energie durch alternative Antriebe.

In dieser Arbeit wird der Energiebedarf des gesamten Verkehrs der EU 27 im Jahr 2030 mit 13,4 Exajoule [EJ] bestimmt, die größten Anteile an diesem Bedarf beanspruchen der PKW-, LKW- und der Flugverkehr für sich.

Um festzustellen, welcher Anteil daran durch alternative Quellen gedeckt werden könnte, werden unterschiedliche Kraftstoffe untersucht und in einem zweistufigen Auswahlverfahren miteinander verglichen. In der ersten Stufe werden Knock-Out-Kriterien gebildet, in weiterer Folge werden nur jene Treibstoffe betrachtet die alle diese KO-Kriterien erfüllen (z.B. kein Konfliktpotential mit der Nahrungsmittelherstellung). Letztendlich erscheinen BTL-Treibstoffe sowie Treibstoffe aus Mikroalgen am besten dazu geeignet, einen großen Anteil des Energiebedarfs zu decken.

Mit verschiedenen Daten bezüglich der Nettoenergieerträge und den verfügbaren Flächen wird in dieser Arbeit ein maximales technisches Gesamtpotential an Biotreibstoffen von 7,5 Exajoule bestimmt, dieser Betrag könnte somit mehr als die Hälfte des Energiebedarfs decken. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Literatur sehr unterschiedliche Daten zu den betrachteten Treibstoffen angegeben werden, die ausgewählten Kraftstoffe sind zum heutigen Zeitpunkt noch nicht wirtschaftlich herstellbar und werden somit noch nicht großtechnisch eingesetzt, dementsprechend sind die hier errechneten Ergebnisse als ein mögliches Szenario anzusehen.

Schlagworte: Alternative Treibstoffe, Energiebedarf, Europäische Union, Nahrungsmittelproduktion, Substitutionspotential, Verkehr

Abstract

In this diploma thesis it is examined how much energy the transport sector of the European Union in the year 2030 will need and which amount of this demand can be substituted by selected alternative fuels.

The transport sector today is nearly completely dependent by fossil fuels, this is the reason why it is vulnerable against high oil prices and, in the long term, against a shortage in the energy supply.

Also the negative effects for the environment by the emissions of greenhouse gases and other pollutants have to be considered.

Because of these major problems, the substitution of fossil fuels by alternative fuels is one approach to reduce this risks and negative effects.

Essential for the energy demand of the transport sector are social, economic and technical factors. The social and economic factors are responsible for the demand of passenger- and freightkilometers carried out by different vehicles, while technical factors like the efficiency of internal combustion engines are responsible for the energy demand to fulfil this traffic volume.

According to the present state of knowledge, the conclusion of this thesis is that the energy demand of the whole transport sector in the European Union in the year 2030 will be around 13,4 exajoule.

To find out which part of this energy demand can be met by regenerative energies, different alternative fuels have been investigated and classified by a two-step selection process. Considering some knock out criteria (such as no additional negative effects for the food supply), BTL-fuels and fuels made of microalgae looks like the most suitable fuels to replace crude oil and to reduce the dependence on fossil fuels. Due to the available data there can be calculated a technical potential of 7,5 exajoule. This means that the technical potential of the selected biofuels can supply about the half of the energy demand. It has to be noted that the technical potential is restricted by economic limitations, also some of the investigated and selected fuels are not economically viable at the moment because they are currently in the development stage.

Because of this reasons, the economically useable potential of biofuels may become much smaller than 7,5 exajoule, the use of biofuels will be strongly dependent on future development of the price of crude oil.

Keywords: alternative fuels, energy demand, European Union, food production, substitution potential, transport

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im Jahr 2011 am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Besonderen Dank möchte ich Herrn O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. W. Hirschberg aussprechen. Durch seine Unterstützung war es mir möglich, den Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit selbst festzulegen und somit eine Thematik zu bearbeiten, die für mich persönlich von großem Interesse ist.

Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. C. Buksnowitz bedanken, seine Förderung und professionelle Beratung hat entscheidenden Anteil an der vorliegenden Arbeit.

Meinen Eltern möchte ich an dieser Stelle ebenfalls von ganzem Herzen danken. Ohne Ihre Unterstützung wäre es mir in keinem Fall möglich gewesen, ein Studium zu absolvieren und diese Arbeit als Abschluss eines bedeutenden Lebensabschnitts anzufertigen.

Auch meiner Lebensgefährtin möchte ich mich für ihre Hilfestellung und das Verständnis in den vergangenen Jahren danken, vor allem in schwierigen Zeiten hat sie mir wichtigen Rückhalt gegeben.

Graz, im Juli 2011

Christoph Brunner

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Energieversorgung bedeutet Lebensqualität	11
1.2	Verkehr und Biotreibstoffe als Schwerpunkt dieser Arbeit	11
2	Methodik	13
3	Überblick über Energiedefinitionen und fossile Energieträger	15
3.1	Energiedefinitionen	15
3.2	Fossile Energieträger, Erdöl	15
3.2.1	Rohölklassifizierung nach Qualitätsmerkmalen	16
3.2.2	Erdölraffinierung und Verwendung als Treibstoff	17
4	Probleme fossiler Energieversorgung	18
4.1	Umweltproblematik durch Nutzung fossiler Energieträger	18
4.1.1	Zerstörung von Lebensräumen durch Abbau fossiler Energieträger	18
4.1.2	Umweltauswirkungen des Verkehrs	18
4.2	Abhängigkeit der Europäischen Union von Energieimporten	21
4.3	Endlichkeit fossiler Rohstoffe	22
4.3.1	Reserven, Ressourcen und Reichweiten	22
4.3.2	Erreichung Fördermaximum - Peak Oil	23
5	Bestimmende Parameter des Energieverbrauchs	27
5.1	Soziale und ökonomische Parameter	27
5.2	Technische Parameter des Energieverbrauchs	29
6	Technische Sparpotentiale am Energieverbrauch	31
6.1	Moderne Motoren und deren Verbrauchsminderungspotentiale	31
6.1.1	Einsparungspotential bei Kolbenmaschinen	31
6.1.2	Einsparungspotential bei Turbomaschinen	37
6.2	Alternative Antriebe und deren Einsparpotentiale	40
6.2.1	Definition alternative Antriebe	40
6.2.2	Definition und Einteilung von Hybridantrieben	40
6.2.3	Eigenschaften der unterschiedlichen Hybridausführungen	49
6.2.4	Energiespeicherung bei elektrifizierten Antrieben	51
6.2.5	Kosten alternativer Antriebe und Kundenakzeptanz	53
6.3	Einsparung durch Verkleinerung der Fahrwiderstände	55

6.3.1	Rollwiderstand	55
6.3.2	Luftwiderstand	55
6.3.3	Fahrzeugmasse - Beschleunigungs- und Steigungswiderstand	57
6.4	Einsparung bei Getriebewirkungsgraden und Nebenaggregaten	57
6.5	Zusammenfassung der Einsparungspotentiale	58
7	Energiebedarf Verkehrssektor EU 2030	59
7.1	Begriffsdefinitionen	61
7.2	Fahrleistungen und Modalsplit in 2010 und 2030	62
7.3	Energiebedarf des PKW-Verkehrs	62
7.3.1	PKW Fahrzeugklassen und Referenzfahrzeuge	65
7.3.2	PKW Ergebnisse der technischen Analyse	66
7.3.3	PKW Fahrleistungsverteilung im Jahr 2030	69
7.3.4	Energiebedarf des PKW Personenverkehrs im Jahr 2030	69
7.4	Energiebedarf des LKW-Verkehrs	74
7.4.1	LKW Fahrzeugklassen	75
7.4.2	LKW Fahrleistungsverteilung und Energieverbrauch	75
7.5	Energiebedarf der übrigen Verkehrsträger	76
7.6	Energiebedarf des gesamten Verkehrs	77
8	Alternative Energieträger und Biotreibstoffe	78
8.1	Biomasseaufbau und Primärproduktion	79
8.2	Biomasseumwandlung	80
8.2.1	Thermo-chemische Umwandlungsarten	81
8.2.2	Physikalisch-chemische Umwandlung	83
8.2.3	Bio-chemische Umwandlung	83
8.3	Herstellungspfade von Biotreibstoffen	84
8.4	Biotreibstoffgenerationen	84
8.4.1	Erste Generation	86
8.4.2	Zweite Generation	86
8.4.3	Dritte Generation	86
8.5	Biodiesel und Pflanzenöl	86
8.6	Bioethanol	88
8.7	Biobutanol	91
8.8	Biogas und Biomethan	92
8.9	Ethyl-Tertiär-Buthyl-Ether	93
8.10	Erdgas	93
8.11	Flüssiggas	93
8.12	Wasserstoff	94
8.13	Synthetische Treibstoffe	94
8.13.1	Fischer-Tropsch-Synthese	95
8.13.2	Methanolsynthese und Methyl-Tertiär-Buthyl-Ether MTBE	96
8.13.3	XTL	96
8.13.4	CTL	97
8.13.5	GTL	97
8.13.6	BTL	97

8.14	Stoffeigenschaften von alternativen Treibstoffen	97
9	Auswahl geeigneter Treibstoffe	99
9.1	Anforderungen an einen idealen alternativen Kraftstoff	99
9.2	Erstauswahl geeigneter Treibstoffe mittels Knockout-Kriterien	101
9.2.1	Kriterium 1: Kein Konfliktpotential Tank-Teller	102
9.2.2	Kriterium 2: In herkömmlichen Verbrennungsmotoren einsetzbar	102
9.2.3	Kriterium 3: Aus regenerativem Anbau herstellbar	103
9.2.4	Kriterium 4: In der EU produzierbar	103
9.2.5	Kriterium 5: Mit bestehender Infrastruktur speicher- und verteilbar	104
9.2.6	Zusammenfassung der Knock-Out-Kriterien	105
9.3	Vergleich der verbliebenen Treibstoffvarianten	105
9.3.1	Nettoenergieerträge von Biotreibstoffen (SK1)	107
9.3.2	Rohstoff in großen Mengen verfügbar (SK2)	107
9.3.3	Mischbarkeit mit fossilen Treibstoffen (SK3)	107
9.3.4	Produkteigenschaften parametrierbar (SK4)	107
9.3.5	Geringe Viskosität, gute Kälteeigenschaften (SK5)	107
9.3.6	Emissionen bei der motorischen Verbrennung	108
9.3.7	Treibhausgasbilanz	109
9.3.8	Positive Energiebilanz	109
9.3.9	Trinkwassergefährdung und Wasserbedarf	110
9.4	Endauswahl der Treibstoffarten	110
9.5	Zusammenfassende Betrachtung der ausgewählten Biotreibstoffe	112
9.5.1	Treibstoffe aus Algen	112
9.5.2	Bioethanol aus Lignozellulosepflanzen	115
9.5.3	BTL Treibstoffe	115
10	Potential der ausgewählten Biotreibstoffe	117
10.1	Potentiale - Begriffsbestimmungen und Abgrenzung	117
10.2	Potentialanalyse	118
10.2.1	Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen	119
10.2.2	Treibstoffenergie pro Fläche	123
10.2.3	Biotreibstoffpotential der EU 27 in 2030	128
11	Vergleich Energiebedarf - Treibstoffpotential	132
12	Schlussfolgerung und Ausblick	133
	Literaturverzeichnis	135

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau der Arbeit	13
3.1	Energiewandlungskette	16
4.1	Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit dem Jahr 1000.	19
4.2	Euro Emissionsgrenzwerte für LKW	21
4.3	Unterschiedliche Prognosen zur weltweiten Erdölförderung.	24
4.4	Voraussagen der IEA für die Rohölimportpreise laut den Berichten WEO 1989 bis WEO 2006.	25
5.1	Verbrauchsbeeinflussende Parameter	28
5.2	Technische Ansatzpunkte für eine Verbrauchsreduktion.	30
6.1	Wirkungsgrade des vollkommenen Motors.	32
6.2	Vergleich zwischen dem Arbeitsprozess eines Viertaktkolbenmotor und eines Turbojettriebwerks	38
6.3	Aufbau eines modernen Turbofantriebwerks	39
6.4	Strukturvarianten bei Hybridantrieben	41
6.5	Paralleler Hybridantrieb	47
6.6	Serieller Hybridantrieb	47
6.7	Kernmodul des AVL Range-Extender-Systems	48
6.8	Kombinierter und Leistungsverzweigender Hybrid	49
7.1	Fahrzeugeinteilung in Verkehrsträger und Fahrzeugklassen.	60
8.1	Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots	78
8.2	Aufbau von Photosyntheseprodukten und ihr Abbau durch die Atmung	79
8.3	Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutz- energiebereitstellung aus Biomasse.	81
8.4	Rohstoffe für die Biodieselerzeugung	88
8.5	Rohstoffe für die Bioethanolerzeugung	91
8.6	Schematische Übersicht zur Bereitstellung von ausgewählten synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse.	96
9.1	Durchschnittliche Emissionsauswirkungen von Biodiesel in LKW Motoren.	108
9.2	Prozesskette bei der Ethanolherstellung aus Lignozellulose.	115
9.3	Prozesskette der BTL-Treibstoffherstellung aus Biomasse.	116

10.1	Technisches Biomassepotential aus Energiepflanzen	118
10.2	Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen in EU12 und EU 15 für drei unterschiedliche Szenarien.	120
10.3	Durchschnittliche Biotreibstoffträge aus Biomasse in der EU in [GJ/ha] .	124
12.1	Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Einflussfaktoren auf das Biotreib- stoffpotential	134

Tabellenverzeichnis

6.1	Brennstoffzellentypen und deren Eigenschaften	44
6.2	Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge	46
6.3	Technische Kenndaten von Lithium-Ionen-Batterien	52
6.4	Anschaffungskosten eines PKW der unteren Mittelklasse im Jahr 2015	54
7.1	Verkehrsleistung und Modalsplit in der EU-27 in den Jahren 2010 und 2030	62
7.2	Energiebedarf Personenverkehr PKW Kleinwagenklasse 2030	71
7.3	Energiebedarf Personenverkehr PKW Mittelklasse 2030	72
7.4	Energiebedarf Personenverkehr PKW Oberklasse 2030	73
7.5	Energiebedarf Personenverkehr PKW Gesamt 2030	74
7.6	LKW Fahrleistungsverteilung und Energieverbrauch in der EU 27 im Jahr 2030	76
7.7	Gesamtenergiebedarf des Verkehrssektors der EU 27 im Jahr 2030	77
8.1	Luftüberschuss, Temperaturbereich und Produktzusammensetzung für thermochemische Umwandlungsverfahren	83
8.2	Übersicht über wesentliche Biokraftstoffoptionen	85
8.3	Stoffeigenschaften von Treibstoffen	98
9.1	Erstauswahl geeigneter Treibstoffe mittels Knockout-Kriterien	106
9.2	Weitere Beurteilung der zuvor ausgewählten Treibstoffe mit zusätzlichen Bewertungskriterien.	111
10.1	Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen und deren Verteilung in der EU 27 im Jahr 2030	121
10.2	Für die Algenkultivierung in Open Ponds nutzbare Wüstenflächen in der EU 27 im Jahr 2030	123
10.3	Ernteerträge von Öl aus Mikroalgen	126
10.4	Technisches Energiepotential aus BTL-Treibstoffen in der EU-27 im Jahr 2030	129
10.5	Technisches Energiepotential aus Algentreibstoffen in der EU27 im Jahr 2030	130
10.6	Gesamtes Biotreibstoffpotential der EU 27 im Jahr 2030	130
11.1	Vergleich Energiebedarf - Biotreibstoffpotential	132

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Energieversorgung bedeutet Lebensqualität

Die sichere und gleichzeitig günstige Versorgung mit Energie ist ein wesentlicher Teil und gleichzeitig ein großes Problem des heutigen Lebensstandards. Die Energieversorgung betrifft dabei jeden Einzelnen. Ohne sie wäre einerseits unsere Lebensqualität im privaten Bereich nicht so hoch, andererseits sind auch Industriebetriebe auf eine verlässliche Energieversorgung mit kalkulierbaren Kosten angewiesen.

Wie anfällig unsere Gesellschaft auf Störungen der Versorgung sowie Preisschwankungen reagiert, ist an vielen Beispielen der jüngeren Vergangenheit ersichtlich. Die Schäden durch längere Stromausfälle und Netzzusammenbrüche wie jene in den USA und Europa betragen Millionen Euro, hohe und vor allem unkalkulierbare Rohstoffpreise belasten Industrie wie Private gleichermaßen.

Vor dem Hintergrund der weltweit stetig steigenden Nachfrage an Energie und dem Faktum der Endlichkeit fossiler Ressourcen gewinnen alternative Energieformen an Bedeutung, dabei macht es keinen Unterschied um welche Form von Nutzenergie es sich handelt. Sowohl die Strom- und Wärmeerzeugung als auch der Bedarf an Kraftstoffen wird heute überwiegend aus fossilen Quellen gespeist, erneuerbare Energieformen sind also überall von steigender Bedeutung.

Neben den genannten ökonomischen haben ökologische Argumente in den letzten Jahren massiv an Bedeutung gewonnen, vor allem der CO_2 Ausstoß und die damit verbundene potentielle Klimaveränderung ist eines der bedeutendsten Themen unserer Zeit.

1.2 Verkehr und Biotreibstoffe als Schwerpunkt dieser Arbeit

Gegenstand dieser Arbeit ist eine Abschätzung des Substitutionspotentials ausgewählter alternativer Kraftstoffe am zukünftigen Energiebedarf des Verkehrssektors in der EU 27. Es werden dabei jene Treibstoffpfade betrachtet, die einerseits Ihren Ursprung in der Biomasse haben und andererseits in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können. Eine Übersicht über diese alternativen sowie auch über fossile Treibstoffe und deren Herstellungspfade und Nutzung zeigt Wietschel et.al, zitiert in [2, S.11].

Einer der Gründe für die enorme Bedeutung der Substitution fossiler Kraftstoffe ist die völlige Abhängigkeit von diesen Quellen. 96 % der Treibstoffe im Transportsektor basieren auf fossilen Energieträgern, ein großer Teil der Quellen liegt in politisch instabilen Regionen [1, S.8].

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten zu diesem Thema werden allerdings nur jene Kraftstoffe in Betracht gezogen, deren Rohstoffe in der EU aufgrund klimatischer und geologischer Bedingungen angebaut werden können bzw. vorhanden sind und außerdem weitere Knock-Out Kriterien erfüllen. Ein Kriterium ist beispielsweise, dass der Rohstoff nicht als Nahrungsmittel verwendet werden kann um einen „Tank vs. Teller“ Konflikt von vornherein auszuschließen.

Als Zeithorizont wird das Jahr 2030 gewählt, bis zu diesem Zeitpunkt ist einerseits eine grundlegende Umstellung des Mobilitätsverhaltens durch Technik und Politik möglich, andererseits sind Studien über den Energieverbrauch bestimmende Parameter wie Bevölkerungszahlen usw. vorhanden.

Als Energiebedarf des Verkehrssektors ist in dieser Arbeit der Energiebedarf in Form von flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen gemeint. Nicht betrachtet werden somit beispielsweise die elektrische Energie zum Antrieb von Schienenfahrzeugen bzw. von Elektro- und Hybridfahrzeugen.

Um diesen Bedarf an Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren zu erhalten, werden die Ergebnisse mehrerer Studien bezüglich der Verkehrsnachfrage des Güter- und Personenverkehrs der EU 27 im Jahr 2030 sowie der Verbreitung von modernen Verbrennungsverfahren bzw. alternativen Antrieben (und dem dazugehörigen Einfluss auf den Energiebedarf eines Fahrzeugs pro zurückgelegter Strecke) kombiniert.

Der Bedarf ist hier also jene Energiemenge, die in PKW, LKW, Flugzeugen, Schiffen, Diesellokomotiven usw. benötigt wird und nicht durch andere Energieformen wie z.B. elektrischem Strom abgedeckt werden kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist somit die Beantwortung der Frage, welchen Anteil ausgewählte Biotreibstoffe am Energieverbrauch des Güter- und Personenverkehrs der EU im Jahr 2030 decken könnten.

Kapitel 2

Methodik

Um die oben genannte Forschungsfrage zu beantworten wird versucht, aus aktueller Literatur die signifikantesten und plausibelsten Zahlen über den künftigen Bedarf und das Einsparpotential an Treibstoffen herauszufiltern, nach zuvor festgelegten Kriterien Alternativen zu bewerten und schlussendlich deren Substitutionsvermögen zu berechnen. In Abbildung 2.1 ist der Aufbau der Arbeit übersichtlich dargestellt:

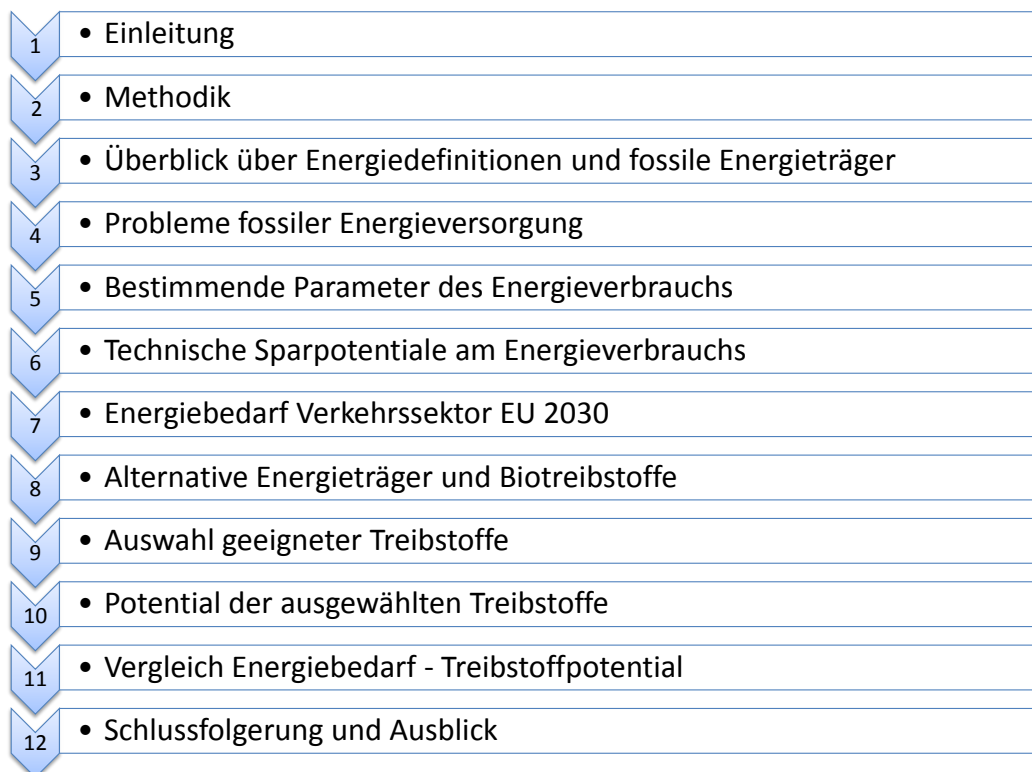


Abbildung 2.1: Aufbau der Arbeit

Vorgehensweise:

- *Inhalt der Arbeit:* In der Einleitung in Kapitel 1 wird dargelegt, welche Frage diese Arbeit zu beantworten versucht und wie sie sich von anderen Arbeiten abgrenzt.
- *Methodik:* Die Beschreibung der Vorgehensweise in dieser Arbeit wird in Kapitel 2 erläutert.
- *Energieformen:* In Kapitel 3 werden die unterschiedlichen Energieformen und deren Definitionen sowie fossile Energiequellen vorgestellt.
- *Problemanalyse:* In Kapitel 4 werden die wichtigsten Probleme der Energieversorgung auf Basis fossiler Brennstoffe erläutert bzw. begründet, warum die Suche nach alternativen, erneuerbaren und nachhaltigen Treibstoffen in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird.
- *Bestimmende Faktoren des Energieverbrauchs:* In Kapitel 5 werden jene sozialen, ökonomischen und technischen Faktoren vorgestellt, die Einfluss auf die Höhe des Energieverbrauchs haben.
- *Technische Faktoren des Energieverbrauchs:* In Kapitel 6 werden die technischen Faktoren und deren Möglichkeiten zur Einsparung am Energieverbrauch untersucht, dies sind z.B. alternative Antriebe oder Wirkungsgradverbesserungen an Verbrennungsmotoren.
- *Energiebedarf:* In Kapitel 7 wird der Energiebedarf des Verkehrs der EU 27 im Jahr 2030 berechnet. Dazu wird die gesamte Verkehrsleistung der EU auf die sieben Verkehrsträger PKW, LKW, Flugzeuge, Zweiräder, Öffentlicher Straßenverkehr, Schiffe und Bahn aufgeteilt. Für PKW werden weitere 39 und für LKW weitere fünf repräsentative Fahrzeugklassen unterschieden und aus den jeweiligen Fahrleistungen und Streckenverbräuchen der einzelnen Klassen der gesamte Energiebedarf gebildet.
- *Alternative Treibstoffe:* In Kapitel 8 werden jene alternativen Energieträger und Treibstoffe vorgestellt, die grundsätzlich einen Beitrag zur Substitution fossiler Brennstoffe leisten können.
- *Auswahl geeigneter Treibstoffe:* In Kapitel 9 werden anhand eines zweistufigen Auswahlverfahrens aus der Vielzahl der Alternativen jene Treibstoffe ermittelt, die im Hinblick auf ökologische, ökonomische und soziale Aspekte die besten Voraussetzungen für einen künftigen Einsatz im Verkehrssektor aufweisen.
- *Potentialermittlung:* In Kapitel 10 wird anhand der nutzbaren Anbauflächen und des flächenbezogenen Energieertrags das Technische Potential der zuvor ausgewählten Treibstoffe ermittelt.
- *Ergebniszusammenführung:* In Kapitel 11 werden der ermittelte Energiebedarf des Verkehrs und das Technische Potential der Treibstoffe gegenübergestellt, das Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist die Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit.
- *Schlussfolgerungen:* In Kapitel 12 werden die Schlussfolgerungen aus dem Ergebnis in Kapitel 11 gezogen und abschließend ein Ausblick in die Zukunft erstellt.

Kapitel 3

Überblick über Energiedefinitionen und fossile Energieträger

3.1 Energiedefinitionen

Energie ist definiert als die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Unter einem Energieträger wird ein Stoff verstanden, aus dem direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen Nutzenergie gewonnen werden kann. Diese Energieträger können nach dem Grad ihrer Umwandlung unterteilt werden in Primär- und Sekundärenergieträger sowie Endenergieträger. Abbildung 3.1 zeigt die Energiewandlungskette und die dazugehörige Einteilung der Energien bzw. ihrer Energieträger.

3.2 Fossile Energieträger, Erdöl

Fossile Energieträger bestehen hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen (HC). Kohlenwasserstoffe mit 1 bis 4 Kohlenstoffatomen im Molekül (Methan, Butan) sind bei Raumtemperatur gasförmig, Moleküle mit 5 bis 17 C-Atomen (Pentan, Hexan) sind flüssig. Hat die Verbindung mehr als 17 C-Atome ist sie in reinem Zustand bei Raumtemperatur fest, allerdings sind diese festen Bestandteile meist in der flüssigen Phase des Öls gelöst [4, S.23].

Diese Kohlenwasserstoffverbindungen werden durch den Aggregatzustand in die folgenden drei Gruppen unterteilt:

- Erdöl (flüssig)
- Erdgas (gasförmig)
- Kohle (fest)

Da der weltweite Energiebedarf des Verkehrssektors aktuell zu etwa 96 % durch Produkte aus dem Energieträger Öl gedeckt wird (während Kohle und Gas nur eine untergeordnete Rolle spielen), siehe [1, S.8], sind in den folgenden beiden Unterkapiteln einige wichtige Informationen zu Erdöl zusammengefasst:

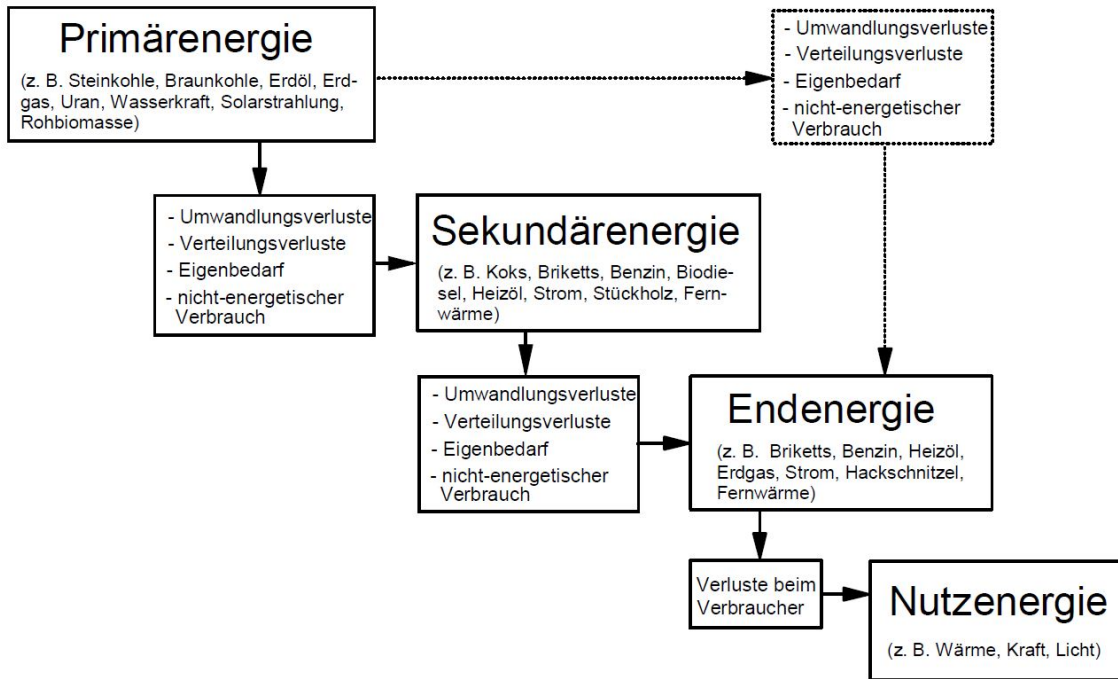


Abbildung 3.1: Energiewandlungskette

Quelle: [3, S.8].

3.2.1 Rohölklassifizierung nach Qualitätsmerkmalen

Die Qualität von Rohöl kann durch drei Kriterien angegeben und bestimmt werden. Diese Klassifizierung wird aufgrund der Molekültypen (Paraffin- oder Naphtenbasiert), nach den Proportionen der erhaltbaren Produktfraktionen (Leicht-, Mittel- und Schweröl) oder nach dem Schwefelgehalt durchgeführt [4, S.24].

Von Bedeutung ist eine Unterscheidung zwischen konventionellem Öl und nicht konventionellem Öl, dazu existieren verschiedene Klassifizierungsschemen, diese beruhen auf ökonomischen und / oder geologischen Kriterien. Eine häufig angewandte Klassifizierung, unter anderem beruhend auf der relativen Dichte (gemessen bei 15°C in °API = American Petroleum Institute, siehe Formel 3.1 laut [4, S.91]) und weiteren Eigenschaften des Öls, sieht wie in [5, S.21] folgende Einteilung vor:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{Dichte [kg/L]} - 131,5 \quad (3.1)$$

3.2.1.1 Konventionelles Öl

- Erdöl > 17°API
- Schweröl mit Werten zwischen 10 und 17°API
- das gesamte Tiefseeöl, unabhängig von der Wassertiefe
- polares Öl

- Kondensat

3.2.1.2 Unkonventionelles Öl

- Flüssiggas (NGL)
- Schwerstöl mit Werten unter 10° API
- synthetisches Rohöl (SCO) und Bitumen aus Teersanden
- Ölschiefer

Eine genaue Beschreibung der verschiedenen Rohölprodukte ist in [5, S.22ff] zu finden.

3.2.2 Erdölraffinierung und Verwendung als Treibstoff

Erdöl ist eine komplexe Mischung aus unterschiedlichen Bestandteilen, hauptsächlich Kohlenwasserstoffen, deren unterschiedliche Eigenschaften eine direkte Verwendung von Rohöl verhindern. Es wird daher in Raffinerien behandelt und in ein Sortiment an verschiedenen Produkten mit unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen aufgespalten [4, S.19]. Diese Produkte unterscheiden sich vor allem durch ihre unterschiedlichen Siedelinien (siehe [6]), sie werden unter anderem als Treibstoffe im Verkehr (Benzin, Kerosin, Diesel), als Brennstoff für Heizzwecke (z.B. Heizöl) sowie als Rohstoff für die Petrochemische Industrie verwendet.

3.2.2.1 Benzin und Diesel

Das Verhalten der Treibstoffe bei der Verbrennung in Motoren hängt stark von ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften ab. Um angemessene Treibstoffqualität für die unterschiedlichen Anforderungen der Motoren zu garantieren, müssen die verwendeten Kraftstoffe gewisse Mindestanforderungen erfüllen. In der EU sind diese Standards in der Norm EN 228 für Benzin und der Norm EN 590 für Diesel festgelegt [4, S.136].

3.2.2.2 Kerosin

Seit der Verwendung der ersten Turbopropflugzeuge in den 1950er Jahren wurde meist Kerosin als Treibstoff in der zivilen kommerziellen Luftfahrt eingesetzt, auch die nachfolgenden Triebwerksgenerationen wie Turbojet und Turbofan werden durch Kerosin angetrieben. Entgegen den meisten Chemikalien werden Jet-Treibstoffe, gleich wie die meisten Treibstoffe, nicht durch ihren chemische Struktur und Reinheit definiert, sondern durch jene charakteristischen Eigenschaften die für den Betrieb im Flugzeug von Bedeutung sind, z.B. Dichte, Energiedichte, Tieftemperatureigenschaften, Oxidationsstabilität, Korrosivität, Hygroskopizität (Wasseranziehung) und statische Aufladbarkeit. Heute werden in der zivilen Luftfahrt die Jet-Treibstoffe JET A-1 (weltweit), JET A (USA), TS-1 (Russland und ehemaliger Ostblock) und JET Fuel no.3 (China) eingesetzt [4, S.321 ff].

Kapitel 4

Probleme fossiler Energieversorgung

4.1 Umweltproblematik durch Nutzung fossiler Energieträger

4.1.1 Zerstörung von Lebensräumen durch Abbau fossiler Energieträger

Nicht zuletzt seit dem Brand auf der Ölplattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko im April 2010 und der anschließenden ökologischen Katastrophe durch ausgetretenes Rohöl zeigt sich das große Gefahren- und Umweltzerstörungspotential bei der Gewinnung von fossilen Energieträgern.

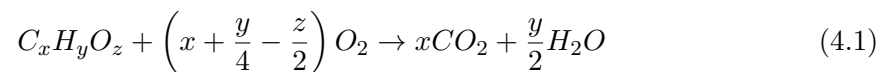
Vor allem der Abbau von unkonventionellem Öl aus z.B. Teersanden hat für die Umwelt katastrophale Auswirkungen. Liegen die Teersande bis zu einer Tiefe von 75 m, werden die Schichten im Tagebau abgetragen, zurück bleiben ohne teure Rekultivierung nur verwüstete Landstriche.

Weitere Informationen zu den Problemen der Ölgewinnung aus Teersand und Ölschiefer sind in [5, S.22 und S.96] zu finden.

4.1.2 Umweltauswirkungen des Verkehrs

4.1.2.1 Treibhausgase, Treibhauseffekt und Klimawandel

Bei der idealen (vollständigen) Verbrennung von Kohlenwasserstoffen $C_xH_yO_z$ mit dem Sauerstoff O_2 aus der Luft entstehen Wasser H_2O und das Treibhausgas Kohlendioxid CO_2 . Folgende Reaktionsgleichung stellt diese exotherme Verbrennung als energetisch wichtigste chemische Reaktion von Kohlenwasserstoffen dar:



Pro kg Benzin, Diesel und Kerosin entstehen dabei ca. 3,2 kg CO_2 , bei Erdgas etwa 2,8 kg [7, S.6], [8, S.8].

Der CO_2 Ausstoß ist also proportional zur verbrannten Treibstoffmenge, er kann im Gegensatz zu den so genannten Schadstoffen Kohlenmonoxid CO , unverbrannten Kohlen-

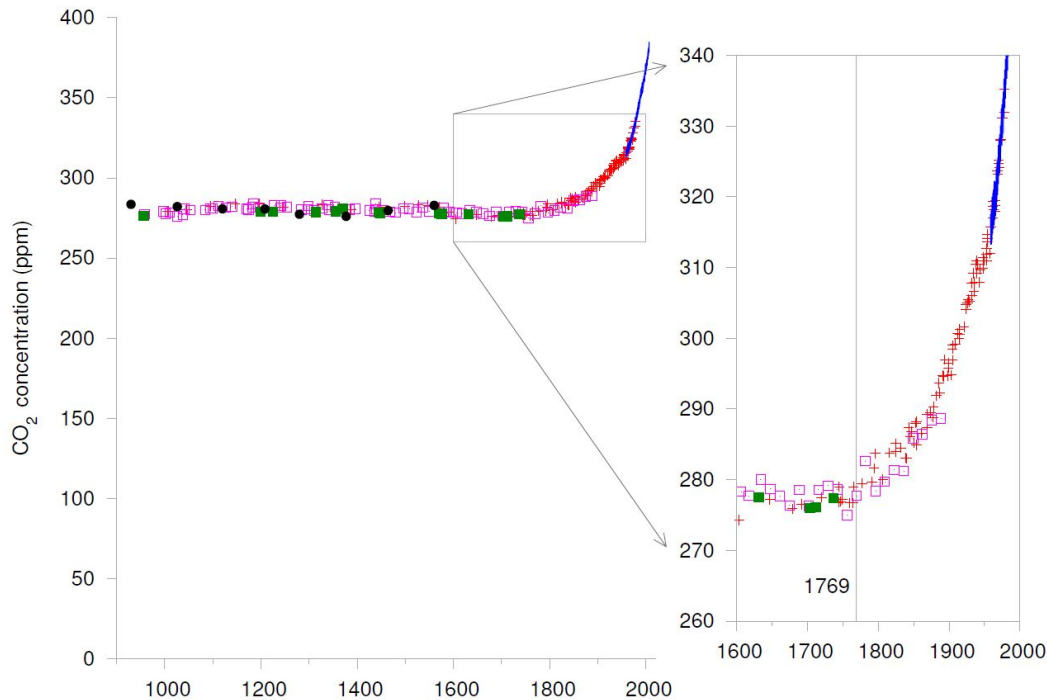


Abbildung 4.1: Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit dem Jahr 1000. Unterschiedliche Symbole (Punkt, Plus, Quadrat) kennzeichnen unterschiedliche Messmethoden.

Quelle: [12, S. 6].

wasserstoffemissionen HC , Stickoxiden NO_x , Ozon usw. nicht durch Abgasnachbehandlung verringert werden. Die einzige Möglichkeit um CO_2 zu reduzieren besteht in der Verringerung des Energieverbrauchs [9]. Dazu ist nicht nur die Länge der Transportstrecke wichtig, sondern auch die Wahl des Transportmittels [10]. Auffallend ist, dass der Frachtverkehr per Flugzeug und Schiff in den letzten Jahren die größten Wachstumsraten bei den Treibhausgasemissionen hatten. Beide Transportmittel sind laut [10] nicht durch das Kyoto-Protokoll geregelt.

Die Energieversorgung und der potentielle Klimawandel sind somit untrennbar miteinander verknüpft, die Menschheit verändert das globale Klima in den letzten Jahrzehnten mit hoher Geschwindigkeit [11, S. 32]. Durch die Emission von Treibhausgasen wie z.B. CO_2 (durch Verbrennung von in fossilen Energieträgern gespeichertem Kohlenstoff) wird die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändert, bereits heute muß man Jahrtausende zurückgehen, um Konzentrationen des Treibhausgases CO_2 zu finden die mit den heutigen vergleichbar sind [11, S.32].

Abbildung 4.1 zeigt die CO_2 Konzentration in der Atmosphäre seit dem Jahr 1000, gemessen an Eiskernen und seit 1958 direkt an der Luft. Im Jahr 1769 patentierte James Watt seine Dampfmaschine und löste dadurch die Industrielle Revolution aus [12, S.6], dies war der Beginn der großtechnischen Förderung und Verbrennung fossiler Energieträger und dem damit einhergehenden Ausstoß großer Mengen an Kohlendioxid.

Um die Politik bei der Beurteilung und der Begrenzung des künftigen Klimawandels zu

unterstützen sowie dessen Auswirkungen abschätzen zu können, wurde der „Zwischenstaatliche Ausschuss zum Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)“ gegründet. Dieser Ausschuss bewertet regelmäßig aktuelle Forschungsergebnisse und veröffentlicht Projektionen von möglichen Klimaentwicklungen mit Hilfe detaillierter Klimamodelle [11, S.32]. Im vierten Sachstandsbericht des IPCC von 2007 wird je nach Szenario eine mittlere globale Erwärmung zwischen 2,5°C und 4,1°C bis zum Jahr 2100 errechnet, diese Erwärmung wird nach den IPCC-Analysen folgende Auswirkungen haben [11, S.38ff]:

- Höhere Verdunstungsraten und damit einhergehend höhere Niederschlagsmengen in Äquatornähe sowie in hohen geographischen Breiten
- Geringere Niederschläge vor allem in den Subtropen (Mittelmeergebiet, Südafrika, Australien, subtropische Ozeangebiete)
- Zunahme von extremen Wetterereignissen, dies sind seltene, überdurchschnittlich intensive Ereignisse mit schwerwiegenden Folgen für Mensch, Natur und Wirtschaft (z.B. Hitzeperioden oder Hochwasser)
- Anstieg des Meeresspiegels je nach Szenario um 0,21 bis 0,28m bis zum Jahr 2100 (örtlich begrenzt bedeutend mehr, bis zu 1m)
- Massenverlust der kontinentalen Eisschilde und Gletscher

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass die Hauptfolgen aufgrund der Klimaänderungen insbesondere durch extreme Ereignisse entstehen und nicht durch die Änderungen der globalen Mittelwerte [11, S.48].

Um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten, ist eine Reduktion der CO_2 Emissionen unumgänglich. Im Bereich des Verkehrssektors kann dies einerseits durch Einsparungen an der benötigten Energie (durch z.B. moderne Motoren oder alternative Antriebe) und andererseits durch die Substitution der fossilen Energieträger durch regenerative Treibstoffe erfolgen.

Detaillierte Informationen über die Ursachen und die Auswirkungen des Klimawandels sind im „Climate Change 2007 - Synthesis Report“ des IPCC zu finden, siehe [13].

4.1.2.2 Luftschaadstoffe

Als Luftschaadstoffe gelten unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC , Stickoxide NO_x , Kohlenmonoxid CO und Partikel PM . Diese Luftschaadstoffe entstehen bei der unvollständigen (realen) Verbrennung von Kohlenwasserstoffen.

Die Betrachtung der Luftschaadstoffe ist in dieser Arbeit nur von untergeordneter Bedeutung. Begründet wird dies mit den mittlerweile äußerst strengen Abgasgrenzwerten hinsichtlich der Emissionen von HC , CO , NO_x und Partikeln bei PKW und LKW.

Die maximal erlaubten Emissionen aufgrund der Verbrennung von Treibstoffen in Verbrennungsmotoren wird durch Standards der Europäischen Union geregelt. Diese Standards limitieren die Emissionen von Neufahrzeugen, welche in den EU Mitgliedsstaaten verkauft werden. Reguliert werden dabei die Emissionen an Stickoxiden NO_x , unverbrannten Kohlenwasserstoffen HC , Kohlenmonoxid CO sowie die Partikelemissionen PM . Die Standards, auch „EURO“ Klassen genannt, beginnend mit EURO 1 im Jahr 1992 bis zu EURO 5 heute, wurden und werden im Lauf der Zeit immer weiter verschärft.

In Abb. 4.2 ist die Reduktion an Partikelemissionen und Stickoxiden für die LKW-Euroklassen angegeben. Es ist ersichtlich, dass die Limits heute nur mehr einen Bruchteil jener aus den 1990er Jahren betragen. Diese Limits gelten bei allen Motoren und für alle Kraftstoffe, unabhängig davon ob der Treibstoff erneuerbar oder fossilen Ursprungs ist.

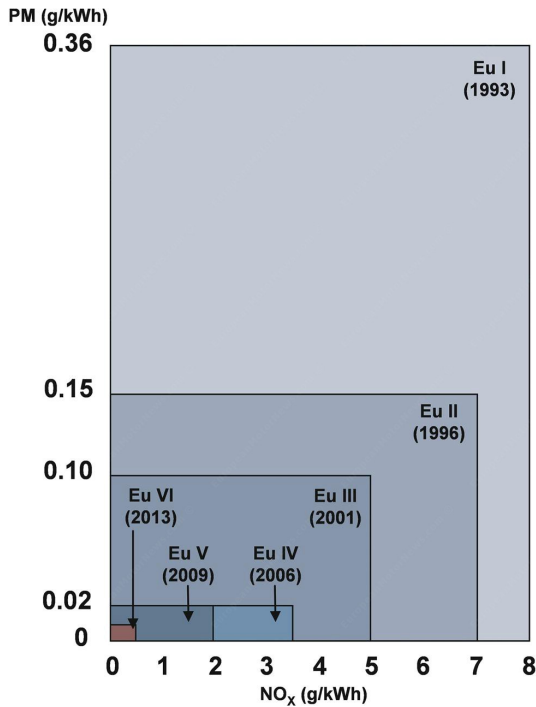


Abbildung 4.2: Euro Emissionsgrenzwerte für LKW

Quelle: [14].

In [15] sind die Emissionslimits der Klassen Euro 1 bis Euro 6 für PKW angegeben, auch hier betragen die aktuellen und zukünftig erlaubten Emissionen nur mehr einen Bruchteil der Grenzwerte, die bei der Einführung der EURO 1 Norm im Jahr 1992 vorgeschrieben waren.

Problematisch ist allerdings der Zielkonflikt zwischen höheren Wirkungsgraden bei Verbrennungskraftmaschinen (gilt für Kolben- und Turbomaschinen) und der damit verbundenen Anhebung von Stickoxidemissionen NO_x , siehe dazu auch [8, S.8].

4.2 Abhängigkeit der Europäischen Union von Energieimporten

Die Europäische Union ist in großem Umfang abhängig von Energieimporten aus Drittländern, bei Öl machte der Anteil der Importe im Jahr 2007 82,6% aus, bei Gas waren es 60,3% [16]. Vor allem der Transportsektor ist mit beinahe 96% der benötigten Energie beinahe vollständig von fossilen Quellen abhängig und somit besonders anfällig für die extremen Preisschwankungen der letzten Jahre auf dem Weltmarkt [1, S.6].

Neben der nachfolgend beschriebenen Endlichkeit fossiler Energieträger ist auch die

geografische und politische Lage der Regionen mit den größten Vorkommen oft problematisch. Viele der Regionen sind nicht unbedingt als politisch stabil einzustufen. Große Vorkommen an Rohöl liegen im Nahen Osten, [17, S.34] gibt dazu einen Überblick.

4.3 Endlichkeit fossiler Rohstoffe

Heute genutzte fossile Rohstoffe wurden im Laufe von Jahrmillionen gebildet, durch die rasche Förderung und den weiter steigenden Bedarf werden sie in nur einem Bruchteil dieser Zeit wieder verbraucht sein. Informationen über die noch verfügbaren Mengen liefern die nachfolgend erläuterten Begriffe Reserven und Ressourcen.

4.3.1 Reserven, Ressourcen und Reichweiten

Reserven:

Laut [17, S.23] sind die Reserven als jene Mengen eines Energierohstoffs definiert, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können.

Eine detailliertere Definition ergibt sich laut [5, S.26ff] durch die Unterscheidung in drei Kategorien:

- Nachgewiesene Reserven
- Wahrscheinliche Reserven
- Mögliche Reserven

Die verbleibenden weltweiten Ölreserven werden von der Energywatchgroup auf 854 Gigabarrel (Gb) geschätzt, Schätzungen anderer Institute sind zum Teil deutlich höher [5, S.7].

Ressourcen:

Als Ressourcen werden laut [17, S.24] jene Mengen eines Energierohstoffs verstanden, die

- geologisch nachgewiesen sind aber derzeit nicht wirtschaftlich gewonnen werden können
- nicht nachgewiesen sind aber aus geologischen Gründen im betreffenden Gebiet erwartet werden können

Reichweiten:

Die Reichweiten eines Energierohstoffs sind in Jahren angegeben und werden laut [18, S.12] folgend definiert:

$$Reichweite = \frac{Reserven}{aktueller Verbrauch} \quad (4.2)$$

Wird der aktuelle weltweite Energieverbrauchs in der Berechnung als konstant angenommen spricht man von statischen Reichweiten, bei Berücksichtigung der Zunahme der

Weltbevölkerung und des künftig steigenden Energieverbrauchs erhält man die dynamischen Reserven [19, S.3], diese sind deutlich geringer.

4.3.2 Erreichung Fördermaximum - Peak Oil

Unter dem Begriff „Peak Oil“ versteht man allgemein den Zeitpunkt des weltweiten Allzeit - Fördermaximums an Erdöl, also die maximale Erdölmenge, die jemals pro Jahr gefördert werden kann. Diese Theorie leitet sich aus Annahmen des amerikanischen Geologen Marion King Hubbert (1903 bis 1989), der so genannten Hubbertkurve ab [17, S.236]. Sie besagt, dass die weltweite Erdölförderung zunächst stetig ansteigt und sobald die Hälfte des Erdöls gefördert wurde irreversibel zurückgeht.

In den Ölförderregionen werden in den meisten Fällen zuerst große Ölfelder erschlossen, erst danach die kleineren Felder. Sobald die ersten großen Felder einer Region ihr Fördermaximum überschritten haben, muß eine steigende Anzahl der kleineren Felder erschlossen werden um den Rückgang an Förderkapazitäten zu kompensieren. Ab diesem Zeitpunkt wird es immer schwieriger, die Förderrate aufrecht zu erhalten. Wenn keine ausreichende Zahl von neuen Feldern mehr zur Verfügung steht, dann beginnt die Gesamtförderung zurückzugehen [5, S.9f].

Eine wichtige Aussage der Studie „Zukunft der weltweiten Erdölversorgung“ [5, S.13] ist, dass die Ölförderung nach dem Erreichen des Peak Oil einen steilen Rückgang erleben wird. Diese Aussage steht in starkem Widerspruch zu den Prognosen der Internationalen Energieagentur (Internationale Energy Agency, IEA). Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich des Szenarios der Energy Watch Group [5] mit dem World Energy Outlook 2006 der IEA. Die Hochrechnungen über die weltweite Ölförderung für das Jahr 2030 ergibt in der Studie „Zukunft der weltweiten Erdölversorgung“ nur 39 Millionen Barrel pro Tag (Mb/Tag), während die IEA im World Energy Outlook 2006 (WEO 2006) von 116 Mb/Tag ausgeht, der Unterschied der beiden Hochrechnungen könnte kaum dramatischer sein [5, S.13].

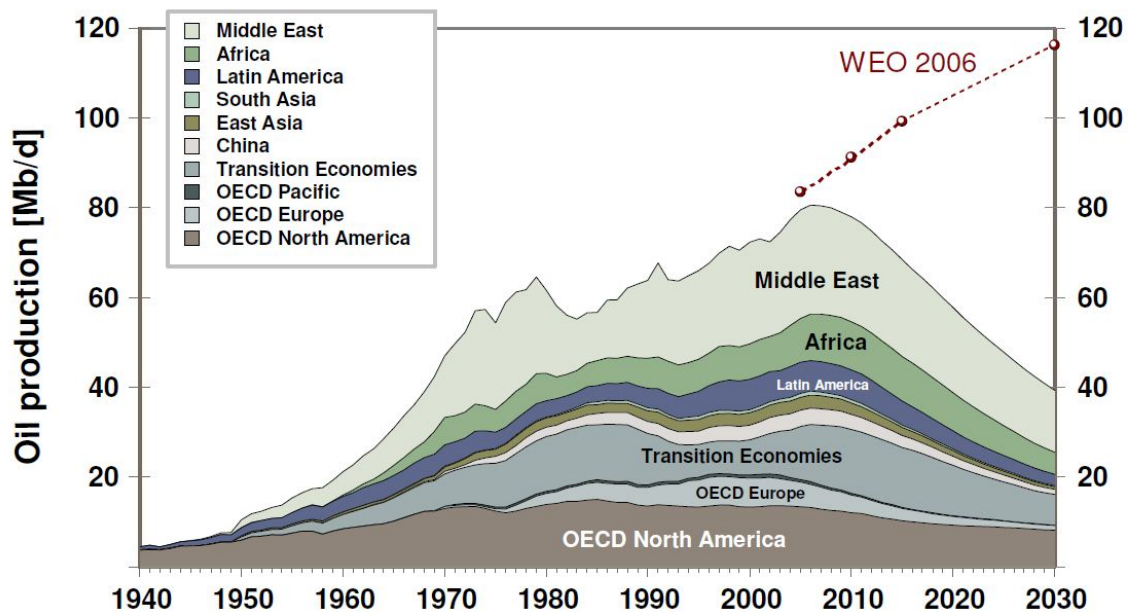


Abbildung 4.3: Unterschiedliche Prognosen zur weltweiten Erdölförderung.
 Middle East = Mittlerer Osten, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) = Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit, Transition Economies = Schwellenländer.
 Quelle: [5, S.13].

Bei den IEA-Prognosen ist zu beachten, dass die künftige Ölnachfrage auf der Grundlage eines Wirtschaftsmodells erstellt wird. Zur Erstellung dieser IEA-Prognosen wird laut [5, S.25] angenommen, dass das Ölangebot der jeweiligen Nachfrage entsprechen kann, der notwendige Anstieg der Ölversorgung wird als möglich angesehen. Dies unterscheidet die Prognosen der IEA grundlegend von anderen, weitaus pessimistischeren Prognosen und Annahmen zur künftigen Ölversorgung.

Laut den Analysen von [5, S.69] soll das weltweite Ölfördermaximum bereits im Jahr 2006 mit einer Förderquote von 81 Mb/Tag eingetreten sein. Dies ist definitiv falsch, da im Jahr 2010 die weltweite Fördermenge auf 86 Mb/Tag gesteigert werden konnte [20, S.68].

Doch auch die Prognosen der IEA haben sich nachträglich als unrichtig herausgestellt, wie man anhand der Ölpreisvorhersagen früherer World Energy Outlook (WEO) Berichte der IEA in Abbildung 4.4 sehen kann.

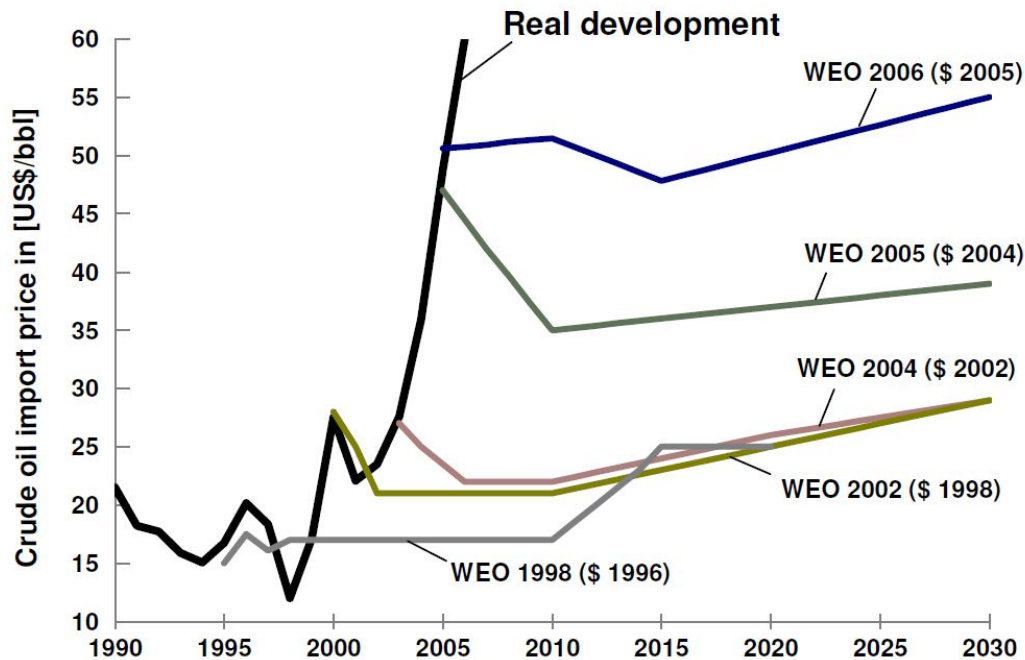


Abbildung 4.4: Voraussagen der IEA für die Rohölimportpreise laut den Berichten WEO 1989 bis WEO 2006.

Crude oil import price = Rohölimportpreis, Real development = reale Entwicklung des Ölpreises.

Quelle: [5, S.87].

Unbestritten ist die Tatsache, dass man nur solches Öl fördern kann, welches man vorher gefunden hat.

Folgende fundamentale Tatsachen sind diesbezüglich laut [5, S.51] in der Geschichte der Ölförderung festzuhalten:

- Praktisch alle größten Ölfelder der Welt wurden vor mehr als 50 Jahren entdeckt
- In den 1960er Jahren wurde der Höchstwert (also der Peak) der Ölfunde erreicht, seit damals gehen die jährlichen Ölfunde zurück
- Seit den 1980er Jahren übersteigt der Verbrauch pro Jahr die jährlichen neuen Ölfunde
- Bis heute wurden über 47.500 Öllagerstätten entdeckt, doch die 400 größten Felder (ein Prozent) enthalten mehr als 75% allen bis heute gefundenen Erdöls

Der Spitzenwert der Ölfunde wurde in den 1960er Jahren erreicht, seit 1986 übersteigt die jährliche Ölförderung die jährlichen Ölfunde [5, S.35]. Auch steigende Ölpreise im Anschluss an die Ölkrisen der 1970er Jahre konnten diesen Trend nicht umkehren, es gibt somit laut [5, S.36] keinen Zusammenhang zwischen dem Ölpreis und der Menge der Ölfunde. Auf den Höhepunkt der weltweiten Ölfunde wird eines Tages der Höhepunkt der Ölförderung folgen müssen.

Auch der Einsatz von so genannten sekundären Fördertechniken (Erhöhung des Drucks im Ölfeld durch Injektion von Erdgas oder Wasser) und tertiären Fördertechniken (Einpressen von CO_2 , Stickstoff N oder Chemikalien sowie Aufwärmen des Erdöls zur Senkung der Viskosität, diese Verfahren sind auch unter „enhanced oil recovery“ - EOR-Verfahren bekannt [5, S.44]) kann die Förderrate nur für einen kurzen Zeitraum gesteigert werden. Diese EOR-Verfahren werden zum Teil schon seit über 30 Jahren eingesetzt und sind bereits in den Förderprognosen berücksichtigt. Sie bewirken nur eine schnellere Entnahme des Öls aus dem Feld, die Gesamtfördermenge wird dabei nicht erhöht [5, S.45].

In [5, S.48] geht man davon aus, dass der Zeitpunkt von Peak Oil mit großer Wahrscheinlichkeit im Königreich Saudi-Arabien entschieden wird, hier liegt „Ghawar“, das größte und bereits 1948 entdeckte Ölfeld der Welt. Sobald dieses Feld sein Fördermaximum überschritten hat, könnte es für Saudi-Arabien schwierig werden, seiner Funktion als so genannter „Swing Producer“ zur Deckung von Nachfragespitzen (wie aktuell z.B. die Deckung der Nachfragespitzen aufgrund der Ausfälle libyscher Ölexporte) nachzukommen. Nach Erreichen des Peak Oil wird die weltweit verfügbare Fördermenge wieder Jahr für Jahr absinken, wie stark dieser Rückgang ausfallen wird ist ebenfalls Gegenstand zahlreicher, zum Teil sehr unterschiedlicher Prognosen.

Fest steht, dass ein Rückgang des Angebots fossiler Energieträger bei gleichzeitig steigender Nachfrage die ganze Welt in einen grundlegenden Strukturwandel zwingen wird.

Kapitel 5

Bestimmende Parameter des Energieverbrauchs

Grundsätzlich kann der jährliche Energieverbrauch $[J/a]$ des Personen- und Güterverkehrs durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$\text{Energiebedarf} = \text{Fahrleistung} * \text{Energiebedarf pro Strecke} \quad (5.1)$$

Die Fahrleistung $[Fkm/a]$ als Ausdruck des Mobilitätsbedürfnisses der Gesellschaft hängt dabei hauptsächlich von sozialen und ökonomischen Faktoren ab, während der Energiebedarf pro zurückgelegter Strecke $[J/km]$ im Wesentlichen von technischen Parametern bestimmt wird.

Diese sozialen, ökonomischen und technischen Faktoren werden nachfolgend erörtert, die Grafik 5.1 gibt zusätzlich einen Überblick darüber, in welche weiteren Teilbereiche sich der Verbrauch eines Straßenfahrzeuges unterteilt und welche Parameter beeinflussbar sind um diesen zu senken.

5.1 Soziale und ökonomische Parameter

Die sozialen und ökonomischen Parameter beeinflussen den Wunsch nach Mobilität der Bevölkerung sowie die Nachfrage nach Gütern und folglich auch deren Transport. Durch diese Parameter wird bestimmt, wie viele Passagier- und Tonnenkilometer pro Jahr und in weiterer Folge, abhängig vom Besetzungsgrad und Ladefaktor, Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden.

Folgende Parameter haben einen Einfluss auf den Bedarf nach Mobilität und damit den Verkehrssektor:

- Gesamtbevölkerung
- Durchschnittsalter
- wirtschaftliche Entwicklung
- Transportkosten im Personenverkehr
- Transportkosten im Güterverkehr

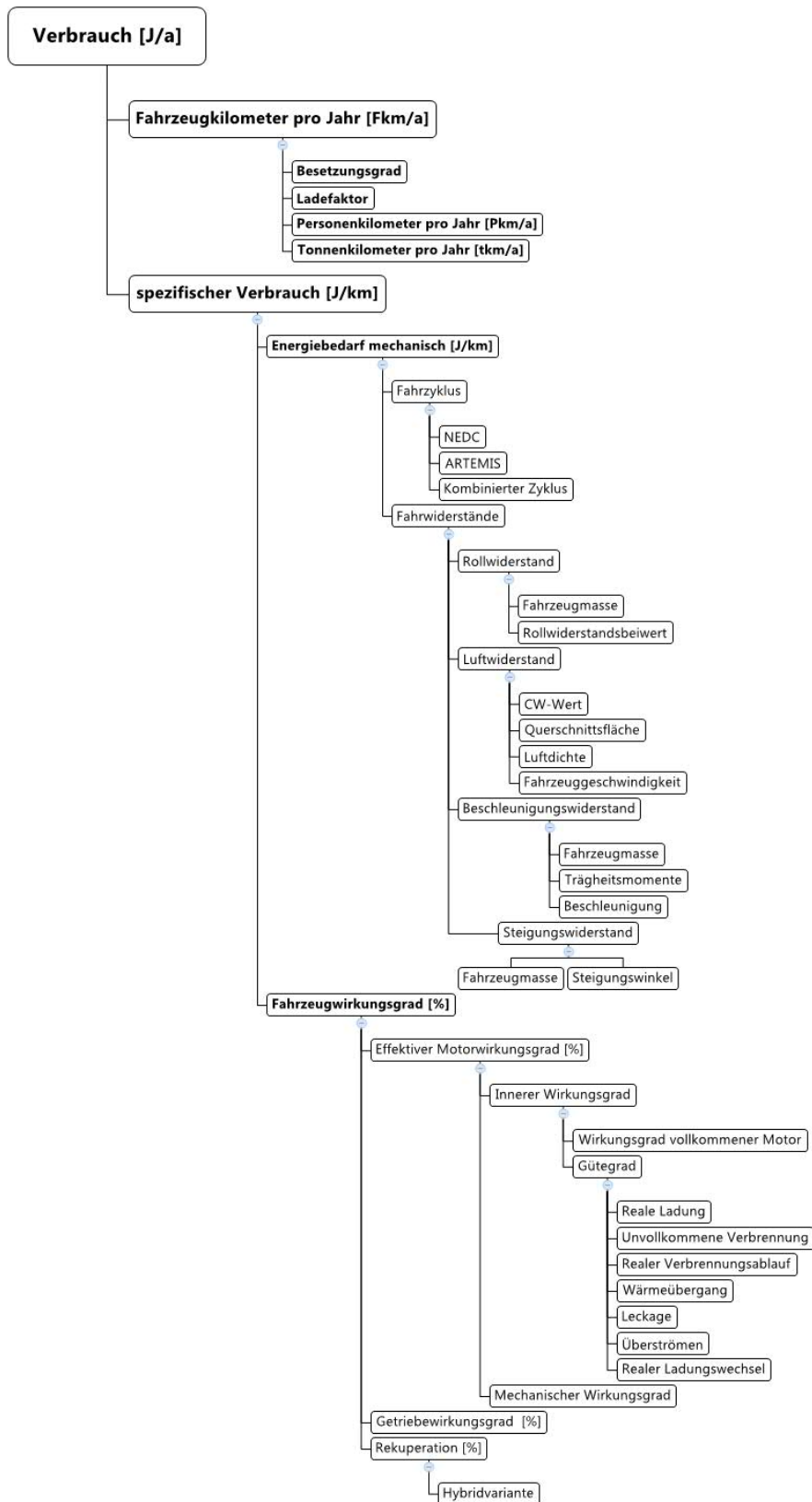


Abbildung 5.1: Verbrauchsbeeinflussende Parameter

- Ausbau der Verkehrsinfrastruktur
- politische Eingriffe in die Wahl der Verkehrsmittel (Umweltzonen, City Maut, Parkgebühren usw.)

Die komplexen Zusammenhänge und Einflüsse der genannten Faktoren auf die Verkehrsnachfrage werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert, sie sind Gegenstand äußerst umfangreicher Forschungsarbeiten. Für die weiteren Berechnungen und die Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit werden daher die Ergebnisse verschiedener Studien herangezogen, siehe Kapitel 7 auf Seite 59.

5.2 Technische Parameter des Energieverbrauchs

Die technischen Parameter sind bei einer gegebenen Anzahl an Fahrzeugkilometern (diese ist abhängig von den oben beschriebenen sozialen und ökonomischen Faktoren) bestimmend für jenen Energieverbrauch, der für das Zurücklegen der Fahrzeugkilometer mit einem bestimmten Verkehrsmittel notwendig ist.

Eine genaue Betrachtung dieser Parameter zeigt somit auch jene Ansatzpunkte für eine Verbrauchsreduktion auf, die durch technische Maßnahmen beeinflusst werden können.

Abbildung 5.2 zeigt die Formel für den Streckenverbrauch B (in MJ/km) in einem Fahrzyklus in Abhängigkeit der zugrunde liegenden Einzelfaktoren.

$$B = \frac{\int b_E \cdot \frac{1}{\eta_{\text{Triebstrang}}} \left[\underbrace{\left(m \cdot f \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 \right)}_{\text{3. Rollwiderstand, 4. Luftwiderstand}} \cdot \underbrace{m}_{\text{5. Massenreduktion}} \cdot \underbrace{(a + g \cdot \sin \alpha) + B_R}_{\text{6. Bremsenergieerückgewinnung}} \right] \cdot v \cdot dt}{\int v \cdot dt}$$

1. Motor

2. Antriebsstrang

3. Rollwiderstand

4. Luftwiderstand

5. Massenreduktion

6. Bremsenergieerückgewinnung

7. Geschwindigkeitsreduktion
u. a.

Abbildung 5.2: Technische Ansatzpunkte für eine Verbrauchsreduktion.

B Streckenverbrauch in [MJ/km]; b_E spezifischer Kraftstoffverbrauch; $\eta_{\text{Triebstrang}}$ Übertragungswirkungsgrad des Antriebsstranges; m Fahrzeugmasse; f Rollwiderstandsbeiwert; g Erdbeschleunigung; α Steigungswinkel; ρ Dichte der Luft; c_W Luftwiderstandsbeiwert; A Stirnfläche; v Fahrgeschwindigkeit; a Beschleunigung; B_R Bremswiderstand; t Zeit
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [21, S.89].

Die unmittelbaren Ansatzpunkte zur Senkung des Streckenverbrauchs können an dieser Formel abgelesen werden, im Wesentlichen bieten sich folgende Möglichkeiten und Einsparungspotentiale, siehe dazu auch [21, S.88]:

- Einsparung durch moderne Motoren und optimierte Verbrennungsverfahren (beeinflusst durch 1. Motor)
- Einsparung durch Alternative Antriebe und dem Betrieb des Motors in wirkungsgünstigen Lastbereichen (beeinflusst durch 1. Motor, 2. Antriebsstrang, 6. Bremsenergieerückgewinnung)
- Einsparung durch Verkleinerung der Fahrwiderstände (beeinflusst durch 3. Rollwiderstand, 4. Luftwiderstand, 5. Fahrzeugmasse)
- Einsparung durch Optimierung des Getriebewirkungsgrades und des Antriebs der Nebenaggregate (beeinflusst durch 1. Motor, 2. Antriebsstrang)

Die einzelnen Faktoren und Abschätzungen zu deren künftige Verbesserungspotentialen werden in den folgenden Kapiteln näher behandelt.

Kapitel 6

Technische Sparpotentiale am Energieverbrauch

Dieses Kapitel gibt einen Überblick darüber, in welchen Bereichen der Motoren- und Antriebstechnik weiteres Potential zur Energieeinsparung vorhanden ist. Für die einzelnen Bereiche werden an dieser Stelle keine exakten Zahlen zu den möglichen prozentuellen Einsparungen genannt. Dies liegt darin begründet, dass einerseits in der Literatur große Unterschiede bei der Bewertung einzelner Maßnahmen bestehen, andererseits können einzelne Verbesserungspotentiale nicht einfach aufsummiert werden da sie sich in Kombination teilweise gegenseitig aufheben. Detaillierte Daten zu Gesamtfahrzeugwirkungsgraden und streckenbezogenen Verbräuchen für PKW und LKW sind deshalb in Kapitel 7 auf Seite 59 bei der Berechnung des Energiebedarfs zu finden.

6.1 Moderne Motoren und deren Verbrauchsminderungspotentiale

6.1.1 Einsparungspotential bei Kolbenmaschinen

Zur Abschätzung der grundlegenden Möglichkeiten von Brennverfahren und deren Verbesserungspotentiale in Verbrennungskraftmaschinen kann der Idealprozess des vollkommenen Motors herangezogen werden. Dieser Idealprozess ist ein Maß dafür, welche Arbeit in einem bestimmten Motor bei gegebenem Luftverhältnis idealerweise verrichtet werden könnte [22, S.54].

Der thermische Wirkungsgrad des vollkommenen Motors in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis, Luftverhältnis und weiteren Parametern ist in Abbildung 6.1 ersichtlich.

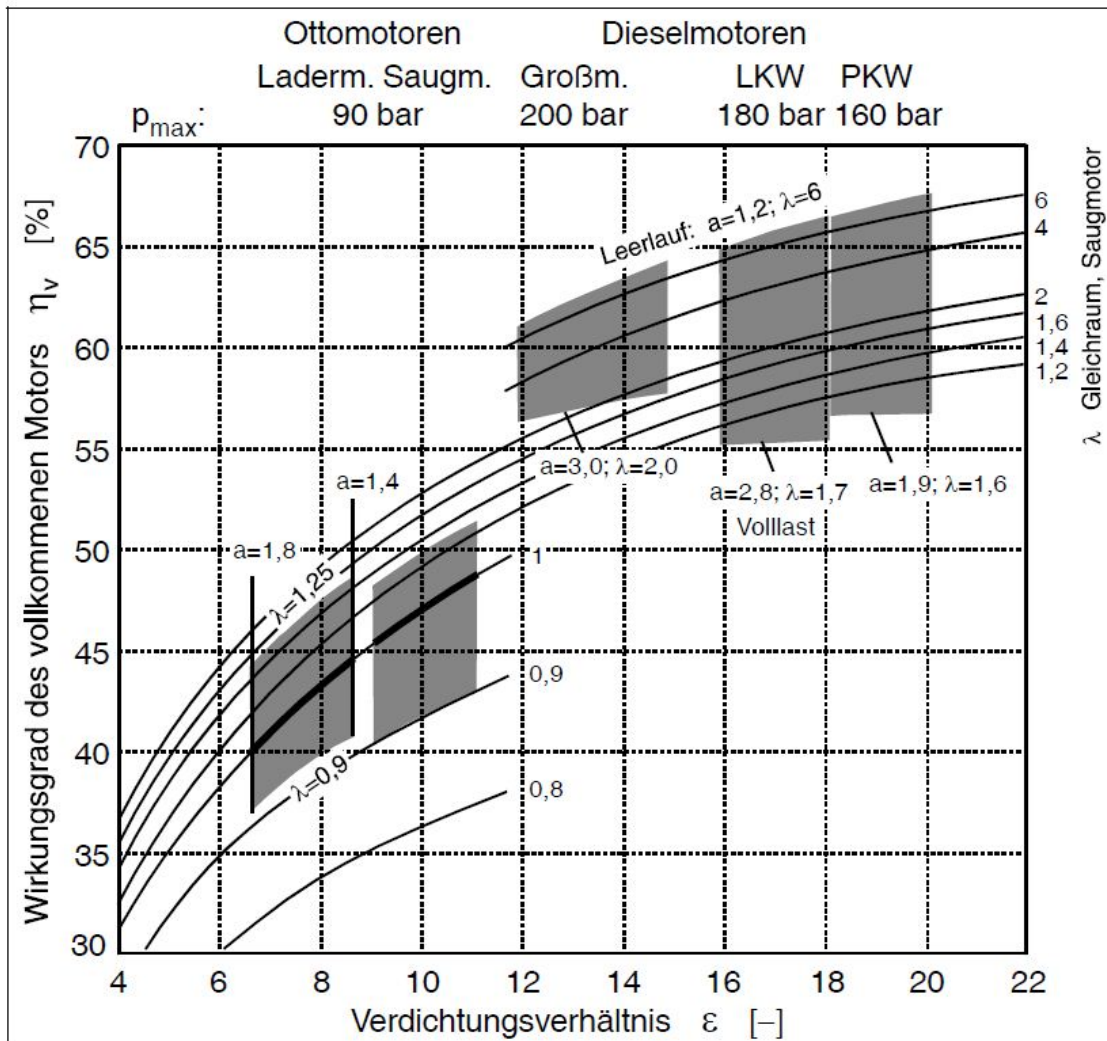


Abbildung 6.1: Wirkungsgrade des vollkommenen Motors.

Kombinierte Gleichraum-Gleichdruck-Verbrennung in Abhängigkeit von Verdichtungsverhältnis ϵ , Luftverhältnis λ , Aufladegrad a und Spitzendruck p_{max} .

Quelle: [23, S.2].

Eine magere Verbrennung (hohes Luftverhältnis λ) verbunden mit hohem Verdichtungsverhältnis (ϵ) erzielt den höchsten Wirkungsgrad η_v , dies ist auch der Grund für die bessere Ausgangsbasis des vollkommenen Dieselmotors gegenüber dem vollkommenen Ottomotor [23].

Beim realen Motor mit dem Inneren Wirkungsgrad η_i treten allerdings eine Reihe von Verlusten gegenüber dem Idealprozess des vollkommenen Motors bzw. dessen Wirkungsgrad η_v auf. Diese Verluste können mit Hilfe der so genannten Verlustanalyse im Detail aufgelistet und quantifiziert werden, sie werden dazu im Gütegrad η_g zusammengefasst.

Gleichung 6.1 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad des vollkommenen Motors η_v , dem Gütegrad η_g und dem Inneren Wirkungsgrad η_i .

$$\eta_i = \eta_v * \eta_g \quad (6.1)$$

Im Gütegrad sind somit eine Reihe von Einzelverlusten zusammengefasst, für eine Darstellung ist eine Aufteilung der Verluste in eine additive Kette von Einzelverlusten von Vorteil, der Innere Wirkungsgrad schreibt sich somit als:

$$\eta_i = \eta_v - \Delta\eta_g \quad (6.2)$$

Folgende Einzelverluste werden in der Verlustanalyse betrachtet bzw. im Gütegrad η_g zusammengefasst und vom Wirkungsgrad des vollkommenen Diesel- oder Ottomotors η_v abgezogen [22, S.114f]:

$$\Delta\eta_g = \Delta\eta_{rL} + \Delta\eta_{uV} + \Delta\eta_{rV} + \Delta\eta_{Ww} + \Delta\eta_{Leck} + \Delta\eta_{\ddot{U}} + \Delta\eta_{LW} \quad (6.3)$$

1. reale Ladung $\Delta\eta_{rL}$ (Einfluss des Ladungszustandes)
2. unvollkommene Verbrennung $\Delta\eta_{uV}$ (Umsetzungsverlust)
3. realen Verbrennungsablauf $\Delta\eta_{rV}$ (Verbrennungsverlust)
4. Wärmeübergang an die Brennraumwände $\Delta\eta_{Ww}$ (Wandwärmeverlust)
5. Leckage $\Delta\eta_{Leck}$ (Leckageverlust)
6. Überströmen zwischen Haupt- und Nebenbrennraum bei Kammermotoren $\Delta\eta_{\ddot{U}}$ (Überströmverlust)
7. realer Ladungswechsel $\Delta\eta_{LW}$ (Ladungswechselverlust)

Durch Hinzunahme der Verluste durch Reibung, beschrieben durch den mechanischen Wirkungsgrad η_m lässt sich zusammen mit dem Inneren Wirkungsgrad η_i letztendlich der effektive Wirkungsgrad η_e des Motors angeben:

$$\eta_e = \eta_i * \eta_m \quad (6.4)$$

Für eine bessere Darstellung lässt sich auch der Effektive Wirkungsgrad als Differenz anschreiben:

$$\eta_e = \eta_i - \Delta\eta_m \quad (6.5)$$

$$\eta_e = \eta_v - \Delta\eta_g - \Delta\eta_m \quad (6.6)$$

$$\eta_e = \eta_v - \Delta\eta_{rL} + \Delta\eta_{uV} + \Delta\eta_{rV} + \Delta\eta_{Ww} + \Delta\eta_{Leck} + \Delta\eta_{\ddot{U}} + \Delta\eta_{LW} - \Delta\eta_m \quad (6.7)$$

Aus Formel 6.7 lassen sich somit die folgenden drei grundlegenden Maßnahmen ableiten, um den effektiven Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors zu verbessern:

1. Erhöhung des Wirkungsgrades des vollkommenen Motors durch Steigerung des Verdichtungsverhältnisses ϵ und/oder des Luftverhältnisses λ

2. Bearbeitung und Minimierung der im Gütegrad η_g zusammengefassten Einzelverluste
3. Minimierung der Reibungsverluste im Kurbeltrieb

Weitere Informationen über die einzelnen Verluste und deren thermodynamischen Grundlagen finden sich in [22, S.115ff].

6.1.1.1 Ottomotoren

Der größte Vorteil und damit Grund für die weltweit mit Abstand dominierende Stellung des herkömmlichen Otto-Motorkonzepts mit Drosselklappe und stöchiometrischer äußerer Gemischbildung liegt in der vergleichsweise einfachen Abgasnachbehandlung. Durch den stöchiometrischen Betrieb mit Lambdasonde kann ein geregelter Dreiwegekatalysator für geringste Emissionen eingesetzt werden und es ist bezüglich des Zündzeitpunktes kein Kompromiss hinsichtlich der Emission von Stickoxiden NO_x notwendig [23].

Der Großteil der Verluste bei diesem Ottomotorkonzept entsteht dabei durch Drosselverluste (Quantitätssteuerung durch Begrenzung der zugeführten Luftmasse durch die Drosselklappe im Ansaugtrakt) bei Teillast, durch das im Vergleich zum Dieselmotor geringere Verdichtungsverhältnis sowie durch ungünstigere Stoffwerte mit stöchiometrischen Kraftstoff/Luftverhältnissen.

Um diese Verluste zu verringern, gibt es im Wesentlichen drei Konzepte [21, S.101]:

- Direkteinspritzung
- variable Ventilsteuerung
- Lastpunktverschiebung durch Downsizing

Direkteinspritzung:

Anstelle der in konventionellen Ottomotoren eingesetzten äußeren Gemischbildung (Saugrohreinspritzung) wird bei Systemen mit innerer Gemischbildung der Kraftstoff mittels einer Hochdruckpumpe über eine gemeinsame Kraftstoffverteilerleiste (Common-Rail-Prinzip) direkt in den Zylinder gespritzt.

Die Direkteinspritzung erlaubt die zwei völlig unterschiedliche Betriebsarten Schichtbetrieb und Homogenbetrieb [24, S.88]:

- Ottomotor homogen stöchiometrisch:

Bei Vollast wird der direkteinspritzende Ottomotor, ähnlich den herkömmlichen Systemen mit Drosselklappe und äußerer Gemischbildung, homogen stöchiometrisch betrieben. Dazu wird der Kraftstoff früh im Saugtakt eingespritzt, die Ladung hat genügend Zeit um sich zu homogenisieren und verbrennt vorgemischt bei stöchiometrischem Luftverhältnis ($\lambda=1$). Diese Betriebsweise diente ursprünglich der Leistungssteigerung, infolge der Innenkühlung durch Verdunstung des Kraftstoffs im Brennraum ergibt sich einerseits ein besserer Liefergrad, andererseits kann der Motor durch die verringerte Klopfneigung bei Vollast mit höherer Verdichtung ausgelegt werden [24, S.88].

- Ottomotor DI geschichtet:

Wird der direkteinspritzende Ottomotor im Teillastbereich betrieben, bietet der geschichtete Magerbetrieb die besten Voraussetzungen für höchste Wirkungsgrade bzw. geringen Verbrauch und stellt damit die entscheidende Stärke des DI-Ottomotors dar. Die Ladungsschichtung wird durch eine späte Einspritzung in den Kompressionsstakt erzeugt, dabei liegt nur an der Zündkerze zündfähiges Gemisch an, während im Brennraum insgesamt mageres Luftverhältnis vorliegt.

Durch das (über den Brennraum gemittelt) deutlich höhere Luftverhältnis im geschichteten Betrieb erhöht sich einerseits der Wirkungsgrad des vollkommenen Motors, durch den Wegfall der Drosselklappe und dem damit einhergehenden ungedrosselten Betrieb mit Qualitätsregelung können andererseits die hohen Ladungswechselverluste des konventionellen Ottomotors vermieden werden, die Frischladung wird wie beim Dieselmotor ungedrosselt angesaugt [24, S.88, S.92].

Grundsätzlich stellt die Benzin-Direkteinspritzung die wirksamste Einzelmaßnahme zur Verbrauchssenkung bei Ottomotoren dar [24, S.102], weitere Informationen zur Direkteinspritzung sind z.B. in [23] und [25] nachzulesen.

Variable Ventilsteuerung:

Durch eine voll-variable Ventilsteuerung können auch bei Lambda=1-Konzepten deutliche Verbrauchseinsparungen realisiert werden [21, S.102]. Dabei wird der Ladungswechsel durch Variation der Steuerzeiten der Gaswechselventile beeinflusst, dies macht den Einsatz einer Drosselklappe überflüssig und senkt somit ebenfalls die Drosselverluste im Teillastbereich.

Downsizing:

Unter Downsizing versteht man den Einsatz von hubraumreduzierten und hochaufgeladenen Motoren in Kraftfahrzeugen. Bei gleichen Fahrleistungen werden diese kleineren Motoren in höheren Last- und somit günstigeren Kennfeldbereichen betrieben, dies führt zu einer deutlichen Verbrauchsminderung [26, S.34ff]. Unter Berücksichtigung der Gewichtseinsparung können laut [21, S.102] allein durch Downsizing Verbrauchsvorteile von 20 % bis 30 % gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen erreicht werden.

6.1.1.2 Flex Fuel Vehicles FFV's

Sogenannte Flexible Fuel Vehicles sind Fahrzeuge, deren Verbrennungsmotoren (Ottomotoren) mit Mischungen aus Benzin und Ethanol betrieben werden können. Dabei wird unterschieden zwischen E85 FFV's und E100 FFV's.

Bei E85 FFV's können Mischungen zwischen 0 % Ethanol (also reinem herkömmlichen Benzin) und maximal 85 % Ethanol (Ein Anteil von 85 % Ethanol und 25 % Benzin im Kraftstoff wird als E85 bezeichnet) verwendet werden, Sensoren im Tank der Fahrzeuge messen das Verhältnis der beiden Komponenten und passen den Motorlauf bzw. die dafür wichtigen Parameter wie z.B. Einspritzmenge und Zündzeitpunkt automatisch an [27, S.42]. Diese Fahrzeuge sind bereits seit vielen Jahren vor allem in Brasilien auf dem

Markt, da hier aufgrund der klimatischen Bedingungen Bioethanol aus Zuckerrohr als preisgünstiger Treibstoff hergestellt werden kann, siehe dazu auch Kapitel 8.6 auf Seite 88.

Im Jahr 2003 wurden in Brasilien E100 FFV's auf den Markt gebracht. Diese Fahrzeuge sind Weiterentwicklungen der E85 FFV's, der Mischungsbereich der verwendbaren Kraftstoffe wurde verändert und reicht von 25 % (E25) bis zu 100 % Ethanol (E100). Die bisher verwendeten Sensoren wurden dabei entfernt und durch eine weiterentwickelte Motorsteuerung ersetzt. Diese nutzt als Input die Messdaten von Sauerstoffsensoren im Abgassystem (Lambdasonden) und kann damit den Motor laufend an den verwendeten Treibstoff kalibrieren [28, S.57].

Reine Ethanolmotoren (Betrieb mit 100 % Ethanol, E100) können aufgrund der hohen Oktanzahl des Treibstoffs und der damit einhergehenden gesteigerten Sicherheit gegen klopfende Verbrennung mit höheren Verdichtungsverhältnissen betrieben werden. Dies führt durch den damit gesteigerten thermischen Wirkungsgrad zu signifikant verringerten Verbräuchen von bis zu 25 % im Vergleich zu leistungsgleichen Motoren, die mit Ethanolbeimischungs-raten von 20 oder 25 % (E20 bzw. E25) betrieben werden [28, S.57].

Weitere Informationen zu FFV's und deren Einsatz in verschiedenen Testflotten in Europa sind in [27] beschrieben.

6.1.1.3 Dieselmotoren

Der Dieselmotor erzielt im gleichen Lastpunkt wie der Ottomotor zum Teil deutlich höhere Wirkungsgrade des vollkommenen Motors, durch höhere Verluste wegen emissionsbegründeter Verbrennungsführung sowie ebenfalls höherer Reibungs- und Ladungswechselverluste ergibt sich allerdings ein geringfügig geringerer effektiver Wirkungsgrad als bei strahlgeführten direkteinspritzenden Verfahren des Ottomotors [23]. Beim Dieselmotor sind künftig im Gegensatz zum Ottomotor keine großen Verbrauchsreduktionen mehr zu erwarten [25], Verbrauchsminderungen durch die Einführung von direkteinspritzenden Dieselmotoren (mittels Pumpe-Düse oder Common-Rail Systemen) wurden bereits in der Vergangenheit erschlossen [21, S.103]. Mögliches weiteres Einsparungspotential liegt laut [21, S.103], [23] und [25] in folgenden Bereichen:

- Reibungsminimierung
- Abgasrückführung
- Downsizing des Motors
- variable Turboaufladung
- Minimierung der Ladungswechselverluste

6.1.1.4 Alternative Verbrennungskonzepte, HCCI

Beim HCCI-Verfahren (Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) versucht man die Vorteile der Qualitätsregelung durch direkte Einspritzung (wie beim Dieselmotor) mit der raschen und rußfreien vorgemischten Verbrennung eines homogenen Gemischs mit Selbstzündung zu verbinden.

Das *Benzin-HCCI* Verfahren stellt beim direkteinspritzenden Ottomotor eine Alternative zum geschichtet betriebenen direkteinspritzenden Ottomotor (Direct Injection, DI)

dar. Der Wirkungsgrad des vollkommenen Motors liegt zwischen dem homogen betriebenen und dem geschichtet betriebenen direkteinspritzenden Ottomotor, von Vorteil ist die wirkungsgradoptimal gelegene und extrem kurze bzw schnelle Verbrennung. Der thermodynamische Wirkungsgrad wird zusätzlich noch durch das höhere Verdichtungsverhältnis sowie durch das höhere Luftverhältnis in der Teillast bei Qualitätsregelung erhöht [24, S.254], Probleme bereiten derzeit vor allem noch die Verbrennungssteuerung [23].

Das *Diesel-HCCI* Verfahren dient grundsätzlich eher zur Reduzierung der Abgasemissionen durch innermotorische Maßnahmen als zur Wirkungsgradsteigerung. Die Ursache für die Bildung von NO_x und Ruß bei der Verbrennung im direkteinspritzenden Dieselmotor ist die heterogene Diffusionsverbrennung mit hohen lokalen Temperaturen bei gleichzeitig örtlichem Sauerstoffmangel, mit einer alternativen Verbrennungsführung wie z.B. beim HCCI-Motor versucht man diese Zustände zu vermeiden und dadurch eine Reduktion der Stickoxid- und Partikelemissionen zu erreichen.

Neben dem HCCI-Konzept seien an dieser Stelle noch die Verfahren Highly Premixed Late Injection (HPLI), Homogeneous Charge Late Injection (HCLI), Modulated Kinetics (MK-Verfahren) sowie Dilution Controlled Combustion System (DCCS) erwähnt, für weitere Details siehe [29, S.579f].

Allen alternativen Dieself Verfahren gemeinsam ist die Selbstzündung eines mehr oder weniger homogenen Gemischs bei räumlich gleichmäßiger Temperaturverteilung während der Verbrennung und dadurch drastischer NO_x Reduktion bei gleichzeitig praktisch rußfreier (d.h. partikelfreier) Verbrennung [24, S.261].

6.1.2 Einsparpotential bei Turbomaschinen

Unterschiede zur Betriebsweise der Kolbenmaschine:

Der Arbeitsprozess einer Gasturbine ist ähnlich dem eines Viertakt-Kolbenmotors, die Unterscheidung liegt darin, dass der Verbrennungsvorgang in der Gasturbine bei konstantem Druck und der des Kolbenmotors bei konstantem Volumen stattfindet (die Brennkammer einer Gasturbine ist im Gegensatz zum Zylinder des Kolbenmotors kein abgeschlossenes Volumen). In Abbildung 6.2 ist dazu der Unterschied zwischen dem zyklischen Arbeitsprozess des Kolbenmotors und dem stetigen Prozess eines kontinuierlich arbeitenden Turbojettriebwerks dargestellt.

Während dabei im Zylinder eines Hubkolbenmotors Drücke bis über 70 bar erreicht werden, kommt es in Gasturbinen während des Verbrennungsprozesses zu einer Volumenzunahme. Das Gasvolumen dehnt sich infolge der Verbrennung um das vier- bis fünffache seines ursprünglichen Volumens aus, dieser Vorgang wird als Gleichdruckverbrennung bezeichnet [30, S. 79].

Diese unterschiedlichen Verhältnisse in Hubkolbenmotoren und Strahltriebwerken haben entscheidenden Einfluss auf die geforderten Eigenschaften der Kraftstoffe. Während bei Hubkolbenottomotoren aufgrund der hohen Drücke hochoktanige Treibstoffe zur Vermeidung von Klopfen benötigt werden, können Gasturbinen mit dieselähnlichen Niedrigoktan-Brennstoffen betrieben werden [30, S. 79].

Eine weitere Unterscheidung zwischen den beiden Motorenvarianten besteht darin, dass die vier grundlegenden Vorgänge Ansaugen, Verdichten, Verbrennen und Ausstoßen bei Gasturbinen kontinuierlich stattfinden, während sie in Kolbenmaschinen intermittierend durchgeführt werden (die dazugehörigen Vergleichsprozesse finden sich in [30, S.80]).

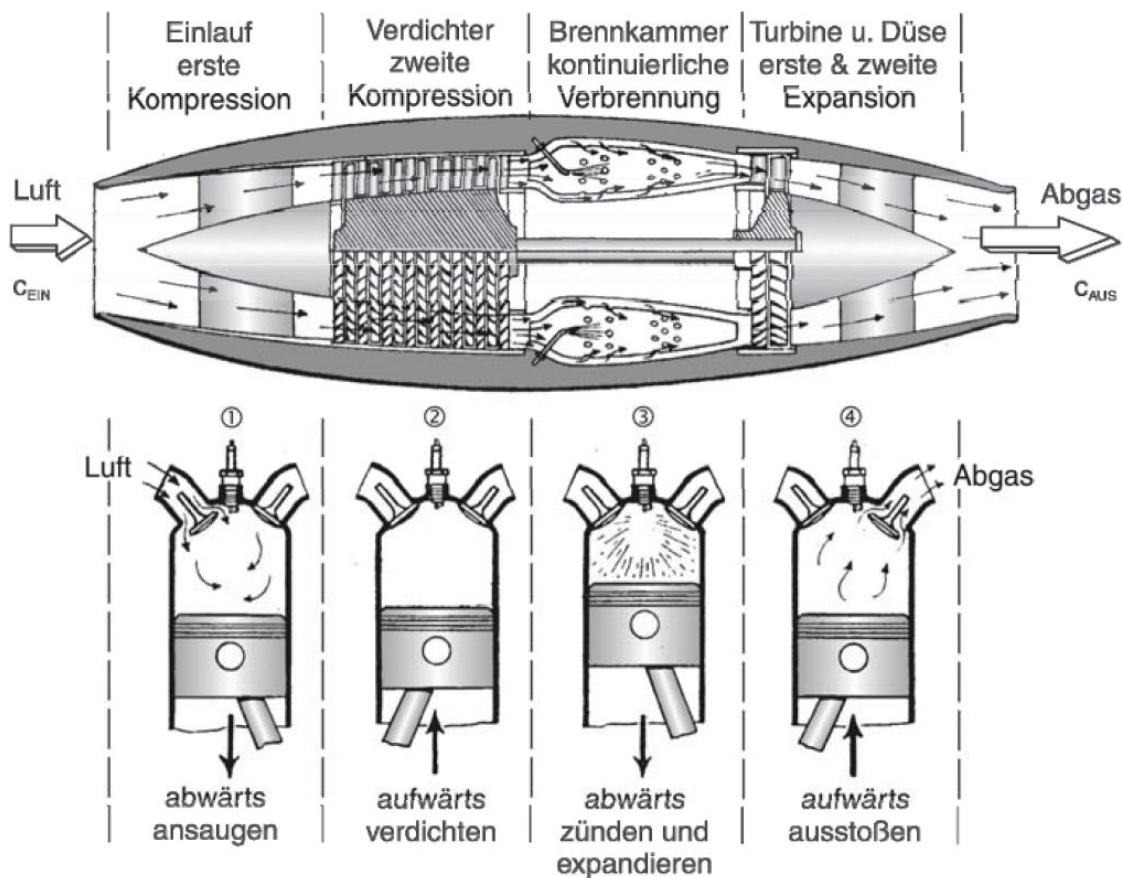


Abbildung 6.2: Vergleich zwischen dem Arbeitsprozess eines Viertaktkolbenmotor und eines Turbojettriebwerks
 Quelle: [30, S.79].

Aktuelle Entwicklungen und Forschungsschwerpunkte:

Der Großteil der Linienjets wird heute mit Turbofantriebwerken ausgerüstet, siehe Abbildung 6.3. Dabei saugt ein schnell drehendes Schaufelrad (der „Fan“) Luft von außen in das Triebwerk und verdichtet sie dabei.

Der Luftstrom wird anschließend in einen äußeren und einen inneren Teil aufgeteilt. Der innere Strom wird in einem Turbokompressor weiter verdichtet, in der nachfolgenden Brennkammer wird dann Treibstoff eingespritzt und das Gemisch verbrannt. Letztlich werden sowohl der innere als auch der äußere Strom in einer Düse beschleunigt und treten mit hoher Geschwindigkeit aus dem Triebwerk aus, der Massenstrom und die dazugehörige Geschwindigkeit erzeugen den für den Antrieb erforderlichen Schub.

Die weltweite Flotte ziviler Luftfahrzeuge erreichte im Jahr 2008 durchschnittlich einen Gesamtkraftstoffverbrauch von 4,8 Litern pro 100 Passagierkilometer (Pkm) [31, S.1], bis zum Jahr 2026 erwartet Airbus durchschnittliche Werte von etwa 3 Litern pro 100 Personenkilometer [31, S.15].

Neben der Aerodynamik (siehe Kapitel 6.3.2 auf Seite 55) und dem Strukturgewicht

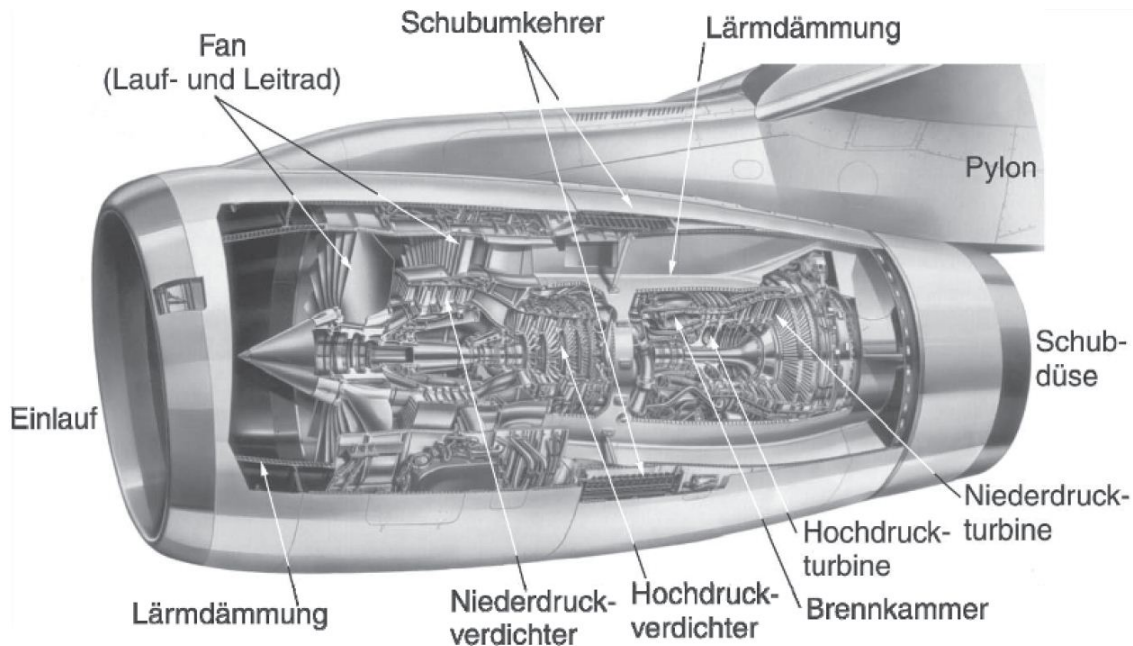


Abbildung 6.3: Aufbau eines modernen Turbofantriebwerks

Quelle: [30, S.114].

der Flugzeuge ist dazu vor allem der spezifische Kraftstoffverbrauch (Specific Fuel Consumption, SFC) der Triebwerke für den Kraftstoffverbrauch von Bedeutung.

Um den Gesamtwirkungsgrad der Triebwerke zu verbessern und damit einhergehend den SFC zu verringern stehen vor allem Methoden im Vordergrund, die durch eine Verringerung des Fandruckverhältnisses (Fan Pressure Ratio, FPR) und eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses (Verhältnis von äußerem zu innerem Luftmassenstrom, Bypass Ratio BPR) den Vortriebswirkungsgrad steigern [31, S.1].

Mittlerweile stoßen die Optimierungsoptionen einzelner Triebwerkskomponenten und die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses bei konventionellen Triebwerkstechniken allerdings an Machbarkeitsgrenzen und verlangen daher neue Konzepte, laut [8, S.15] werden dies in naher Zukunft voraussichtlich so genannte Ultrahochbypass-Triebwerke sein. Bei diesen Getriebefan-Triebwerken (Geared Turbofan, GTF) sorgt ein Übersetzungsgetriebe dafür, das Fan, Verdichter und Turbine nicht mit der gleichen sondern mit einer für jedes Bauteil optimalen Drehzahl laufen. Neben dem dadurch erhöhten Wirkungsgrad wirken sich bei diesen Triebwerken auch die verkürzte Bauweise (durch die verringerte Anzahl notwendiger Turbinenstufen) und das geringere Gewicht vorteilhaft auf das Gesamtpaket aus [31, S.31].

Weitere Informationen über Flugzeugmotoren und Details zu innovativen Antriebskonzepten bei Flugzeugtriebwerken sind in [31] und [32, S.38ff] dargestellt.

6.2 Alternative Antriebe und deren Einsparpotentiale

Wie in Kapitel 6 bereits dargestellt, hängt der Energieverbrauch von Fahrzeugen einerseits von der benötigten mechanischen Energie zum Antrieb des Fahrzeuges über eine gewisse Strecke ab, diese Antriebsarbeit ist eine Funktion von Gewicht, Luftwiderstand, Rollwiderstand und dem Betrieb der benötigten Nebenaggregate.

Andererseits muß diese mechanische Arbeit von einer Antriebsquelle, dem Motor, durch Umwandlung von gespeicherter chemischer, elektrischer oder mechanischer Energie bereitgestellt werden.

Die Steigerung der Effizienz dieser Energieumwandlung vom Tank zum Rad (Tank To Wheel, TTW) sowie eine eventuelle Rekuperation (Rückgewinnung) von Bremsenergie (welche sonst als Verlustwärme über die Bremsen an die Umgebung abgegeben wird) ist das Einsatzgebiet der Alternativen Antriebe.

6.2.1 Definition alternative Antriebe

Mit alternativen Antrieben sind zumeist Konzepte gemeint, die von der konventionellen Verbrennungskraftmaschine abweichen oder andere Treibstoffe als Benzin oder Diesel nutzen. Dies können z.B. Druckluftmotoren, Brennstoffzellen, Elektro-, Solar-, Hybridantriebe, Erdgasfahrzeuge usw. sein, in weitere Folge ist in dieser Arbeit damit allerdings die Elektrifizierung des Antriebes gemeint. Weiters beschränkt sich diese Ausdrucksweise auf den Straßenverkehr, da meist nur in diesem Bereich Bedingungen vorherrschen, die den Einsatz elektrischer Maschinen und der dazugehörigen Energiespeicher als Ersatz zur VKM erlauben. Die unterschiedlichen Varianten der Elektrifizierung von PKW-Antrieben und dessen Einsparmöglichkeiten werden im folgenden Kapitel behandelt, eine Übersicht über bisher realisierte Fahrzeugkonzepte ist in [33, S.2ff] zu finden.

6.2.2 Definition und Einteilung von Hybridantrieben

Als Hybridantriebe werden Fahrzeugantriebe bezeichnet, die über mindestens zwei verschiedenartige Energiewandler- und Energiespeichersysteme verfügen. Am bekanntesten ist die Kombination von Verbrennungsmotor/Kraftstofftank mit einem Elektroantrieb/-Speicher.

Grundsätzlich lassen sich die verschiedenen Hybridkonzepte folgendermaßen einteilen:

- Durch die Struktur und Anordnung der Komponenten
- Durch den Grad der Elektrifizierung, also der Ergänzung oder dem vollständige Ersatz der VKM durch einen oder mehrere E-Motoren

Die Abbildung 6.4 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Strukturvarianten von Hybridantrieben.

Als Maß für die Elektrifizierung bzw. Hybridisierung wird der Hybridisierungsgrad H [%] verwendet, dieser ist definiert als Anteil der Maximalleistung des elektrischen Antriebs (P_E) an der Gesamtleistung des Fahrzeugs, also der Summe aus Maximalleistung des elektrischen Antriebs (P_E) und der Maximalleistung der Verbrennungskraftmaschine (P_{VKM}), siehe [35, S.100] und [36, S.14]:

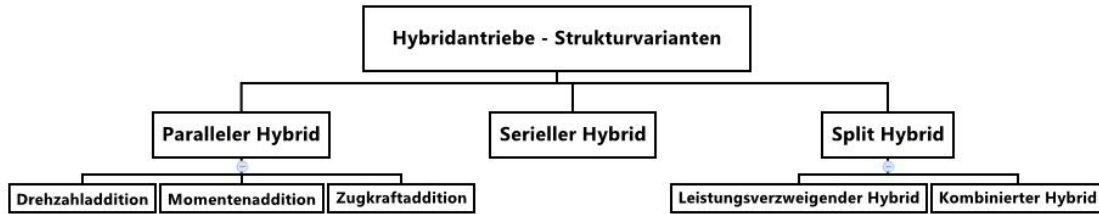


Abbildung 6.4: Strukturvarianten bei Hybridantrieben

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [34, S.67].

$$H = \frac{P_E}{P_E + P_{VKM}} * 100 [\%] \tag{6.8}$$

Für $H = 5\%$: Mikro Hybrid

Für $H = 10\%$: Mild Hybrid

Für $H = 25\%$: Voll Hybrid

Damit einhergehend ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Verbrauch, Reichweite und Einsatzgebiete der unterschiedlichen Hybridfahrzeuge.

6.2.2.1 VKM konventionell

Bei Fahrzeugen die ausschließlich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren betrieben werden gibt es keine elektrische Leistung, der Hybridisierungsgrad ist definitionsgemäß 0%.

6.2.2.2 Mikro Hybrid / Start-Stopp-Automatik

Nach [37, S.12] versteht man unter Mikro Hybriden konventionelle Antriebe, die zusätzlich über eine so genannte Start-Stopp-Automatik verfügen, welche den Verbrennungsmotor bei Stillstand des Fahrzeuges ausschaltet und beim Lösen des Bremspedals wieder startet, zusätzlich kann mit diesem System Bremsenergie zurück gewonnen und in das Bordnetz eingespeist werden. Da eine Start-Stopp-Automatik keine elektrische Antriebsenergie zur Verfügung stellt, handelt es sich bei einem Mikro Hybrid nicht um einen Hybrid im eigentlichen Sinn, sondern eher um eine Maßnahme zur Effizienzverbesserung von konventionellen Antrieben.

Die Start-Stopp-Automatik hat nur innerorts, bei einem hohem Anteil an Stop-and-Go Verkehr Vorteile, daraus ergibt sich auch der eingeschränkte Einsatzbereich auf PKW, Linienbusse im Stadtverkehr und leichte Nutzfahrzeuge. Für LKW im Fernverkehr und Linienbusse im Überlandverkehr wird dieses System daher nicht zum Einsatz kommen [35, S.155 und S.161].

6.2.2.3 Mild Hybrid

Bei dieser Konfiguration wirken sowohl Verbrennungsmotor als auch Elektromotor auf die Antriebsräder (paralleler Hybrid). Der Elektromotor ist im Vergleich zum Verbrennungsmotor deutlich schwächer, rein elektrisches Fahren ist daher nicht möglich. Der Elektromotor kommt vor allem beim Beschleunigen des Fahrzeuges als Unterstützung der VKM

zum Einsatz, zusätzlich dient er (als Generator) zur Rekuperation (Rückgewinnung) von Bremsenergie [37, S.12].

6.2.2.4 Voll Hybrid

Im Gegensatz zum Mild Hybrid ist der E-Motor beim Voll Hybrid deutlich stärker, das Fahrzeug kann mit dieser Auslegung auch rein elektrisch angetrieben fahren. Aufgrund der niedrigen Speicherkapazität der Batterie ist die elektrische Reichweite allerdings auf wenige Kilometer beschränkt. Wie der Mild Hybrid zählt auch der Voll Hybrid zur Klasse der parallelen Hybride, sowohl Verbrennungsmotor als auch E-Motor sind mechanisch mit den Antriebsrädern verbunden.

6.2.2.5 Plug In Hybrid PHEV

Plug In Hybride (PHEV) können, wie der Name andeutet, am Stromnetz aufgeladen werden. Die elektrische Speicherkapazität ist größer als bei den anderen Varianten, somit ist auch die elektrische Reichweite deutlich höher. Grundsätzlich kann ein Plug In Hybrid als paralleler Hybrid oder aber auch als serieller Hybrid ausgeführt werden, meist ist damit aber ein paralleler Hybrid gemeint. Serielle Hybride stellen eine eigene Kategorie dar, siehe 6.2.2.9.

Der Plug In Hybrid funktioniert somit gleich wie ein Voll Hybrid, mit dem Unterschied größerer und mit Netzstrom aufladbarer Batterien [37, S.13].

Durch den Einsatz eines leistungsfähigeren Energiespeichersystems wird rein elektrisches Fahren über eine größere Reichweite gewährleistet und gleichzeitig die Reichweitenrestriktion von rein elektrischen Fahrzeugen vermieden. Die Ladung der Batterie erfolgt neben Bremsenergieerückgewinnung und den Verbrennungsmotor im Fahrbetrieb vor allem stationär über das Stromnetz.

Durch den höheren Fahranteil im elektrischen Betrieb können wesentlich höhere Verbrauchsreduktionen als für Micro-, Mild-, und Vollhybride erreicht werden, der Verbrennungsmotor wird nur mehr bei Bedarf (hohe Fahrgeschwindigkeit oder geringer Batterieladestatus) hinzugeschaltet [35, S.99].

6.2.2.6 E-KFZ BEV

Das Elektrofahrzeug (E-KFZ), auch Batterie-elektrisches Fahrzeug oder Battery Electric Vehicle (BEV) genannt, verzichtet auf den Einsatz eines Verbrennungsmotors. Es besitzt ausschließlich einen elektrischen Antrieb und bezieht die gesamte Energie aus den Batterien, welche über das Stromnetz stationär geladen werden. Die Reichweite der Fahrzeuge ist aufgrund der problematischen Energiespeicherung sehr viel geringer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, die Herstellungs- bzw. Anschaffungskosten sind bisher deutlich höher.

Als besonders vorteilhaft stellen sich der lokal emissionsfreie Betrieb und die hohe Effizienz des Fahrzeugantriebes an sich dar, die Emissionen werden aber nur von der Straße zur Stromerzeugung ins Kraftwerk verschoben. Je nach Art der Stromerzeugung (z.B. Solarstrom oder Kohlekraftwerk) können daher insgesamt mehr CO_2 Emissionen entstehen als beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit einer herkömmlichen Verbrennungskraftmaschine (VKM). Bei Betrachtung des gesamten Lebenswegs (Life Cycle Analysis

LCA) ist beispielsweise die CO_2 Bilanz für ein batterieelektrisches Fahrzeug, betrieben mit Strom aus dem deutschen Strommix, schlechter als für einen modernen Benzin- oder Diesel-PKW. Elektrische Antriebskonzepte mit Strom aus dem Netz liefern also erst dann Treibhausgasvorteile, wenn der benötigte Strom aus regenerativen Quellen stammt [38, S.9].

Wesentliche Herausforderungen verbleiben hinsichtlich der erforderlichen Batterietechnologie und der damit verbundenen eingeschränkten Leistungsfähigkeit und Reichweite sowie des hohen Gewichts der Fahrzeuge [35, S.99]. Aufgrund der genannten Restriktionen ist ein sinnvoller Einsatz bisher nur bei speziellen Anforderungen, meist im urbanen Personen- und Zustellverkehr, möglich. Mittelfristig erscheinen laut [35, S.101] elektrische Reichweiten von 100 bis 200 Kilometern fahrzeugtechnisch bezüglich Gewicht und Platzbedarf der Batterie realisierbar, wobei die Ausführung der Batterie wesentlich durch die Fahrzeugnutzung bestimmt wird.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind ab dem Inkrafttreten der Abgasnorm EURO 6 im September 2014 den Elektroautos bezüglich der Emission von Luftschadstoffen nur mehr unwesentlich unterlegen [38, S.15]. Ab diesem Zeitpunkt hat das Elektrofahrzeug gegenüber neu zugelassenen PKW mit Verbrennungsmotor hinsichtlich der Emission der Luftschadstoffe HC , CO und NO_x nur mehr marginale Vorteile. Je nach Art der Stromerzeugung (z.B. Kohlekraftwerk oder Windkraft) können sich bei der Emission des Treibhausgases CO_2 Vorteile oder Nachteile beim Einsatz von E-KFZ als Ersatz für KFZ mit Verbrennungsmotor ergeben.

6.2.2.7 Brennstoffzellen-KFZ

Das Brennstoffzellenfahrzeug (BZ-KFZ) ist im Prinzip ein Elektrofahrzeug, die Energie wird allerdings nicht aus der Batterie bezogen sondern an Bord in der Brennstoffzelleneinheit erzeugt. Dabei wird der Brennstoff (meist Wasserstoff) in einem elektrochemischen Prozess (kalte Verbrennung) mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in elektrische Energie umgewandelt, werden mehrere Brennstoffzellen zu einem Block zusammengeschaltet, generiert dieser sogenannte Stack genügend Leistung für den Antrieb eines Verbrauchers [34, S.133].

Eine Beschreibung der elektrochemischen Vorgänge und des Aufbaus von Brennstoffzellen ist z.B. in [7, S.139] und [34, S.133] nachzulesen.

Brennstoffzellen können entweder nach deren Betriebstemperatur oder nach der Art des verwendeten Elektrolyten eingeteilt werden, siehe dazu Tabelle 6.1.

Die Vorteile der Brennstoffzelle liegen in einem (theoretisch) hohen Wirkungsgrad (vor allem bei tieferen Temperaturen) und der lokalen Geräusch- und Emissionsfreiheit.

Als Hauptschwierigkeiten stellen sich momentan die eingeschränkte Leistungsdichte, die geringe Lebensdauer sowie die hohen Kosten der entwickelten Brennstoffzellen dar. Während die Leistungsziele als erreichbar eingeschätzt werden, ist die erforderliche Nutzungsdauer von 15 Jahren laut [35, S.129] mittelfristig nur schwer realisierbar.

Auch die Kostenentwicklung ist aufgrund der bisher noch nicht erfolgten Markteinführung nur schwer zu prognostizieren, eine Literaturlauswertung verschiedener Studien bezüglich der prognostizierten Kostenentwicklung für Brennstoffzellen wurde in [35, S.130] durchgeführt, die Ergebnisse liegen zwischen \$ 30/kWh und \$ 500/kWh im Jahr 2015.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen für Brennstoffzellen wurde in [35] eine Abschätzung

Tabelle 6.1: Brennstoffzellentypen und deren Eigenschaften

	AFC	PEMFC			PAFC	MCFC	SOFC
		DMFC	NT-PEMFC	HT-PEMFC			
Temperaturbereich	NT	NT	NT	NT	NT	HT	HT
Betriebstemperatur	60°C bis 80°C	ca. 80°C	60°C bis 120°C	120°C bis 200°C	160°C bis 200°C	ca. 650°C	ca. 1000°C
Brennstoff	H_2	CH_3OH	H_2	H_2	H_2	H_2, CO	H_2, CO
Elektrolyt	Wässrige Kalilauge	Protonenleitende Membran	Protonenleitende Membran	Protonenleitende Membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Karbonatschmelze	Dotiertes Zirkoniumdioxid
Ionenleitung	OH_-	H_+	H_+	H_+	H_+	CO_3^-	O^{--}
CO_2 -Verträglichkeit	< 1 ppm	—	< 100 ppm	< 500 ppm	< 1%	verträglich	verträglich
Leistung [kW]	10-100	0,01-1	0,1-500	0,1-500	bis 10.000	bis 100.000	bis 100.000
elektrischer Wirkungsgrad Zelle [%]	60-70	20-30	50-70	50-70	55	55	60-65
elektrischer Wirkungsgrad System [%]	60		30-50	30-50	40	50	55-60
Anwendung	Raumfahrt Fahrzeuge	Klein-geräte	Raumfahrt Fahrzeuge	Raumfahrt Fahrzeuge	Kleinkraftwerke	Kraftwerke	Kraftwerke und APU

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [7, S.151].

über die gesamten Zusatzkosten in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße für ein Brennstoffzellenfahrzeug erstellt. Diese Zusatzkosten enthalten neben der Brennstoffzelle auch das Tanksystem und den Elektromotor. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Zusammenfassend noch einmal die Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen als Energiewandler im Überblick [7, S.139]:

Vorteile der Brennstoffzelle als Energiewandler:

- Direkte Umwandlung von chemisch gebundener Energie in elektrische Energie.
- Das Potential höherer Wirkungsgrade bei niedrigen Temperaturniveaus da sie nicht an den Carnot-Prozess gebunden ist.
- Es treten lokal keine Emissionen von Schadstoffen oder Lärm auf, bei Wasserstoff als Brennstoff auch keine CO_2 Emissionen.
- Die Brennstoffzelle arbeitet ohne bewegte Bauteile.

Nachteile der Brennstoffzelle beim derzeitigen Stand der Technik sind:

- Die Brennstoffzelle weist hohe Herstellkosten auf.
- Das hohe Wirkungsgradpotential konnte in der Praxis noch nicht ausreichend demonstriert werden.
- Das Langzeitverhalten und die Lebensdauer von Brennstoffzellen sind vor allem bei instationärem Betrieb noch nicht zufriedenstellend.
- Einige Brennstoffzellen benötigen hochreinen Wasserstoff.
- Die Erzeugung, Verteilung und Speicherung des Brennstoffs Wasserstoff ist teuer.

6.2.2.8 Parallel Hybrid

Beim parallelen Hybrid (siehe Abbildung 6.5 auf Seite 47) sind sowohl Verbrennungsmotor als auch Elektromotor mechanisch mit der Antriebsachse verbunden. Beide können einzeln oder gemeinsam betrieben werden. Je nach Art der Leistungsüberlagerung lassen sich die weiteren Klassifizierungen Drehmomentaddition, Drehzahladdition und Zugkraftaddition treffen.

Charakteristisch für den parallelen Hybrid ist, dass beide Antriebsaggregate aufgrund ihrer Leistungsaddition bei gleichen Fahrleistungen im Vergleich zum konventionellen Antrieb kleiner dimensioniert werden können [34, S.68].

6.2.2.9 Serieller-Hybrid/Range Extender

Beim seriellen Hybrid (siehe Abbildung 6.6 auf Seite 47) ist der Verbrennungsmotor nicht mechanisch mit den Antriebsrädern verbunden, sondern mit einem Generator gekoppelt. Der Verbrennungsmotor und der E-Motor sind nacheinander, also „in Serie“ geschaltet, deshalb die Bezeichnung serieller Hybrid. Die so erzeugte elektrische Leistung wird in eine Batterie bzw. an den Elektro-Fahrtrieb weitergeleitet. Je nach Größe der Batterie kann

Tabelle 6.2: Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge

Jahr	Brennstoffzelle			Tanksystem			Elektromotor			Gesamt		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
spezifische Zusatzkosten [€/kW]	250	60	40	20	15	5	25	20	15	295	95	60
PKW klein 54 kW [€]	13.500	3.240	2.160	2.260	1.695	565	1.350	1.080	810	17.110	6.015	3.535
PKW mittel 90 kW [€]	22.500	5.400	3.600	3.760	2.820	940	2.250	1.800	1.350	28.510	10.020	5.890
PKW groß 165 kW [€]	41.250	9.900	6.600	6.880	5.160	1.720	4.125	3.300	2.475	52.255	18.360	10.795

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [35, S.132 und S.133].

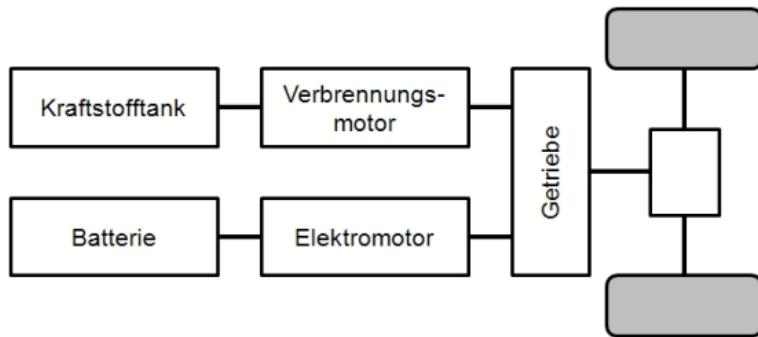


Abbildung 6.5: Paralleler Hybridantrieb

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [34, S.68].

der serielle Hybrid prinzipiell auch als ein Elektrofahrzeug betrachtet werden, durch die kleinere Batterie ist allerdings die elektrische Reichweite deutlich geringer.

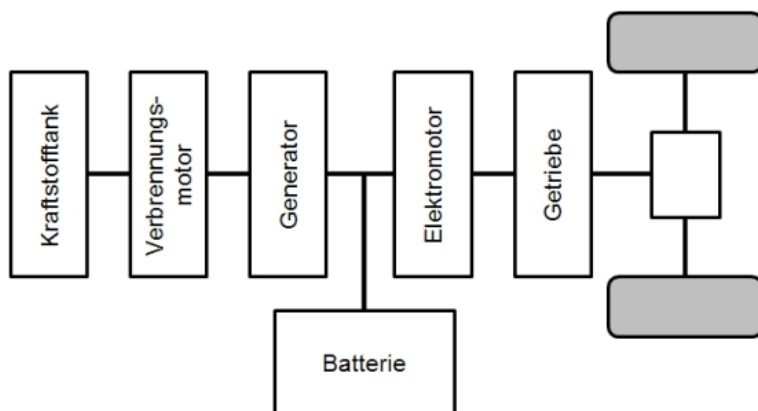


Abbildung 6.6: Serieller Hybridantrieb

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [34, S.68].

Viele serielle Hybrid besitzen eine Plug In Funktion und können somit am Stromnetz geladen werden. Die Speicherkapazität der Batterie wird dabei so ausgelegt, dass der Großteil der Strecken rein elektrisch zurückgelegt werden kann und nur bei Überschreiten der elektrischen Reichweite der zusätzliche Verbrennungsmotor benötigt wird. Dieser Verbrennungsmotor fungiert somit als „Notstromaggregat“ und wird nur im Bedarfsfall eingeschaltet um die Reichweite zu verlängern, er wird daher im seriellen Hybrid auch als Range Extender bezeichnet [37, S.13].

Die Bandbreite der Motor- und somit Fahrleistungen reicht dabei von mäßiger Geschwindigkeit, gerade genug um eine Stromtankstelle zu erreichen, bis zum uneingeschränkten und vollwertigen Betrieb des Fahrzeuges [38, S.5].

Der Vorteil dieser Variante ist die hinsichtlich Verbrauchs- und Emissionsreduktion frei wählbare Betriebsweise des Verbrennungsmotors. Nachteilig wirkt sich die zweifache Energieumwandlung in einem seriellen Hybrid durch die unvermeidbaren Umwandlungsverluste aus.

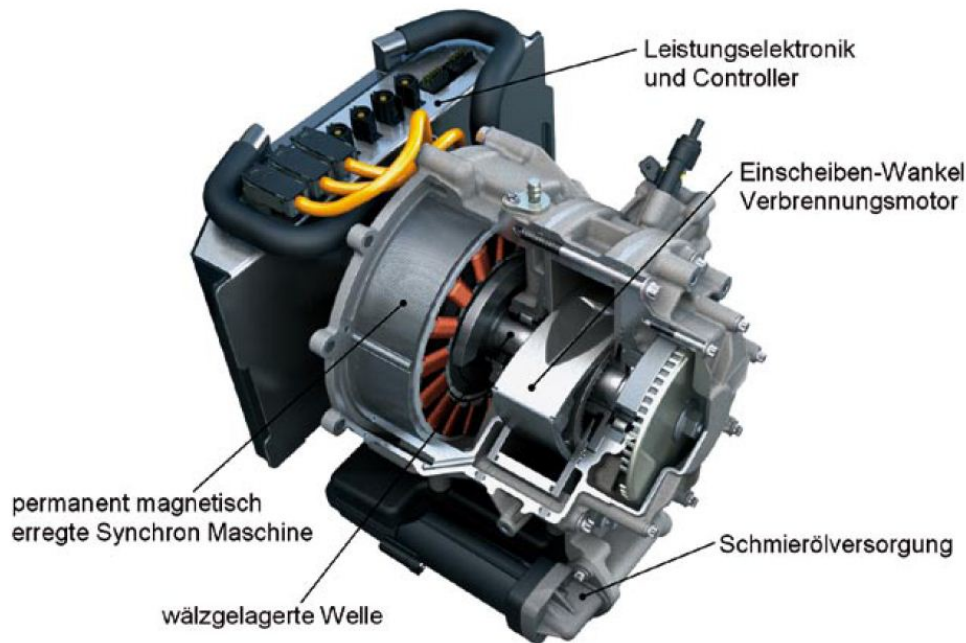


Abbildung 6.7: Kernmodul des AVL Range-Extender-Systems

Quelle: [39].

Ein sehr interessantes Beispiel für die Auslegung eines seriellen Hybridantriebes ist das Range Extender Modul der AVL List GmbH [39]. Hierbei wird der Range Extender als serielles Hilfsaggregat für einzelne längere Fahrtstrecken gesehen und für die Batterienachladung im Einpunktbetrieb ausgelegt.

Die Betriebsweise des Motors (unabhängig von Last- und Drehzahlvorgaben) lässt eine aus Emissionsgesichtspunkten optimale Start- und Kat-Heizprozedur zu, die Emissionsnormen EURO 5 und SULEV können dadurch sicher unterschritten werden [39].

Abbildung 6.7 zeigt das Kernmodul des AVL Range-Extender-Systems.

Bei einem Hubraum von 254 ccm und einer Drehzahl von 5000 U/min kann mit diesem Modul eine konstante elektrische Leistung von 15 kW bereitgestellt werden. Da sich die maximal notwendige elektrische Leistung des Fahrzeugantriebsmotors primär aus Beschleunigungs- und Steigfähigkeitsanforderungen ergibt und nicht als Dauerleistung verfügbar sein muß, reicht diese relativ geringe Leistung des Wankelmotors für den Betrieb des Fahrzeugs aus. Kurzfristige Leistungsspitzen (z.B. für Überholvorgänge) werden durch die Batterie gedeckt.

6.2.2.10 Split-Hybrid

Der Split Hybrid basiert auf den Strukturen von parallelem und seriellen Hybrid. Es können dabei die folgenden zwei Bauarten unterschieden werden [34, S.69]:

- Kombiniertes Hybrid
- Leistungsverzweigendes Hybrid

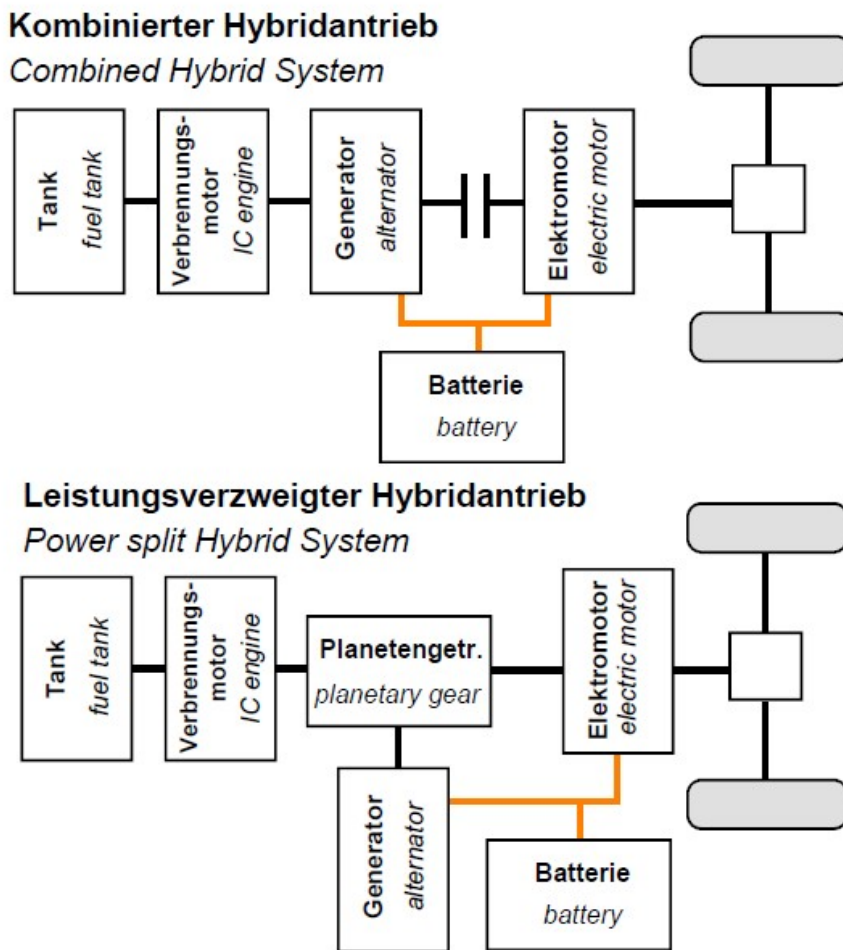


Abbildung 6.8: Kombiniertes und Leistungsverzweigendes Hybrid
 Quelle: [40].

Beim Kombinierten Hybrid besteht die Möglichkeit, durch das Öffnen oder Schließen einer Kupplung zwischen paralleler und serieller Betriebsweise zu wählen.

Beim Leistungsverzweigenden Betrieb sind mechanische und elektrische Leistungsübertragung gleichzeitig möglich und optimal kombinierbar. Der Split Hybrid bietet durch seine Freiheitsgrade somit die besten Voraussetzungen für die Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen.

Abbildung 6.8 zeigt die beiden möglichen Anordnungen des Split Hybrid.

6.2.3 Eigenschaften der unterschiedlichen Hybrid Ausführungen

Hybridantriebe im Allgemeinen und Elektrohybride im Speziellen bieten gegenüber herkömmlichen Fahrzeugantrieben folgende prinzipielle Vorteile [34, S.67]:

- wirkungsgradgünstigerer Betrieb des Verbrennungsmotors möglich
- abgasfreier und geräuschreduzierter Betrieb in Ballungszentren möglich

- reduzierter Energieverbrauch durch Nutzbremmung (Rekuperation)
- „Zutanken“ von elektrischer Energie reduziert Bedarf an Treibstoffen für den Verbrennungsmotor

Den Vorteilen stehen folgende, zum Teil gravierende Nachteile gegenüber:

- komplexe Regelungstechnik notwendig
- erhöhte Herstellkosten der Fahrzeuge
- hohe Batteriekosten

Grundsätzlich lassen sich die verschiedenen hier behandelten Elektrohybridkonzepte durch den

- Grad der Elektrifizierung
also der Ergänzung oder der vollständige Ersatz der VKM durch einen oder mehrere E-Motoren, sowie nach der
- Struktur und Anordnung der Komponenten einteilen.

Energie- und Treibstoffverbrauch:

Vor allem im Teillastbereich haben herkömmliche VKM sehr geringe Wirkungsgrade. Ideale Einsatzgebiete von Hybrid- und Elektrofahrzeugen sind einerseits somit Anwendungen mit hohen Anteilen an Stop-and-Go Manövern zur Rekuperation (Rückgewinnung) von Bremsenergie und andererseits Fahrten mit geringer Beanspruchung (Last) des Verbrennungsmotors, hier kann die Verbrennungskraftmaschine (VKM) durch die E-Maschine ersetzt werden.

Start-Stopp Automatik:

Start-Stopp-Automatik bedeutet, dass der Verbrennungsmotor bei Fahrzeugstillstand (z.B. vor einer roten Ampel) abgestellt und vollautomatisch wieder gestartet wird, sobald der Fahrer weiterfahren möchte. Der Treibstoff der normalerweise im Leerlauf unnötig verbrannt würde, kann mit dieser relativ einfachen Maßnahme eingespart werden.

Rekuperation:

Die Rückgewinnung eines möglichst großen Teils der Bewegungsenergie des Fahrzeuges beim Bremsen wird Rekuperation genannt. Der Vorteil ist, dass die Bewegungsenergie nicht durch Reibung zwischen Bremscheiben und Bremsbelägen in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben und somit nicht mehr nutzbar ist, sondern im Fahrzeug gespeichert wird und beim nächsten Beschleunigungsvorgang wieder genutzt werden kann.

Je nach Ausführung des Hybridantriebes kann diese Energie als Druck-, kinetische- oder elektrische Energie gespeichert werden.

Reichweite:

Sehr bedeutende Faktoren bei der Betrachtung der Reichweite von Elektrofahrzeugen sind die Nebenaggregate und deren Wirkungsgrade. Durch das Nicht-Vorhandensein eines Verbrennungsmotors müssen sämtliche Nebenverbraucher ebenfalls mit Energie aus der Batterie versorgt werden [38, S.19].

Ein Vergleich der Reichweiten eines Elektrofahrzeugs abhängig vom Betrieb zusätzlicher elektrischer Verbrauchern (Licht, Scheibenwischer, Klimaanlage und Heizung) ergibt Reichweitenverluste von über 50 % der theoretischen Reichweite, siehe [41, S.4].

6.2.4 Energiespeicherung bei elektrifizierten Antrieben**6.2.4.1 Batterie**

Die Batterie ist die Schlüsseltechnologie und zugleich der Flaschenhals bei der Elektrifizierung von KFZ. Einerseits ist sie bezüglich der Energiedichte den flüssigen Treibstoffen weit unterlegen, andererseits sind die Kosten pro kWh Speichervermögen zur Zeit sehr hoch.

Bei den Batterien für den Fahrzeugeinsatz gibt es in Anlehnung an [42, S.96], [34] und [35, S.105] unter anderem folgende Systeme:

1. Blei-Batterien (Pb/PbO_2)
2. Nickel-Cadmium-Batterien ($NiCd$)
3. Nickel-Metallhydrid-Batterien ($NiMH$)
4. Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperatur-Batterien ($Na/NiCl_2$)
5. Lithium-Ionen-Batterien ($Li - Ion$)
6. Lithium-Schwefel-Batterie

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie NiMH stellt momentan die Standardenergiespeichertechnologie für Hybridfahrzeuge dar und auch wird in den bisher entwickelten Elektrofahrzeugen vorzugsweise eingesetzt. NiMH-Batterien zeichnen durch eine relativ hohe Leistungsdichte, Zyklfestigkeit und Lebensdauer bei vernachlässigbaren Sicherheitsrisiken aus. Diese Technologie stellt die Grundlage für marktfähige Hybridfahrzeuge wie den Toyota Prius dar.

Angesichts der im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien wesentlich geringeren Energiedichte von NiMH-Batterien und den nur geringen technologischen Entwicklungspotentialen, wird der Einsatz dieser Technologie für BEV und PHEV mit größerer Reichweite in [35, S.105] als unwahrscheinlich bewertet. Ein Fahrzeug mit einer elektrischen Reichweite von 100- 150 km auf Basis einer NiMH-Batterie mit 30 kWh würde laut den Berechnungen in [35, S.105] ein Zusatzgewicht von 540 bis 600 kg haben.

Die Li-Io-Batterie ist die jüngste Entwicklung und stellt neben Metall-Hydrid-Batterien eine der vielversprechendsten Technologien für künftige Batteriesysteme dar [34, S.46], [35, S.105]. In Tabelle 6.3 sind die wichtigsten technischen Daten von Li-Io-Zellen in Abhängigkeit ihres Einsatzgebietes dargestellt:

Tabelle 6.3: Technische Kenndaten von Lithium-Ionen-Batterien

	Elektrofahrzeugbatterie	Hybridfahrzeugbatterie
Spezifische Energie [Wh/kg]	100	70
Spezifische Leistung [W/kg]	200	2000
Energiedichte [Wh/l]	250	150
Leistungsdichte [W/l]	500	4200

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [34].

Durch die elektrochemisch bedingte höhere Spannung von Lithium-Ionen-Zellen im Vergleich zu den anderen Technologien können Li-Ion-Batterien wesentlich höhere Energiedichten erzielen bzw. ermöglicht dies den Aufbau eines Batterieverbandes mit einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Einzelzellen. Weitere Vorteile dieses Batterietyps sind die relativ hohe Zyklenfestigkeit und lange Lebensdauer sowie die geringe Selbstentladungsrate [35, S.105].

Bislang erzielte Energie- und Leistungsdichten von Li-Ionen-Batterien erfüllen bereits die Mindestanforderungen (siehe [35, S.108]) für kleine und mittlere BEV sowie für PHEV mit geringer elektrischer Reichweite bei einer nur mäßigen Steigerung des Fahrzeuggewichts. Vor allem die hohen Kosten haben den Markteintritt dieses Batterietyps bisher verzögert, die prognostizierten Kostendegressionen in Abhängigkeit der Produktionsmenge variieren beträchtlich, siehe [35, S.105].

Weitere Informationen zur Energiedichte, Leistungsdichte und der Lebensdauer von Batterien werden in [43] und [34] erläutert.

In Zukunft werden im Automobilssektor hauptsächlich die NiMH- und Li-Ion-Technologie zum Einsatz kommen. Bei NiMH-Batterien steht dabei nach Ansicht von [35, S.106] eine weitere Kostenminderung bei der Herstellung und eine Ausrichtung auf den HEV-Massenmarkt im Fokus, Li-Ion-Batterien werden als Alternativtechnologie entwickelt und kurzfristig Marktreife erlangen. Eine detaillierte technische Übersicht über aktuelle Batterietechnologien und deren Eigenschaften wurde von einer mehrköpfigen Expertenrunde in [42, S.96] erstellt.

Auch wenn die Batterieentwicklung große Fortschritte macht muß allerdings festgehalten werden, dass auch die Energiedichte der modernsten Batterien um mindestens eine Größenordnung derzeitigen Kraftstoffen unterlegen ist [38, S.5].

6.2.4.2 Kondensatoren (SuperCaps)

Als SuperCaps werden Hochleistungskondensatoren für den Einsatz in Hybridfahrzeugen bezeichnet. SuperCaps weisen immer dann Einsatzpotential auf, wenn große Leistungen über einen kurzen Zeitraum gespeichert oder umgekehrt zur Verfügung gestellt werden müssen. Supercaps bieten sich aufgrund ihrer Eigenschaften für Power-Assist Realisierungen an, d.h. die Spitzenlasten des Antriebs werden nach Möglichkeit aus dem Kondensator bereitgestellt während die niederen Durchschnittslasten aus der Batterie entnommen werden [34, S.60]. Die Deckung der Spitzenlasten hat eine enorme Lebensdauererlängerung der Batterien zu Folge.

6.2.4.3 Ladedauer und Lademöglichkeiten bei Elektrofahrzeugen

Die Möglichkeit zur schnellen Ladung der Batterie ist eine wichtige Forderung bei Elektro- und Hybridfahrzeugen. Bei Elektrofahrzeugen wird die Nutzung allerdings unter anderem durch die Ladedauer beschränkt, ein durchschnittliches Elektrofahrzeug benötigt je nach verfügbarem Stromanschluss (230V oder 400V) zwischen 5 und 14 Stunden [38, S.20] für eine vollständige Aufladung der Batterie.

Ein weiteres wesentliches Kernproblem der Elektromobilität stellt die unzureichende öffentliche Ladeinfrastruktur dar. Es ist derzeit ungeklärt, wie Fahrzeugbesitzer ohne eigene Garage und ohne fixen Stromanschluss ihr Fahrzeug wieder aufladen können [44, S.73], der Aufbau einer großflächigen Ladeinfrastruktur ist mit erheblichen Investitionen verbunden [45, S.13].

Bei Hybridfahrzeugen beruht ein großer Teil der Treibstoffeinsparung auf der elektrischen Rückspeicherung, der Rekuperation der Bremsenergie. Dieser Vorgang erfordert extreme Schnellladefähigkeit [34, S.35].

6.2.5 Kosten alternativer Antriebe und Kundenakzeptanz

Einer der wichtigsten Parameter für die Marktdurchdringung von PHEV und BEV sind die Batteriekosten.

In Tabelle 6.4 sind die prognostizierten Anschaffungskosten eines PKW der unteren Mittelklasse im Jahr 2015 mit herkömmlichem Verbrennungsmotor sowie mit Elektroantrieb ersichtlich. In der dritten Variante (in der Tabelle als „BEV 1“ angeführt) wurde angenommen, dass der Hersteller beim Elektroauto zur Markteinführung auf den Gewinn verzichtet und außerdem die Normverbrauchsabgabe entfällt.

Tabelle 6.4: Anschaffungskosten eines PKW der unteren Mittelklasse im Jahr 2015

Komponente	VKM	BEV 1	BEV 2
Basisfahrzeug ohne Antrieb	€ 12.000	€ 12.000	€ 12.000
Verbrennungsmotor inkl. Peripherie	€ 28/kW	-	-
Kraftübertragung (Getriebe, Kupplung)	€ 8/kW	€ 3/kW	€ 3/kW
Elektromotor inkl. Steuerungselektronik	-	€ 16/kW + € 385	€ 16/kW + € 385
Lithium-Ionen-Akku inkl. Batterie-Managementsystem	-	€ 300/kWh	€ 300/kWh
Selbstkosten (ohne Vertrieb)	€ 15.240	€ 23.000	€ 23.000
Gewinnaufschlag Hersteller	€ 762 5%	€ 0 0%	€ 1150 5%
Vertriebskosten inkl. Händlermarge	€ 3.810 25%	€ 3.450 15%	€ 3.450 15%
Anschaffungskosten exkl. Steuern und Abgaben	€ 19.812	€ 26.450	€ 27.600
Normverbrauchsabgabe (NOVA)	€ 1.387 7%	€ 0 0%	€ 1.932 7%
Mehrwertsteuer	€ 4.240 20%	€ 5290 20%	€ 5.906 20%
Anschaffungskosten inkl. Steuern und Abgaben	€ 25.439	€ 31.740	€ 35.438
Mehrpreis	-	€ 6.301 25%	€ 9.999 39%

VKM = Verbrennungskraftmaschine; BEV = batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle).

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [38, S.17].

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass selbst unter Nichtberücksichtigung des Herstellergewinnaufschlags und der Normverbrauchsabgabe (NOVA) das betrachtete Elektrofahrzeug um mehr als € 6.000.- teurer ist als das Vergleichsfahrzeug mit herkömmlicher Verbrennungskraftmaschine, unter gleichen Voraussetzungen ist das Elektroauto in dieser Berechnung sogar um fast € 10.000.- oder knapp 40% teurer.

Vergleicht man diese Mehrkosten mit den Ergebnissen der Aral-Studie „Trends beim Autokauf 2009“ (siehe [46]), ist mittelfristig kein bedeutender Marktanteil für Elektroautos erkennbar. Nur 1,5 % der befragten Neuwagenkäufer wären laut dieser Studie bereit, einen Mehrpreis von mehr als € 3.000 für neue Antriebstechnologien in Kauf zu nehmen, nur 25 % würden sich mit Reichweiten von 150 km begnügen, siehe [46, S.20ff].

Als Richtwert für aktuelle Batteriekosten gilt laut [47] ein Preis von 1000 Euro pro kWh für Li-Ionen Batterien, weitere Batteriekostenprognosen wurden in [35, S.124f] durchgeführt, für das Jahr 2030 werden Kosten von 150 €/kWh bis 180 €/kWh erwartet während in [37, S.51] ausgehend von 700 €/kWh in 2010 ein Preis von etwa 250 €/kWh im Jahr 2030 ermittelt wird.

6.3 Einsparung durch Verkleinerung der Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände lassen sich, wie in Kapitel 5.2 auf Seite 29 gezeigt, in folgende Einzelwiderstände unterteilen:

- Rollwiderstand
- Luftwiderstand
- Beschleunigungswiderstand
- Steigungswiderstand

6.3.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand ist abhängig von der Fahrzeugmasse und dem Rollwiderstandsbeiwert der Reifen, rollwiderstandsoptimierte Reifen lassen laut [21, S.99] bis zu 5% Verbrauchseinsparungen zu, sie haben bisher aber meist schlechtere Eigenschaften beim Fahrverhalten und beim Bremsweg als normale Reifen [25].

Der Rollwiderstandsbeiwert der Reifen steigt auch bei zu geringem Luftdruck im Reifen, eine Reduzierung des Drucks um 0,3 bar erhöht den Rollwiderstand um bis zu 6%. Untersuchungen auf französischen Straßen haben ergeben, dass über 50% der Fahrzeuge mit zumindest 0,3 bar weniger Druck als vorgeschrieben gefüllt sind. Dies erklärt das Interesse an Technologien, die bei Abweichungen des Reifendrucks vom Sollwert den Fahrer automatisch aufmerksam machen [48, S.18].

Analog dem Einsatz rollwiderstandsoptimierter Reifen bei schweren Nutzfahrzeugen ist deren Einsatz auch bei Bussen möglich, hier sind ähnliche Effekte zu erwarten [35, S.159].

Der Rollwiderstand ist bei schweren Nutzfahrzeugen für etwa ein Drittel des Energieverbrauches verantwortlich, einfachste Maßnahme zur Verringerung ist auch hier eine regelmäßige bzw. automatische Reifendruckkontrolle.

6.3.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand eines Fahrzeugs ergibt sich aus dem Produkt des Luftwiderstandsbeiwerts c_W und der Querschnittsfläche A des Fahrzeuges mit dem Quadrat der Geschwindigkeit v und der Dichte des umströmenden Mediums ς (Luft bei KFZ und Flugzeugen, Wasser bei Schiffen), siehe Abbildung 5.2 auf Seite 30. Nachfolgend werden mögliche Optimierungmaßnahmen bei den verschiedenen Fahrzeugklassen erläutert.

6.3.2.1 Luftwiderstandsverringern bei PKW, LKW und Bussen:

Verbesserungspotentiale in der Aerodynamik von Fahrzeugen sind vor allem in der Verbesserung der Kühlluftführung, in einem strömungsgünstigen Unterboden sowie Detailoptimierungen der Karosserie und bei Außenspiegeln und Spoilern zu sehen [25], [21, S.100]. Auch eine Verringerung der Fahrzeughöhe trägt zur Verbesserung der Aerodynamik bei [35, S.93]. Da der Luftwiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, sind aerodynamische Verbesserungen speziell bei höheren Geschwindigkeiten wirksam.

Im Vergleich zu PKW haben LKW aufgrund ihrer Form einen viel größeren Luftwiderstandsbeiwert, typische Werte sind $c_W = 0,5$ bis $c_W = 0,8$. Um einen 40 Tonnen LKW konstant mit 85 km/h auf ebener Strecke zu bewegen, werden etwa 40% der Leistung für die Überwindung des Luftwiderstandes benötigt. Bisher haben sich Luftleitschilder, abgerundete Aufbaukanten, kleinere Abstände zwischen Fahrerhaus und Aufbau sowie das Anbringen von Seitenverkleidungen als nützliche Mittel bewährt, um den Luftwiderstand zu senken. Weitere Maßnahmen wären neben weiteren Verkleidungen und Spoilern vor allem stromlinienförmige Sattelaufzieger. Allein ein stromlinienförmiger Sattelaufzieger (auch „Teardrop Trailer“ genannt) kann den Luftwiderstand und damit den Kraftstoffverbrauch um 10% reduzieren [43].

Für Omnibusse gelten grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge zwischen der Optimierung des Luftwiderstandes und der Minderung des Verbrauches wie für LKW.

6.3.2.2 Luftwiderstandsverringering bei Schienenfahrzeugen:

Bei den Eisenbahnen betreffen Reduktionen des Luftwiderstandes im Allgemeinen Dach, Seitenverkleidungen, Unterflurbereich und Wagenanordnung. Die künftigen bzw. möglichen Einsparungen am Energiebedarf bei Personenzügen werden in [35, S.174] mit 5% angegeben. Beachtenswert ist die Tatsache, dass bei Güterzügen hingegen bereits durch eine optimierte Wagenanordnung bis zu 10% eingespart werden kann.

6.3.2.3 Luftwiderstandsverringering bei Flugzeugen:

Die Aerodynamik von Tragflächen und der Zelle von Flugzeugen ist mittlerweile stark optimiert, weiteres Verbesserungspotential bieten künftig folgende Baugruppen und aerodynamische Maßnahmen [31, S.19]:

- optimierte Flügeldbaugruppen (Wing-Grids, Wing Tip Turbine und Winglets)
- Riblets, Wirbelgeneratoren und Turbulenzsensoren
- optimierte Bremsklappen
- adaptive Flügel (Profilanpassung an jeweiligen Missionsabschnitt)
- Hybrid Laminar Flow Control (HLFC), d.h. aktive und natürliche laminare Strömungskontrolle, Laminarität der Strömung über dem Flügel durch Ausblasung und Absaugen

Eine zusätzliche Verbesserung wird durch so genannte Laminarhaltung (turbulenzfreie Umströmung) des Flugzeuges erreicht, da turbulente Strömungen wesentlich mehr Widerstand erzeugen als laminare Strömungen. Speziell Tragflügel, Triebwerksgondeln und Leitwerke werden diesbezüglich untersucht und optimiert [8, S.12].

Ein interessanter Ansatz um den Luftwiderstand zu verringern besteht durch Aufbringen von speziellen Mikrostrukturen (so genannten Riblets) auf der Oberfläche von Flugzeugen. Diese Struktur ist der Haifischhaut nachempfunden und hilft dabei, den Reibungswiderstand der Flugzeugrümpfe zu senken.

6.3.2.4 Fahrwiderstandsverringering bei Schiffen:

Eine für den Schiffsverkehr sehr interessante Möglichkeit zur Reibungsminderung zwischen Rumpf und Wasser ist die in [35, S.175] genannte „Luftschmierung“. Dabei soll durch Einbringen von Luftblasen unterhalb des Schiffs eine Widerstandsreduktion erreicht werden, die zu einer Verbrauchsverringering von bis zu 20% führen kann.

6.3.3 Fahrzeugmasse - Beschleunigungs- und Steigungswiderstand

Das Gewicht von Personenkraftwagen in Europa hat sich in den vergangenen 30 Jahren um durchschnittlich 30% erhöht. Die Gründe für diese Gewichtszunahme liegen vor allem in der Weiterentwicklung der Fahrzeuge hinsichtlich der Sicherheit und des Komforts [48, S.17].

Durch den Einsatz neuartiger Bauweisen sowie leichter Werkstoffe kann die Fahrzeugmasse deutlich gesenkt werden. Weniger Masse wirkt sich positiv auf den Rollwiderstand, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand und somit auf den Kraftstoffverbrauch aus [26, S.11ff], dies gilt für PKW gleichermaßen wie für LKW, Busse und Züge. Die Reduzierung des Fahrzeuggewichts ermöglicht in weiterer Folge bei gleich bleibenden Fahrleistungen auch den Einsatz kleinerer und leichter Motoren, dies sorgt wiederum für eine weitere Abnahme der Gesamtfahrzeugmasse [48, S.17], [21, S.90], [26, S.15].

Neuartige und leichte Werkstoffe wie Carbon oder Aluminium sind allerdings zumeist teurer als herkömmliche Stähle, außerdem können sie auch ökologisch (aufgrund des erhöhten Energieeinsatzes bei der Herstellung sein) bedenklich sein. Weitere Informationen über moderne Karosseriebauweisen und den dazu geeigneten Leichtbaumaterialien sind in [26, S.65ff] und [21, S.92ff] nachzulesen.

Bei Flugzeugen wird künftig eine Verbrauchsminderung durch intelligenten Leichtbau an Tragflügeln, Leitwerken und Rümpfen erwartet, siehe dazu [35, S.175] und [8, S.13].

6.4 Einsparung bei Getriebewirkungsgraden und Nebenaggregaten

Durch viele elektrische Hilfsmotoren und Nebenaggregate wird ein beachtlicher Teil der Motorleistung abgezweigt. Hier gilt es, die Funktionen einer bedarfsgerechten Steuerung zu unterziehen (z.B. Servopumpe, Ölpumpe oder Wasserpumpe).

Bei der Getriebetechnik sollen neben den Wirkungsgraden auch die Schaltzeitpunkte und Schaltvorgänge optimiert werden.

Automatisiertes Schaltgetriebe:

Hier bleibt im Kern das manuelle Schaltgetriebe erhalten, Kupplungs- und Schaltvorgänge erfolgen jedoch automatisiert hydraulisch oder elektromotorisch. Dieses Getriebekonzept kann prinzipiell den Bedienkomfort einer konventionellen Automatik bieten und ihn mit dem Verbrauch eines Schaltgetriebes verbinden. Üblicherweise ist dabei eine Verbrauchseinsparung möglich, da einerseits die Schaltvorgänge schneller abgeschlossen sind und andererseits die Last in wirkungsgradgünstige Bereiche des Motors verlegt werden kann.

Stufenloses Automatikgetriebe CVT:

Ein CVT-Getriebe (Continuously Variable Transmission) ermöglicht es, die Drehzahl des Motors durch die vollvariable Übersetzung für einen Großteil der Lasten in einem optimalen Bereich zu halten. Bisher sind CVT Getriebe im PKW-Bereich nur eine seltene Randerscheinung, laut [25] liegt das eventuell am ungewohnten Fahr- und Geräuschverhalten dieser Antriebe.

Nebenaggregate:

Der elektrische Antrieb und die bedarfsgerechte Steuerung von Klimaanlage, Ölpumpe, Wasserpumpe und Servolenkung ermöglicht einerseits Energieeinsparungen, andererseits werden sie durch ihren vom Verbrennungsmotor unabhängigen Betrieb auch in ihrer Funktion aufgewertet.

Thermomanagement:

Ein elektronisch geregeltes Kühlsystem erlaubt einen optimierten Wärmehaushalt und schnellere Erwärmung des Motors, laut [25] wurden bereits Verbrauchseinsparungen von 5% nachgewiesen.

6.5 Zusammenfassung der Einsparungspotentiale

Die obigen Ausführungen geben einen Überblick und zeigen das grundsätzliche Potential einzelner Technologien für bestimmte Einsatzbereiche auf. Bei der Abschätzung des gesamten Reduktionspotentials darf allerdings nicht übersehen werden, dass die Einzelpotentiale nicht einfach aufaddiert werden dürfen.

Einige der Maßnahmen verlieren in der Kombination ihre positiven Effekte, je nachdem welche Technologien miteinander kombiniert werden ergeben sich unterschiedliche Gesamtverbesserungen. Der schlechte Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors in der Teillast wird beispielsweise durch Direkteinspritzung entscheidend verbessert, wohingegen eine intelligente Getriebetechnik und Hybridstrategie den Motor erst gar nicht in diesen Wirkungsgradbereichen betreibt, sondern den Lastpunkt in effizientere Bereiche verschiebt [25]. Die Bandbreite der mögliche Einsparpotentiale kann dabei sehr groß sein, [43] beispielsweise gibt als Summe der Effizienzverbesserungen im LKW-Sektor bis 2030 einen Bereich von 19% bis 36% an.

Aufgrund des Zusammenspiels sehr vieler Einzelfaktoren ist die Ermittlung von künftigen streckenbezogenen Verbräuchen nur durch aufwendige Simulationen möglich. Da die Durchführung solcher Simulationen für alle Fahrzeugkategorien und Fahrzeugklassen den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen würden, werden für die weiteren Berechnungen des Verbrauchs die Ergebnisse aus bereits veröffentlichten Studien verwendet.

Eine weitere Gegenüberstellung einzelner Technologien und deren verbrauchsmindernde Effekte zeigen vom Öko Institut e.V. durchgeführte Berechnungen, siehe [35, S.86].

Kapitel 7

Energiebedarf Verkehrssektor EU 2030

Wie in Gleichung 5.1 auf Seite 27 bereits dargestellt, ergibt sich der Energieverbrauch des Verkehrs aus den Fahrleistungen und dem Streckenverbrauch der Fahrzeuge. Um bei der Ermittlung des Gesamtverbrauchs eine höhere Genauigkeit zu erzielen wird deshalb idealerweise zwischen Personen- und Güterverkehr sowie weiters zwischen unterschiedlichen Fahrzeugarten und Klassen unterschieden.

Um den Energiebedarf des Verkehrssektors der EU bestimmen zu können, müssen daher für jede Fahrzeugart die dazugehörigen Fahrleistungen und der spezifische Verbrauch bekannt sein. Dazu werden in dieser Arbeit die gesamten Fahrleistungen des Güter- und Personenverkehrs der EU 27 in 49 verschiedene Fahrzeugtypen, Klassen und Antriebsvarianten aufgeteilt, diese Aufteilung ist in Abbildung 7.1 ersichtlich.

Jede dieser angeführten Fahrzeugklassen hat somit eine eigene jährliche Fahrleistung bei einem bestimmten Streckenverbrauch und somit einen klar definierten jährlichen Energiebedarf, die Summe der Fahrleistungen entspricht der gesamten Verkehrsleistung des Personen- und Güterverkehrs in der EU 27 im Jahr 2030.

Für den Streckenverbrauch eines Fahrzeuges sind technische Parameter ausschlaggebend, dazu wurden in Kapitel 6 auf Seite 31 die einzelnen Möglichkeiten zur Verbrauchsverbesserung vorgestellt. Die Angaben zu den Verbrauchsverbesserungen galten dabei immer für den alleinigen Einsatz der Technologien.

Für die Berechnung des Energiebedarfs eines gesamten Fahrzeuges sind allerdings Simulationen in Abhängigkeit einer Vielzahl von Parametern notwendig. Da eine Durchführung derartiger Simulationen für die große Anzahl der betrachteten Fahrzeugkategorien (PKW, LKW, Bahn, Schiffe, Flugzeuge) und Klassen (abhängig von Größe, Motorisierung, Masse usw.) in dieser Arbeit aufgrund des enormen Berechnungsaufwandes nicht möglich und für die Beantwortung der Forschungsfrage auch nicht nötig ist, werden in weiterer Folge die Ergebnisse aus verschiedenen Studien und deren Simulationen herangezogen.

Um die Effizienz einzelner Fahrzeugkategorien und -klassen gegenüberstellen zu können, werden die Verbräuche dieser Fahrzeuge häufig als benötigte Treibstoffmenge pro Strecke in [*Liter/km*] oder [*kg/km*] als Vergleichskriterium herangezogen. Da sich unterschiedliche Kraftstoffe allerdings zum Teil sehr stark in ihrem Energiegehalt und ihrer

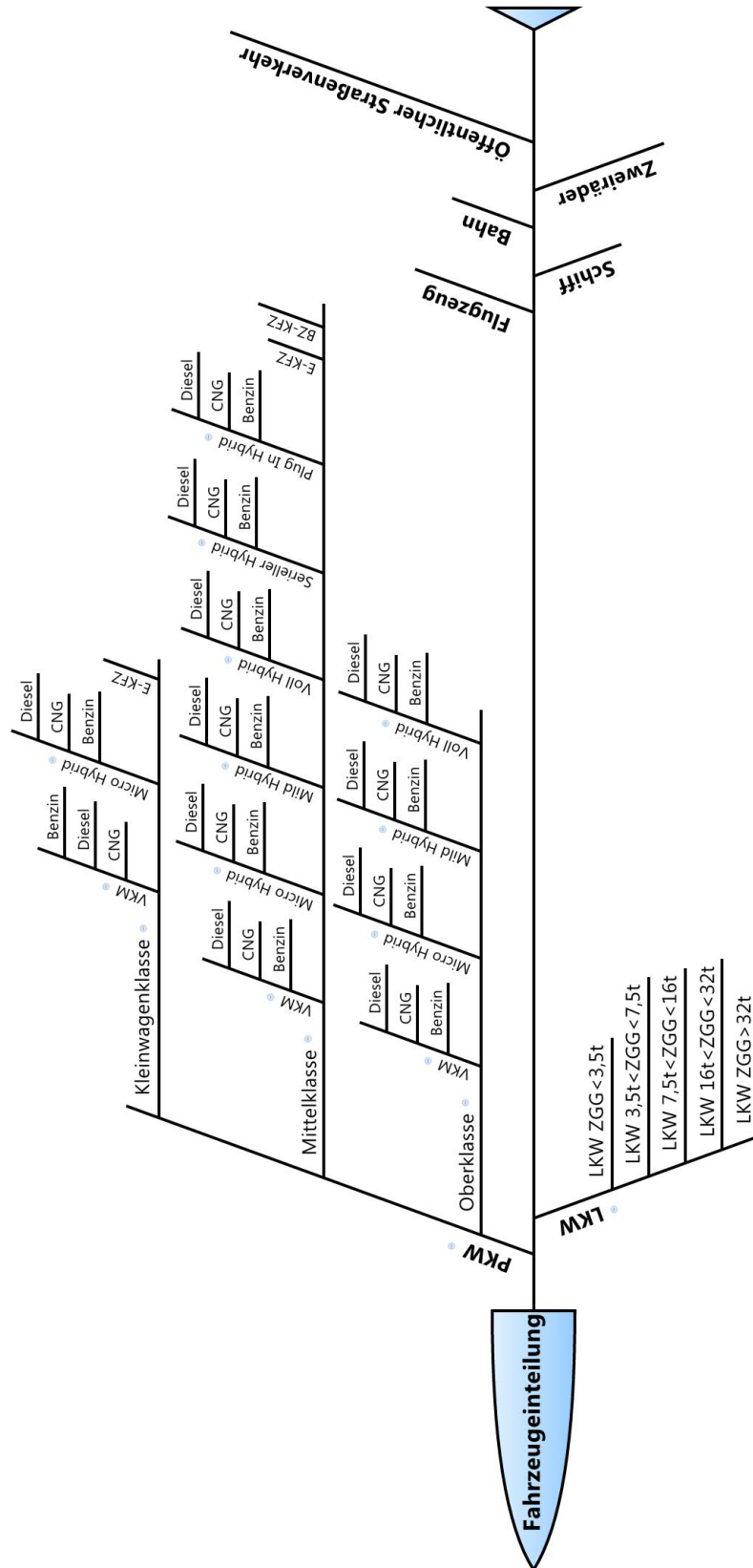


Abbildung 7.1: Fahrzeugeinteilung in Verkehrsträger und Fahrzeugklassen. ZGG = Zulässiges Gesamtgewicht.

Dichte voneinander unterscheiden, ist eine massen- oder volumenbezogene Angabe des Energieverbrauchs vor allem bei den verschiedenen Mischkraftstoffen problematisch.

In dieser Arbeit werden deshalb zum Zweck der besseren Übersicht alle Angaben zum Energiebedarf des Verkehrs und dem Energieangebot der Treibstoffe in Joule [J] bzw. Kilowattstunden [kWh] angeführt. Zur besseren Verständlichkeit und Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten werden diese Angaben zusätzlich in weitere Einheiten wie z.B. [$Liter/km$] oder [kg/km] umgerechnet und angegeben.

7.1 Begriffsdefinitionen

Die in der Energiebedarfsberechnung verwendeten Begriffe werden nachfolgend erläutert:

- **Fahrleistung**
Gibt die Anzahl der gefahrenen Kilometer an. Aus der Fahrleistung eines Transportmittels kann gemeinsam mit dem Verbrauch pro Kilometer der Energieverbrauch bestimmt werden.
- **Verkehrsträger**
Als Verkehrsträger werden in dieser Arbeit PKW, LKW, Schiffe, Züge, Flugzeuge, Öffentlicher Straßenverkehr und Zweiräder bezeichnet.
- **Modalsplit**
Der Modalsplit beschreibt, welchen Anteil die einzelnen Verkehrsträger (z.B. LKW, Schiffe usw.) am Verkehr haben.
- **Passagierkilometer**
Ein Passagierkilometer (Pkm) entspricht dem Transport von einer Person über die Distanz von einem Kilometer.
- **Besetzungsgrad**
Der Besetzungsgrad gibt an, mit wie vielen Personen ein Transportmittel besetzt ist bzw. wie viele Personenkilometer pro Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden können.
- **Tonnenkilometer**
Ein Tonnenkilometer (Tkm) entspricht dem Transport von einer Tonne an Gütern über die Distanz von einem Kilometer.
- **Ladefaktor**
Der Ladefaktor gibt an, mit wie vielen Tonnen an Gütern ein Transportmittel beladen ist bzw. wie viele Tonnenkilometer pro Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden können.

7.2 Fahrleistungen und Modalsplit in 2010 und 2030

Als Grundlage für die Energiebedarfsberechnung der PKW und LKW werden Prognosen zur voraussichtlichen Verkehrsleistung dieser beiden Verkehrsträger im Jahr 2030 aus [49, S.125] und [50] herangezogen.

Die Ergebnisse der Fahrleistungen aus den verwendeten Studien sind als Personenkilometer und Tonnenkilometer ausgewiesen und werden mit den durchschnittlichen Lade-faktoren bzw. Besetzungsgraden der einzelnen Fahrzeugklassen in Fahrzeugkilometer umgerechnet, siehe auch [50, S.34].

$$PKW \text{ Personenverkehr} : \text{Fahrzeugkilometer} = \frac{\text{Passagierkilometer}}{\text{Besetzungsgrad}} \quad (7.1)$$

$$LKW \text{ Güterverkehr} : \text{Fahrzeugkilometer} = \frac{\text{Tonnenkilometer}}{\text{Ladefaktor}} \quad (7.2)$$

Für den PKW Sektor werden diese Verkehrsleistungen mit den Ergebnissen zur Fahrleistungverteilung auf die einzelnen PKW Klassen und den dazugehörigen spezifischen Verbräuchen der PKW Klassen aus der Studie ELEKTRA [37] kombiniert. Die Fahrleistungen im LKW Sektor und deren Verteilung auf die einzelnen LKW Klassen sowie deren spezifische Streckenverbräuche werden aus den Ergebnissen der Studie TREMOVE [50] übernommen.

Der Energiebedarf der verbleibenden Verkehrsträger wird direkt aus [49, S.125] übernommen. Abbildung 7.1 zeigt die Fahrleistungen und den Modalsplit der einzelnen Verkehrsträger für den Personen- und Güterverkehr im Jahr 2030:

Tabelle 7.1: Verkehrsleistung und Modalsplit in der EU-27 in den Jahren 2010 und 2030

Verkehrssektor	Einheit	2010	2030
Gesamte Personentransportleistung	[GPkm]	6.511,3	8.389,8
Öffentlicher Straßenverkehr	[GPkm]	545,0	641,7
Privater PKW Straßenverkehr	[GPkm]	4.711,1	5.806,7
Privater Zweirad Straßenverkehr	[GPkm]	155,0	197,2
Bahn	[GPkm]	482,5	643,1
Flugzeug	[GPkm]	576,9	1.054,9
Schiff	[GPkm]	40,8	46,2
Gesamte Gütertransportleistung	[GTkm]	2.662,6	4.158,9
LKW	[GTkm]	1.940,3	3.237,2
Bahn	[GTkm]	440,5	579,6
Schiff	[GTkm]	281,9	342,2

GPkm = Gigapersonenkilometer; GTkm = Gigatonnenkilometer.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [49, S.125], [51], [50].

7.3 Energiebedarf des PKW-Verkehrs

Wie oben erwähnt, wird der Energiebedarf des PKW Verkehrs mit Daten aus [51], [49, S.125] und der Studie „ELEKTRA“ [37] berechnet.

In der sehr detaillierten Studie „ELEKTRA“, welche von der Technischen Universität Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft gemeinsam mit der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH und der AVL List GmbH durchgeführt wurde, sind verschiedene Antriebssysteme von PKW mit unterschiedlichem Grad der Elektrifizierung untersucht worden [37].

Ziel der technischen Analyse in „ELEKTRA“ ist es, für die definierten Fahrzeuge in den unterschiedlichen Fahrzeugklassen Aussagen über Wirkungsgrade, Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen in festgelegten Fahrzyklen zu machen [37, S.19]. Zu diesem Zweck wurden in der genannten Studie die unterschiedlichen Fahrzeugklassen und Antriebssysteme sowie verschiedene Kombinationen mit dem Programmpaket AVL Cruise simuliert.

Folgende acht Antriebe wurden aus technischer, ökologischer und ökonomischer Sicht in „ELEKTRA“ analysiert:

- konventionelle Verbrennungsantriebe
- Micro Hybride
- Mild Hybride
- Voll Hybride
- Plug-In Hybride
- Serielle Hybride
- Elektrofahrzeuge
- Brennstoffzellen-Plug-In Hybride

Anhand von vier Szenarien wurde dabei untersucht, unter welchen Rahmenbedingungen und in welchem Zeitraum eine Einführung elektrischer Antriebssysteme möglich ist und wie sich eine Verbreitung elektrischer Antriebe auf die Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch des PKW-Sektors auswirkt, die Studie berücksichtigt dabei einen Zeitraum von 2010 bis 2050.

Die Szenarien werden durch die beiden Parameter Rohölpreis und Politik bestimmt:

- Rohölpreis niedrig
Ausgehend vom Niveau 2009 wird ein moderater Anstieg (um 30%) der realen Treibstoffpreise für den Zeitraum 2010 bis 2050 angenommen (z.B. Benzin 2010: 0,059€/kWh; Benzin 2050: 0,08€/kWh).
- Rohölpreis hoch
Ausgehend vom Niveau 2009 wird ein starker Anstieg (etwa 70%) der realen Treibstoffpreise bis 2050 angenommen (z.B. Benzin 2010: 0,059€/kWh; Benzin 2050: 0,1€/kWh).
- Politik business as usual
Dabei geht man davon aus, dass es im Vergleich zu 2009 nur geringe Veränderungen bei NOVA, KFZ-Steuer und Mineralölsteuer geben wird, wichtigste Maßnahme ist höhere Besteuerung von Erdgas.

- Politik aktiv

Es wurde angenommen, dass die Politik stark zugunsten effizienter Antriebe eingreift. Dies geschieht unter anderem durch steuerliche Maßnahmen, die auf eine Minimierung der Treibhausgasemissionen abzielen. Beispielsweise wird die Mineralölsteuer schrittweise erhöht, biogene Kraftstoffe werden im Vergleich zu fossilen steuerlich begünstigt.

Mit diesen Annahmen ergeben sich in [37, S.56] somit folgende Szenarien:

- Szenario A: Niedriger Ölpreis, kaum politische Interventionen bis 2050
- Szenario B: Hoher Ölpreis, kaum politische Interventionen bis 2050
- Szenario C: Niedriger Ölpreis, aktives Eingreifen der Politik
- Szenario D: Hoher Ölpreis, aktives Eingreifen der Politik

Um die unterschiedlichen Antriebssysteme miteinander vergleichen zu können wurden ausgehend von statistischen Daten der österreichischen Fahrzeugflotte 3 Fahrzeugklassen mit unterschiedlichen Grundparametern (Leistung, Gewicht, Reichweite etc.) modelliert. Je nach Szenario ergeben sich dabei unterschiedliche Anteile der verschiedenen Varianten am Gesamtbestand und unterschiedliche Fahrleistungen einer Klasse. Dies hat in weiterer Folge Auswirkungen auf den Energie- und Treibstoffverbrauch des PKW-Sektors.

Da in der vorliegenden Arbeit das künftige Potential alternativer Treibstoffe untersucht werden soll, werden in weitere Folge nur Daten aus dem Szenario D verwendet, dieses Szenario fördert die Verbreitung alternativer Antriebe und Treibstoffe naturgemäß stärker als die anderen drei.

Die Fahrzeuge des Jahres 2010 wurden dabei direkt aus den statistischen Daten abgeleitet, für Wirkungsgradpotentiale einzelner Komponenten im Jahr 2050 haben die Autoren eine Expertenabschätzung durchgeführt, Details dazu siehe Kapitel 7.3.2.

Für die vorliegende Arbeit wurden einerseits die technischen Analysen und Definitionen der PKW-Referenzfahrzeuge von ELEKTRA verwendet und die spezifischen Verbräuche und Wirkungsgrade auf das Jahr 2030 umgerechnet.

Andererseits wurden die Ergebnisse der Studie über die Verteilung der Fahrzeugklassen und Antriebsarten am gesamten Fahrzeugbestand repräsentativ für die gesamte EU-PKW-Fahrzeugflotte verwendet und in weiterer Folge in eine Verteilung der Gesamtfahrleistung auf die einzelnen Klassen und Antriebsarten umgerechnet.

Durch diese Verteilung der gesamten Fahrleistung des PKW Verkehrs der EU im Jahr 2030 auf 39 repräsentative PKW Fahrzeugklassen und Antriebsarten läßt sich in Kombination mit den spezifischen Verbräuchen der 39 Varianten der gesamte Bedarf an Treibstoff gut abbilden.

Es wird an dieser Stelle weiters angenommen, dass sich die technische Entwicklung der Fahrzeuge zwischen den (in ELEKTRA berechneten) Jahren 2010 und 2050 linear darstellt und sich der Stand der Technik bezüglich Verbrauch, Emissionen usw. für das Jahr 2030 als Mittelwert interpolieren läßt.

Mit diesen Annahmen ist in Kombination mit den jeweiligen Fahrleistungen der einzelnen Klassen eine sehr detaillierte Aufschlüsselung des Energieverbrauchs im PKW Sektor möglich, es lassen sich somit verschiedene Möglichkeiten zur Verbrauchsminderung sowie deren technologische Grenzen gut erkennen.

7.3.1 PKW Fahrzeugklassen und Referenzfahrzeuge

Aus ELEKTRA wurden folgende Fahrzeugklassen übernommen [37, S.14]:

- Kleinwagenklasse
- Mittelklasse
- Oberklasse

Die Fahrzeugklassen sind dabei im Wesentlichen über Gewicht und Leistung definiert, zur Festlegung dieser Parameter erfolgte in Anlehnung an Statistiken der PKW Neuzulassungen in Österreich. Zusätzlich unterscheiden sie sich durch die angebotenen Antriebsvarianten.

7.3.1.1 Kleinwagenklasse

Diese Klasse wird definiert durch Motorleistungen von 50 kW und ein Gewicht von maximal 1.000 kg. Bei diesen kleinen Fahrzeugen sind komplexe Hybridantriebe aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nicht darstellbar, die Untersuchung wird somit auf folgende Antriebe beschränkt:

- Konventioneller Antrieb mit Verbrennungsmotor
- Micro Hybrid
- Elektrofahrzeug

7.3.1.2 Mittelklasse

In der Mittelklasse wird das Referenzgewicht auf maximal 1.470 kg festgelegt und die Leistung auf 75 kW. In dieser Klasse wird das ganze Spektrum an Antriebssystemen untersucht:

- Konventioneller Antrieb mit Verbrennungsmotor
- Mikro Hybrid
- Mild Hybrid
- Voll Hybrid
- Plug In Hybrid
- Serieller Hybrid
- Elektrofahrzeug
- Brennstoffzellen Plug In Hybrid

7.3.1.3 Oberklasse

Hier werden schwere und leistungsstarke Fahrzeuge zusammengefasst. Das Referenzgewicht wurde auf 2.000 kg und die Leistung auf 120 kW festgelegt.

Durch das hohe Gewicht der Fahrzeuge in diesem Segment sind Elektrofahrzeuge und Plug In Hybride technisch und wirtschaftlich schwer umsetzbar. Aus diesem Grund wurden in ELEKTRA für die Oberklasse nur folgende Antriebe berücksichtigt:

- Konventioneller Antrieb mit Verbrennungsmotor
- Micro Hybrid
- Mild Hybrid
- Voll Hybrid

7.3.2 PKW Ergebnisse der technischen Analyse

In den Tabellen 7.2, 7.3 und 7.4 sind die technischen Daten, Wirkungsgrade und spezifischen Verbräuche der einzelnen Fahrzeugklassen und Antriebsarten zusammengefasst. Wie oben erwähnt, wurden die unterschiedlichen Antriebsstränge mit dem Programmpaket AVL Cruise simuliert. Die Daten für die Jahre 2010 und 2050 stammen aus der Studie „ELEKTRA“ [37], die Daten für das Jahr 2030 wurden an dieser Stelle daraus abgeleitet.

Die Fahrzeuge wurden in „ELEKTRA“ mit den beiden Fahrzyklen NEDC (New European Driving Cycle) und ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) simuliert, die Ergebnisse der beiden Fahrzyklen wurden gemäß ihrer Streckenlänge gewichtet und zu einem kombinierten Fahrzyklus zusammengefasst [37, S.20]. Der kombinierte Zyklus setzt sich folgendermaßen zusammen [52, S.3]:

$$\text{Kombinierter Zyklus} = \frac{(50 * Artemis + 11 * NEDC)}{61 \text{ Zyklen}} \quad (7.3)$$

Für die Randbedingungen der Simulationen der Jahre 2010 und 2050 wurden in „ELEKTRA“ bei einigen Komponenten Expertenabschätzungen bezüglich der künftigen Eigenschaften und Wirkungsgrade durchgeführt. Folgende Annahmen wurden dabei getroffen:

- Batterien

Es werden ausschließlich Li-Ionen Batterien untersucht, dieser Technologie wird sowohl für Hybrid- als auch reine Elektrofahrzeuge das höchste Potential zugeschrieben. Es wurde davon ausgegangen, dass 2010 bei auf Energiedichte optimierten Batterien eine spezifische Energie von 100 Wh/kg und bei auf Leistung optimierten Batterien eine spezifische Leistung von 2.000 W/kg erreicht wird. Für den Zeitraum bis 2050 wurde angenommen, dass sich diese Werte verdoppeln, was zu einer Halbierung des Batteriegewichts in den Fahrzeugen führt.

- Brennstoffzelle

Im Jahr 2010 stellt die Brennstoffzelle eine noch recht unausgereifte Komponente mit hohem Gewicht und Platzbedarf dar (vor allem durch die Wasserstofftanks). Bis 2050 wird angenommen, dass das gesamte System (Brennstoffzelle und Wasserstofftank)

auf eine gemeinsame, kompakte Einheit reduziert werden kann, welche als Range Extender für Plug In Hybride zum Einsatz kommt.

- Otto VKM

Künftige Motoren im PKW-Sektor werden generell mit Direkteinspritzung betrieben und dabei hochaufgeladen sein. Um die strengen Abgasvorschriften zu erfüllen, wird ein 4-Wege Abgasnachbehandlungssystem erforderlich sein damit die Emissionen von Stickoxiden NO_x , Kohlenmonoxid CO , unverbrannten Kohlenwasserstoffen HC sowie Partikeln PM die Grenzwerte nicht übersteigen.

Das Verbrennungsverfahren wird sich in bestimmten Lastbereichen dem Dieserverfahren annähern („Controlled Auto Ignition“). Das Verdichtungsverhältnis wird leicht angehoben auf 13:1 bis 14:1. Die Verbrauchsverbesserungspotentiale gegenüber 2010 ergeben sich im Jahr 2050 folgendermaßen:

- 4% aus Downsizing und automatisiertem Getriebe
- 4% aus Abgasnachbehandlung und Brennverfahren
- 5% aus Verdichtungsverhältnis und reduzierter Reibung

Insgesamt ergibt sich also laut [37, S.24] für die Ottomotoren ein Wirkungsgradpotential von etwa 13% bis 2050, unter der Annahme einer linearen Entwicklung entspricht das einem Potential von 6,5% bis 2030.

- Diesel VKM

Bei Dieselmotoren ist generell von einem geringeren Potential als bei Benzinmotoren auszugehen, siehe dazu auch Kapitel 6.1.1.3. Ein Grund dafür ist der bereits jetzt schon sehr gute Teillastwirkungsgrad. Künftige Motoren werden hochaufgeladene Direkteinspritzer mit sehr hohem Einspritzdruck sein, weiters werden die Motoren zumindest in gewissen Bereichen der Teillast mit alternativen Verbrennungsverfahren wie z.B. HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition, siehe auch Kapitel 6.1.1.4) arbeiten. Typische Verdichtungsverhältnisse sind in „ELEKTRA“ für das Jahr 2050 mit etwa 16:1 veranschlagt, zur Erfüllung der Emissionsvorschriften werden ebenfalls 4-Wege Abgasnachbehandlungssysteme notwendig sein [37, S.24]. Das Verbrauchsverbesserungspotential für 2050 ergibt sich wie folgt:

- 2% aus Abgasnachbehandlung
- 3% aus Reibung und Aufladung
- 2% aus Getriebe und Downsizing

Insgesamt ergibt sich also für den Dieselmotor ein Optimierungspotential von 7% im Jahr 2050 bzw. 3,5% im Jahr 2030, dies ist deutlich weniger als beim Ottomotor.

- CNG VKM

Für Gasfahrzeuge wurden ähnliche Maßstäbe wie für Fahrzeuge mit Ottomotor angewandt da der Gasmotor prinzipiell mit ottomotorischen Verbrennungsverfahren betrieben wird. Zusätzlich gilt dies für das Verbesserungspotential durch Hybridisierung. Zukünftige Gasmotoren werden somit meist mit Direkteinblasung und

zweistufiger Aufladung betrieben werden. Das Wirkungsgradpotential liegt wie beim Ottomotor bei etwa 13% im Jahr 2050 bzw. 6,5% im Jahr 2030.

- Getriebe

Die Getriebe werden verstärkt automatisiert sein, um das entsprechende Verbrauchsverbesserungspotential der Motoren (d.h. die fahrerunabhängige Wahl des jeweils verbrauchsoptimalen Motorlastpunktes) nutzen zu können

- Hybridfahrzeuge

Entscheidend für das Verbesserungspotential von Hybridantrieben ist die Kombination der Einzelwirkungsgrade der Batterien, der Konverter und Inverter, der elektrischen Maschinen sowie der Rekuperationswirkungsgrad beim Bremsen. Für 2010 wurde ein Rekuperationsgrad von 66% angenommen. Bis 2050 wird dieser Wert auf 85% erhöht, d.h. 60% bzw. 85% der Energie eines durchschnittlichen Bremsvorganges werden statt in Verlustwärme in elektrische Energie umgewandelt und stehen anschließend wieder zur Nutzung für den E-Motor bereit. Die Wirkungsgrade der elektrischen Komponente Batterie wurde mit 97% angegeben, jene von Generator bzw. Motor mit jeweils 95% [37, S.25].

- Batteriefahrzeuge

Da in reinen Batteriefahrzeugen dieselben elektrischen Komponenten eingesetzt werden wie in Hybridfahrzeugen, wurden für beide Fahrzeugarten die gleichen Wirkungsgrade für die Komponenten Motor, Generator, Wandler und Batterie, sowie auch den Rekuperationswirkungsgrad angenommen.

- Brennstoffzellenfahrzeug

In [37, S.26] wird davon ausgegangen, dass bei der Brennstoffzellentechnologie großes Verbesserungspotential gegenüber dem heutigen Stand der Technik vorhanden ist. Einerseits gilt das gesamte Potential der Hybridantriebe, andererseits kann auch die Brennstoffzelle selbst noch weiter verbessert werden. Die einzelnen Anteile am gesamten Verbesserungspotential der Brennstoffzelle bis 2050 wurden wie folgt bewertet:

- 3% durch Stromdichte (Verbesserung innerhalb der Zelle)
- 8% durch Verbesserung der Leistungselektronik
- 3% durch Verbesserung der Nebenaggregate

Insgesamt ergibt sich für die Brennstoffzelle ein Verbesserungspotential von 14%, bei linearer Entwicklung wären dies 7% bis zum Jahr 2030.

- Fahrzeuggewicht

Durch leistungsstärkere Komponenten und Leichtbau wird ein hohes Einsparpotential gesehen. Obwohl derzeit das Durchschnittsgewicht der neu zugelassenen Fahrzeuge in fast allen Ländern kontinuierlich ansteigt wird von einer Trendwende in nächster Zeit ausgegangen. Ein Teil der künftigen Gewichtseinsparung wird durch zusätzliche Komfortfunktionen des PKW allerdings wieder kompensiert.

Selbstverständlich ist zu berücksichtigen, dass ein Ausblick in das Jahr 2030 oder 2050 mit Unsicherheiten behaftet ist, dies gilt sowohl für die hier behandelte technische Entwicklung der Antriebe als auch bei der Abschätzung des künftigen Treibstoffverbrauchs oder dem Angebot an alternativen Treibstoffen.

7.3.3 PKW Fahrleistungsverteilung im Jahr 2030

In [53] wird der in [37] simulierte PKW Bestand für das Jahr 2030 und das Szenario D (hoher Ölpreis, Politik aktiv) für jede einzelne der 39 untersuchten PKW Varianten angegeben. Zusätzlich sind die Fahrzeuge nach jährlichen Fahrleistungen unterteilt. Aus diesen Angaben über PKW-Bestand und spezifischer Fahrleistung wird in der vorliegenden Arbeit die prozentuelle Verteilung der Fahrleistung auf die einzelnen PKW Varianten ermittelt. Diese Verteilung wird repräsentativ für die gesamte EU PKW-Flotte zur Verbrauchsberechnung herangezogen.

Ein Vergleich der beiden grundsätzlich verschiedenen Szenarien A und D der Studie ELEKTRA zeigt folgende wichtige Erkenntnis:

Aufgrund der trägen Flottenerneuerung dauert es in jedem Fall noch mehrere Jahrzehnte, bis es zu tiefgreifenden technischen Verschiebungen innerhalb des PKW Sektors kommt. Nennenswerte Anteile rein elektrischer Fahrzeuge an der Fahrzeugflotte sind daher auch unter besten Bedingungen nicht vor 2025 zu erwarten, siehe dazu [37, S.83].

Ausgehend von den in Kapitel 6.2.5 auf Seite 53 dargestellten Überlegungen werden nach Meinung des Autors auch im Jahr 2030 Verbrennungsmotoren weiterhin die überwiegende Hauptantriebsquelle in den Fahrzeugen sein. Dies deckt sich einerseits mit den Einschätzungen der Europäischen Kommission in [1, S.25], andererseits auch mit den Ergebnissen der Fahrleistungsverteilung in „ELEKTRA“ und der daraus für diese Arbeit abgeleiteten EU-weiten Fahrleistungsverteilung. In dieser Fahrleistungsverteilung werden, wie in den Tabellen 7.2, 7.3 und 7.4 ersichtlich, den Elektrofahrzeugen weniger als 25% der Fahrleistungen im Kleinwagensegment zugerechnet, in den beiden größeren PKW-Klassen werden fast keine Fahrzeugkilometer mit reinen Elektrofahrzeugen zurückgelegt. Auf den gesamten PKW Verkehr umgelegt, ergibt sich ein Anteil der Fahrleistungen (in Fahrzeugkilometern) reiner Elektrofahrzeuge von ca. 6%.

Im Gegensatz dazu werden sich vor allem Micro- und Mild Hybride mit einem Verbrennungsmotor relativ rasch am Markt durchsetzen können, wie [37, S.74] zeigt.

Weiters ist zu bemerken, dass geänderte politische Rahmenbedingungen anscheinend stärkere Auswirkungen auf die Neuzulassungen und in weiterer Folge auf den Bestand der Fahrzeugflotte haben als gestiegene Rohölpreise [37, S.107].

7.3.4 Energiebedarf des PKW Personenverkehrs im Jahr 2030

Die Berechnung des Energiebedarfs des PKW Verkehrs, die zugrunde liegenden technischen Daten der Fahrzeuge und vor allem die Ergebnisse der Berechnungen für den PKW Personenverkehr sind in den Tabellen 7.2, 7.3, 7.4 und 7.5 ersichtlich.

In der Analyse wird deutlich, dass mit steigendem Hybridisierungs- bzw. Elektrifizierungsgrad des Antriebes der Verbrauch und die direkten THG-Emissionen reduziert

werden. Von großer Bedeutung ist allerdings der Umstand, dass sich die Vorteile der Hybridisierung von Fahrzeugen hauptsächlich im innerstädtischen Bereich zeigen. Bei Überlandfahrten kann einerseits aufgrund der begrenzten Batteriekapazität kaum auf den Elektromotor als Antrieb zurückgegriffen werden, andererseits kann bei konstant hohen Geschwindigkeiten ohne Bremsmanöver keine Energie rekuperiert werden da diese Verluste erst gar nicht entstehen.

Da die simulierten Emissionen und Verbräuche von Kraftfahrzeugen wesentlich von den zu Grunde gelegten Fahrzyklen abhängen, werden zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien alle drei betrachteten Fahrzyklen (NEDC, ARTEMIS und der daraus kombinierte Fahrzyklus) angegeben.

In Anlehnung an [37] wird bei der Verbrauchsberechnung davon ausgegangen, dass Plug In Hybride (elektrische Reichweite etwa 40 km) 50% ihrer Strecken rein elektrisch zurücklegen können. Serielle Hybridfahrzeuge (elektrische Reichweite 80 km) können 80% der gefahrenen Strecken mit dem Elektromotor bewältigen, für diese Strecken wird elektrische Energie aus dem Stromnetz verwendet aber kein Treibstoff für die Verbrennungsmotoren benötigt.

Insgesamt wird mit diesen Berechnungen ein Energiebedarf von 5.401 Petajoule bzw. 5,4 Exajoule für den gesamten PKW Personenverkehr in der EU 27 im Jahr 2030 ermittelt, der mit Abstand größte Anteil des Bedarfs entfällt auf die PKW Mittelklasse.

Tabelle 7.2: Energiebedarf Personenverkehr PKW Kleinwagenklasse 2030

Fahrzeugklasse	Kleinwagenklasse 2030				E-KFZ			
	Antriebsart		VKM		Micro Hybrid		Gas	
Motorvariante	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Gas	Gas
Fahrzeuginformationen:								
Gemittelttes Gesamtgewicht	kg	985	985	985	985	985	985	985
Leistung Verbrennungsmotor	kW	50	50	50	50	50	50	50
Leistung Elektromotor	kW	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtleistung	kW	50	50	50	50	50	50	50
Batteriekapazität	kWh	0	0	0	0	0	0	0
Reichweite elektrisch	km	0	0	0	0	0	0	0
Reichweite gesamt	km	400	400	400	400	400	400	400
Streckenanteil mit Energie aus Stromnetz	%	0	0	0	0	0	0	0
Frontfläche	m ²	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Luftwiderstandsbeiwert	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Kraftstoffdaten:								
Unterer Heizwert gravimetrisch	kWh/kg	13,3						
Unterer Heizwert volumetrisch	kWh/dm ³	9,9						
Gemittelte Verbrauchsergebnisse:								
NEDC:								
mechanischer Energiebedarf	MJ/km	0,367						
mechanischer Energiebedarf NEDC	kWh/km	0,102						
Fahrzeuwirkungsgrad NEDC	%	23,99%						
Kraftstoffbedarf NEDC	Liter/100km	3,70						
Kraftstoffbedarf NEDC	kg/100km	3,215						
Kraftstoffbedarf NEDC	MJ/km	1,311						
Kraftstoffbedarf NEDC	MJ/km	1,543						
Kraftstoffbedarf NEDC	kWh/km	0,428						
ARTEMIS:								
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	MJ/km	0,526						
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	kWh/km	0,146						
Fahrzeuwirkungsgrad ARTEMIS	%	28,06%						
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	Liter/100km	4,555						
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	kg/100km	3,930						
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	MJ/km	1,887						
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	kWh/km	0,524						
Kombinierter Zyklus:								
mechanischer Energiebedarf Komb. Zyklus	MJ/km	0,497						
mechanischer Energiebedarf Komb. Zyklus	kWh/km	0,138						
Fahrzeuwirkungsgrad Komb. Zyklus	%	27,32%						
Kraftstoffbedarf Komb. Zyklus Benzin	Liter/100km	4,9						
Kraftstoffbedarf Komb. Zyklus Diesel	Liter/100km	4,4						
Kraftstoffbedarf Komb. Zyklus CNG	kg/100km	3,8						
Kraftstoffbedarf kombinierter Zyklus	MJ/km	1,818						
Kraftstoffbedarf kombinierter Zyklus	kWh/km	0,505						
Fahrleistung:								
Fahrzeugglökometer pro Jahr	mio Fkm/a	109,013						
Energiebedarf:								
NEDC:								
Energiebedarf NEDC	PJ/a	168,2						
Energiebedarf NEDC	TWh/a	46,7						
ARTEMIS:								
Energiebedarf ARTEMIS	PJ/a	205,7						
Energiebedarf ARTEMIS	TWh/a	57,1						
Kombinierter Zyklus:								
Energiebedarf kombinierter Zyklus	PJ/a	198,2						
Energiebedarf kombinierter Zyklus	TWh/a	55,0						
Legende:								
		grün = Daten aus Elektra übernommen						
		gelb = Daten aus Elektra abgeleitet						

Quelle: Eigene Berechnung in Anlehnung an [37] und [49, S.125].

Tabelle 7.3: Energiebedarf Personenverkehr PKW Mittelklasse 2030

Fahrzeugklasse	Mittelklasse 2030															
	Antriebsart		VKM		Micro Hybrid		Mild Hybrid		Voll Hybrid		Plug In Hybrid*		Serieller Hybrid**			
Motorvariante	Otto	Gas	Otto	Gas	Otto	Gas	Otto	Gas	Otto	Gas	Otto	Gas	Otto	Gas		
Fahrzeuginformationen:																
Gemittelttes Gesamtgewicht	1385	1385	1385	1385	1385	1385	1360	1360	1385	1385	1385	1385	1385	1385	1360	1360
Leistung Verbrennungsmotor	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	0
Leistung Elektromotor	0	0	0	0	0	0	20	20	50	50	50	50	50	50	75	75
Gesamtleistung	75	75	75	75	75	75	95	95	125	125	125	125	125	125	75	75
Batteriekapazität	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	10	10	20	20	20
Reichweite elektrisch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	40	40	80	80	200
Reichweite gesamt	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	500
Streckenanteil mit Energie aus Stromnetz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	50	80	100
Frontfläche	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Luftwiderstandsbeiwert	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Kraftstoffdaten:																
Unterer Heizwert gravimetrisch	13,3															
Unterer Heizwert volumetrisch	13,3															
Gemittelte Verbrauchsergebnisse:																
NEDC:																
mechanischer Energiebedarf NEDC	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
mechanischer Energiebedarf NEDC	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Fahrzeuggewicht NEDC	22,0%	25,2%	21,9%	27,6%	25,1%	29,1%	31,3%	29,1%	32,1%	33,0%	32,0%	32,0%	32,0%	34,8%	34,8%	60,1%
Kraftstoffbedarf NEDC	5,95	4,87	4,16	5,21	4,45	3,64	3,11	3,11	4,07	3,68	2,85	2,85	2,85	3,74	3,34	2,62
Kraftstoffbedarf NEDC	1,99	1,73	1,99	1,74	1,58	1,75	1,49	1,38	1,49	1,36	1,30	1,37	1,36	1,25	1,18	1,25
Kraftstoffbedarf NEDC	0,55	0,48	0,55	0,48	0,44	0,48	0,41	0,38	0,41	0,38	0,38	0,38	0,38	0,35	0,35	0,15
ARTEMIS:																
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Fahrzeuggewicht ARTEMIS	25,7%	29,2%	25,7%	27,9%	30,8%	27,9%	30,4%	33,3%	30,4%	32,5%	34,6%	32,5%	32,5%	36,7%	38,7%	36,6%
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	6,97	5,76	4,87	6,43	5,47	4,49	5,86	5,01	5,48	4,83	3,81	3,81	3,81	4,89	4,34	2,62
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	2,34	2,04	2,34	2,15	1,94	2,15	1,96	1,77	1,96	1,83	1,71	1,83	1,83	1,64	1,54	1,64
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	0,65	0,57	0,65	0,60	0,54	0,60	0,54	0,49	0,54	0,51	0,47	0,51	0,47	0,51	0,45	0,15
Kombinierter Zyklus:																
mechanischer Energiebedarf komb. Zyklus	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
mechanischer Energiebedarf komb. Zyklus	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Fahrzeuggewicht komb. Zyklus	25,0%	28,5%	25,0%	27,4%	30,2%	27,4%	30,2%	32,9%	30,2%	32,4%	34,3%	32,4%	32,4%	36,3%	36,3%	62,4%
Kraftstoffbedarf komb. Zyklus	6,8	5,6	4,8	6,2	5,3	4,3	4,8	4,8	5,2	4,6	2,3	2,3	2,3	3,6	3,6	2,6
Kraftstoffbedarf komb. Zyklus	2,27	2,00	2,27	2,08	1,88	2,08	1,86	1,71	1,86	1,73	1,64	1,73	1,64	1,54	1,43	1,64
Kraftstoffbedarf komb. Zyklus**	0,63	0,55	0,63	0,58	0,52	0,58	0,52	0,47	0,52	0,48	0,45	0,48	0,45	0,42	0,31	0,00
Kraftstoffbedarf kombinierter Zyklus***																
Fahrleistung:																
Fahrleistung pro Jahr	120.061	333.251	21.496	276.569	332.830	28.889	347.408	319.713	50.307	113.760	73.751	11.211	67.037	30.409	16.209	151.148
Energiebedarf:																
NEDC:																
Energiebedarf NEDC	239,1	575,5	42,8	482,2	524,3	50,4	517,7	439,9	75,0	155,1	96,1	15,3	91,4	39,7	22,1	189,3
Energiebedarf NEDC	66,4	159,9	11,9	133,9	145,6	14,0	143,8	122,2	20,8	43,1	26,7	4,3	25,4	11,0	6,1	52,6
ARTEMIS:																
Energiebedarf ARTEMIS	280,50	681,22	50,24	595,72	644,99	62,21	680,52	567,46	98,47	208,62	126,03	20,56	122,94	51,98	29,72	247,40
Energiebedarf ARTEMIS	77,92	189,23	13,96	165,48	179,16	17,28	188,03	157,63	27,35	57,95	35,01	5,71	34,15	14,44	8,26	68,72
Kombinierter Zyklus:																
Energiebedarf kombinierter Zyklus	273,1	665,2	48,9	574,3	625,7	60,0	646,7	545,2	93,6	197,2	120,6	19,4	58,1	24,9	14,1	46,7
Energiebedarf kombinierter Zyklus	75,8	184,8	13,6	159,5	173,8	16,7	179,6	151,5	26,0	54,8	33,5	5,4	16,1	6,9	3,9	13,0
* Plug In Hybrid können 50% der Strecken rein elektrisch mit Strom aus dem Netz zurücklegen und benötigen nur für die restlichen 50% Kraftstoff																
** Serieller Hybrid können 80% der Strecken rein elektrisch mit Strom aus dem Netz zurücklegen und benötigen nur für die restlichen 20% Kraftstoff																
grün = Daten aus Elektro übernommen																
gelb = Daten aus Elektro abgeleitet																

Quelle: Eigene Berechnung in Anlehnung an [37] und [49, S.125].

Tabelle 7.4: Energiebedarf Personenverkehr PKW Oberklasse 2030

Fahrzeugdaten:	Oberklasse 2030															
	VKM				Micro Hybrid				Mild Hybrid				Voll Hybrid			
	Otto		Gas		Otto		Gas		Otto		Gas		Otto		Gas	
Gemittelttes Gesamtgewicht	kg	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015
Leistung Verbrennungsmotor	kW	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Leistung Elektromotor	kW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtleistung	kW	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Batteriekapazität	kWh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reichweite elektrisch	km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reichweite gesamt	km	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Streckenanteil mit Energie aus Stromnetz zurückgelegt	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frontfläche	m ²	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Luftwiderstandsbeiwert	-	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Kraftstoffdaten:																
Unterer Heizwert gravimetrisch	kWh/kg		13,4													
Unterer Heizwert volumetrisch	kWh/dm ³			9,3		9,3		10,1		13,4		9,3		10,1		13,4
Gemittelte Verbrauchsleistungen:																
NEDC:																
mechanischer Energiebedarf NEDC	MJ/km	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
mechanischer Energiebedarf NEDC	kWh/km	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Fahrgewirkungsgrad NEDC	%	20,12%	22,73%	20,12%	22,44%	22,44%	22,44%	22,44%	22,44%	24,93%	24,93%	24,93%	24,93%	24,93%	29,56%	29,56%
Kraftstoffbedarf NEDC	Liter/100km	8,1	6,6	7,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	4,6	4,6
Kraftstoffbedarf NEDC	kg/100km	2,71	2,39	2,71	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,18	2,18	2,18	2,18	1,85	1,85	1,85
Kraftstoffbedarf NEDC	MJ/km	0,75	0,66	0,75	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,60	0,60	0,60	0,60	0,51	0,51	0,51
ARTEMIS:																
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	MJ/km	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
mechanischer Energiebedarf ARTEMIS	kWh/km	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Fahrgewirkungsgrad ARTEMIS	%	23,54%	27,24%	23,54%	25,19%	25,19%	25,19%	25,19%	25,19%	27,52%	27,52%	27,52%	27,52%	29,11%	29,11%	29,11%
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	Liter/100km	8,9	7,3	8,3	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,6	7,6	7,6	7,6	6,2	6,2	6,2
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	kg/100km	2,99	2,57	2,99	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,54	2,54	2,54	2,54	2,40	2,40	2,40
Kraftstoffbedarf ARTEMIS	MJ/km	0,83	0,71	0,83	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,71	0,71	0,71	0,71	0,67	0,67	0,67
Kombinierter Zyklus:																
mechanischer Energiebedarf kombinierter Zyklus	MJ/km	0,6696	0,6696	0,6696	0,6696	0,6696	0,6696	0,6696	0,6696	0,6642	0,6642	0,6642	0,6642	0,6642	0,6642	0,6642
mechanischer Energiebedarf kombinierter Zyklus	kWh/km	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
Fahrgewirkungsgrad kombinierter Zyklus	%	22,92%	26,43%	22,92%	24,70%	24,70%	24,70%	24,70%	24,70%	27,05%	27,05%	27,05%	27,05%	29,20%	29,20%	29,20%
Kraftstoffbedarf komb. Zyklus Benzin	Liter/100km	8,7	7,1	8,1	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	7,3	7,3	7,3	7,3	6,8	6,8	6,8
Kraftstoffbedarf komb. Zyklus CNG	kg/100km	2,921	2,534	2,921	2,711	2,711	2,711	2,711	2,711	2,456	2,456	2,456	2,456	2,275	2,275	2,275
Kraftstoffbedarf kombinierter Zyklus	MJ/km	0,812	0,704	0,812	0,753	0,753	0,753	0,753	0,753	0,682	0,682	0,682	0,682	0,632	0,632	0,632
Fahrlleistung:																
Fahrzeugkilometer pro Jahr	mio Fkm/a	5,395	25,948	140	10,343	25,621	608	14,125	18,488	1,167	5,111	11,552	377			
Energiebedarf:																
NEDC:																
Energiebedarf NEDC	PJ/a	14,6	62,0	0,4	25,2	57,3	1,5	30,7	36,5	2,5	9,4	19,4	0,7			
Energiebedarf NEDC	TWh/a	4,1	17,2	0,1	7,0	15,9	0,4	8,5	10,1	0,7	2,6	5,4	0,2			
ARTEMIS:																
Energiebedarf ARTEMIS	PJ/a	16,11	66,66	0,42	28,88	63,30	1,70	35,86	41,89	2,99	12,26	24,85	0,90			
Energiebedarf ARTEMIS	TWh/a	4,48	18,52	0,12	8,02	17,58	0,47	9,96	11,64	0,83	3,41	6,90	0,25			
Kombinierter Zyklus:																
Energiebedarf kombinierter Zyklus	PJ/a	15,8	65,8	0,4	28,0	62,1	1,6	34,7	40,9	2,9	11,6	23,8	0,9			
Energiebedarf kombinierter Zyklus	TWh/a	4,4	18,3	0,1	7,8	17,3	0,5	9,6	11,4	0,8	3,2	6,6	0,2			

Quelle: Eigene Berechnung in Anlehnung an [37] und [49, S.125].

Tabelle 7.5: Energiebedarf Personenverkehr PKW Gesamt 2030

Energiebedarf PKW Gesamt 2030						
	Fahrzeugklasse	Kleinwagenklasse 2030	Mittelklasse 2030	Oberklasse 2030	Gesamtenergiebedarf PKW	
	Antriebsart	alle	alle	alle		
	Motorvariante	alle	alle	alle		
Fahrleistung:						
	Fahrzeugkilometer pro Jahr	mio Fkm/a	864.254	2.436.649	118.825	3.419.729
Energiebedarf:						
NEDC:						
	Energiebedarf NEDC	PJ/a	955	3.719	260	4.934
	Energiebedarf NEDC	TWh/a	265	1.033	72	1.371
	Energiebedarf NEDC	ktoe/a	22.812	88.828	6.218	117.858
ARTEMIS:						
	Energiebedarf ARTEMIS	PJ/a	1.236	4.681	296	6.213
	Energiebedarf ARTEMIS	TWh/a	343	1.300	82	1.726
	Energiebedarf ARTEMIS	ktoe/a	29.529	111.808	7.066	148.402
Kombinierter Zyklus:						
	Energiebedarf komb. Zyklus	PJ/a	1.049	4.063	289	5.401
	Energiebedarf komb. Zyklus	TWh/a	291	1.129	80	1.500
	Energiebedarf komb. Zyklus	ktoe/a	25.064	97.049	6.892	129.004

Quelle: Eigene Berechnung in Anlehnung an [37] und [49, S.125].

7.4 Energiebedarf des LKW-Verkehrs

Das Frachttransportvolumen in der EU korreliert stark mit der wirtschaftlichen Entwicklung, nach dem Einbruch hervorgerufen durch die Wirtschaftskrise im Jahr 2008 ist die Frachttransportleistung nun wieder im Steigen begriffen. Leider nehmen die Gütertransporte durch die Transportmittel mit den größten negativen Umweltauswirkungen (Straßen- und Luftfrachtverkehr) am stärksten zu [10].

Während die Modellierung der Fahrleistungsverteilung und der spezifischen und gesamten Verbräuche des PKW Verkehrs auf der Studie „ELEKTRA“ und statistischen Daten aus [49] basiert, wird der LKW Sektor mit Daten aus den Ergebnissen des Simulationsmodells „TREMOVE“ (siehe [50]) nachgebildet und daraus der Verbrauch abgeleitet.

TREMOVE ist ein Transport- und Emissionsmodell, welches für die Europäische Kommission entwickelt wurde. TREMOVE dient der Untersuchung von Auswirkungen unterschiedlicher verkehrs- und umweltpolitischer Entscheidungen auf den Transportsektor [50, S.9 und S.13]. Im Detail werden dabei in Abhängigkeit von verschiedenen politischen Szenarien unter anderem Aussagen über den Transportbedarf und Modalsplit, die Zusammensetzung von Fahrzeugflotten sowie über den Energiebedarf und die Emissionen getroffen.

TREMOVE bildet sowohl den Personen- wie auch den gesamten Güterverkehr der EU

27 ab, zusätzlich werden die Schweiz, Norwegen, Kroatien und die Türkei in die Simulationen eingebunden. Ähnlich der Studie „ELEKTRA“ die den PKW-Sektor in mehrere Kategorien betrachtet, wird in den Simulationen von „TREMOVE“ der LKW-Güterverkehr in mehrere Klassen unterteilt, dadurch können Fahrleistungen, spezifische und absolute Verbräuche des LKW-Güterverkehrs sehr detailliert untersucht werden.

7.4.1 LKW Fahrzeugklassen

Um die spezifischen Verbräuche, die technischen Möglichkeiten und die Fahrleistungen im LKW-Verkehr besser zuordnen zu können, wird die LKW Flotte in TREMOVE in folgende Gruppen abhängig von ihrem höchsten zulässigen Gesamtgewicht (ZGG) unterteilt [50, S.74]:

- Leichte LKW mit 3,5t höchst zulässigem Gesamtgewicht
- Schwere LKW mit 3,5t bis 7,5t höchst zulässigem Gesamtgewicht
- Schwere LKW mit 7,5t bis 16t höchst zulässigem Gesamtgewicht
- Schwere LKW mit 16t bis 32t höchst zulässigem Gesamtgewicht
- Schwere LKW über 32t höchst zulässigem Gesamtgewicht

Im LKW-Bereich werden aus Gründen der Zuverlässigkeit und der Wirtschaftlichkeit bisher fast ausschließlich Dieselmotoren eingesetzt, bei Fahrzeugen über 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht spielen Ottomotoren praktisch keine Rolle, eine Ausnahme sind CNG Busse im städtischen öffentlichen Verkehr (auch bei den leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5t ist der Dieselmotor die bedeutendste Antriebsquelle, in [54] beispielsweise wird für 2008 bei leichten Nutzfahrzeugen ein Dieselmotorenanteil von 91% an der gesamten deutschen Flotte angegeben).

Es wird ebenfalls nicht erwartet, dass Brennstoffzellen als primäre Antriebsquelle für LKW vor 2050 eine signifikante Rolle spielen werden [44, S.18].

7.4.2 LKW Fahrleistungsverteilung und Energieverbrauch

Die gesamte durch LKW transportierte Güterverkehrsleistung wird auf diese fünf LKW Klassen aufgeteilt. Die so erhaltenen Tonnenkilometer pro Jahr [Tkm/a] für jede LKW Klasse wird im nächsten Schritt mit dem Klassenspezifischen Ladefaktor [Tkm/Fkm] in jährliche Fahrzeugkilometer umgerechnet. Letztendlich wird mit dem spezifischen Streckenverbrauch und den Fahrzeugkilometern der jährliche Energiebedarf für jede Klasse ermittelt.

Als Energiebedarf für den gesamten Gütertransport mit Lastkraftwagen in der EU im Jahr 2030 ergeben sich somit 4.384.472 Terrajoule bzw. 4,38 Exajoule, siehe Tabelle 7.6.

Tabelle 7.6: LKW Fahrleistungsverteilung und Energieverbrauch in der EU 27 im Jahr 2030

Güterverkehr LKW Fahrleistungsverteilung und Energieverbrauch EU-27 2030							
							Summe
Verkehrsträger Tonnenkilometer	MTkm	LKW Verkehr 3.237.158					
PKW Klasse		LKW < 3.5t	LKW 3.5-7.5t	LKW 7.5-16t	LKW 16-32t	LKW >32t	
Anteil LKW Klasse an LKW Verkehr	%	2,21%	3,28%	3,93%	33,39%	57,19%	100%
Tonnenkilometer der LKW Klasse	MTkm	71.687	106.262	127.071	1.080.861	1.851.276	3.237.158
Ladefaktor der LKW Klasse	Tkm/Fkm	0,84	1,02	3,39	5,99	12,23	4,69
Fahrzeugkilometer der LKW Klasse	MFkm	85.527,90	104.609,20	37.509,37	180.367,10	151.422,90	559.436
Energieverbrauch pro Fkm	MJ/km	2,88	3,90	6,84	9,29	11,88	6,96
Energieverbrauch der LKW Klasse	TJ/a	246.476	408.222	256.398	1.674.828	1.798.547	4.384.472
Energieverbrauch der LKW Klasse	ktoe	5.887,0	9.750,2	6.124,0	40.002,6	42.957,6	104.721,3

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung in Anlehnung an [50].

7.5 Energiebedarf der übrigen Verkehrsträger

Während der Energiebedarf für PKW und LKW in den vorangegangenen Kapiteln detailliert untersucht wird, wird der Bedarf für die übrigen fünf Verkehrsträger im Jahr 2030 direkt aus den Prognosen der Europäischen Kommission [49] und [51] übernommen.

Energiebedarf des öffentlichen Straßenverkehrs:

Der Energiebedarf des Öffentlichen Straßenverkehrs der EU 27 im Jahr 2030 wird in [49, S.125] mit 5.071 ktOE bzw. 212.313 TJ angegeben.

Energiebedarf des Zweirad-Verkehrs:

Der Energiebedarf durch motorisierte Zweiräder in der EU 27 im Jahr 2030 wird in [51] mit 7.305 ktOE bzw. 305.846 TJ angegeben.

Energiebedarf der Schiff-Fahrt:

Der Energiebedarf in der Schifffahrt der EU 27 im Jahr 2030 wird in [49, S.125] mit 6.369 ktOE bzw. 266.657 TJ angegeben.

Energiebedarf des Schienenverkehrs:

Der Energiebedarf des Schienenverkehrs der EU 27 im Jahr 2030 wird in [49, S.125] mit 8.522 ktOE bzw. 356.799 TJ angegeben. Davon werden 8.179 ktOE bzw. 342.438 TJ durch Strom gedeckt, als Bedarf an Brennstoff für Verbrennungsmotoren verbleiben 343 ktOE bzw. 14.360,7 TJ.

Energiebedarf des Flugverkehrs

Der Energiebedarf durch den Flugverkehr (Personen- und Gütertransport) der EU 27 im Jahr 2030 wird in [49, S.125] mit 66.467 ktoe bzw. 2.782.840 TJ angegeben. Es ist ersichtlich, dass der Flugverkehr nach dem Güterverkehr per LKW und dem Personenverkehr per PKW den größten Verbraucher an Treibstoffen darstellt.

7.6 Energiebedarf des gesamten Verkehrs

Der Energiebedarf des gesamten Verkehrssektors der EU 27 im Jahr 2030 beträgt laut den in Tabelle 7.7 angeführten Daten 319.280 Kilotonnen Öleinheiten [ktoe] oder umgerechnet 13.367.615 Terajoule [TJ] bzw. 13,37 Exajoule [EJ].

Er ist somit um 63.311 ktoe bzw. 2.650.705 TJ oder ca. 16,5% geringer, als in der Studie „EU Energy Trends to 2030 - Update 2009“ angeführt wird, dies kommt hauptsächlich durch unterschiedliche Annahmen von z.B. Wirkungsgraden, Besetzungsgraden oder Ladefaktoren in den zugrunde liegenden Studien [49], [37] und [50] zustande.

Tabelle 7.7: Gesamtenergiebedarf des Verkehrssektors der EU 27 im Jahr 2030

Gesamtenergiebedarf des Verkehrssektors der EU 27 im Jahr 2030		
	ktoe/a	TJ/a
Energiebedarf PKW-Verkehr	129.004	5.401.000
Energiebedarf LKW-Verkehr	104.721	4.384.472
Energiebedarf Zweirad-Verkehr	7.305	305.846
Energiebedarf Öffentlicher Straßenverkehr	5.071	212.313
Energiebedarf Schifffahrt	6.369	266.657
Energiebedarf Bahn-Verkehr	343	14.361
Energiebedarf Flugverkehr	66.467	2.782.840
Energiebedarf Gesamter Verkehrssektor	319.280	13.367.615

1 ktoe = 41.868 TJ.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in Anlehnung an [49, S.125], [51], [50], [37].

Kapitel 8

Alternative Energieträger und Biotreibstoffe

Alle auf der Erde insgesamt nutzbaren Energieströme entspringen drei grundsätzlich unterschiedlichen primären Energiequellen, der Planetengravitation und -bewegung, der Erdwärme und vor allem der Sonnenenergie, welche mit Abstand die größte Quelle des regenerativen Energieangebots darstellt [3, S.1]. Abbildung 8.1 zeigt die Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots aus diesen Quellen.

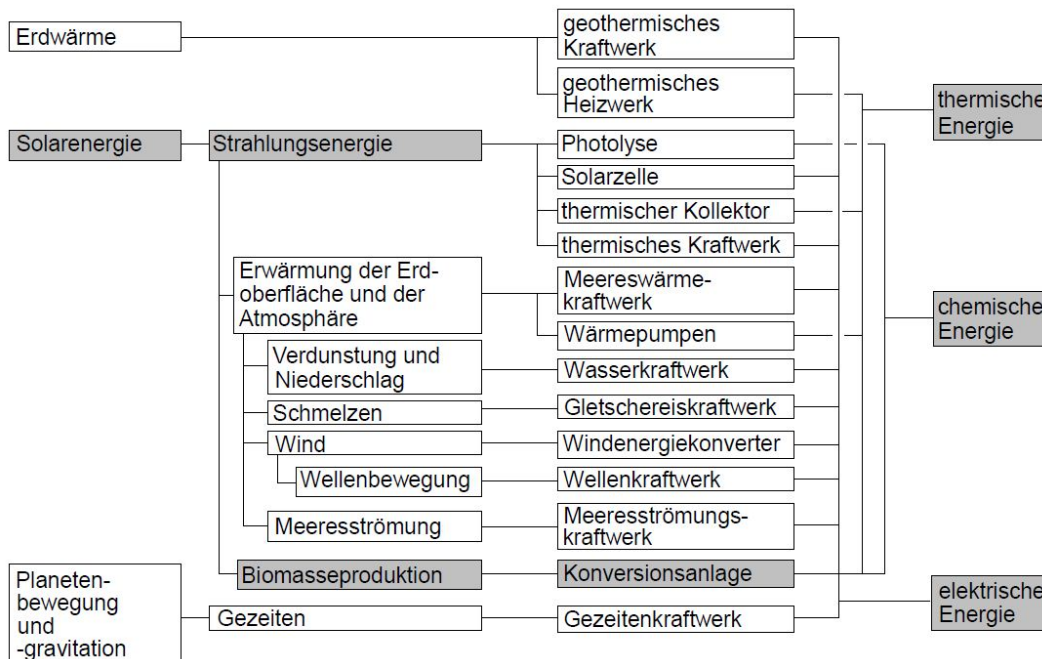


Abbildung 8.1: Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots
Quelle: [3, S.1].

In weiterer Folge werden in dieser Arbeit Treibstoffe aus Biomasse behandelt, für Informationen zu den anderen alternativen Energien sei auf [55] verwiesen.

8.1 Biomasseaufbau und Primärproduktion

Bei der Biomasse (sämtliche Stoffe organischer Herkunft, d.h. kohlenstoffhaltige Materie) wird die solare Strahlung mit Hilfe von Pflanzen über den Prozess der Photosynthese in organische Materie umgewandelt. Diese Biomasse stellt somit gespeicherte Sonnenenergie dar, die bei entsprechender Energienachfrage genutzt werden kann. Dies unterscheidet sie grundsätzlich von anderen Optionen der direkten und indirekten Sonneneinstrahlung (Solarthermie, Photovoltaik, Windkraft), welche direkt an die von der Sonne eingestrahelte Energie gekoppelt sind und daher starken zeitlichen Schwankungen unterliegen [3, S.2].

Die wesentlichen Prozesse die eine Primärproduktion von Biomasse ermöglichen, sind die Photosynthese und die Atmung (Respiration) [3, S.46], siehe Abbildung 8.2. Im Zuge der Photosynthese werden mittels Lichtenergie Kohlenhydrate aufgebaut, die durch den Prozess der Atmung zur Energiegewinnung wieder abgebaut werden.

Ein wesentlicher Faktor für die gewinnbare Treibstoffenergie pro Fläche ist neben Standortfaktoren (wie z.B. Temperatur, Bodenqualität, Wasser- und Nährstoffangebot) der Wirkungsgrad der Photosynthese der Pflanzen. Der Wirkungsgrad bzw. Nutzeffekt der Photosynthese gibt an, welcher Anteil der absorbierten Strahlungsenergie aus der Einstrahlung (nur Strahlungsenergie im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 700 nm ist für die Photosynthese nutzbar [56, S.426]) in Form von chemisch gebundener Energie festgelegt wird. Angaben zur durchschnittliche Sonneneinstrahlung für die einzelnen Mitgliedsstaaten der EU sind in [57] angeführt.

Bezogen auf den gesamten Pflanzenbestand und die gesamte Vegetationsperiode erreichen selbst die produktivsten Pflanzengesellschaften nur einen Nutzeffekt von ca. 2% (Regenwälder). Die meisten Wälder und Grasgesellschaften liegen allerdings nur bei etwa 1%, in weiten Teilen Europas liegt der Nutzeffekt damit im Mittel bei 0,8% bis 1,2%. Verglichen mit dem Wirkungsgrad heute am Markt verfügbarer Solarzellen von über 15% [56, S.427], ist der Wirkungsgrad der Photosynthese somit äußerst bescheiden.

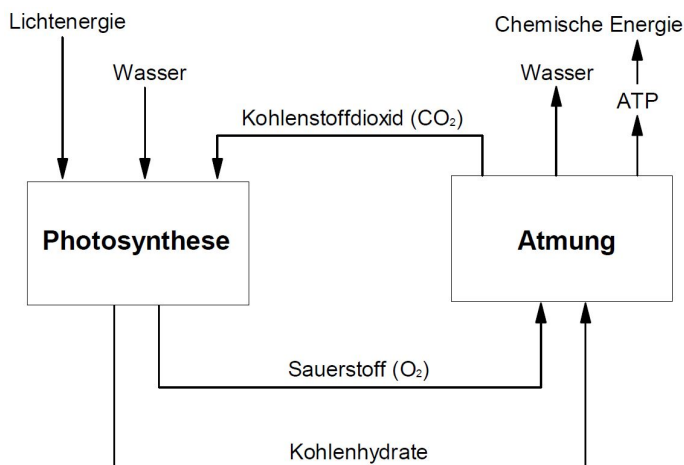


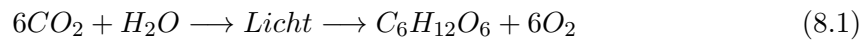
Abbildung 8.2: Aufbau von Photosyntheseprodukten und ihr Abbau durch die Atmung
Quelle: [3, S.46].

Photosynthese:

Der Gesamtprozess der Photosynthese umfasst zwei Stufen. Auf eine lichtabhängige jedoch temperaturunabhängige Reaktion (der Lichtreaktion) folgt eine weitere, lichtunabhängige und temperaturabhängige Reaktion, die Dunkelreaktion [3, S.47].

- Lichtreaktion: Durch photochemische Reaktionen wird die für die Aufnahme des CO_2 und den Einbau des Kohlenstoffs in höherenergetische organische Verbindungen notwendige Energie verfügbar - Assimilation [58, S.8].
- Dunkelreaktion: Ein Teil der im ersten Prozess durch die Assimilation von CO_2 gewonnenen Energie wird zur Aufrechterhaltung der Lebensprozesse und dem Aufbau der Pflanzenmasse wieder verbraucht - Dissimilation [58, S.8].

Der Gesamtprozess der Photosynthese kann durch folgende Gleichung beschrieben werden [58, S.8]:

**Atmung:**

Die Atmung kann ebenfalls wieder in eine Lichtatmung und in eine Dunkelatmung unterschieden werden. Die Atmung, die mit steigender Temperatur zunimmt, ist mit einem Substanzverlust verbunden. In der Regel ist aber der Substanzgewinn durch die Photosynthese größer als der Substanzverlust durch die Atmung, die sowohl bei Tag (Lichtatmung) als auch bei Nacht (Dunkelatmung) stattfindet [58, S.8]. Für weiterführende Informationen zur Atmung sei auf [58, S.8] und [3, S.51] verwiesen.

8.2 Biomasseumwandlung

In dieser Arbeit werden neben alternativen Treibstoffen aus fossilen Quellen (CNG, LNG, Wasserstoff aus Dampfreformation) vor allem Biokraftstoffe aus umgewandelter Biomasse betrachtet. Abbildung 8.3 zeigt die möglichen Versorgungsketten, mit der Energie aus Biomasse bereitgestellt werden kann. Diese Ketten umfassen alle Prozesse beginnend mit der Produktion der Biomasse bis hin zur Nutzung des Treibstoffs und beschreiben somit den gesamten Lebensweg der organischen Stoffe [3, S.3].

Bei den Verfahren zur Umwandlung organischer Stoffe in feste, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger als Zwischenstufe vor der Umwandlung in die gewünschte End- bzw. Nutzenergie kann zwischen den folgenden drei Veredelungsverfahren unterschieden werden [3, S.5]:

1. Thermo-chemische Umwandlung
2. Physikalisch-chemische Umwandlung
3. Bio-chemische Umwandlung

Weitere, über die nachfolgenden Informationen hinausgehende Details zu den verschiedenen Umwandlungsrouten sind beispielsweise in [59, S.85 ff] zu finden.

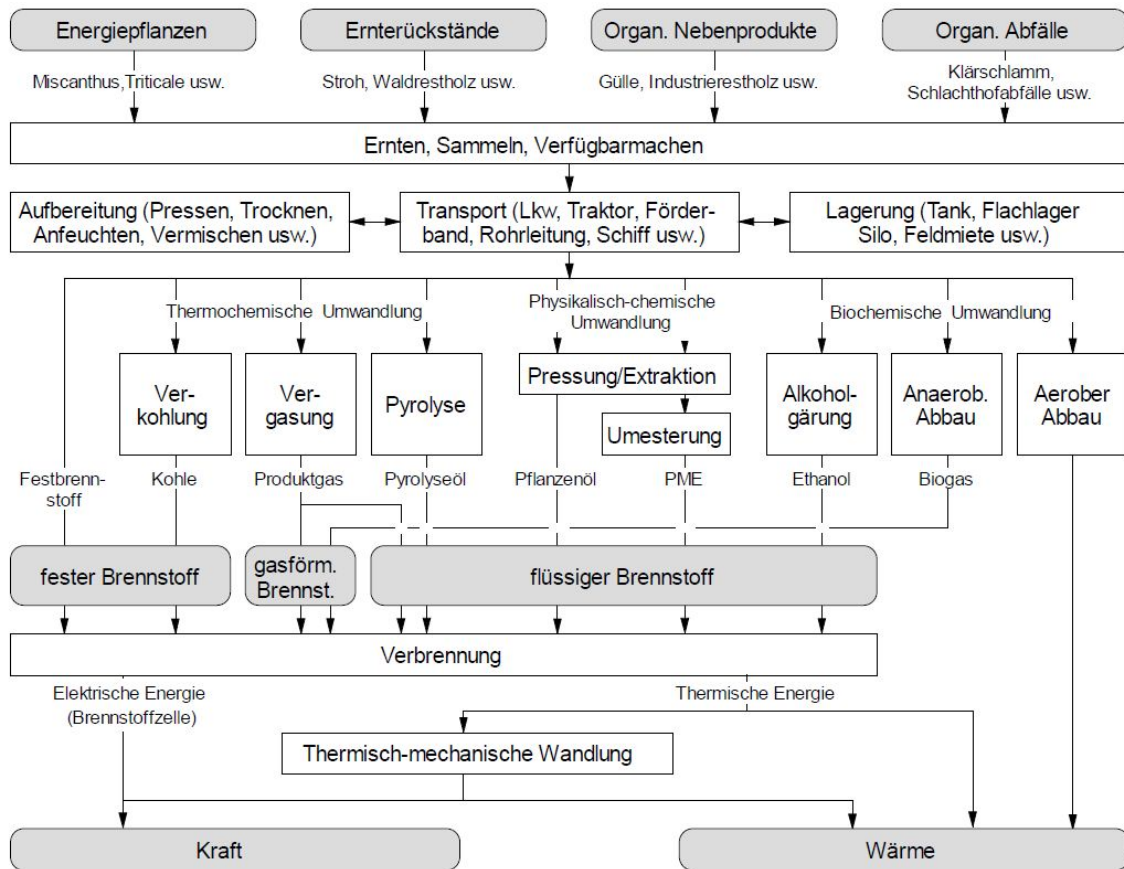


Abbildung 8.3: Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse.

Quelle: [3, S.4].

8.2.1 Thermo-chemische Umwandlungsarten

Bei diesen Veredelungsverfahren werden feste Bioenergeträger unter Wärmeeinfluss in feste, flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger transformiert [3, S.5]. Als Umwandlungsrouten werden die

- Verbrennung
- Vergasung
- Pyrolyse
- Verkohlung

durchgeführt.

8.2.1.1 Verbrennung

Bei der vollständigen Verbrennung (d.h. Luftüberschußzahl $\lambda > 1$) wird Kohlenstoff C und Wasserstoff H in Gegenwart von Sauerstoff O unter Energiefreisetzung zu

Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O oxidiert [3, S.377].

8.2.1.2 Vergasung

Wird ein Brennstoff wie beispielsweise Kohlenstoff C unter Zugabe eines Oxidationsmittels (z.B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf) nicht zu Kohlendioxid CO_2 sondern nur zu Kohlenstoffmonoxid CO oxidiert und damit nur teilverbrannt (d.h. die Luftüberschusszahl λ ist kleiner 1 und größer als 0), spricht man von Vergasung.

Das bei einer derartigen Umwandlung entstandene Gas (im genannten Beispiel CO) kann anschließend an einem anderen Ort zu einer anderen Zeit unter Energieabgabe weiter oxidiert werden [3, S.378]. Grundsätzlich laufen also die gleichen Umwandlungsprozesse wie bei der Verbrennung ab, die einzelnen Stufen werden jedoch räumlich und zeitlich getrennt realisiert [3, S.599].

Mit Hilfe der Vergasung können daher feste Brennstoffe in ein Brenngas und damit in einen gasförmigen Sekundärenergieträger umgewandelt werden, der z.B. als Treibstoff in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann (und damit in Bereichen, in denen ein Festbrennstoff nicht einsetzbar wäre) [3, S.378].

Das durch eine thermo-chemische Umwandlung erzeugte Gas nennt sich Produktgas (früher auch Holzgas bzw. Generatorgas genannt), wird ein an Wasserstoff H und Kohlenstoffmonoxid CO reiches Gas erzeugt, kommt auch die Bezeichnung Synthesegas zur Anwendung.

Der Begriff Synthesegas ist dabei definiert als Gasgemisch mit einem auf die jeweilige Synthese (Herstellung flüssiger Treibstoffe aus Gas, z.B. Fischer-Tropsch-Synthese, Methanolsynthese) angepassten Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenmonoxid [3, S.599].

Unter der Bezeichnung KOGASIN (Kohle-Gas-Benzin-Verfahren) wurde bereits während des Zweiten Weltkriegs aus dem Produktgas mittels Fischer-Tropsch-Synthese flüssiger Treibstoff aus Steinkohle erzeugt [7, S.209].

8.2.1.3 Pyrolytische Zersetzung

Biomasse kann durch thermo-chemische Prozesse direkt in überwiegend flüssige (Pyrolyseöle oder Bio-Öle) oder feste Produkte (Biomassekoks, Holzkohle) umgewandelt werden [3, S.671].

Bei der pyrolytischen Zersetzung findet die Umwandlung im Gegensatz zur Verbrennung und Vergasung ausschließlich unter Einwirkung von Wärme und ohne Gegenwart von zusätzlich der Reaktion zugeführtem Sauerstoff O_2 statt, d.h. die Luftüberschusszahl λ ist Null [3, S.378].

Für die Bereitstellung flüssiger Sekundärenergieträger mittels Pyrolyse wird dabei zwischen den beiden Varianten

- Flash-Pyrolyse und
- Druckverflüssigung

unterschieden [3, S.671].

Pyrolyseöl kann grundsätzlich (neben einigen anderen Alternativen der thermischen und chemischen Nutzung) vor allem in Dieselmotoren eingesetzt werden.

Pyrolyseöle sind im Gegensatz zu Mineralölen nicht mit Kohlenwasserstoffen mischbar und enthalten überdies noch krebserregende Aromate [3, S.685].

Die Tabelle 8.1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über Luftüberschuss, Temperaturbereich und Produktzusammensetzung für thermo-chemische Umwandlungsverfahren.

Tabelle 8.1: Luftüberschuss, Temperaturbereich und Produktzusammensetzung für thermo-chemische Umwandlungsverfahren

Technischer Prozess	Thermo-chemische Umwandlung	Sauerstoffangebot	Temperatur in °C	Produkte
Verbrennung	A&T, PZ, Vg, Ox	$\lambda \geq 1$	800 – 1 300	heißes Abgas
Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^a$	700 – 900	brennbares Gas
Hydrothermale Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^b$	400 – 700 (200 – 300 bar)	brennbares Gas flüssiger Rückstand
Pyrolyse	A&T, PZ	$\lambda = 0$	450 – 600	brennbares Gas, Pyrolyseöl und -koks
Verkohlung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	>500	Holzkohle
Torrefizierung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	250 – 300	torrefizierte Biomasse

A&T Aufheizung und Trocknung, PZ pyrolytische Zersetzung, Vg Vergasung, Ox Oxidation

^a Oxidationsmittel ist meist Luft, Sauerstoff (O₂) oder Wasserdampf (H₂O); ^b Oxidationsmittel ist Wasserdampf (H₂O) bei überkritischen Bedingungen

Quelle: [3, S.377].

8.2.2 Physikalisch-chemische Umwandlung

Zu den Verfahren der physikalisch-chemischen Umwandlung zählen alle Möglichkeiten zur Bereitstellung von Energieträgern aus Ölpflanzen. Als Ausgangsmaterial kommt dabei ölhaltige Biomasse zum Einsatz, wie zum Beispiel Rapssaat oder Sonnenblumensaat [3, S.6], als Endprodukte entstehen Pflanzenöl und in weiterer Folge nach einer eventuellen Veresterung Biodiesel.

8.2.3 Bio-chemische Umwandlung

Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse in Sekundär- und End- oder Nutzenergieträger mit Hilfe von Mikroorganismen und damit durch biologische Prozesse [3, S.6]. Zucker-, stärke- und zellulosehaltige Biomasse kann durch eine alkoholische Gärung mit Hilfe von z.B. Hefen in Ethanol C_2H_5OH überführt werden. Anschließend kann dieser Alkohol durch Destillation und Rektifikation aus der Maische abgetrennt und in einem letzten Schritt durch die so genannte Absolution in Reinform gewonnen werden [3, S.6].

Eine weitere Möglichkeit zur biologischen Umwandlung stellt der anaerobe und der aerobe Abbau organischer Stoffe dar.

Beim anaeroben Abbau wird aus der Biomasse unter Sauerstoffausschluss durch bestimmte Bakterien ein wasserdampfgesättigtes Biogas freigesetzt [3, S.6]. Dieses Biogas besteht zu etwa zwei Dritteln aus Methan, welches abgetrennt und als Erdgasersatz (mit identen Eigenschaften) in Motoren, Blockheizkraftwerken usw. verwendet werden kann.

Beim aeroben Abbau wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärmefreisetzung ebenfalls mit Hilfe von Bakterien oxidiert (Kompostierung). Die frei werdende Wärme kann unter anderem mit Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme nutzbar gemacht werden [3, S.7].

8.3 Herstellungspfade von Biotreibstoffen

Ausgehend von den zuvor erläuterten Varianten der Biomasseumwandlung existieren unterschiedliche Pfade zur Herstellung von Biokraftstoffen, diese hängen einerseits von der zur Verfügung stehenden Biomasse und andererseits vom gewünschten Endprodukt ab, einen Überblick über die verschiedenen Varianten gibt [28, S.39].

Für weiterführende und in dieser Arbeit nicht behandelte Details zu Energiepflanzen und den daraus hergestellten Treibstoffen, deren Eigenschaften und Ernteerträge sei auf die sehr umfassende Quelle [60] verwiesen.

8.4 Biotreibstoffgenerationen

Eine sehr beliebte Form der Klassifizierung von alternativen Treibstoffen ist die Unterteilung in drei Generationen, die dazugehörigen Definitionen werden nachfolgend dargestellt. Es sollte dabei allerdings beachtet werden, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Generationen nicht exakt definiert sind, beispielsweise kann Biogas sowohl als Kraftstoff der ersten wie auch der zweiten Generation bezeichnet werden [28, S.38].

Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die drei Biokraftstoffgenerationen, deren Rohstoffe und Prozessschritte, diese werden in den nachfolgenden Kapiteln weiter erläutert.

Tabelle 8.2: Übersicht über wesentliche Biokraftstoffoptionen

Biokraftstoffoption	Rohstoffe	Prozessschritte	Nebenprodukte
Biokraftstoffe der 1. Generation			
Pflanzenöl	Ölsaaten/-früchte	Extraktion, Raffination	Presskuchen, Schrot
Biodiesel (FAME)	Pflanzenöle und -fette, Tierfette	Extraktion, Raffination, Umesterung, Reinigung	Presskuchen, Schrot, Glycerin, Fettsäuren
Bioethanol	Zucker- und Stärkehaltige Pflanzen	Zuckerextraktion/ Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Reinigung	Schlempe, (Wärme/Strom)
Biokraftstoffe der 2. Generation			
Hydriertes Pflanzenöl (HVO)	Pflanzenöle und -fette, Tierfette	Raffination, Hydrierung, Nachbehandlung	
Bioethanol	Lignozellulose- haltige Biomasse	Hydrolyse, Fermentation, Destillation, Reinigung	Lignin, (Wärme/Strom)
Biomass To Liquid (BTL)	Lignozellulose- haltige Biomasse	Vergasung, Gasreinigung/ -konditionierung, Synthese, Nachbehandlung	Wachse, Naphta, (Wärme/Strom)
Biomethan (Bio-SNG)	Lignozellulose- haltige Biomasse	Vergasung, Gasreinigung/ -konditionierung, Synthese (Metha- nisierung), Nachbehandlung	(Wärme/Strom)
Biomethan (Biogas)	Gülle, Dung, Bioabfälle, Mais, Gras, Getreide- ganzpflanzen	anaerobe Fermentation, Gasreinigung/ -konditionierung	Schlempe, (Wärme/Strom)
Biokraftstoffe der 3. Generation			
Biodiesel	Algen	Extraktion, Umesterung	
Hydriertes Pflanzenöl (HVO)	Algen	Raffination, Hydrierung	

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [45, S.8].

8.4.1 Erste Generation

Biotreibstoffe der ersten Generation werden jene Kraftstoffe genannt, die bereits heute in industriellem Maßstab hergestellt und in geeigneten Motoren verwendet werden [28, S.38]. Dazu zählen beispielsweise Pflanzenöl und Biodiesel aus Raps sowie Ethanol aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen [59, S.33], [59, S.33].

8.4.2 Zweite Generation

Biotreibstoffe der zweiten Generation sind jene, die heute noch nicht in kommerziellen Anwendungen zum Einsatz kommen. Ihre Herstellung ist zwar grundsätzlich bereits möglich und wird auch durchgeführt, allerdings sind die notwendigen Produktionsprozesse noch nicht ausgereift und bedürfen weiterer Forschung und Entwicklung. Zu diesen Treibstoffen zählen zum Beispiel die synthetisch hergestellten Biomass To Liquid (BTL) Kraftstoffe sowie Ethanol aus Lignozellulosepflanzen [59, S.33].

Die Grenzen zwischen Treibstoffen der ersten und zweiten Generation sind in der Literatur allerdings nicht immer gleich definiert und können daher in verschiedenen Studien voneinander abweichen.

8.4.3 Dritte Generation

Biotreibstoffe aus Algen werden meist als Kraftstoffe der 3. Generation bezeichnet. Sie haben im Vergleich zu Biotreibstoffen der 2. Generation weitere bedeutende Vorteile [61, S.705], sind dabei allerdings noch weiter von einem kommerziellen Einsatz entfernt [59, S.33]. Unter anderem kann die Algenzucht im Gegensatz zu Lignozellulosepflanzen auf völlig degradierten Böden durchgeführt werden und ist nicht unbedingt von frischem Süßwasser abhängig, wie in Kapitel 9.5.1 auf Seite 112 noch genauer beschrieben wird.

8.5 Biodiesel und Pflanzenöl

Einsatzgebiet von Biodiesel und Pflanzenöl

Die Eigenschaften von Biodiesel und Pflanzenöl unterscheiden sich vor allem in der Viskosität. Diese ist bei Pflanzenöl etwa 10 mal höher als bei Biodiesel [28, S.89]. Um Pflanzenöl in Dieselmotoren verwenden zu können, müssen daher vor allem bei tiefen Temperaturen und im Winter Vorkehrungen getroffen werden, die das Kaltstartverhalten und den Betrieb positiv beeinflussen, siehe [28, S.90] und [3, S.761].

Als Alternative zur Anpassung des Motors an den Kraftstoff gibt es die Möglichkeit, das Pflanzenöl selbst an die Eigenschaften konventioneller Kraftstoffe auf Mineralölbasis und damit an die vorhandene Motorentechnik anzupassen, dies kann einerseits durch eine Umesterung mit Methanol oder Ethanol in Biodiesel durchgeführt werden, andererseits ist auch die Verarbeitung von Pflanzenöl in Mineralölraffinerien möglich [3, S.736].

Biodiesel (Fatty Acid Methyl Ester FAME) hat ähnliche Eigenschaften wie fossiler Diesel, als Einsatzgebiet kommen daher Verbrennungsmotoren mit Selbstzündung in Frage, Voraussetzung dafür ist jedoch die Verwendung von biodieselbeständigen Kraftstoffsystemkomponenten (z.B. Schläuche und Dichtungen aus Teflon) [3, S.757]. Weiters ist zu

beachten, daß sich bei ungünstigen Betriebsbedingungen (z.B. Schwachlastbetrieb) eventuell zu viel Biodiesel im Motoröl anreichert, dieses Problem kann durch verkürzte Ölwechselintervalle vermieden werden [3, S.757].

Weitere Gegenüberstellungen der Vor- und Nachteile beim Einsatz von Biodiesel als Treibstoff lassen sich [62, S.4663] und [63] entnehmen.

Herstellungsverfahren von Biodiesel und Pflanzenöl

Pflanzenöle können entweder durch eine ausschließliche Auspressung (d.h. Fertigpressen, ergibt einen Restölgehalt von 6% bis 10%), durch eine ausschließliche Extraktion (d.h. Direktextraktion mit Hexan als Lösungsmittel, dies ergibt sehr niedrige Restölgehalte bei relativ einfacher Prozessführung und ist vor allem bei Rohstoffen mit niedrigem Ölgehalt wirtschaftlich), oder durch eine Kombination der beiden Verfahren gewonnen werden [3, S.713]. Die Umwandlung der Pflanzenöle und Fette in Biodiesel kann entweder durch Veresterung mit Alkohol oder durch Hydrierung mit Wasserstoff erfolgen.

Umesterung von Pflanzenöl zu Biodiesel

Das am meisten verbreitete Verfahren zur Anpassung von Pflanzenöl an konventionelle Dieselmotoren ist die Umesterung zu Pflanzenölmethylester (PME) bzw. Biodiesel [3, S.736], der Hauptzweck der Veresterung ist die damit einhergehende Verringerung der Viskosität [64, S.466].

Bei der Herstellung von Biodiesel erfolgt die schrittweise Umesterung (auch Alkohololyse genannt) von pflanzlichen und tierischen Ölen bzw. Fetten durch die Zugabe eines einwertigen Alkohols (z.B. Methanol oder Ethanol) unter der Nutzung eines Katalysators [64, S.471], [3, S.737f].

Da die ursprüngliche Bindungsform (d.h. die Esterbindung) erhalten bleibt, wird dieser Vorgang als Umesterung bezeichnet, als Kuppelprodukt wird Glycerin freigesetzt [3, S.766, S.767].

Beim Einsatz von Methanol zur Umesterung der Öle und Fette wird das Umesterungsprodukt chemisch exakt als Fettsäuremethylester bzw. Fatty Acid Methyl Ester (FAME) und landläufig als Biodiesel bezeichnet. Mindestanforderungen hinsichtlich der Qualität dieses Kraftstoffs sind in der Norm DIN 14214 festgelegt. Weitere Details zur Herstellung von Biodiesel und den verfahrenstechnischen Abläufen bei der Umesterung finden sich in [64, S.476 ff] und [65, S.289 ff].

Hydrierung von Pflanzenöl

Eine weitere Möglichkeit, Pflanzenöle durch chemische Umwandlung an die Eigenschaften fossiler Kraftstoffe und damit an die vorhandenen Motoren anzupassen, stellt die katalytische Reaktion mit Wasserstoff (die sogenannte Hydrierung) dar. Derartige hydrierte Pflanzenöle werden als HVO (Hydrogenated bzw. Hydrotreated Vegetable Oils) bezeichnet [3, S.746], diese Premiumkraftstoffe sind frei von Sauerstoff, Stickstoff und Aromaten und haben neben hohen Cetanzahlen auch sehr gute Kälteeigenschaften [3, S.748], [66, S.73, S.81].

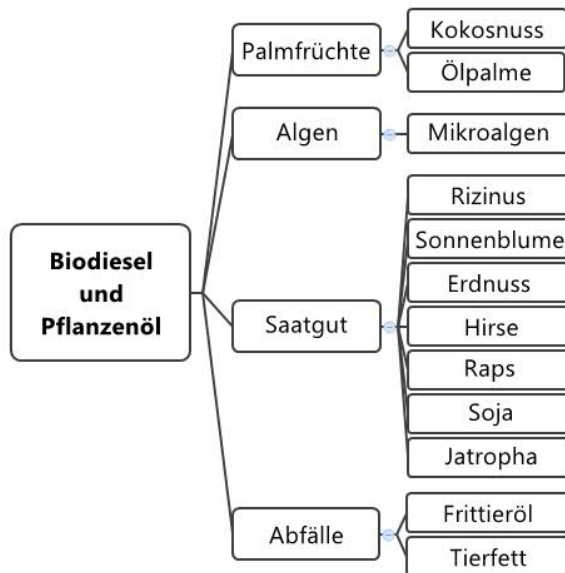


Abbildung 8.4: Rohstoffe für die Biodieselerzeugung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [28, S.73].

Ausgangsstoffe der Biodieselherstellung

Als Rohstoff für die Biodieselherstellung kommen Früchte von Ölpflanzen, Tierfette, Speiseölreste usw. in Frage [67], Abbildung 8.4 gibt hierzu einen Überblick.

Da für die energetische Nutzung ein hoher Ölertrag angestrebt wird, kommen in Europa als Energiepflanzen bisher (für Biodiesel der 1. Generation aus Energiepflanzen) nur der Winterraps und mit Abstrichen eventuell die Sonnenblume in Betracht [3, S.109, S.711].

Weitere detaillierte Informationen über Energiepflanzen für die Biodieselherstellung und deren Eigenschaften und Ernteerträge sind in [60, S.41ff, S.95ff] zu finden.

8.6 Bioethanol

Ethanol ist eine leicht entzündliche, klare und farblose Flüssigkeit, die sich in jedem Verhältnis mit Wasser, Ether, Benzin und Benzol mischen lässt [3, S.844]. Alkohole werden in der Regel nach jenen Kohlenwasserstoffen bezeichnet, von denen sie sich ableiten und dabei mit der Endung „ol“ versehen, bei z.B. Ethanol C_2H_5OH ist dieser Kohlenwasserstoff Ethan C_2H_6 . Verwendet man für die Produktion einen nachwachsenden Rohstoff (also Biomasse), wird das erzeugte Ethanol auch Bioethanol genannt, gleiches gilt für alle anderen Treibstoffe aus Biomasse.

Einsatzgebiet

Bioethanol (C_2H_5OH) kann aufgrund seiner Eigenschaften vor allem zur Substitution von Benzin, also in Ottomotoren eingesetzt werden. Auch der Einsatz in Dieselmotoren ist möglich, dazu wird dem Ethanol zur Verbesserung der geringen Zündwilligkeit entweder

ein Additiv zugemischt (z.B. 5% Beraid bei 95% Ethanol) oder Ethanol selbst wird in einstelligen Prozentsätzen Diesel beigemischt, dies ergibt einen guten Kompromiss zwischen Verbrauch, Leistung und Emissionen [28, S.58].

Ein großer Vorteil von Reinethanol liegt in der hohen Oktanzahl ROZ (Research Oktan Zahl) von über 100, dies ermöglicht aufgrund der geringeren Neigung zum Klopfen eine höhere Verdichtung der Ottomotoren und damit einen höheren thermischen Wirkungsgrad, siehe dazu auch Kapitel 6.1 auf Seite 31.

Beimischungen zu fossilem Benzin sind bis zu etwa 20% (E20) meist ohne Probleme möglich, für höhere Beimischungsquoten sowie für reinen Ethanolbetrieb (E100) sollten die Motoren allerdings angepasst werden um den Treibstoff optimal nutzen zu können [28, S.56], diese Änderungen betreffen vor allem das Verdichtungsverhältnis und den Zündzeitpunkt.

Da Ethanol deutlich korrosiver ist als z.B. Benzin, muss grundsätzlich darauf geachtet werden das man für Treibstoffleitungen und andere Bauteile nur solche Materialien verwendet, die nicht von Ethanol zersetzt werden [27, S.42].

Als drittes Einsatzgebiet neben Otto- und Dieselmotoren kann Ethanol auch in sogenannten Direct-Ethanol-Fuel-Cells (DEFC) eingesetzt werden [28, S.58]. Dabei wird Ethanol direkt von der Brennstoffzelle verwertet und muss zuvor nicht reformiert werden.

Weitere Eigenschaften von Ethanol im Vergleich zu anderen Treibstoffen werden in Tabelle 8.3 auf Seite 98 zusammengefasst.

Herstellungsverfahren

Im Gegensatz zu synthetischem Ethanol aus fossilen Quellen wird Bioethanol mittels biotechnischer Verfahren gewonnen, diese sind aufwendiger als mechanische Verfahren wie zum Beispiel die Pressung von Ölpflanzen. Ausschließlich Zucker kann durch eine alkoholische Gärung in Ethanol und Kohlenstoffdioxid CO_2 umgewandelt werden. Da jedoch grundsätzlich auch stärke- und zellulosehaltige organische Stoffe zur Alkoholgärung einsetzbar sind, muß der eigentlichen Fermentation bei diesen Ausgangsstoffen ein entsprechender Zwischenschritt vorgeschaltet werden [3, S.793].

Zucker zu Ethanol - Fermentation

Die Grundlage jeder Alkoholgewinnung aus Biomasse stellt die alkoholische Gärung dar, dieser Vorgang wird auch Fermentation genannt [3, S.813]. Dabei handelt es sich um eine biochemische Spaltung von Kohlenhydraten, die durch das Zusammenwirken von mikrobiellen Enzymen ausgelöst werden und unter Ausschluss von Sauerstoff ablaufen. Für die Fermentation können Pilze (Schimmelpilze), Bakterien und Hefe-Mikroorganismen verwendet werden.

Die Vergärung des Zuckers ist relativ einfach sowie technisch ausgereift und wird bereits in industriellem Maßstab durchgeführt [28, S.40].

Bekanntestes Beispiel für die Ethanolerzeugung ist die Zuckerrohrvergärung in Brasilien, dies ist laut der Definition von 8.4.1 auf Seite 86 ein Kraftstoff der ersten Generation.

Stärke zu Ethanol

Etwas mehr Aufwand erfordert die Herstellung von Ethanol aus stärkehaltigen Rohstoffen. Da Stärke nicht unmittelbar vergoren werden kann wird sie in einem zusätzlichen Schritt vor der Fermentation in vergärbaren Zucker umgewandelt [3, S.794]. Stärken bestehen aus langkettigen Glukosemolekülen, diese müssen in einfache und kurze Glukosemoleküle aufgebrochen werden (Saccharifikation). Dazu wird eine Reaktion der Stärke mit Wasser benötigt, diese Reaktion wird Hydrolyse genannt [28, S.52].

Zellulose zu Ethanol

Die grundlegende Prozesskette bei der Umwandlung von Lignozellulose in Bioethanol besteht aus den Schritten Zerkleinerung der Pflanze, Vorbehandlung der Biomasse (z.B. durch „Steam Explosion“, siehe [68]), Hydrolyse, Fermentation und der abschließenden Destillation.

Im Gegensatz zur Umwandlung von Zucker und Stärke in Alkohol ist die Bioethanolproduktion aus Lignozellulose bisher nur im Labor erfolgreich durchgeführt worden. Der Vorteil dieser Variante ist, dass nicht nur die Frucht sondern die ganze Pflanze verwendet werden kann, da Zellulose und Hemizellulose - vergleichbar zu Stärke - ebenfalls Kohlenhydrate sind.

Da Zellulose und Hemizellulose die weltweit am häufigsten vorkommenden Stoffwechselprodukte der Pflanzen darstellen [3, S.799], eröffnet dies ein sehr breites Spektrum an nutzbaren Biomasserohstoffen und -reststoffen sowie höheren Erträgen pro genutzter landwirtschaftlicher Fläche [69, S.246]. Der verwertbare Zelluloseanteil der Pflanzen beträgt etwa 30% bis 70% [28, S.41].

Lignozellulosehaltige Rohstoffe bestehen aus Lignin, Hemizellulose und Zellulose, solch eine Biomasse wird oft auch Lignozellulose genannt. Im Gegensatz zur Bioethanolproduktion aus Zucker und Stärke sind beim Rohstoff Lignozellulose zusätzliche Umwandlungsschritte notwendig, da die Biomasse zuerst in Zucker umgewandelt werden muß, bevor sie fermentiert und in Ethanol vergoren werden kann [70, S.16].

Die Verzuckerung (=Hydrolyse) von Lignozellulose kann dabei mittels

- enzymatisch katalysierter Hydrolyse oder
- säurekatalysierter Hydrolyse

realisiert werden.

Weitere Informationen über die Herstellung von Bioethanol aus Lignozellulose sind in [3, S.809], [68] und [28, S.53] zu finden.

Destillation und Dehydration

Unabhängig vom eingesetzten Rohstoff (Zucker, Stärke oder Zellulose) ist das Resultat der Fermentation eine Lösung von Ethanol in Wasser. Um das gewonnene Ethanol als Treibstoff nutzen zu können, muß zuvor das Wasser entfernt werden. Dazu wird die Lösung in einem ersten Schritt destilliert und anschließend weiter dehydriert, siehe [28, S.54]. Zusätzliche Informationen zu diesen Prozessschritten sind in [70, S.16 ff] und [71, S.23] zu finden.

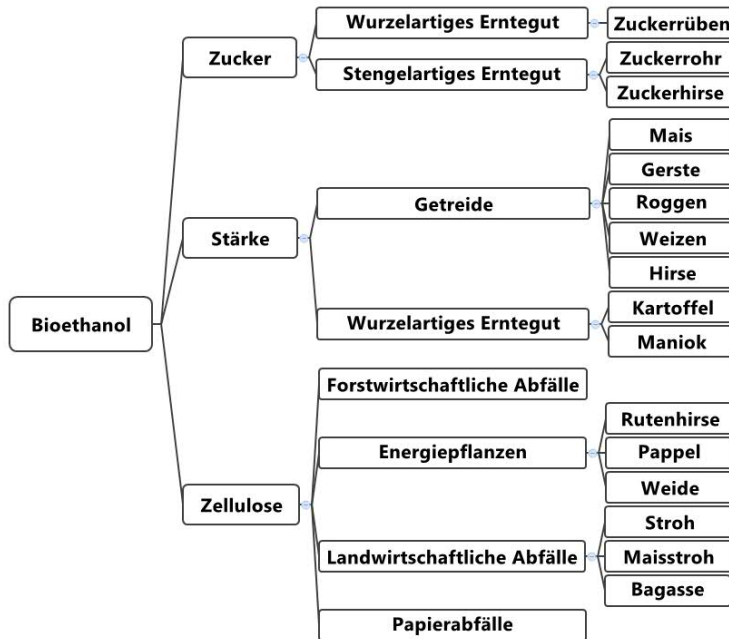


Abbildung 8.5: Rohstoffe für die Bioethanolerzeugung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [28, S.41].

Ausgangsstoffe der Bioethanolproduktion

Als Rohstoffe für die Bioethanolproduktion können alle Pflanzen herangezogen werden, die Zucker enthalten bzw. die man in Zucker umwandeln kann, also auch stärke- und zellulosehaltige Pflanzen. Wie zuvor dargestellt sind Zuckerpflanzen relativ einfach umwandelbar während bei Lignozellulosepflanzen die Zellulose erst aufwendig aufgeschlossen werden muß [3, S.115]. Abbildung 8.5 gibt einen Überblick darüber, welche Rohstoffe für die Ethanolproduktion zum Einsatz kommen können.

Als Pflanzen mit einem technisch nutzbaren Zuckeranteil werden in Mitteleuropa im Wesentlichen Zuckerrüben großtechnisch angebaut, grundsätzlich wäre aber auch Zuckerhirse (Sweet sorghum) anbaubar [3, S.116].

Weitere Information zu Bioethanol und die Ernteerträge einzelner Energiepflanzen sind in [60, S.39ff, S.95ff] nachzulesen.

8.7 Biobutanol

Biobutanol wird ähnlich wie Bioethanol durch Fermentation von Biomasse gewonnen, allerdings kommt dabei ein anderes Bakterium zum Einsatz. Biobutanol hat laut [44, S.82] und [66, S.99] eine höhere Energiedichte als Bioethanol, es ist nicht hygroskopisch und weniger korrosiv. Weiters sind auch bei höheren Beimischungsquoten keine Modifikationen am Motor notwendig, zusätzlich gibt es bei diesem Treibstoff auch keine Dampfdruckprobleme.

8.8 Biogas und Biomethan

Biogas ist ein Gasgemisch aus Methan CH_4 und Kohlendioxid CO_2 . Um das Biogas als Treibstoff in Fahrzeugen oder für eine Einspeisung ins Erdgasnetz nutzen zu können, wird es weiter aufbereitet, bei dieser Aufbereitung wird das Gas von Schwefel, Ammoniak und CO_2 befreit und entwässert, das hochwertige Endprodukt ist Biomethan [71, S.29]. Biomethan ist einer der am effizientesten nutzbaren und sauber verbrennenden Biotreibstoffe auf dem Markt.

Einsatzgebiet

Die Möglichkeiten der Biogasnutzung sind vielfältig, wesentliche Anwendungsfälle sind z.B. Wärmebereitstellung, Nutzung in VKM und Blockheizkraftwerken sowie die Einspeisung in das Erdgasnetz.

Beim Einsatz in Verbrennungsmotoren werden meist Ottomotoren mit Biogas betrieben, allerdings ist Biogas in Kombination mit einem Zündstrahl aus Diesel grundsätzlich auch in Selbstzündungsmotoren einsetzbar. Diese Motoren werden Zweibrennstoffmotoren (dual fuel) genannt, neben fossilem Diesel können auch biogene Treibstoffe wie Pflanzenöl oder Biodiesel als Zündöl verwendet werden [3, S.915].

Aus wirtschaftlichen Überlegungen ist die Verwendung von Biogas vor allem bei der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft (bzw. Strom) in Blockheizkraftwerken (BHKW) interessant, sie stellt die in Europa inzwischen am meisten verbreitete Nutzungsform dar [3, S.916].

Herstellungsverfahren

Für die Biomethanherzeugung gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Herstellungsrouten:

- Herstellung aus Biogas (anaerobe Methangärung)
- Vergasung von Biomasse (aerobe Oxidation)

Bei der Methangärung bauen (im Gegensatz zum aeroben Abbau) ausschließlich Bakterien die organische Masse in sauerstofffreiem Milieu unter Freisetzung von Biogas ab [3, S.853], die Erzeugung durch aerobe Oxidation wird in Kapitel 8.2.1.2 beschrieben. Weitere Informationen über die Biogaserzeugung sind in [60, S.49 ff] zu finden.

Ausgangsstoffe

Das Ausgangsprodukt für die Biomethanherzeugung ist Biogas, welches aus verschiedenen Rohstoffquellen erzeugt werden kann. Die Auswahl an Rohstoffen ist deutlich größer als bei anderen Biotreibstoffen wie z.B. Ethanol oder Biodiesel, für Biogas kann jede organische Quelle herangezogen werden.

Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit der Biogaserzeugung unter Verwendung von feuchter Biomasse und Abfällen wie Abwässer, Rückstände und Exkrememente aus der Viehzucht. Bei diesen Rohstoffen beträgt der Feuchtegehalt meist mehr als 60%, diese Stoffe sind daher für andere Treibstoffherzeugungsrouten kaum einsetzbar. Biogas kann also aus fast allen Arten von Biomasse erzeugt werden, inklusive nasser Biomasse welche sonst nicht für die Biotreibstoffproduktion nutzbar ist [28, S.109].

Gasspeicherung

Da Biogas eine niedrige Energiedichte aufweist, wird die Speicherkapazität aus ökonomischen Gründen so gewählt, dass Nachfragespitzen nur innerhalb von einigen Stunden durch den Speicher ausgeglichen werden können. Je nach Verfügbarkeit liegt dieser Zeitraum in der Praxis zwischen 0,5 und 12 Stunden. Eine längerfristige Speicherung ist aufgrund der geringen Energiedichte und der dadurch zu speichernden großen Volumina kaum ökonomisch darstellbar [3, S.900].

8.9 Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether

Aus Ethanol läßt sich auf chemischem Weg Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE) gewinnen, dieser Ether wird vornehmlich als Oktanzahlverbesserer Ottokraftstoffen zugesetzt. Zu diesem Zweck wird Ethanol in petrochemischen Anlagen mit Isobuten verestert, dieses Isobuten wird aus der Zerlegung von Erdöl oder Erdgas und damit aus fossilen Energieträgern gewonnen.

Insgesamt bietet die Zumischung von ETBE gegenüber einer Zumischung von Ethanol zu Ottokraftstoffen allerdings keine quantifizierbaren Vorteile [3, S.848].

8.10 Erdgas

Unter dem Begriff Erdgas werden alle gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen verstanden, die aus der Erde stammen und brennbar sind. Zum überwiegenden Teil besteht Erdgas aus Methan CH_4 und ist daher sehr gut als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren geeignet. Grundsätzlich stellt Erdgas die gleichen Ansprüche an den Motor wie der Betrieb mit Ottokraftstoff, aufgrund der höheren Klopfestigkeit kann der Motor allerdings höher verdichtet werden was Vorteile in Bezug auf Verbrauch und Leistung bringt.

Da Erdgas von allen fossilen Energieträgern den geringsten Kohlenstoffgehalt und den höchsten Wasserstoffanteil hat, entstehen bei der Verbrennung geringere Emissionen an CO , CO_2 und Ruß [24, S.235].

Für die Speicherung an Bord eines KFZ muß die volumetrische Energiedichte von Erdgas erhöht werden. Geschieht das durch Kompression auf Drücke von etwa 200 bar spricht man von Compressed Natural Gas (CNG), wird das Gas durch tiefkalte Speicherung (unter 112K bzw. $-161^\circ C$) in Kryotanks flüssig gelagert nennt man es Liquefied Natural Gas (LNG), siehe [24, S.237].

8.11 Flüssiggas

Flüssiggas, auch Liquefied Petroleum Gas (LPG) oder Autogas genannt, wird als Nebenprodukt direkt bei der Gasförderung oder Rohölraffination gewonnen. Es besteht hauptsächlich aus Propan C_3H_8 und Butan C_4H_{10} , nicht zu verwechseln mit verflüssigtem Erdgas LNG welches hauptsächlich aus Methan CH_4 besteht. Flüssiggas ist bei Umgebungsbedingungen ebenfalls gasförmig, läßt sich im Gegensatz zu Erdgas jedoch bereits bei moderaten Drücken und somit geringem Energieaufwand verflüssigen und wird bei etwa 8 bar und Umgebungstemperatur in flüssiger Form gespeichert. Die Speicherung als Flüssigkeit mit

höherer Energiedichte erlaubt bei ähnlich geringen Emissionen wie sie durch die Verbrennung von CNG entstehen größere Fahrzeugreichweiten [24, S.237].

8.12 Wasserstoff

Als kohlenstofffreier Energieträger steht Wasserstoff H_2 weltweit im Zentrum von Forschungsaktivitäten. Er ist ein wichtiger Grundstoff für chemische Prozesse und wird in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt [7, S.9]. Wasserstoff kann außerdem in Verbrennungskraftmaschinen äußerst schadstoffarm oder in Brennstoffzellen schadstofffrei umgesetzt werden [7].

Vorteilhaft in der motorischen Anwendung von Wasserstoff ist die Tatsache, dass ein Erdgasinjektor auch für Wasserstoff eingesetzt werden kann, ohne dabei Öffnungsquerschnitt und Öffnungszeit wesentlich verändern zu müssen [7, S.192]. Man kann somit einen Gasmotor einerseits mit Methan aus Erdgas oder Biogas betreiben, andererseits auch mit Wasserstoff. Sind weiters noch Sensoren im Tank verbaut, welche die jeweiligen Anteile der beiden Gase messen und die Motorsteuerung darauf ausgelegt ist, kann der Motor auch mit beliebigen Gemischen der beiden Treibstoffe betrieben werden. Dieses Konzept erlaubt sowohl die Nutzung der im Aufbau befindlichen Infrastruktur für Erdgas als auch eine mögliche zukünftige Wasserstoffinfrastruktur, bei solch einer gemeinsamen Nutzung der vorhandenen Erdgasinfrastruktur spricht man auch von einem „Brückenkonzept“ für die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff [72, S.16].

Der Prototyp eines multivalenten Fahrzeugs mit solch einem Motor wurde an der Technischen Universität Graz vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik in Kooperation mit der Hydrogen Center Austria GmbH (HyCentA) entwickelt [7, S.198]. Das Fahrzeug kann mit Benzin, Erdgas, Wasserstoff und beliebigen Erdgas-Wasserstoff-Gemischen (H₂NG) betrieben werden, es ist mittlerweile typisiert und als Versuchsfahrzeug im Einsatz [72, S.1].

Die Herstellung von Wasserstoff H_2 kann unter anderem schadstofffrei durch die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus regenerativen Energiequellen erfolgen, dies ist allerdings mit erheblichen Kosten verbunden. Aus wirtschaftlichen Gründen wird derzeit deshalb ein Großteil des Wasserstoffs mittels Dampfreformierung aus Erdgas erzeugt. Diese Herstellungsvariante, basierend auf fossilen Kohlenwasserstoffen, bildet allerdings CO_2 und ist deshalb aus ökologischer Sicht nicht wünschenswert [7, S.49].

8.13 Synthetische Treibstoffe

Synthetische Biokraftstoffe können unter anderem aus fester Biomasse oder Kohle auf Basis einer thermo-chemischen Umwandlung erzeugt werden [3, S.653].

Neben der Pyrolyse (siehe Kapitel 8.2.1.3 auf Seite 82) von Biomasse ist dies auch über eine Synthese aus dem Produkt- oder Synthesegas möglich, welches durch die thermochemische Vergasung biogener Festbrennstoffe erzeugt werden kann [3, S.653], siehe Kapitel 8.2.1.2 auf Seite 82.

Grundsätzlich lassen sich somit die zwei verschiedene Herstellungsrouten

- Vergasungsbasierter Herstellungsprozess

- Pyrolysebasierter Herstellungsprozess

von synthetischen Treibstoffen unterscheiden [59, S.35].

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Syntheserouten zur Herstellung flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe, welche auf Basis fossiler oder biogener Festbrennstoffe anwendbar sind. Beispielsweise können mit der Fischer Tropsch Synthese oder der Methanolsynthese flüssige Biokraftstoffe hergestellt werden, prinzipiell ist auch die synthetische Herstellung von Ethanol oder gemischten Alkoholen möglich.

Alternativ dazu können auch gasförmige Kraftstoffe wie z.B. synthetisch hergestelltes Erdgas (SNG, Synthetic Natural Gas), Dimethylether (DME) und Hythane (Mischungen aus Methan und Wasserstoff) synthetisiert werden [3, S.653].

Die vier wichtigsten Synthesepfade für die Herstellung von Treibstoffen sind:

- Fischer-Tropsch-Synthese
- Methanol-Synthese
- SNG-Synthese
- DME-Synthese

In Abbildung 8.6 sind diese vier Pfade zur Herstellung von Synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse schematisch dargestellt.

8.13.1 Fischer-Tropsch-Synthese

Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mittels Fischer-Tropsch-Synthese erfolgt unabhängig vom verwendeten Rohstoff immer nach den folgenden drei Prozeßschritten, siehe dazu auch Abbildung 8.6:

1. Umwandlung des Rohstoffs in Synthesegas (auch Produktgas genannt, dies ist eine Mischung aus CO und H_2)
2. Umwandlung des Synthesegases mittels Fischer-Tropsch-Synthesen in Fischer-Tropsch-Rohprodukte
3. Hydroprocessing / Hydrocracken der Primär-FT-Produkte in die Endprodukte

Das Spektrum der Fischer-Tropsch-Rohprodukte, die den Fischer-Tropsch-Synthesereaktor verlassen, muss für eine Nutzung als Motorenkraftstoff weiter aufbereitet werden, dazu werden die einzelnen Fraktionen destillativ getrennt. Im Ergebnis liegen Rohbenzin (Naphta, C4 bis C9), Fischer-Tropsch-Diesel (C10 bis C19) und Wachse (C20+) vor [3, S.660].

Nach Aufspaltung der langkettigen Kohlenwasserstoffe ergibt dieser Herstellungsprozess letztendlich einen sehr hochwertigen Treibstoff. Er ist frei von Schwefel, Stickstoff und Aromaten und kann mit bestimmten Siedelagen und Zündeigenschaften reproduzierbar aus unterschiedlichen Rohstoffen hergestellt werden [7, S.210]. Vor allem für Dieselmotoren ist dieser Treibstoff durch seine hohe Cetanzahl (über 75) besonders geeignet. Durch den Herstellungsprozess ist es außerdem möglich, dem Treibstoff für spezielle Anwendungsfälle wie z.B. HCCI (siehe Kapitel 6.1.1.4 auf Seite 36) maßgeschneiderte Eigenschaften zu verpassen [4, S.167]. Diese Variationsmöglichkeiten reichen so weit, dass je nach Bedarf Treibstoff mit Eigenschaften von Diesel und von Benzin hergestellt werden kann [28, S.107].

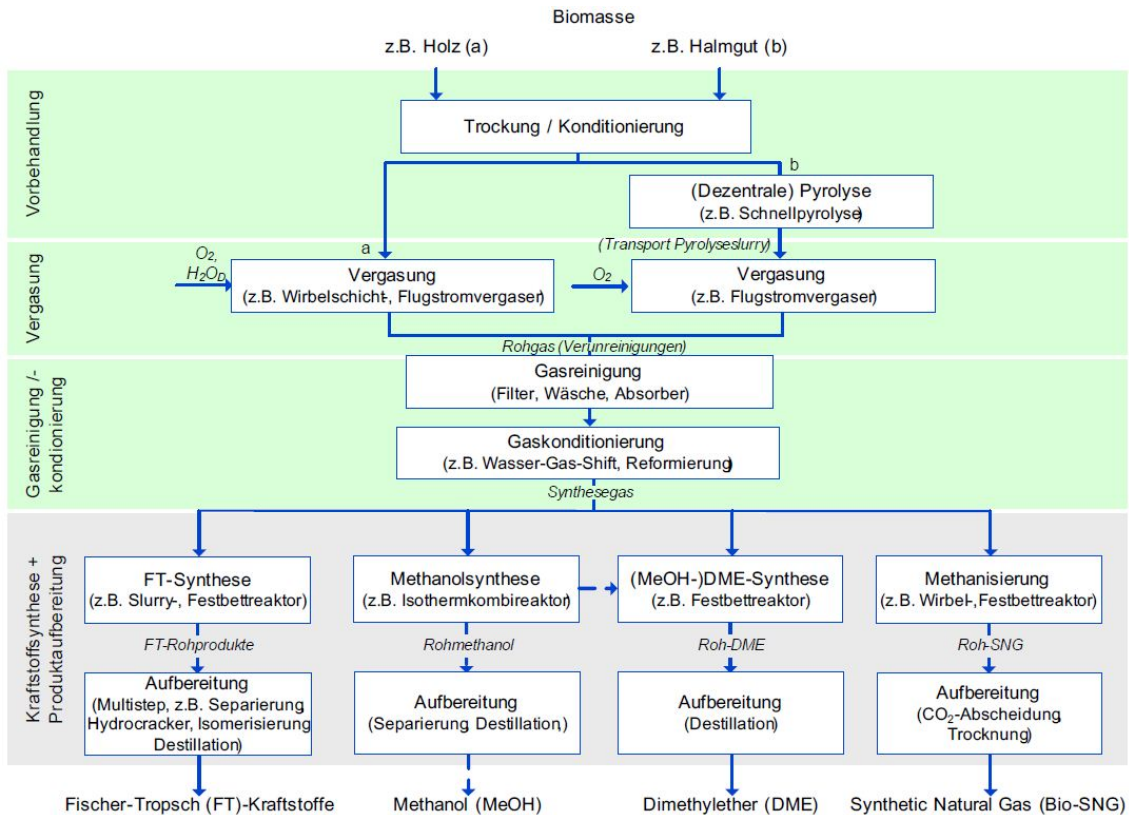


Abbildung 8.6: Schematische Übersicht zur Bereitstellung von ausgewählten synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse.

Quelle: [3, S.654].

8.13.2 Methanolsynthese und Methyl-Tertiär-Buthyl-Ether MTBE

Neben der Fischer-Tropsch-Synthese kann das Synthesegas auch als Ausgangsmaterial für andere Kraftstoffe bzw. eine Reihe weiterer Prozessrouten verwendet werden. Vor allem die Methanolsynthese wird heute bereits in industriellem Maßstab angewandt [11, S.205], das erzeugte Methanol kann anschließend z.B. als Oktanzahlverbesserer in Form von Methyl-tertiär-buthyl-ether (MTBE) oder in Reinform in Brennstoffzellen oder Motoren genutzt werden [73, S.9], [11, S.206].

Eine Barriere für den Einsatz von Methanol als Treibstoff stellt seine Gefahr für die Gesundheit dar, Methanol ist giftig (tödliche Dosis 10-75 g) und kann auch über die Haut aufgenommen werden [74, S.84].

8.13.3 XTL

Unter dem Synonym XTL werden die drei Begriffe

- CTL (Coal to Liquid)
- GTL (Gas To Liquid)

- BTL (Biomass To Liquid)

zusammengefasst.

XTL ist somit ein Überbegriff für die Herstellung von synthetischen Treibstoffen aus Kohle, Erdgas und Biomasse. Allen drei Kraftstoffen gemeinsam ist die Herstellung über Synthesegas mit anschließender Synthetisierung des gewünschten Kraftstoffs, dabei können verschiedene Treibstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften wie z.B. Methanol, DME, synthetisches Benzin, synthetischer Diesel und synthetisches Erdgas (Synthetic Natural Gas, SNG) hergestellt werden.

Der Herstellungsprozess mit dem Zwischenschritt Synthesegas erlaubt somit sowohl bei den verwendeten Rohstoffen (Kohle, Gas, verschiedene Arten von Biomasse) als auch bei den erzeugten Produkten eine größtmögliche Flexibilität [75, S.38].

8.13.4 CTL

Durch den XTL Prozess ist es wie oben erwähnt möglich, auch Kohle in flüssigen Treibstoff umzuwandeln. Die weltweiten Kohlereserven und -reichweiten sind zwar deutlich größer als jene von Öl oder Gas, trotzdem wird dieser Pfad der Kraftstoffherstellung aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung zumindest in großem Maßstab nicht als zukunftssträftig angesehen [44, S.25].

8.13.5 GTL

Unter Gas To Liquid (GTL) wird die Verflüssigung von Erdgas über den Zwischenschritt der Synthesegaserzeugung verstanden.

8.13.6 BTL

Biomass-To-Liquid (BTL) Kraftstoffe werden bisher noch nicht im großtechnischen Maßstab sondern nur im Labor und kleineren Versuchsanlagen hergestellt [76, S.11], sie werden deshalb zu den Treibstoffen der zweiten Generation gezählt. Die technische Machbarkeit ist somit grundsätzlich gegeben, die größten Herausforderungen bestehen derzeit noch bei der Biomassevergasung [76, S.12].

Im Gegensatz zu Ethanol aus Zellulose kann bei Herstellung von BTL-Treibstoffen auch das Lignin aus Lignozellulosepflanzen verwertet werden, dies ist ein bedeutender Pluspunkt [28, S.104].

Weitere Informationen über die einzelnen Prozessschritte bei der BTL-Treibstoffherstellung aus Biomasse finden sich in [70, S.23 ff], [71, S.21], [76, S.11ff] und [75, S.37ff].

8.14 Stoffeigenschaften von alternativen Treibstoffen

In Tabelle 8.3 werden die wichtigsten Stoffeigenschaften für ausgewählte Treibstoffe zusammengefasst.

Tabelle 8.3: Stoffeigenschaften von Treibstoffen

Eigenschaft	Einheit	Benzin (Super Plus)	Diesel	Jet A-1	Rapsöl	Biodiesel (FAME)	BTL	Bioethanol	Methan	Wasserstoff	Pyrolyseöl
Dichte (flg.) bei und 1,013 bar	kg/m^3 $^{\circ}C$	760 15	830 15	775 - 840	920	880	760	794 15	423 -162	70,8 -253	1100 - 1300
Dichte (gasförmig) bei 0°C, 1,013 bar	kg/m^3	-	-	-	-	-	-	-	0,716	0,090	-
Siedepunkt bzw. -bereich	$^{\circ}C$	30 - 190	210 - 355	205 - 300	-	-	-	78	- 161,5	- 252,8	-
Gefrierpunkt	$^{\circ}C$	-	-	- 47	-	-	-	-	-	-	-
unterer Heizwert	MJ/kg	41,4	42,9	42,8	37,6	37,1	43,9	26,8	50	120	16-18
Energiedichte flüssig	MJ/dm^3	31,7	35,8	-	34,6	32,7	33,5	21,3	21	8,5	-
Energiedichte gasförmig	MJ/dm^3	-	-	-	-	-	-	-	12,6 (350 bar, 280K)	3,0 (350 bar, 280K)	-
ROZ	-	100	-	-	-	-	-	107	130	-	-
MZ	-	88	-	-	-	-	-	-	100	0	-
CZ	-	-	52-54	-	>39	>51	>70	-	-	-	-
Viskosität	mm^2/s	-	2,0 - 4,5	< 8	74	3,5 - 5,0	4	1,5	-	-	13 - 80
Flammpunkt	$^{\circ}C$	-	> 55	> 38	> 220	> 120	88	12,8	-	-	45- 100
laminare Flammen- geschwindigkeit	cm/s	ca. 40	ca. 40	-	-	-	-	-	ca. 42	ca. 230	-
C	Gew.- %	85,6	86,1	-	-	-	-	52	74,9	0	32-49
H	Gew.- %	12,2	13,9	-	-	-	-	13	25,1	100	6-8
O	Gew.- %	2,2	0	-	-	-	-	35	0	0	44-60

Quellen: [7, S.163], [28, S.89], [3, S.686], [3, S.756], [3, S.845], [32, S.17].

Kapitel 9

Auswahl geeigneter Treibstoffe

Ein Schlüsselpunkt dieser Arbeit ist die Beantwortung der Frage, welche alternativen Kraftstoffe am besten dafür geeignet erscheinen, fossile Treibstoffe zu ersetzen.

Um diese Frage zu beantworten, werden im Anschluss Kriterien aufgestellt, die ein Treibstoff und dessen Rohstoff im Jahr 2030 nach Meinung des Autors erfüllen muß um ethischen, technischen und wirtschaftlichen Mindestanforderungen zu genügen. Aus den verbliebenen Varianten werden dann jene ausgewählt, die aufgrund von weiteren Bewertungen am besten dafür geeignet erscheinen, fossile Kraftstoffe im Verkehr zu ersetzen.

9.1 Anforderungen an einen idealen alternativen Kraftstoff

Die nachfolgend aufgelisteten Kriterien zeigen, welche Eigenschaften ein idealer Treibstoff laut [74, S.17ff] besitzt bzw. welchen Kriterien er möglichst weitgehend entsprechen sollte, diese Kriterien wurden um jene Anforderungen erweitert, die speziell für alternative Treibstoffe gelten.

Die zehn wichtigsten Punkte der nachfolgenden Auflistung (gekennzeichnet mit den nummerierten Abkürzungen KO für Knock-Out-Kriterium bzw. SK für Schlüsselkriterium) werden in den anschließenden Kapiteln 9.1 auf Seite 106 und 9.3 auf Seite 105 weiter behandelt.

Anforderungen bezogen auf Fahrzeug und Motor:

- In herkömmlichen Motoren einsetzbar (KO2)
- Produkteigenschaften parametrierbar (SK4)
- geringe Viskosität, gute Kälteeigenschaften (SK5)
- Einhaltung enger Toleranzen für die physikalischen und chemischen Eigenschaften
- Zündwilligkeit bzw. Klopfestigkeit im geforderten Bereich
- Bei Ottokraftstoffen: Ausreichend hoher Dampfdruck für Kaltstarts bei tiefen Temperaturen

- Keine schädlichen Ablagerungen von Inhaltsstoffen des Treibstoffs oder von Verbrennungsprodukten im Gemischbildungssystem, Brennraum oder Auspuff
- Enthält keine Substanzen, die als Katalysatorgifte wirken
- Saubere Verbrennung, insbesondere geringe Rohemissionen an NO_x , HC und Rußpartikeln PM für eine einfache und dadurch günstige Abgasnachbehandlung
- Hohe Energiedichte des Gesamtsystems (d.h. mit Treibstoffspeicher)
- Keine Energieverluste bei Nichtbenutzung des Fahrzeugs
- Geringe Aggressivität gegenüber den Materialien im Motor und im Kraftstoffsystem
- Ausreichende Schmiereigenschaften
- Verträglichkeit mit Schmierölen

Anforderungen bezogen auf Infrastruktur, Handhabung und Sicherheit:

- Mit bestehender Technik und Infrastruktur speicherbar und verteilbar (KO5)
- Mit herkömmlichen Treibstoffen mischbar (SK3)
- Lagerbar und transportierbar unter Normaltemperatur und -druck
- Handhabung durch Laien gefahrlos möglich
- Geringer Dampfdruck zur Vermeidung von Verdunstungsverlusten bzw. HC -Emissionen
- Geringe Neigung zur Bildung explosionsfähiger Gemische bei Unfällen
- Abstellen des Fahrzeugs in Garagen ohne Einschränkungen möglich

Anforderungen bezogen auf die Wirtschaftlichkeit:

- Hohe Flächenerträge bezüglich der Biomasse und des Kraftstoffs (SK1)
- Rohstoffe in großen Mengen verfügbar (SK2)
- Positive Energiebilanzen
- Geringe oder zumindest langfristig kalkulierbare Kosten
- Weltweite Verfügbarkeit bzw. zumindest Verfügbarkeit auf quantitativ wichtigen Märkten über dichte Tankstellennetze

Anforderungen bezogen auf die Wirkung auf den Menschen:

- Beeinträchtigt die Nahrungsmittelversorgung nicht (KO1)
- Nicht toxisch
- Nicht karzinogen
- Nicht allergieerregend
- Nicht narkotisierend
- Nicht ätzend
- Keine Geruchsbelästigung
- Leicht ab- bzw. auswaschbar

Anforderungen bezogen auf die Umweltwirkungen:

- Mittels regenerativem Anbau herstellbar (KO3)
- Geringer Wasserbedarf beim Anbau der Biomasse durch effiziente Wassernutzung der verwendeten Energiepflanzen
- Schutz vor Bodenerosion
- geringe Emissionen bei der motorischen Verbrennung
- positive Treibhausgasbilanz
- Geringe Emissionen bei der Herstellung
- Geringes photochemisches Potential der Abgase (d.h. geringer Beitrag zur Smog- und Ozonbildung)
- Keine Freisetzung von Elementen, die in der Luft nicht natürlich vorkommen
- Nicht umweltschädigend bei ungewollter Freisetzung in Böden, im Wasser oder in der Luft
- In unverbranntem Zustand nicht treibhauswirksam
- Biologisch leicht abbaubar

9.2 Erstauswahl geeigneter Treibstoffe mittels Knockout-Kriterien

Ausgehend von den oben aufgelisteten Anforderungen an einen idealen alternativen Treibstoff werden die fünf wichtigsten Punkte als Knockout-Kriterium (KO) angeführt, diese muß ein alternativer Treibstoff nach Meinung des Autors erfüllen um für eine künftige großtechnische Anwendung in Frage zu kommen.

9.2.1 Kriterium 1: Kein Konfliktpotential Tank-Teller

Viele heute verwendete Biotreibstoffe nutzen als Rohstoffe Pflanzen, welche zumindest teilweise auch als Nahrungsmittel Verwendung finden. Gleichzeitig sterben weltweit etwa 25.000 Menschen täglich an Unterernährung (das sind mehr Menschen, als durch Aids, Malaria und Tuberkulose zusammen getötet werden), zwei Drittel davon sind Kinder unter fünf Jahren [77, S.8].

Um jegliches Konfliktpotential zwischen der Landnutzung für Nahrungs- und Biotreibstoffproduktion (siehe z.B. [78, S.28]) zu verhindern, wird als erstes Knock-Out-Kriterium für die künftige Biotreibstoffherstellung in der EU eine Abkehr von essbaren bzw. als Tierfutter verwendbaren Pflanzen als Rohstoff angenommen. Dies trifft vor allem Treibstoffe der ersten Generation, wie z.B. Biodiesel aus Raps oder Ethanol aus Kartoffeln oder Zuckerrüben, welche somit aus den weiteren Betrachtungen ausscheiden. Auch Importe von Nahrungsmittelpflanzen aus Entwicklungsländern werden dadurch in dieser Arbeit ausgeschlossen, da diese Importe negative Auswirkungen auf die Sicherheit der Nahrungsmittelversorgung in diesen Ländern haben können [77, S.9].

Werden die verbleibenden Energiepflanzen als weitere Bedingung ausschließlich auf nicht für andere landwirtschaftliche Produktion benötigten Flächen angebaut, sollte sich theoretisch kein Konfliktpotential zwischen der Nahrungsmittelproduktion (Teller) und der Kraftstoffproduktion (Tank) ergeben. In der Praxis der Biotreibstoffproduktion kann aber durch den Bedarf an Trinkwasser trotzdem eine zusätzliche Konkurrenzsituation mit der Nahrungsmittelherstellung entstehen [79, S.52], [77, S.4].

9.2.2 Kriterium 2: In herkömmlichen Verbrennungsmotoren einsetzbar

Als zweites KO-Kriterium wird in dieser Arbeit von künftigen alternativen Treibstoffen gefordert, dass sie in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können. Dadurch wird sichergestellt, dass die vorhandene Fahrzeugflotte auch mit künftigen Kraftstoffen betrieben werden kann und eine gleitende Markteinführung der alternativen Treibstoffe möglich ist.

Die meisten Dieselmotoren können ohne vorherige Modifikationen mit Biodieselbeimischungen bis zu 20% (B20) betrieben werden, vor allem wenn die Fahrzeuge in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre produziert wurden. Bei älteren Modellen müssen gegebenenfalls Kunststoffteile und Treibstoffleitungen durch resistente Ersatzteile ausgetauscht werden, da Biodiesel manche Kunststoffe angreift und zerstört [28, S.91].

Pflanzenöl kann ebenfalls in Dieselmotoren verwendet werden, aufgrund der viel höheren Viskosität (etwa 12 mal höher als bei Diesel) sind aber Veränderungen an den Motoren durchzuführen [28, S.92].

BTL Treibstoffe sind aufgrund der Variation der Treibstoffeigenschaften bei der Herstellung grundsätzlich für alle Anwendungen in jedem herkömmlichen Verbrennungsmotor sehr gut einzusetzen. Vor allem beim Einsatz in Flugzeugturbinen sind Kraftstoffqualität und Kraftstoffeigenschaften von besonderer Bedeutung, hier bieten sich maßgeschneiderte BTL-Kraftstoffe besonders an und sind Bioethanol oder Biodiesel vorzuziehen [80, S.13]. Als Beimischung zu fossilem Jet-Fuel wurde ein synthetischer Treibstoff auf Basis der Fischer-Tropsch-Synthese bereits für den Einsatz im Flugverkehr zugelassen [32, S.15].

Weiterführende Informationen über den Einsatz von Flugzeugtreibstoffen in Kolbenmotoren und Verbrennungsturbinen, deren strenge Standards und besondere geforderte

Eigenschaften sind in [32] zu finden.

9.2.3 Kriterium 3: Aus regenerativem Anbau herstellbar

Mit diesem Kriterium werden jene Energiequellen ausgeschlossen, die nicht mittels regenerativem Anbau herstellbar und somit nicht erneuerbar sind.

Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle Erdgas. Aufgrund seiner Eigenschaften und chemischen Zusammensetzung ist Erdgas zwar als Treibstoff für Verbrennungsmotoren gut geeignet (hoher Wirkungsgrad durch hohe Verdichtung aufgrund hoher Methanzahl sowie verhältnismäßig geringe CO_2 Emissionen wegen günstigem $C-H$ -Verhältnis), genau wie Erdöl ist es aber ein fossiler, nicht erneuerbarer Energieträger der in absehbarer Zeit (in wenigen Jahrzehnten) den Peak seiner Produktion erreicht haben wird. Die Probleme mit der Energieversorgung durch Erdgas sind im Grunde daher die gleichen wie bei Erdöl, diese Probleme werden durch den Einsatz von Erdgas als Treibstoff nur um eine überschaubare Zeitspanne nach hinten verschoben aber nicht gelöst.

9.2.4 Kriterium 4: In der EU produzierbar

Dieser Auswahlfaktor ist im Gegensatz zu den ethischen, technischen und ökologischen Einschränkungen der vorab genannten Kriterien zwar keine Anforderung an einen alternativen Treibstoff laut Kapitel 9.1 auf Seite 99, volkswirtschaftlich und auch sicherheitspolitisch ist dieses Kriterium allerdings von größter Bedeutung.

Es begrenzt das technische Potential einerseits durch den Wegfall jener Energiepflanzen, die unter den klimatischen Bedingungen Europas nicht oder nur unzureichend gedeihen (z.B. Zuckerrohr), andererseits ist dieses Kriterium eine sehr starke Einschränkung des Potentials aufgrund der begrenzten verbleibenden Anbaufläche innerhalb der EU. Durch diese Einschränkung wird verdeutlicht, ob und wie stark die Europäische Union künftig von Energieimporten abhängig sein wird.

Zur Bioethanolherstellung ist noch anzumerken, das Ethanol aus Zuckerrohr in Brasilien keineswegs der ideale Biotreibstoff bezüglich Nachhaltigkeitskriterien und günstigen Produktionskosten ist, als der er sehr häufig in den Medien dargestellt wird. In den Zuckerrohrplantagen herrschen zum Teil katastrophale Arbeitsbedingungen, das katholische Hilfswerk geht von tausenden Landarbeitern aus, die auf diesen Plantagen unter Missachtung von Menschenrechten in sklavenartigen Bedingungen leben und arbeiten müssen [71, S.78].

Ohne diese Menschenrechtsmissachtung wäre es nicht möglich, Biotreibstoffe aus Zuckerrohr zu jenen günstigen Preisen zu erzeugen, die in der Literatur oft als Benchmark und positives Beispiel für die gesamte Biotreibstoffindustrie genannt werden. Ähnliches gilt für Palmöltreibstoffe aus Südostasien, zusätzlich besteht in der Plantagenwirtschaft von Malaysia und Indonesien noch das Problem der Kinderarbeit [71, S.79].

Weiters werden die benötigten landwirtschaftlichen Flächen für die Produktion von Zuckerrohr und Palmöl oft durch Rodung von Regenwaldbeständen gewonnen, die Vernichtung der CO_2 Speicherkapazitäten und die gleichzeitige Freisetzung großer Mengen an Treibhausgasen ist - neben allen anderen negativen Auswirkungen die die Zerstörung der Wälder mit sich bringt - eine doppelte Belastung für das Weltklima [71, S.86], [81, S.13ff]. Solange die genannten sozialen Probleme und die Zerstörung tropischen Regenwaldes nicht zu 100% gelöst und beseitigt sind, ist ein Import solcher Treibstoffe in die EU nicht nur aus

Gründen der Abhängigkeit zu vermeiden, sondern auch aus moralischen Gesichtspunkten strikt abzulehnen.

9.2.5 Kriterium 5: Mit bestehender Infrastruktur speicher- und verteilbar

Für eine breite Einführung von Biotreibstoffen ist die Kundenakzeptanz von größter Bedeutung. Um diese Akzeptanz zu erreichen ist für den Kunden idealerweise weder in der Anwendung ein Unterschied zwischen fossilen und biogenen Treibstoffen ersichtlich, noch sollte er dazu gezwungen sein vorhandenes Fahrzeug kurzfristig zu ersetzen oder in dessen Nutzung eingeschränkt zu sein [1, S.14].

Für alternative Kraftstoffe, die nicht mit bestehender Infrastruktur und Technik verteilt und in Zwischenlagern sowie im Fahrzeug selbst gespeichert werden können, müssten beträchtliche Investitionen in die Versorgungsinfrastruktur getätigt werden um eine Verfügbarkeit vergleichbar mit dem heutigen Netz an Tankstellen ermöglichen zu können. Dies ist zwar technisch möglich, die Investitionen stellen aber eine ökonomische Barriere für die flächendeckende Nutzung dar [48, S.13]. Neben dem finanziellen Aufwand ist in weiterer Folge auch die Problematik durch erhöhtes Fahrzeuggewicht, geringeres Platzangebot sowie die zum Teil deutlich reduzierten Reichweiten beim Einsatz von Druckspeichern für gasförmige Treibstoffe in den Fahrzeugen zu beachten [82, S.44].

Insgesamt stellen diese Gewichts-, Sicherheits-, Raum- und Kostenprobleme eine derartig große Hürde für einen großflächigen Einsatz dar, dass diese Treibstoffe bei mobilen Anwendungen nach Meinung des Autors mittelfristig nur Nischenanwendungen bleiben (im Gegensatz zu stationären Anwendungen von z.B. Biogas in Blockheizkraftwerken oder stationären Gasmotoren zur Stromerzeugung), sie werden also von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Dies ist somit ein Knock-Out-Kriterium für alle gasförmigen Treibstoffe wie z.B. Wasserstoff oder komprimiertes Erdgas CNG.

Für detaillierte Informationen und technische Daten zu On-Board Speichersystemen von verschiedenen Treibstoffen sei auf [82, S.46 ff] und [82, S.109 ff] verwiesen.

Sollte das bisher ungelöste Problem einer günstigen und gleichzeitig nachhaltigen Wasserstoffproduktion mittels erneuerbaren Energiequellen erfolgreich gelöst werden (siehe Kapitel 9.2.3) wäre dieses Knock-Out-Kriterium zumindest für spezielle Anwendungen wie z.B. in kommunalen Fahrzeugen zu überdenken, vor allem da der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren durch mehrere Projekte, speziell an der TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, sehr erfolgreich demonstriert wurde [72]. Von diesem Institut stammt das erste und bisher einzige in Österreich für den uneingeschränkten Straßenbetrieb zugelassene Fahrzeug mit Wasserstoffantrieb [72, S.14].

Letztendlich wird davon ausgegangen, dass eine nennenswerte Marktdurchdringung von Biotreibstoffen nur möglich ist wenn herkömmliche Motoren und die bestehende Infrastruktur genutzt werden kann, aus diesem Grund werden voraussichtlich auch im Jahr 2030 flüssige Kraftstoffe den Markt dominieren und gasförmige Treibstoffe nur in Nischenanwendungen zum Einsatz kommen, siehe dazu auch [1, S.14 f].

9.2.6 Zusammenfassung der Knock-Out-Kriterien

In der Tabelle 9.1 werden nun die wichtigsten alternativen sowie biologischen Kraftstoffe aufgelistet und mit den oben beschriebenen Knock-Out-Kriterien beurteilt.

Jene Treibstoffe, die alle fünf KO-Kriterien erfüllen, werden im folgenden Kapitel bezüglich zusätzlich relevanter Eigenschaften miteinander verglichen. Nach der Auswahl durch die fünf Knock-Out-Kriterien verbleiben folgende Treibstoffe:

- Bioethanol und Biobutanol der zweiten Generation aus Kurzumtriebspflanzen (Weide, Pappel, Switchgrass)
- Bioethanol und Biobutanol der zweiten Generation aus Reststoffen (Stroh, Maissengeln usw.)
- Bioethanol und Biobutanol der dritten Generation aus Algen
- Biodiesel der dritten Generation aus Mikroalgen
- Pflanzenöl der dritten Generation aus Mikroalgen
- Biodiesel aus Altöl und anderen Reststoffen
- HVO Treibstoffe aus Algen
- Biodiesel aus Tierfett
- BTL Treibstoffe aus Reststoffen
- BTL Treibstoffe aus Energiepflanzen (Weide, Pappel, Switchgrass)

Diese Treibstoffe werden nachfolgend in einem weiteren Schritt auf Vor- und Nachteile bezüglich der vorab genannten Schlüsselkriterien (SK) untersucht, diese Schlüsselkriterien sowie ausgewählte weitere Kriterien sind nachfolgend beschrieben.

Nicht weiter betrachtet wird aufgrund der KO-Kriterien unter anderem Wasserstoff, da eine großtechnische Erzeugung aus regenerativen Quellen derzeit nicht absehbar ist und Wasserstoff nicht mit bestehender Infrastruktur großflächig verteilt werden kann. Für weitere Informationen und Details zur Nutzung von Wasserstoff als Endenergieträger in mobilen Anwendungen sei auf die Studie [83] verwiesen.

Trotz der grundsätzlich positiven Bewertung ebenfalls von einer weiteren Betrachtung ausgenommen werden an dieser Stelle Hydrierte Öle und Fette (HVO Treibstoffe) sowie Butanol, da es für diese Treibstoffe vergleichsweise wenig belastbare Daten in der Literatur gibt.

9.3 Vergleich der verbliebenen Treibstoffvarianten

Mit den nachfolgenden fünf Schlüsselkriterien (SK) wird nun eine zweite Auswahlstufe der verbliebenen Treibstoffe durchgeführt. Zusätzlich werden vier weitere bedeutende, in dieser Arbeit allerdings nicht in den beiden Auswahlverfahren berücksichtigte Kriterien erläutert.

Tabelle 9.1: Erstauswahl geeigneter Treibstoffe mittels Knockout-Kriterien

Treibstoff	Rohstoff	Kriterium 1: Nahrungsmittelkonkurrenz	Kriterium 2: Herkömmliche Motoren	Kriterium 3: Erneuerbar	Kriterium 4: In EU erzeugbar	Kriterium 5: Herkömmliche Infrastruktur
Bioethanol	Zuckerhaltige Biomasse	-	+	+	0	+
	Stärkehaltige Biomasse	-	+	+	0	+
	Zellulosehaltige Biomasse	+	+	+	+	+
	Algen	+	+	+	+	+
Biodiesel (FAME)	essbare Ölpflanzen	-	+	+	-	+
	Algen	+	+	+	+	+
	Jatropha	0	+	+	-	+
	Frittieröl	+	+	0	+	+
	Tierfette	+	+	0	+	+
Pflanzenöl	analog Biodiesel (FAME)					
Hydrierte Öle und Fette (HVO)	analog Biodiesel (FAME)					
Wasserstoff		+	0	0	+	-
Biobutanol	analog Bioethanol					
Biogas	Energiepflanzen analog Bioethanol					-
	Gräser	+	+	+	+	-
	Gülle	+	+	+	+	-
	organische Abfälle	+	+	+	+	-
BTL	Zellulosehaltige Biomasse	+	+	+	+	+
CNG, LNG	Erdgas	+	+	-	-	-
LPG	Erdgas, Rohöl	+	+	-	-	0

+ ... positive Eigenschaften

0 ... keine klare Einteilung möglich

- ... negative Eigenschaften

9.3.1 Nettoenergieerträge von Biotreibstoffen (SK1)

Der Nettotreibstoffenergieertrag pro Fläche (ermittelt aus der Kombination der Bruttoerträge und den Energiebilanzen) ist einer der wichtigsten Maßstäbe, um verschiedene Biotreibstoffsorten aus unterschiedlichen Rohstoffen miteinander zu vergleichen.

Idealerweise ist er aussagekräftig als jährlicher Energieertrag [J/ha] (statt z.B. [Liter/ha] oder [kg/ha]) angegeben, durch diese Darstellung führen unterschiedliche Treibstoffeigenschaften wie Dichte und Heizwert nicht zu unübersichtlichen und inkompatiblen Daten.

Weitere Informationen und Daten zu verschiedenen Treibstoffen können in [66, S.20 ff] sowie in [84] und [59, S.82] nachgelesen werden.

9.3.2 Rohstoff in großen Mengen verfügbar (SK2)

Mit diesem Kriterium werden jene Rohstoffe negativ bewertet, die zwar grundsätzlich gut für die Biotreibstoffherstellung geeignet erscheinen, aufgrund mengenmäßiger Begrenzung der verwendeten Rohstoffe aber keinen großen Anteil am Gesamtenergiebedarf decken können.

9.3.3 Mischbarkeit mit fossilen Treibstoffen (SK3)

Mit diesem Kriterium werden jene Treibstoffe bevorzugt, die aufgrund der Mischbarkeit mit herkömmlichen Treibstoffen ohne logistische Probleme in den Markt eingeführt werden können.

Biodiesel ist einfach und vollständig mit fossilem Diesel mischbar, es sind alle Konzentrationen von 0% bis 100% möglich. Typische Mischungen sind bisher B5, B20 und B30 mit 5%, 20% sowie 30% Biodieselgehalt [28, S.91].

9.3.4 Produkteigenschaften parametrierbar (SK4)

Mit diesem Kriterium ist die Fähigkeit gemeint, durch gezielte Veränderung der Kraftstoffeigenschaften während der Produktion die Nachfrageschwankungen zwischen Otto- und Dieselmotoren bzw. Kerosin anpassen zu können.

9.3.5 Geringe Viskosität, gute Kälteeigenschaften (SK5)

Dieses Kriterium berücksichtigt die Einsatzmöglichkeiten der Treibstoffe während den Wintermonaten bzw. in den nördlichen Mitgliedsländern der EU. Kraftstoffe mit hoher Viskosität können in solchen Anwendungsfällen zu Problemen beim Kaltstart oder in der langfristigen Lagerung führen.

Pflanzenöl z.B. hat aufgrund der langkettigen Moleküle eine höhere Viskosität als Dieseltreibstoff, dies führt bei manchen Motoren zu Problemen bei der Verbrennung. Durch Umesterung mit Ethanol wird Öl zu Methylester, dieser Prozess senkt die Viskosität auf das Niveau von fossilem Diesel womit die Probleme durch Verkokung usw. beseitigt sind.

Als Qualitätsmerkmal für die Kälteeigenschaften von Biodiesel gilt der „Cold Filter Plugging Point, CFPP“. Dieser CFPP-Wert gibt Aufschluss darüber, ab welcher Temperatur ein gegebenes Volumen an Kraftstoff einen standardisierten Filter in gegebener Zeit aufgrund zu hoher Viskosität nicht mehr passieren kann [63].

9.3.6 Emissionen bei der motorischen Verbrennung

Bestimmte Treibstoffe haben besondere Vorteile bezüglich der Emissionsbildung. Biodiesel beispielsweise ist gut dafür geeignet, den Anteil an Partikeln, CO und HC zu reduzieren [85, S.100]. Vorteilhaft für die motorische Verbrennung ist dabei der Sauerstoffgehalt durch die Alkoholmoleküle im Biodiesel, dies führt zu einer vollständigeren Verbrennung und bewirkt in weiterer Folge eine Reduktion der genannten Emissionen im Rohabgas [28, S.90].

Nachteilig beim Einsatz von Biodiesel sind die erhöhten NO_x Emissionen [28, S.92], siehe dazu Abbildung 9.1. Weitere Informationen zu Emissionen bei der Verwendung von verschiedenen Biodieselmischungen in Verbrennungsmotoren finden sich in [85].

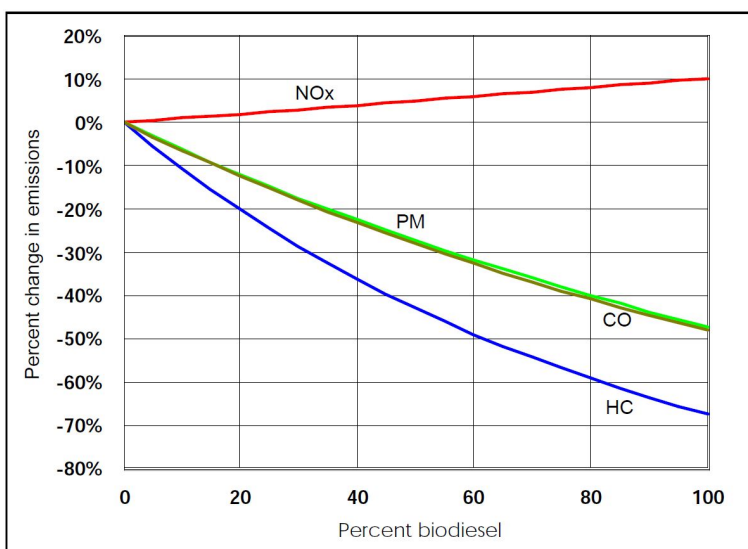


Abbildung 9.1: Durchschnittliche Emissionsauswirkungen von Biodiesel in LKW Motoren. Percent change in emissions = prozentuelle Änderung der Emissionen; Percent biodiesel = Prozent Biodiesel.

Quelle: [86].

BTL Treibstoffe haben noch größere Emissionsvorteile da sie völlig frei von Schwefel sind und ihre Eigenschaften aufgrund der synthetischen Herstellung ideal auf den Verbrennungsprozeß im Motor abgestimmt werden können [28, S.108].

Aufgrund der in Kapitel 4.1.2.2 auf Seite 20 erwähnten „Strenge“ bei den Euro - Emissionsstandards spielen diese positiven Eigenschaften nach Meinung des Autors allerdings langfristig keine allzu große Rolle mehr. Auch die Abgase der fossilen Brennstoffe werden in der EU schon heute und noch verstärkt mit Inkrafttreten der EURO 6 Norm durch aufwendige Abgasnachbehandlungssysteme soweit gereinigt, das die Gesundheitsgefährdung durch die Emissionen von CO , HC und NO_x im Vergleich zur CO_2 Problematik und der nicht von der motorischen Verbrennung hervorgerufenen Feinstaubbelastung (damit ist Feinstaub durch Abrieb der Reifen, Aufwirbelung von Rollsplit usw. gemeint, dieser Feinstaub wird letztendlich auch von E-KFZ erzeugt) nur mehr eine untergeordnete Rolle spielen wird.

9.3.7 Treibhausgasbilanz

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Analysen über die Treibhausgasbilanzen von alternativen Energieträgern, oft mit recht unterschiedlichen Ergebnissen für die einzelnen Treibstoffe. Vor allem Biotreibstoffe der 1. Generation haben in manchen Studien aufgrund des großen Energie- und Düngereinsatzes während der Produktion bei vergleichsweise geringem Energieertrag zum Teil deutlich negative Treibhausgasbilanzen, d.h. es wird durch die Produktion (Well To Tank, WTT), durch die anschließende Nutzung im Fahrzeug (Tank To Wheel, TTW) bzw. insgesamt (Well To Wheel, WTW) mehr Treibhausgas (Green House Gas, GHG) freigesetzt als eingespart.

Für Treibstoffe der 2. und 3. Generation wird im Gegensatz dazu im Allgemeinen von einer positiven Treibhausgasbilanz gesprochen, d.h. durch die Substitution von fossilen Treibstoffen durch diese Kraftstoffe wird insgesamt weniger Treibhausgas emittiert. Da allerdings auch für diese Treibstoffe die Ergebnisse solcher Analysen stark voneinander abweichen bzw. die Systemgrenzen bei den Berechnungen oft völlig unterschiedlich gesetzt sind, werden diese GHG-Emissionen in weiterer Folge nicht betrachtet. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass alle Treibstoffe der 2. und 3. Generation deutlich bessere Treibhausgasbilanzen haben als fossile Treibstoffe.

Weitere Informationen sowie WTT, TTW und WTW-Analysen von Biotreibstoffen finden sich z.B. in [87].

9.3.8 Positive Energiebilanz

Um die Energiebilanzen von Biotreibstoffen miteinander vergleichen zu können, werden in der Literatur unterschiedliche Kennzahlen verwendet, z.B. Net Energy Value NEV, Net Energy Balance NEB, Net Energy Ratio NER oder Energieeffizienz.

Allen Kennzahlen gemein ist, dass sie das Verhältnis von zugeführter Energie (Aufwand) zu Energie im Treibstoff bzw. gewonnener Energie (Nutzen) beschreiben. Oft sind die Systemgrenzen bei der Betrachtung des erforderlichen Energieaufwandes (z.B. Düngerherstellung, siehe [79, S.35]) und der Berücksichtigung von Co-Produkten (z.B. Schlempe oder Glycerin) allerdings sehr unterschiedlich bzw. nicht klar definiert. Da diese Energiebilanzen zusammen mit den Bruttobiomasseerträgen ohnehin in den Nettoenergieerträgen von Treibstoffen (siehe SK1) enthalten sind, werden sie deshalb nicht für die Bewertung der verbliebenen Treibstoffe herangezogen, einzig die NER wird nachfolgend bei der Berechnung der Energieerträge von Algentreibstoffen verwendet.

Als Beispiel sei an dieser Stelle die Definition des NEV laut [79, S.27] angeführt:

$$\begin{aligned} \text{NEV} = & + \text{Energiegehalt des Treibstoffs} \\ & + \text{Energiegehalt der Co-Produkte} \\ & - \text{Energieverbrauch bei Anbau und Ernte der Biomasse} \\ & - \text{Energieverbrauch bei der Umwandlung in den Treibstoff} \\ & - \text{Energieverbrauch des Transports der Biomasse und des Treibstoffs} \end{aligned}$$

Die Berechnung des NER verwendet die gleichen Zahlen bezüglich Energieaufwand und -ertrag, allerdings werden diese nicht subtrahiert sondern miteinander ins Verhältnis gesetzt.

Weiterführende Informationen und verschiedene Definitionen sind z.B. in [28, S.25] dargestellt.

9.3.9 Trinkwassergefährdung und Wasserbedarf

Biodiesel ist rasch biologisch abbaubar und stellt somit bei einer Kontamination von Böden oder Grundwasser eine viel geringere Gefahr dar als fossiler Diesel. Aus diesem Grund wird Biodiesel auch in ökologisch besonders empfindlichen Gegenden wie z.B. Wasserschutzgebieten als Treibstoff für in diesen Regionen betriebene landwirtschaftliche Fahrzeuge eingesetzt.

Reines Pflanzenöl hat noch weniger Gefährdungspotential, im Gegensatz zu Biodiesel wird dieser Treibstoff nicht verestert, enthält daher auch kein Methanol und ist aus diesem Grund in kürzester Zeit biologisch abbaubar [28, S.99].

Eine massive Erhöhung des Energiepflanzenanbaus bedarf zusätzlich großer Mengen an Wasser. Einige Energiepflanzen zeichnen sich durch geringen Bedarf an Wasser pro kg gebildeter Biomasse aus.

9.4 Endauswahl der Treibstoffarten

In Tabelle 9.2 werden die nach der ersten Auswahlstufe (durch die KO-Kriterien) verbliebenen Treibstoffe mit den oben erwähnten Schlüsselkriterien der zweiten Auswahlstufe bewertet. Es zeigt sich, dass BTL Treibstoffe und Bioethanol aus Reststoffen, Biodiesel basierend auf Abfällen und Reststoffen sowie Pflanzenöl aus Algen die gewählten Schlüsselkriterien nicht in vollem Umfang erfüllen können und deshalb in diesem Auswahlverfahren ausscheiden.

Tabelle 9.2: Weitere Beurteilung der zuvor ausgewählten Treibstoffe mit zusätzlichen Bewertungskriterien.

	Hohe Nettoenergieerträge pro Fläche	Rohstoff in großen Mengen verfügbar	Mischbarkeit mit fossilen Treibstoffen	Produkt-eigenschaften parametrierbar	geringe Viskosität, gute Kälte-eigenschaften
2.Generation					
Bioethanol aus Kurzumtriebspflanzen (Weide, Pappel, Switchgrass)	+	+	+	0	+
Bioethanol aus Reststoffen (Stroh, Maisstengel usw.)	0	-	+	0	+
Biodiesel aus Altöl und anderen Reststoffen	0	-	+	0	+
Biodiesel aus Tierfett	0	-	+	0	+
BTL Treibstoffe aus Reststoffen	0	-	+	+	+
BTL Treibstoffe aus Energiepflanzen (Weide, Pappel, Switchgrass)	+	+	+	+	+
3.Generation					
Bioethanol aus Algen	+	+	+	0	+
Biodiesel aus Mikroalgen	+	+	+	0	+
Pflanzenöl aus Mikroalgen	+	+	0	0	-

+ ... positive Eigenschaften

0 ... keine klare Einteilung möglich

- ... negative Eigenschaften

9.5 Zusammenfassende Betrachtung der ausgewählten Biotreibstoffe

Aufgrund der bisherigen Kriterien und Bewertungen erscheinen folgende Treibstoffe am besten dazu geeignet, in Europa angebaut zu werden und einen Teil des Energiebedarfs des Verkehrssektors der EU zu decken:

1. Ethanol aus Lignozellulosepflanzen (Treibstoff der 2. Generation)
2. BTL-Kraftstoffe aus Lignozellulosepflanzen (Treibstoff der 2. Generation)
3. Biodiesel aus Algen (Treibstoff der 3. Generation)
4. Bioethanol aus Algen (Treibstoff der 3. Generation)

Da aus einer Lignozellulosepflanze sowohl Bioethanol als auch BTL Treibstoff hergestellt werden kann, muß für die nachfolgende Potentialanalyse an an dieser Stelle eine Entscheidung bezüglich einer Herstellungsrouten getroffen werden. Beide Varianten unterscheiden sich in den Energiebilanzen aufgrund der vorliegenden Daten kaum, BTL-Treibstoffe haben allerdings mehr Freiheitsgrade bezüglich der Eigenschaften des erzeugten Endproduktes. Im Rahmen der nachfolgenden Betrachtungen wird deshalb der Umwandlung der Energiepflanzen in BTL Kraftstoffe der Vorzug gegeben.

9.5.1 Treibstoffe aus Algen

Algen besitzen die Fähigkeit, Lipide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenhydrate und Wasserstoff zu bilden. Aus diesen Elementen können in weiterer Folge unterschiedliche Treibstoffe hergestellt werden [88, S.2]. Neben der Nutzung als Energierohstoff gibt es weitere Anwendungsgebiete der Algen unter anderem als Nahrungs- und Futtermittel sowie in der chemischen Industrie und Kosmetik, weitere Informationen dazu finden sich in [89, S.11 ff].

Algenstämme können abhängig von Ihrer Größe grundsätzlich in die zwei Hauptkategorien Mikroalgen und Makroalgen eingeteilt werden. Während Makroalgen - ähnlich höheren terrestrischen Pflanzen - definierte anatomische Strukturen (vergleichbar mit Blättern, Stengel und Wurzeln) entwickeln, sind Mikroalgen kleine Mikroorganismen ohne diese Strukturen. Da der Aufbau solcher Strukturen bei Pflanzen Energie erfordert und daher das Wachstum bremst, können Mikroalgen effektiver als Makroalgen oder den meisten terrestrischen Pflanzen Photosynthese betreiben und somit aus Sonnenlicht und CO_2 schnell Biomasse aufbauen [90, S.2]. Aus diesem Grund werden in weiterer Folge Biotreibstoffe aus Mikroalgen behandelt und Makroalgen als Biomassequelle nicht weiter betrachtet.

Informationen über unterschiedliche Anbaumöglichkeiten von Makroalgen sowie eine weltweite Biomassepotentialabschätzung von Mikro- und Makroalgen finden sich in [91].

Aus den drei wichtigsten Komponenten der Mikroalgen (Lipide, Kohlenhydrate und Proteine, für eine detaillierte Angabe dieser Bestandteile abhängig von der Algenpezies siehe [89, S.16]), lassen sich unter anderem Alkohole, Diesel und Methan herstellen [90, S.6]. Einige Algenstämme sind außerdem in der Lage, unter bestimmten Bedingungen Wasserstoff herzustellen [92, S.22], dies wird an dieser Stelle aber nicht weiter behandelt.

Ist die Algenbiomasse geerntet, kann das Öl nicht wie bei z.B. Raps mit konventionellen Methoden extrahiert werden, sondern es sind dazu spezielle Verfahren notwendig. Dies liegt darin begründet, dass die Lipide (also das Öl) direkt in den Zellen der Algen z.B. als Teil der Zellmembrane gespeichert werden [90, S.39]. Die geringe Größe der Zellen und die Dicke der Zellwände erfordern daher eine Zerstörung der Zellen, um das Öl gewinnen zu können, dafür können z.B. Lösungsmittel wie Hexan [93, S.271] oder superkritische Fluide verwendet werden [90, S.41]. Das gewonnene Öl lässt sich dann ähnlich wie andere Pflanzenöle und Fette mittels Umesterung in Biodiesel oder mittels Hydrierung in HVO Treibstoffe umwandeln [94, S.51].

Algenkulturen können in Gebieten angebaut werden, die für jede andere Art der landwirtschaftlichen Nutzung wenig bis gar nicht geeignet sind, zum Beispiel in Wüsten. Sie konkurrieren bezüglich der Landnutzung deshalb nicht mit anderen landwirtschaftlichen Kulturen für die Nahrungsmittelproduktion.

Weiters ist sehr vorteilhaft, dass Algen nicht unbedingt frisches Wasser benötigen, sie gedeihen auch in für die Landwirtschaft unbrauchbarem Schmutzwasser sehr gut [95, S.907]. Vor allem die Verwendung von kommunalen Abwässern bietet sich an, da diese Abwässer als Düngemittellieferant von Stickstoff und Phosphor für die gezüchteten Algen verwendet werden können [92, S.37], [88, S.10]. Die Düngung durch energie- und treibhausgasintensive Chemikalien kann dadurch stark eingeschränkt oder auch vollständig vermieden werden [96, S.1817], [61, S.706].

Zusätzlich können Algen sowohl in Süßwasser wie auch in Salzwasser aus dem Meer angebaut werden [90, S.12], [96, S.1813].

Algenanbausysteme:

Um Mikroalgen zu kultivieren werden grundsätzlich zwei verschiedene Systeme unterschieden [92, S.29 ff]:

- Offene Systeme (Open Pond bzw. Raceway Systeme)
- Geschlossene Systeme (Photobioreaktoren)

Bei den Offenen Systemen besteht die Gefahr, dass die gezüchtete Algenkultur durch andere Algenspezies oder Bakterien verunreinigt wird, für diese Art des Anbaus ist außerdem nur eine sehr geringe Anzahl unterschiedlicher Algenstämme geeignet. Weiters gibt es keine oder nur eingeschränkte Kontrolle über die Wassertemperatur und den Lichteinfall [97, S.4]. Die Wachstumsaison hängt stark von den lokalen klimatischen Gegebenheiten ab und beschränkt sich auf die warme Jahreszeit [28, S.80].

Die großen Vorteile der Open Pond Systeme sind die im Vergleich zu geschlossenen Systemen verhältnismäßig geringen Kosten sowie die hohe Biomasseproduktionskapazität [28, S.80], [88, S.14].

Die zweite Möglichkeit um Algen anzubauen sind geschlossene Systeme, diese bestehen aus transparenten Rohren, Platten oder Säcken [98, S.751] in denen die Algen im Wasser gezüchtet werden. Hauptsächlich aus ökonomischen Gründen sind diese Systeme bisher meist deutlich kleiner ausgeführt, sie haben aber bedeutende Vorteile gegenüber den offenen Systemen:

- Da die Gefahr einer schädlichen Beeinflussung von außen minimiert ist können auch empfindliche Spezies eingesetzt werden.
- Kontaminationen können einfacher verhindert und somit während der gesamten Kultivierung eine Reinkultur gehalten werden, siehe [63].

Alles was die Algenkulturen in Photobioreaktoren für das Wachstum benötigen muß von außen zugeführt werden, dies erlaubt allerdings auch eine optimale und genau abgestimmte Versorgung der Algen mit Licht, CO_2 , Wasser und anderen Nährstoffen. Durch diese genau einstellbaren Verhältnisse kann mit diesen Photobioreaktoren eine höhere volumetrische Produktivität als bei offenen Systemen erreicht werden [99, S.1407]. Ein Vergleich von Open Pond Systemen und Photobioreaktorsystemen bezüglich der Parameter Platzbedarf, Wasserbedarf, erforderlicher Temperatur usw. findet sich in [97, S.11].

Aufgrund der hohen Kosten ist es derzeit jedoch nicht absehbar, dass geschlossene Systeme künftig für die großtechnische Anwendung zum Einsatz kommen [90, S.33, S.73], diese Systeme werden somit bei den nachfolgenden Ertragsberechnungen nicht weiter betrachtet, für künftige großtechnische Anwendungen erscheinen Open Ponds als das am besten geeignete Anbausystem [97, S.9].

Die besten Voraussetzungen für den industriellen Einsatz haben offene Systeme (Open Ponds) bei denen das Wasser in Bewegung gehalten wird, so genannte „Intensive Ponds“, auch als „Raceways“ bezeichnet, auf diese Anbausysteme beziehen sich die nachfolgenden Angaben zu Energiebilanzen und Hektarerträgen [96, S.1815].

Diese Raceways sind typischerweise 15 bis 35 cm tief und haben eine Fläche von 0,2 bis 0,5 Hektar (2.000 bis 5.000 m²). Der Inhalt wird durch ein Paddelrad langsam im Kreis gefördert, Düngereinträge sowie die Algenentnahme können dadurch an einem Punkt erfolgen, zusätzlich ist bei diesen Systemen auch eine Überwachung der wichtigen Parameter wie Temperatur oder Düngerkonzentration möglich und innerhalb gewisser Grenzen regelbar [91, S.35].

Durch die ständige Durchmischung wird vermieden, dass Algen an der Wasseroberfläche zuviel Sonnenlicht aufnehmen und dadurch ihre Zellen absterben [90, S.52], während darunterliegende, abgeschattete Algen aufgrund von Lichtmangel keine Photosynthese durchführen können. Weiters wird die Bildung unerwünschter Ablagerungen und Temperaturdifferenzen im Raceway verhindert [91, S.19]. Eine schematische Darstellung eines Raceway Ponds sowie Informationen zur Ernte und Weiterbehandlung der Biomasse sind in [90, S.30], [97, S.25] und [61, S.706] zu finden.

Die größten Vorteile der Biodieselerzeugung aus Mikroalgen lassen sich wie folgt zusammenfassen [90, S.2], [92, S.20]:

- Mikroalgen wachsen aufgrund ihrer effektiven Photosynthese schneller als die meisten terrestrischen Pflanzen
- Sie können auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Flächen oder Wüsten kultiviert werden
- Algen sind kein Grundnahrungsmittel
- Algen können je nach Spezies in Süß- oder Salzwasser angebaut werden
- Algen können kommunale und Industrieabwässer nutzen

- Sie können schubweise oder kontinuierlich angebaut werden
- Bei passenden Bedingungen ist ein ganzjähriger Anbau mit kontinuierlicher Ernte möglich
- Algen sind neben der Treibstoffherzeugung Rohstoff für unterschiedlichste industrielle Produkte

9.5.2 Bioethanol aus Lignozellulosepflanzen

Als lignozellulosehaltige Biomasse für die Ethanolherzeugung können unter Berücksichtigung der vorangegangenen Auswahlverfahren grundsätzlich folgende landwirtschaftlich produzierte Pflanzen eingesetzt werden [3, S.88]:

- Schnellwachsende Baumarten (z.B. Weiden und Pappeln)
- Miscanthus (Chinaschilf)
- Switchgrass (Rutenhirse)
- Rohrglanzgras
- Futtergräser (Weidelgras, Knautgras, Rohrschwengel, Glatthafer)
- Energiegräser (Low-Input High-Diversity LIHD, siehe [100])

Abbildung 9.2 zeigt die grundsätzlichen Prozessschritte bei der Umwandlung von Lignozellulosepflanzen in Bioethanol der 2. Generation.

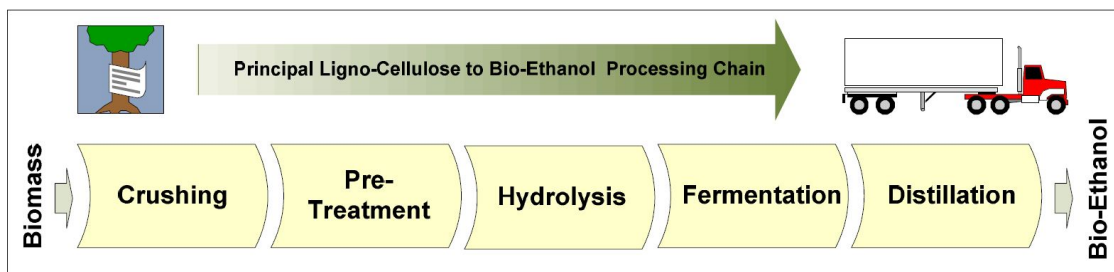


Abbildung 9.2: Prozesskette bei der Ethanolherstellung aus Lignozellulose. Biomasse = Biomasse Crushing = Zerkleinerung; Pre-Treatment = Vorbehandlung; Hydrolysis = Hydrolyse (Verzuckerung); Distillation = Destillation. Quelle: [70, S.16].

9.5.3 BTL Treibstoffe

BTL Kraftstoffe, auch synthetische Biokraftstoffe oder SunFuel genannt, bestehen aus reinen Kohlenwasserstoffketten. Da sie neben der Vielfalt der verwertbaren Rohstoffe auch in Ihren Nutzungseigenschaften regelrecht maßgeschneidert und damit an die Anforderungen der motorischen Verbrennung angepasst werden können, wird für diese Treibstoffe auch der Begriff „Designerkraftstoff“ verwendet [66, S.31 und S.83].

BTL-Kraftstoffe sind eine relativ neue und bisher am Markt nicht verfügbare Entwicklung. Es bestehen unterschiedlich weit entwickelte Produktionsverfahren für den Otto- und Dieselmotorenmarkt sowie erste größere Versuchsanlagen.

Ein besonders bekanntes Verfahren zur BTL Produktion für den Dieselmotorenmarkt stellt das sogenannte „Carbo-V Verfahren“ von Choren dar, dieser mehrstufige Prozess vereint die Vorteile einer Flugstromvergasung mit denen der Niedertemperaturvergasung [71, S.21], weitere Verfahren sind bei unterschiedlichen Forschungszentren in Entwicklung [66, S.84].

Abbildung 9.3 zeigt die Prozesskette bei der BTL-Treibstoffherstellung aus lignozellulosehaltiger Biomasse.

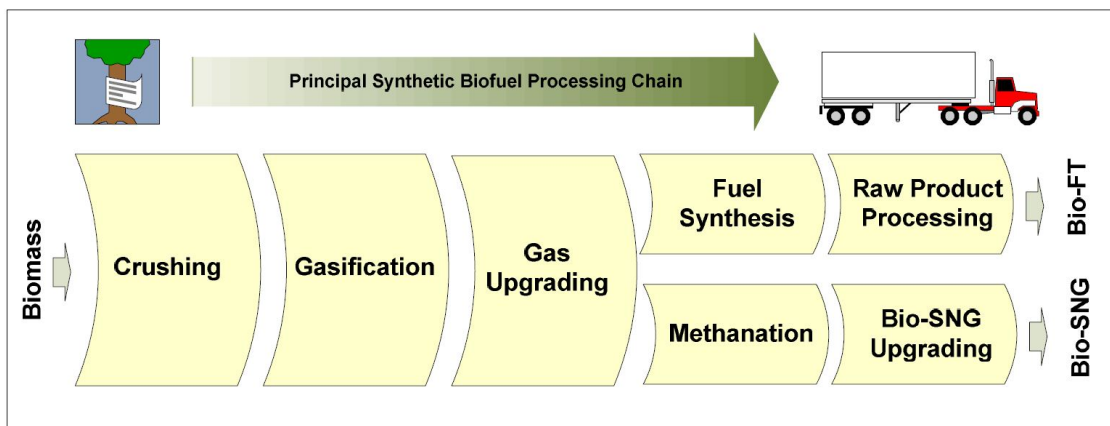


Abbildung 9.3: Prozesskette der BTL-Treibstoffherstellung aus Biomasse.

Biomass = Biomasse; Crushing = Zerkleinerung; Gasification = Vergasung; Gas Upgrading = Gasveredelung; Fuel Synthesis = Treibstoffsynthese; Raw Product Processing = Rohtriebstoff Nachbehandlung; Methanation = Methanisierung; Bio-SNG Upgrading = Bio-SNG (Synthetic Natural Gas SNG = Synthetisches Erdgas) Veredelung.

Quelle: [70, S.23].

Weitere Informationen über Biomasseaufbereitung, Biomassevergasung, Gasreinigung und Gaskonditionierung sowie der Synthese und der abschließenden Kraftstoffaufbereitung finden sich in [35, S.270 ff].

Kapitel 10

Potential der ausgewählten Biotreibstoffe

10.1 Potentiale - Begriffsbestimmungen und Abgrenzung

Für eine Potentialanalyse müssen vorab unterschiedliche Potentialdefinitionen voneinander abgegrenzt werden. Es wird zwischen nachfolgend aufgelisteten Begriffen unterschieden:

- Theoretisches Potential

Beschreibt das in einer gegebenen Region innerhalb eines Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot [3, S.10]. Damit ist z.B. die in der gesamten Pflanzenmasse gespeicherte Energie gemeint, es markiert die Obergrenze des theoretisch realisierbaren Beitrages zur Energiebereitstellung.

- Technisches Potential

Beschreibt jenen Teil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Zusätzlich werden auch die strukturellen, ökologischen und gesetzlichen Vorgaben berücksichtigt, da diese ähnlich den technischen Restriktionen ebenfalls unüberwindlich sind [3, S.11].

- Wirtschaftliches Potential

Beschreibt den zeit- und ortsabhängigen Anteil des technischen Potentials, der unter den jeweils betrachteten Randbedingungen (z.B. Rohölpreis) wirtschaftlich erschlossen werden kann [3, S.11].

- Erschließbares Potential

Das wirtschaftliche Potential kann nur innerhalb eines sehr langen Zeitraumes auch erschlossen werden [3, S.11], das erschließbare Potential ist daher wiederum kleiner als das wirtschaftliche Potential.

Das Technische Potential beschreibt somit den aus technischer Sicht möglichen Beitrag einer regenerativen Energie zur Deckung der Energienachfrage [3, S.11].

Bei den folgenden Potentialbetrachtungen wird in dieser Arbeit ausschließlich das technische Potential ausgewiesen.

10.2 Potentialanalyse

Das verfügbare technische Biomassepotential setzt sich aus folgenden einzelnen Komponenten bzw. Rohstoffquellen zusammen:

- Forstwirtschaftliches Potential (Verwendung von Holz als Rohstoff)
- Potential aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen (z.B. Stroh, Exkremente)
- Potential aus der Energiepflanzenproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen und landwirtschaftlich nicht nutzbaren (degradierten) Flächen

In dieser Arbeit werden ausschließlich die technischen Biomasse- bzw. Biotreibstoffpotentiale der Energiepflanzen im Jahr 2030 betrachtet.

Diese Einschränkung auf den Anbau von Energiepflanzen wird einerseits damit begründet, dass die anderen Potentiale (also energetische Nutzung von forstwirtschaftlichen Rohstoffen wie z.B. überschüssigem Holz sowie Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen) sehr gut für die Verwendung in anderen Energiebereichen wie der dezentralen Wärme- oder Stromerzeugung verwendet werden können.

Andererseits kommen einige Studien bezüglich des künftigen Biotreibstoffpotentials zu dem Schluss, dass der Energiepflanzenanbau langfristig die bedeutendste Rohstoffquelle für Energie aus Biomasse sein wird [101, S.11], [102, S.8].

Die bestimmenden Faktoren für das technische Potential der Energiepflanzen sind unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen die nutzbaren Flächen sowie die Biomasseerträge pro Fläche, siehe Abbildung 10.1.



Abbildung 10.1: Technisches Biomassepotential aus Energiepflanzen

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass jegliche Abschätzung über künftige Biomassepotentiale bedeutenden Unsicherheiten unterliegen. Große Unterschiede in den Ergebnissen vieler bisher durchgeführter Studien belegen dies. Beispielsweise wird in [101, S.8] in einer Übersicht über 17 verschiedene Studien eine Bandbreite von 47 EJ/a bis 450 EJ/a für das globale Bioenergieangebot im Jahr 2050 angegeben. Die beiden wichtigsten Gründe für diese große Bandbreite sind unterschiedliche Annahmen bei der verfügbaren Fläche sowie den aktuellen und künftigen durchschnittlichen Biomasseerträgen pro Fläche. Zusätzlich sind auch der zunehmende CO_2 Gehalt in der Atmosphäre sowie die Auswirkungen des Klimawandels Unsicherheitsfaktoren, die eine Abschätzung künftiger Biomassepotentiale erschweren [101, S.11 ff].

Zusammenfassend läßt sich das künftige Potential an Biomasse und den daraus erstellten Biotreibstoffen also einerseits durch das vorhandene Flächenpotential und andererseits durch die pro Fläche gewinnbare Energie bestimmen, diese beiden Faktoren werden nachfolgend erörtert.

10.2.1 Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen

Neben dem in Kapitel 9.2.1 auf Seite 102 beschriebenen Knock-Out-Kriterium 1 (Ausschluss aller essbaren Pflanzen) wird das Biomassepotential durch die für den Anbau der Energiepflanzen nutzbare Fläche einer weiteren Beschränkung unterworfen. Das Ausmaß dieser Beschränkung hängt davon ab, wie viel der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche für den Anbau von Nahrungsmitteln benötigt wird. Die verfügbaren Flächen resultieren aus den gegenwärtig nicht landwirtschaftlich genutzten jedoch grundsätzlich nutzbaren Flächen [3, S.14]. Entscheidend für den Anteil der nicht genutzten Flächen an den nutzbaren Flächen ist wiederum die Flächenproduktivität, der Nahrungsmittelverbrauch, sowie der Flächenbedarf für andere Zwecke (z.B. Infrastruktur).

In globalem Maßstab betrachtet, werden laut [103, S.858] im Jahr 2050 zwischen 35% und 55% der gesamten für die Landwirtschaft nutzbaren Fläche für die Nahrungsmittelproduktion benötigt.

10.2.1.1 Flächenangebot für Lignozellulosepflanzen

Für Europa hat die Studie [104] zuerst jene Flächen ermittelt, die für die Nahrungsmittel- und Futterproduktion sowie für künftige Siedlungsflächen benötigt werden. Darauf basierend wurde weiters anhand von drei Szenarien das verbleibende Flächenpotential für den Energiepflanzenanbau ausgewertet. Besonderer Wert wurde dabei auf den Grundsatz „Food First“ gelegt. Dieses „Food First“ Prinzip beruht auf der grundlegenden Annahme, dass Europa in jedem Fall den aktuellen (Periode 2000-2002) Anteil der Selbstversorgung an Nahrungs- und Futtermitteln sowie tierischen Erzeugnissen auch in Zukunft beibehalten kann. In diesem Sinne werden nur jene Flächen für die Energiepflanzenproduktion betrachtet, die ohne eine Beeinträchtigung der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zur Verfügung stehen [104, S.175].

Die drei untersuchten Szenarien

- Basis Szenario (Land Use Base Scenario, LU-Base)
- Umweltorientiertes Szenario (Land Use Environment Scenario, LU-Env)
- Energieorientiertes Szenario (Land Use Energy Scenario, LU-Ene)

unterscheiden sich hinsichtlich politischer Rahmenbedingungen, Umweltschutzvorgaben, Ertragssteigerungen und der unterschiedlichen Nutzung von überschüssigen Weideflächen.

Das Basis Szenario (LU-Base) beschreibt die aus heutiger Sicht wahrscheinliche Entwicklung aufgrund aktueller politischer Vorgaben und ökologischer Trends sowie moderater jährlicher Ertragssteigerungen bei Nahrungs- und Futtermittelpflanzen. Energiepflanzen können in diesem Szenario auf überschüssigen landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden.

Das Umwelt Szenario (LU-Env) geht von einer steigenden Bedeutung von Nachhaltigkeit und Biodiversität in der Landwirtschaft aus. Dies bedeutet, dass mehr Fläche für ökologischen Anbau genutzt wird und somit nicht für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung steht.

Das Energie Szenario (LU-Ene) geht von einer stärkeren Landnutzungsänderung als bei den anderen beiden Szenarien aus. In diesem Szenario werden einerseits die gleichen überschüssigen landwirtschaftlichen Flächen wie im Basis Szenario in Betracht gezogen, andererseits kann zusätzlich aber auch überschüssiges Weideland für den Anbau von krautartigen Energiepflanzen genutzt werden [104, S.177 ff].

Abbildung 10.2 zeigt die gesamteuropäischen Flächenpotentiale für den Energiepflanzenanbau für diese drei Szenarien bis zum Jahr 2030.

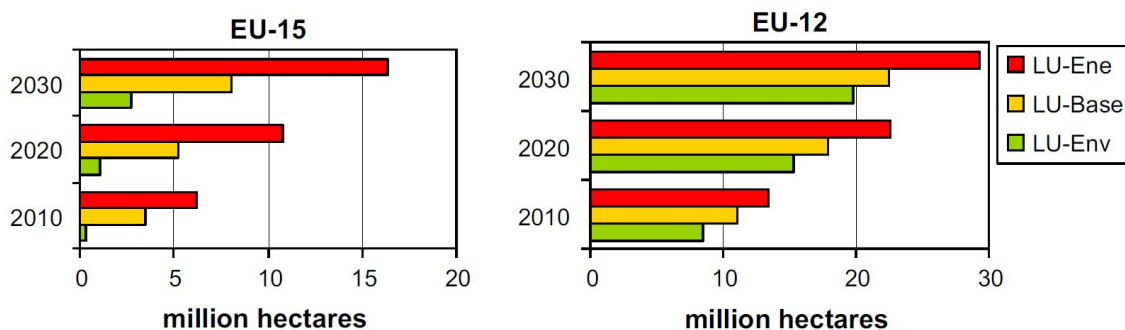


Abbildung 10.2: Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen in EU12 und EU 15 für drei unterschiedliche Szenarien.

Million hectares = Millionen Hektar.

Quelle: [104, S.182].

Es ist ersichtlich, dass die jeweiligen Flächenpotentiale für die drei Szenarien sich sehr stark voneinander unterscheiden, allen gemein ist die grundsätzliche Zunahme der nutzbaren Flächen aufgrund von Ertragssteigerungen bei der Nahrungsmittel- und Futterproduktion.

Für die weiteren Berechnungen der Biotreibstoffpotentiale in der vorliegenden Arbeit werden für die nutzbaren Flächen die Ergebnisse des energieorientierten Szenarios (Land Use Energy, LU-Ene) aus [104] verwendet, d.h. es wird davon ausgegangen dass künftig auch überschüssige Weideflächen für den Energiepflanzenanbau genutzt werden können, dies hat bedeutende positive Auswirkungen auf das Gesamtflächenpotential.

Die länderspezifische Aufteilung der für die Energiepflanzen nutzbaren Flächen sowie der Flächen für Nahrungs- und Futtermittelanbau, Viehweiden und brachliegenden Weiden für den Naturschutz sind in Tabelle 10.1 aufgelistet.

Tabelle 10.1: Für den Energiepflanzenanbau nutzbare Flächen und deren Verteilung in der EU 27 im Jahr 2030

Land	gesamte Landfläche	Fläche für Nahrungsmittel- und Futterproduktion	Fläche des Energiepflanzenanbaus auf überschüssigem Ackerland	Fläche des Energiepflanzenanbaus auf überschüssigem Weideland	Für Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehende Gesamtfläche
	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
Belgien	3.051.800	857.000	21.000	29.000	50.000
Bulgarien	11.055.000	1.569.000	2.983.000	882.000	3.865.000
Dänemark	4.309.400	1.873.000	289.000	72.000	361.000
Deutschland	35.702.000	9.285.000	1.909.000	1.296.000	3.205.000
Estland	4.321.100	482.000	356.000	44.000	400.000
Finnland	30.452.900	1.637.000	439.000	67.000	506.000
Frankreich	54.396.400	16.136.000	1.767.000	3.291.000	5.058.000
Griechenland	13.162.500	3.576.000	213.000	1.008.000	1.221.000
Irland	7.027.300	1.153.000	0	0	0
Italien	30.133.300	9.889.000	898.000	732.000	1.630.000
Lettland	6.458.900	1.091.000	758.000	368.000	1.126.000
Litauen	6.530.000	1.648.000	1.314.000	247.000	1.561.000
Luxemburg	258.600	-	-	-	0
Malta	31.600	-	-	-	0
Niederlande	3.387.300	1.005.000	14.000	38.000	52.000
Österreich	8.385.900	1.221.000	180.000	235.000	415.000
Polen	31.268.500	7.111.000	6.896.000	1.587.000	8.483.000
Portugal	9.190.600	2.413.000	215.000	274.000	489.000
Rumänien	23.034.000	4.177.000	5.526.000	2.457.000	7.983.000
Schweden	41.093.400	2.292.000	217.000	54.000	271.000
Slowakei	4.903.500	753.000	773.000	293.000	1.066.000
Slowenien	2.027.300	175.000	15.000	70.000	85.000
Spanien	50.479.000	16.813.000	1.301.000	0	1.301.000
Tschechische Republik	7.885.900	1.660.000	1.547.000	457.000	2.004.000
Ungarn	9.302.900	2.325.000	2.259.000	517.000	2.776.000
Vereinigtes Königreich	24.382.000	4.555.000	568.000	1.042.000	1.610.000
Zypern	924.000	153.000	0	0	0
EU 27	423.155.100		30.458.000	15.060.000	45.518.000

Quellen: [105], [104, S.181, S.183].

Ausgehend von einer gesamten Landfläche von 423,16 Millionen ha in Europa stehen somit 10,76 % bzw. 45,52 Millionen Hektar für den Energiepflanzenanbau mit Lignozel-

lulosepflanzen als nutzbare Fläche zur Verfügung. Die restlichen Flächen sind landwirtschaftlich genutzte Flächen, landwirtschaftlich nicht nutzbare Flächen (z.B. Halbwüsten), Wald- oder Siedlungsflächen bzw. werden in anderer Form genutzt.

10.2.1.2 Flächenangebot für Algenzucht

Eine solare Einstrahlung von ca. 1.500 kWh pro m² und Jahr wird für die Algenproduktion als gut geeignet erachtet, dies bedeutet das grundsätzlich ein großer Teil der Erdoberfläche für die Kultivierung geeignet wäre [90, S.52]. Betrachtet man die solare Einstrahlung in Europa, ergeben sich Werte von unter 900 kWh/m² für Finnland bis zu über 1700 kWh/m² für Malta, siehe [57]. Vor allem Flächen in den südlichen Mitgliedsstaaten der EU wie z.B. Portugal, Spanien, Italien und Griechenland können daher aufgrund der solaren Einstrahlung für die Algenproduktion verwendet werden.

Weitere Einschränkungen der nutzbaren Flächen für die Errichtung von Open Ponds ergeben sich laut [90, S.54 ff] allerdings durch:

- zu geringe Tagesdurchschnittstemperaturen im Winter (ganzjährige Produktion ist bei Durchschnittstemperaturen von über 15°C möglich)
- die Verfügbarkeit von Wasser (der Transport von großen Mengen an Meerwasser ins Landesinnere ist energieintensiv)
- Topographische Gegebenheiten (es sind nur Flächen mit einer Steigung von maximal 5% für die Installation großer Open Pond Raceways geeignet)
- große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit (zu viel Niederschlag kann in den offenen Raceways zu einem osmotischen Schock und dem Absterben der Algen führen)
- Unwetter mit Hagel oder Stürmen

Diese Faktoren grenzen die für den Algenanbau möglichen Flächen stark ein, besonders geeignet erscheinen deshalb nur küstennahe und flache Regionen im Süden Europas.

Wie bereits erörtert, ist für den Anbau von Algen in Open Ponds keine landwirtschaftlich nutzbare Fläche notwendig, für die Installation der Open Ponds können auch vollständig degradierte Böden und Wüstenflächen verwendet werden.

Im Gegensatz zu den vorher erörterten landwirtschaftlichen Flächen gibt es in der Literatur allerdings keine detaillierten Daten über die Verteilung der Wüsten, Halbwüsten und Trocken-Subhumiden Flächen in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU 27. Es liegen diesbezüglich nur Informationen über die gesamten Wüstenflächen in ganz Europa (also inklusive der Nicht-EU-Mitgliedsstaaten) vor, siehe [106, S.10].

Um eine Abschätzung des Potentials der Algentreibstoffe durchführen zu können, werden deshalb an dieser Stelle folgende beiden Annahmen getroffen:

1. Von der Wüstenfläche Gesamteuropas (218 Millionen Hektar, [106, S.10]) liegen 10% (21,8 Millionen Hektar) in den Mitgliedsstaaten der EU 27 (d.h. vor allem in den südlichen Ländern Spanien, Portugal, Griechenland) und entsprechen somit dem Knock-Out-Kriterium 4 (d.h. der Begrenzung der erzeugten Treibstoffe und deren Anbauflächen auf Mitgliedsstaaten der EU 27)

2. Von diesen 10% (21,8 Millionen Hektar) sind wiederum 20% (4,36 Millionen Hektar) aufgrund ihrer geographischen und topographischen Eigenschaften (Küstennähe für Wasserversorgung, geringes Gefälle) für die Errichtung und den Betrieb von Open Ponds geeignet.

Mit diesen Annahmen ergibt sich somit eine Fläche von 4,36 Millionen Hektar, welche für eine herkömmliche landwirtschaftliche Nutzung nicht in Frage kommt, für die Installation von Algenzuchtbetrieben aber geeignet ist. Dies entspricht 4,23% der Landfläche von Italien, Portugal, Spanien und Griechenland (102,9 Millionen Hektar) oder 1,03% der gesamten Landfläche der EU 27 Mitgliedsländer (423,16 Millionen Hektar)

Aufgrund der Unsicherheit dieser Annahmen werden bei der Zusammenführung aller Daten in Kapitel 11.1 auf Seite 132 zwei Ergebnisse vorgelegt, eines mit und eines ohne Berücksichtigung der Algentreibstoffe.

Tabelle 10.2: Für die Algenkultivierung in Open Ponds nutzbare Wüstenflächen in der EU 27 im Jahr 2030

	Einheit	Fläche
Wüstenflächen in Europa	[ha]	300.000
Halbwüstenflächen in Europa	[ha]	94.260.000
Trocken Subhumide Flächen in Europa		123.470.000
Gesamte Wüstenfläche Europas	[ha]	218.030.000
Davon in der EU 27 liegende Flächen	[%]	10
Wüstenfläche in der EU 27	[ha]	21.803.000
Davon für Algenkultivierung in Open Ponds geeignete Flächen	[%]	20
Für Algenkultivierung in Open Ponds geeignete Flächen in der EU 27 im Jahr 2030	[ha]	4.360.600

Quelle: Eigene Annahmen und Eigene Darstellung in Anlehnung an [106, S.10].

10.2.2 Treibstoffenergie pro Fläche

10.2.2.1 Energieerträge der Lignozellulosepflanzen

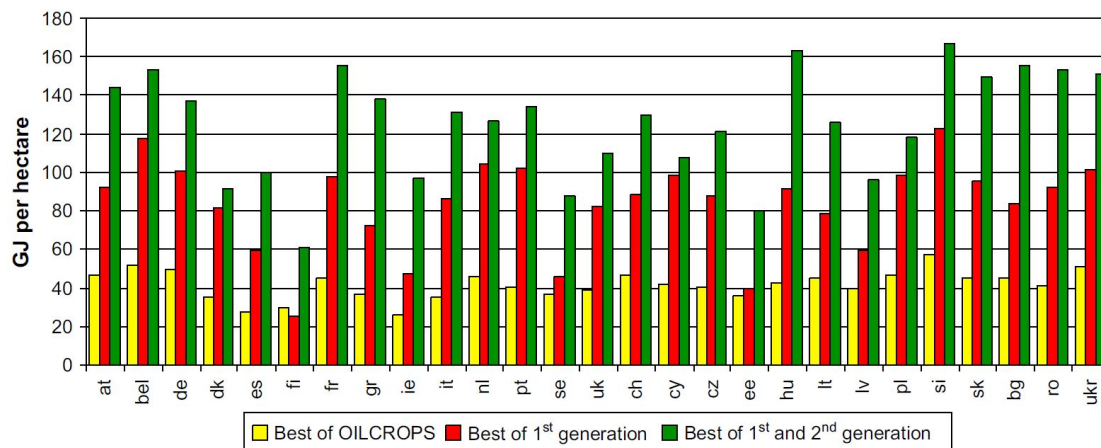
In der Studie [107, S.166] werden die durchschnittlichen Biotreibstoffpotentiale für die EU-27 Mitgliedsstaaten (bis auf die aufgrund ihrer geringen Anbaufläche vernachlässigbaren Länder Luxemburg und Malta) ermittelt.

Bei einer Auflösung der betrachteten Länder in 1 km² große Flächenzellen berücksichtigen die Zahlen dabei neben den klimatischen und geologischen Bedingungen auch die unterschiedlichen Bodenqualitäten und die sich daraus ergebenden Kombinationen mit verschiedenen Energiepflanzen [107, S.162].

Als die bestgeeigneten Rohstoffe in Verbindung mit einer Umwandlung der Biomasse mittels Fischer-Tropsch-Synthese in BTL Kraftstoffe erweisen sich dabei Treibstoffe der 2. Generation aus holzartiger Lignozellulose (Pappeln, Weiden) sowie aus krautartiger Lignozellulose (Miscanthus, Switch Gras) [107, S.166]. Für den Anbau dieser Energiepflanzen wurden als weitere Einschränkung nur Bodenqualitäten von Überschuss- und Weideland, nicht aber von landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen in Betracht gezogen [107, S.164].

Es ist ersichtlich, dass die Potentiale heute verwendeten Treibstoffe der 1. Generation aus z.B. Ölpflanzen deutlich unter jenen der 2. Generation liegen [107, S.169], siehe dazu auch Abbildung 10.3.

Abbildung 10.3: Durchschnittliche Biotreibstoffträge aus Biomasse in der EU in [GJ/ha]



Best of Oilcrops = Höchstwert der Ernteerträge bei Ölpflanzen, Best of 1st Generation = Höchstwert bei der 1. Treibstoffgeneration, Best of 1st and 2nd Generation = Höchstwert aus 1. und 2. Treibstoffgeneration.

Quelle: [107, S.168].

Diese Angaben stellen also jene im Treibstoff gespeicherte Energiemenge dar, die Brutto (also ohne den Energieverlust durch Anbau, Ernte und Umwandlung) pro Hektar und Jahr aus den Biotreibstoffen gewonnen werden kann. (Für weitere Informationen über die flächenbezogenen Biomasse- und Energieerträge ausgewählter Energiepflanzen und deren Biotreibstoffe sei auf die Quellen [108, S.7], [79, S.102], [62, S.4667], [73, S.5, S.11], [100, S.1598] und [77, S.18] verwiesen.)

Durch die länderspezifische Auflösung der Bruttoerträge sind diese Daten gut dafür geeignet, für jedes einzelne EU-Mitgliedsland den möglichen Treibstofftrag zu bestimmen.

Weiters wird in dieser Studie ein Energiebedarf von 8 bis 20 GJ/ha/a für Anbau, Düngung, Ernte, Transport und Umwandlung angegeben, um beispielsweise Miscanthus mittels Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese in BTL Kraftstoffe umzuwandeln [107, S.166].

In weiterer Folge wird in der vorliegenden Arbeit, ausgehend von den Angaben für Miscanthus, auch für den Anbau und die Ernte bzw. Umwandlung der anderen Lignozellulosepflanzen in BTL Treibstoffe ein Energiebedarf von 20 GJ pro Hektar und Jahr angenommen.

Um diese Energiemenge reduziert sich somit der in Abbildung 10.3 für die einzelnen Staaten angegebene Bruttoenergieertrag auf den letztendlich entscheidenden Nettoenergieertrag pro Hektar und Jahr für die jeweils bestgeeigneten Energiepflanzen und der nachfolgenden Umwandlung in BTL Treibstoff.

10.2.2.2 Energieerträge der Algenproduktion

In Gebieten mit hoher solarer Einstrahlung ($> 6 \text{ kWh/m}^2/\text{Tag}$ bzw. $>2190 \text{ kWh/Jahr}$) liegt das theoretische Maximum des Algenbiomassewachstums bei etwa $100\text{g/m}^2/\text{Tag}$. Über die künftig zu erwarteten Erntemengen an Biotreibstoffen aus Algen werden in der Literatur sehr unterschiedliche Werte genannt. In Versuchen kurzfristig beobachtet wurden beispielsweise Wachstumsraten von über $50\text{g/m}^2/\text{Tag}$, über längere Perioden sind Wachstumsraten von 20 bis $30\text{g/m}^2/\text{Tag}$ ermittelt worden [90, S.19], [88, S.5].

In [62, S.4663] werden weiters 46 Tonnen Öl pro Hektar und Jahr als mögliche Ernte angegeben, in [90, S.11] reichen die jährlichen Ölerträge je nach Szenario von 3.800 Litern bis über 50.000 Litern pro Hektar, siehe Tabelle 10.3.

Tabelle 10.3: Ernteerträge von Öl aus Mikroalgen

	Einheit	Demonstriert in Roswell, NM [90, S. 11]	Höherer Ölgehalt [90, S. 11]	Höhere Produktivität [90, S. 11]	Beschrieben in [99, S.1410]	Beschrieben in [94, S.52]	Beschrieben in [95, S.910]	Beschrieben in [88, S.5]
Täglicher Algenmasseertrag	g/m ² /Tag	10	10	50	11	15	45	20
Tage mit Produktion	Tage/Jahr	330	330	330	-	-	300	-
Algenmasseertrag	kg/ha/Jahr	33.000	33.000	165.000	38.500	54.800	104.490	-
Ölgehalt	%	15	40	40	30	-	50	20
Anteil Pond an Gesamtfläche	%	70	70	70	-	-	-	-
Jährlicher Algenöl-ertrag	kg/ha/Jahr	3.465	9.240	46.200	-	-	-	-
Dichte Algenöl	kg/m ³	910	910	910	-	-	-	-
Jährlicher Algenöl-ertrag	l/ha/Jahr	3.800	10.200	50.800	12.650	-	-	20.000

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [90, S. 11], [99, S.1410], [94, S.52], [95, S.910], [88, S.5].

Unter Berücksichtigung der zusätzlich benötigten Flächen für die Anlagen der Wasserbereitstellung, Ernte, Behandlung und Trocknung der feuchten Biomasse verringern sich diese flächenbezogenen Produktivitätsraten nochmals.

Neben den Wachstumsraten der Biomasse ist für die Ölernteerträge ebenfalls ausschlag-

gebend, wie hoch der prozentuelle Anteil der Lipide (Öle) an der Gesamtmasse der Alge ist. Diese Ölanteile variieren in Abhängigkeit der Algenart und den Wachstumsbedingungen, typische Werte in der Literatur betragen zwischen 15% und bis zu 70% [90, S.49]. Von Bedeutung ist dabei, dass schnelles Wachstum und der Lipidgehalt der Algenbiomasse negativ korreliert sind. Schnell wachsende Algen akkumulieren weniger Lipide, diese werden erst unter Stress- und Mangelbedingungen in großen Mengen gebildet [109, S.54], [93, S.269].

Neben den Erträgen pro Fläche und Tag ist entscheidend, an wie vielen Tagen pro Jahr die Anlage in Betrieb ist und Algen produzieren kann. Ein durchgehender Betrieb ohne Unterbrechungen ist auch in klimatisch optimalen Gebieten aufgrund von z.B. Wartungsarbeiten nicht möglich [90, S.36].

Ein wichtiger Parameter bei der Ermittlung der Nettohektarerträge ist wie bereits erwähnt die Festlegung der Systemgrenzen für die Energiebilanzen und damit einhergehend die Bilanzierung der Verluste beim Anbau und der Zusatznutzen der energetisch verwertbaren Co-Produkte. Vor allem bei Energiebilanzen zu Algenkraftstoffen ist dies ein entscheidender Faktor, da in der Algenbiomasse neben dem für die Ölproduktion nutzbaren Lipidanteil auch bedeutende Anteile an Kohlenhydraten beinhaltet sind. Diese Kohlenhydrate eignen sich besonders gut für die Ethanolherstellung da die Algenbiomasse im Gegensatz zu terrestrischen Pflanzen kaum Lignin enthält [61, S.709].

Bei einer Aufteilung der Algenbiomasse in 30% Lipide, 31% Kohlenhydrate und 37,5% Proteine können laut [61, S.710] pro 24 kg Algenöl (entspricht etwa 1000 MJ) über 28 kg Kohlenhydrate bzw. weitere Zelluloseprodukte und daraus in weiterer Folge über 6 Liter Ethanol hergestellt werden

Der wichtigste Faktor für den Energiebedarf ist die Ernte und Entwässerung der Algen, weitere Energie benötigt auch die anschließende Trocknung der Biomasse. In [95, S.911] wird zwar angenommen, dass eine Trocknung mittels Sonnenlicht und somit ohne zusätzlichen Energiebedarf möglich ist. Dieser Prozess ist aber sehr langsam, im Gegensatz dazu wird die Trocknung der Algenbiomasse in den Berechnungen von [61, S.711] berücksichtigt und als Energieverbraucher bei der Algendieselerzeugung in die Berechnungen mit einbezogen.

In [61, S.711] sind die benötigten Energieaufwendungen für die einzelnen Prozeßschritte der Algendieselerzeugung sowie die Gutschriften aus den Co-Produkten für eine Treibstoffmenge von 1000 MJ (etwa 24 kg Algendiesel) angeführt. Je nachdem welche Entwässerungsform angewandt wird (Filterpresse oder Zentrifuge), ergibt sich aufgrund des hohen Energieertrags der Co-Produkte ein Net Energy Ratio von über 3,3:

$$\frac{\text{Energie im Treibstoff und in den Co - Produkten}}{\text{Energieaufwand für die Herstellung}} = \frac{(1000MJ + 9971,77MJ)}{3291,96MJ} = 3,33 \quad (10.1)$$

Zum Vergleich, in [99, S.1410] wird ein etwas geringerer Net Energy Ratio für die Algenölproduktion von 3,05 angegeben, weiters wurde bei dieser Studie der Energieaufwand für die Umwandlung des Öls in Biodiesel nicht berücksichtigt.

Es ist aufgrund der Angaben in Tabelle 10.3 auf der vorherigen Seite ersichtlich, dass sich die in der Literatur angegebenen Daten oft sehr deutlich voneinander unterscheiden, für die weiteren Berechnungen werden jene Daten verwendet, die am plausibelsten erscheinen.

Für die Energieertragsberechnung der Algentreibstoffe werden folgende Daten verwendet:

Pro Hektar Produktionsfläche können jährlich 20.000 Liter Algenöl gewonnen werden, siehe [88, S.5]. Dies entspricht bei einer Dichte von $910 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ [90, S.11] einer Masse von 18.200 kg und in weiterer Folge bei einer in [61, S.710] genannten Energiedichte von $41,6 \text{ [MJ/kg]}$ einer jährlichen Bruttoenergiemenge von 757.120 MJ pro Hektar. Durch Nutzung der restlichen Biomasse für eine Umwandlung in Ethanol ergibt sich laut den Angaben von [61, S.711] ein zusätzlicher Ethanolertrag von 0,238 Liter pro Liter Algendiesel und somit 4.754 Liter Ethanol bei 20.000 Liter Algendiesel. Bei einer Energiedichte von Ethanol von $21,3 \text{ MJ pro Liter}$ (siehe Tabelle 8.3 auf Seite 98) sind das weiters 101.260 MJ pro Hektar und Jahr.

Pro Hektar und Jahr lassen sich somit brutto 757.120 MJ mit Algendiesel und gleichzeitig 101.260 MJ mit Ethanol erzeugen, gesamt sind das 858.380 MJ pro Hektar und Jahr.

Mit einer Net Energy Ratio von 3 in Anlehnung an [61, S.711] und [99, S.1410] wird ein Drittel dieser Energie bzw. 286.126,7 MJ pro Jahr für den Herstellungsprozess benötigt.

Es verbleiben abschließend als jährlicher Nettoenergieertrag bei der Treibstoffherstellung aus Algen [$572.253,3 \text{ MJ/ha}$], dieser Wert wird als Grundlage für die Berechnung des Algentreibstoffpotentials verwendet.

10.2.3 Biotreibstoffpotential der EU 27 in 2030

10.2.3.1 Energiepotential durch BTL Treibstoffe

Tabelle 10.4 fasst die Ergebnisse der Studien [107, S.168] und [104, S.181 ff] bezüglich der für den Energiepflanzenanbau verfügbaren Flächen und den jeweiligen Brutto- und Nettoenergieerträgen für die einzelnen Staaten der EU-27 zusammen, die Brutto-Flächenertragsangaben aus der Abbildung 10.3 auf Seite 124 werden dabei auf die nächstkleinere Zehnerstelle abgerundet.

Tabelle 10.4: Technisches Energiepotential aus BTL-Treibstoffen in der EU-27 im Jahr 2030

EU-27 Mitgliedsstaat	für den Energie- pflanzen- anbau nutzbare Fläche	Brutto- energie- ertrag pro Fläche	Energie- bedarf für Biomasse- anbau und Treibstoff- produktion	Netto- energie- ertrag pro Fläche	Netto- energie- ertrag
	[ha]	[GJ/ha/a]	[GJ/ha/a]	[GJ/ha/a]	[GJ/a]
Belgien	50.000	150	20	130	6.500.000
Bulgarien	3.865.000	150	20	130	502.450.000
Dänemark	361.000	90	20	70	25.270.000
Deutschland	3.205.000	130	20	110	352.550.000
Estland	400.000	80	20	60	24.000.000
Finnland	506.000	60	20	40	20.240.000
Frankreich	5.058.000	150	20	130	657.540.000
Griechenland	1.221.000	130	20	110	134.310.000
Irland	0	90	20	70	0
Italien	1.630.000	130	20	110	179.300.000
Lettland	1.126.000	90	20	70	78.820.000
Litauen	1.561.000	120	20	100	156.100.000
Luxemburg	0	-	-	-	0
Malta	0	-	-	-	0
Niederlande	52.000	120	20	100	5.200.000
Österreich	415.000	140	20	120	49.800.000
Polen	8.483.000	110	20	90	763.470.000
Portugal	489.000	130	20	110	53.790.000
Rumänien	7.983.000	150	20	130	1.037.790.000
Schweden	271.000	80	20	60	16.260.000
Slowakei	1.066.000	150	20	130	138.580.000
Slowenien	85.000	160	20	140	11.900.000
Spanien	1.301.000	100	20	80	104.080.000
Tschechische Republik	2.004.000	120	20	100	200.400.000
Ungarn	2.776.000	160	20	140	388.640.000
Vereinigtes Königreich	1.610.000	110	20	90	144.900.000
Zypern	0	100	20	100	0
Gesamt	45.518.000	131	20	111	5.051.890.000

Quellen: [107], [104].

In Summe können in der EU-27 im Jahr 2030 somit 5.051,89 Petajoule bzw. 5,05 Ex-

ajoule an Treibstoffenergie aus Lignozellulosepflanzen hergestellt und für die Verwendung in den Verbrennungsmotoren der unterschiedlichen Fahrzeuge bereitgestellt werden.

Diese hier berechneten Zahlenwerte decken sich in etwa mit den Ergebnissen der Studien [102] und [110]. In [102, S.52] wird für die Staaten der EU 25 (EU 27 ohne die neuen Mitgliedsstaaten Bulgarien und Rumänien) ein Bioenergiepotential durch landwirtschaftlichen Energiepflanzenanbau von 142,4 Mtoe bzw. 5,95 Exajoule EJ für das Jahr 2030 angegeben, während in [110, S.34] für das Szenario S1 und das betrachtete Jahr 2020 ein Energiepflanzenpotential von 5,42 Exajoule ermittelt werden.

10.2.3.2 Energiepotential durch Algentreibstoffe

Tabelle 10.5 fasst die Ergebnisse aus den vorangehenden Kapiteln bezüglich der verfügbaren Fläche und den Flächenerträgen für Algentreibstoffe zusammen:

Tabelle 10.5: Technisches Energiepotential aus Algentreibstoffen in der EU27 im Jahr 2030

	für den Algenanbau nutzbare Fläche	Brutto- energieertrag pro Fläche	Energiebedarf für die Produktion pro Fläche	Netto- energieertrag pro Fläche	Netto- energieertrag
	[ha]	[GJ/ha/a]	[GJ/a/a]	[GJ/ha/a]	[GJ/a]
EU 27	4.360.600	858,380	286,1	572,25	2.495. 353.350

Mit den verwendeten Daten bezüglich der Anbauflächen und des Flächenertrags bei der Algentreibstoffproduktion können in der EU 27 im Jahr 2030 also etwa 2,5 Exajoule an Algentreibstoff (Biodiesel und Bioethanol) hergestellt werden. Es muß an dieser Stelle allerdings klar festgestellt werden, daß diese Daten aufgrund des uneinheitlichen Datenmaterials in der Literatur mit vergleichsweise großen Unsicherheiten verbunden sind.

10.2.3.3 Gesamtpotential der Biotreibstoffe

Unter Verwendung der zuvor erläuterten Daten und Annahmen steht folgendes technische Potential an Biotreibstoffen aus Biomasse in der Europäischen Union im Jahr 2030 insgesamt für die Nutzung im Verkehrssektor zur Verfügung:

Tabelle 10.6: Gesamtes Biotreibstoffpotential der EU 27 im Jahr 2030

	verfügbare Anbaufläche	Nettoenergie- ertrag pro Fläche	Nettoenergie- potential aus Biotreibstoff
	[ha]	[GJ/ha/a]	[GJ/a]
Biomass To Liquid (BTL) Treibstoffe aus Lignozellulose	45.518.000	111	5.051.890.000
Bioethanol und Biodiesel aus Mikroalgen	4.360.600	572,25	2.495. 353.350
Summe			7.547.243.350

Das gesamte Biotreibstoffpotential der EU 27 im Jahr 2030 beläuft sich somit auf 7,5 Exajoule pro Jahr.

Es ist weiters ersichtlich, dass Algentreibstoffe eine weitaus geringere potentielle Anbaufläche als die terrestrischen Energiepflanzen zur Verfügung haben. Da ihre flächenbezogenen Nettoenergieerträge allerdings deutlich höher sind, könnten sie trotzdem einen bedeutenden Beitrag zum gesamten Biotreibstoffpotential leisten.

Kapitel 11

Vergleich Energiebedarf - Treibstoffpotential

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zuerst Berechnungen über den künftigen Energiebedarf der EU 27 im Jahr 2030 durchgeführt, anschließend wurde das Technische Potential ausgewählter Biotreibstoffe ermittelt.

Das Ergebnis in Tabelle 11.1 zeigt, dass grundsätzlich ein beträchtlicher Anteil des Energiebedarfs durch diese Treibstoffe gedeckt werden kann.

Je nachdem, ob das Energieangebot durch BTL-Treibstoffe, durch Algentreibstoffe oder das gesamte Biotreibstoffangebot betrachtet wird, können zwischen 19% und knapp 58% des Bedarfs mit diesen erneuerbaren Kraftstoffen bereitgestellt werden.

Tabelle 11.1: Vergleich Energiebedarf - Biotreibstoffpotential

	Einheit	
Energiebedarf des Verkehrs der EU 27 in 2030	[GJ/a]	13.367.615.000
Energieangebot durch BTL Treibstoffe	[GJ/a]	5.051.890.000
Bedarfsdeckung durch BTL Treibstoffe	[%]	37,8
Energieangebot durch Algentreibstoffe	[GJ/a]	2.495.353.350
Bedarfsdeckung durch Algentreibstoffe	[%]	18,7
Energieangebot durch alle Biotreibstoffe	[GJ/a]	7.547.243.350
Bedarfsdeckung durch alle Biotreibstoffe	[%]	56,5

Kapitel 12

Schlussfolgerung und Ausblick

Die gesamte Wirtschaft und der gesamte Verkehr der westlichen Industriestaaten hängt fast zur Gänze von der Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe ab, es gibt allerdings keine einheitlichen Regeln und Definitionen zum Erstellen von Berichten über die verfügbaren Reserven und Reichweiten von fossilen Energieträgern und somit keine Sicherheit bezüglich der künftigen Entwicklung der Energieversorgung. Dies wäre allerdings von großer Bedeutung, da die heutigen Wohlstandsgesellschaften auf der ausreichenden Verfügbarkeit bei gleichzeitig geringen Preisen dieser Rohstoffe aufbauen.

Ein weiterer großer Unsicherheitsfaktor in der weltweiten Energieversorgung ist die teilweise sehr instabile politische Lage in den Öl, Gas und Kohle fördernden Nationen, die Auseinandersetzungen in Libyen (einem der bedeutendsten Öllieferanten Afrikas) sind dafür ein aktuelles und gleichzeitig besorgniserregendes Beispiel.

Um die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zu vermindern, stellen alternative Energieangebote einen wichtigen Ansatz dar, speziell im Verkehrssektor sind dafür Treibstoffe aus umgewandelter Biomasse besonders geeignet.

In dieser Arbeit wurde dazu jener Anteil ermittelt, den ausgewählte Biotreibstoffe am Energiebedarf des Verkehrssektors in der EU 27 im Jahr 2030 decken könnten. Dieser Anteil ist sehr beachtlich, er bewegt sich zwischen ca. 19% und knapp 57%.

Es ist dabei allerdings zu beachten, dass die Ergebnisse der Potentialermittlung die technischen Potentiale darstellen. Wie in Kapitel 10.1 auf Seite 117 beschrieben, läßt dies keine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Nutzung durch die betrachteten Kraftstoffe zu. In [111, S.9] wird z.B. angegeben, dass in den USA hergestelltes Bioethanol aus zellulosehaltiger Biomasse wirtschaftlich nicht mit Benzin konkurrieren kann, solange der Rohölpreis unter 90 \$ pro Barrel liegt.

Weiters ist ein Teil der verwendeten Daten mit Unsicherheit behaftet, hauptsächlich durch die noch mangelnde Erfahrung mit der Herstellung von Biotreibstoffen der 2. und 3. Generation, nur diese Treibstoffe erscheinen aber künftig als in großem Maßstab verwendbar.

Die Forschungsfrage dieser Arbeit ist mit den Ergebnissen in Kapitel 11 auf der vorherigen Seite zwar beantwortet, ob und in welcher Form diese Ergebnisse in Zukunft allerdings tatsächlich zutreffen, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab.

Herausragenden Einfluss wird der Rohölpreis haben, er dürfte künftig die stärkste treibende Kraft in der Forschung und Entwicklung und letztendlich in der Markteinführung von alternativen Energien und Kraftstoffen sein.

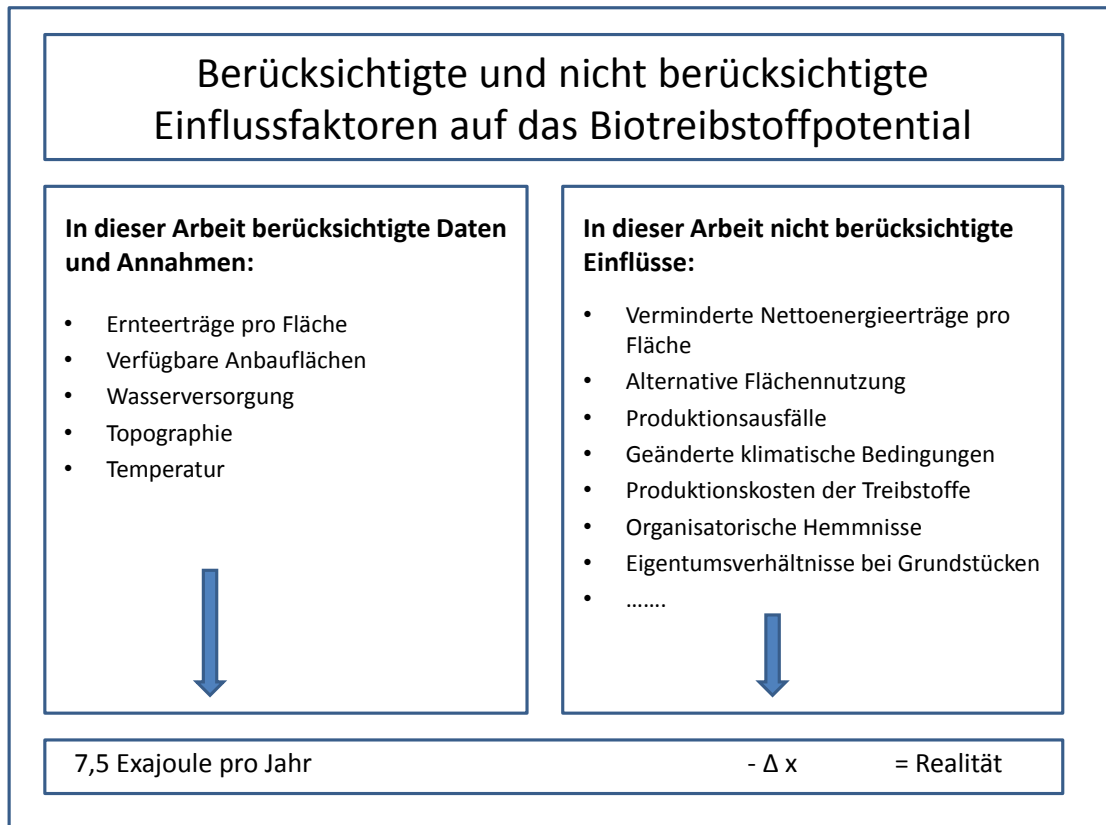


Abbildung 12.1: Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Einflussfaktoren auf das Biotreibstoffpotential

Abbildung 12.1 zeigt abschließend, welche Daten und Annahmen zum Ergebnis dieser Arbeit geführt haben und welche Einflüsse nicht betrachtet wurden und somit die erzeugbare Biotreibstoffmenge bzw. das Substitutionspotential deutlich verringern können.

Literaturverzeichnis

- [1] European Commission EC. *Biofuels in the European Union - A vision for 2030 and beyond*. 2006. ISBN 92-79-01748-9.
- [2] Amela Ajanovic, Reinhard Haas, Felipe Toro, Claudia Anacker, Gerfried Cebrat, Ingo Bunzeck, and Bas Bree. *Promoting Alternative Automotive Technologies And Alternative Fuels - Some Insights From The EU Project Alter Motive*. 2010.
- [3] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, and Hermann Hofbauer. *Energie aus Biomasse*. Hermann Hofbauer, 2009.
- [4] Barbara Elvers. *Handbook of Fuels: Energy Sources for Transportation*. 2008.
- [5] Jörg Schindler and Werner Zittel. *Zukunft der weltweiten Erdölversorgung*. Energy Watch Group / Ludwig-Bölkow-Stiftung, Mai 2008.
- [6] Wikipedia. Begriffserklärung Erdölraffinerie. 2010.
- [7] Helmut Eichlseder and Manfred Klell. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 2008.
- [8] Thomas Bürke and Matthias Meyer. *Klimawirkungen des Luftverkehrs*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Linder Höhe 51147 Köln, September 2007.
- [9] Christoph Weinberger. *Erhebung von verkehrs-, energie- und umweltrelevanten Fahrzeugdaten*. 2008.
- [10] European Environment Agency EEA. *TERM 2008 - Transport at a crossroads - indicators tracking transport and environment in the European Union*. 2008.
- [11] Peter Gruss and Ferdi Schüth. *Die Zukunft der Energie - Die Antwort der Wissenschaft*. 2008.
- [12] David Mackay. *Sustainable Energy Without The Hot Air*. 2008.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. 2007.
- [14] Noreen. *Euro 6 Standards Pose A Tough Challenge For Truck Manufacturers*. *European Motor News*, März 2010.
- [15] Dieselnets.com. *Background Emission Standards*. 2010.

- [16] European Commission EC. EU Energy and transport in figures - Statistical Pocket-book 2010. 2010.
- [17] Bernhard Cramer and Harald Andruleit. *Energierohstoffe 2009*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2009.
- [18] Jürgen Karl. *Wärmetechnik 1*. Skript zur Vorlesung an der Technischen Universität Graz. 2008.
- [19] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. *Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen*. 2006.
- [20] OPEC. *World Oil Outlook 2010*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, 2010.
- [21] Martin Pehnt. *Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen*. Juni 2001.
- [22] Andreas Wimmer. *Thermodynamik des Verbrennungsmotors. Skript zur Vorlesung an der Technischen Universität Graz*. 2004.
- [23] Helmut Eichlseder, Stefan Hausberger, and Andreas Wimmer. *Zukünftige Otto-DI-Brennverfahren - Thermodynamische Potenziale und Grenzen im Vergleich zu Dieselmotoren. 3. Motortechnische Konferenz*, 2007.
- [24] Helmut Eichlseder. *Verbrennungskraftmaschinen - Vertiefte Ausbildung. Skript zur Vorlesung an der Technischen Universität Graz*. 2005.
- [25] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung. *Flottenverbrauch 2010*. Juli 2002.
- [26] Alexander Dauensteiner. *Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Minimierung aller Fahrwiderstände mit neuen Konzepten*. 2002.
- [27] Paul Fenton and Helene Carlsson. *BioEthanol for Sustainable Transport*. 2009. ISBN 978-91-85125-40-1.
- [28] Dominik Rutz and Rainer Janssen. *BioFuel Technology Handbook*. WIP Renewable Energies, February 2007.
- [29] Richard van Basshuysen. *Handbuch Verbrennungsmotor*. Fred Schäfer, 2005.
- [30] Willy J.G. Bräunling. *Flugzeugtriebwerke Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. 2009.
- [31] Gmelin C. Tillmann, Gerhard Hüttig, and Oliver Lehmann. *Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale bei Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Triebwerkstechnik sowie der absehbaren mittelfristigen Entwicklungen*. 2008.

- [32] Greg Hemighaus, Tracy Boval, John Bacha, Fred Barnes, Matt Franklin, Lew Gibbs, Nancy Hogue, Jacqueline Jones, David Lesnini, John Lind, and Jack Morris. Aviation Fuels Technical Review. Technical Report FTR3, Chevron Corporation, 2006.
- [33] Wolfgang Hirschberg. Fahrzeugkonzepte. Skript zur Vorlesung Innovative Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Graz. 2009.
- [34] Dietrich Naunin. *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Dietrich Naunin, 2007.
- [35] Öko Institut, DLR, and Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt DLR. RE-NEWBILITY - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil1: Methodik und Datenbasis. 2009.
- [36] G. Hohenberg. Ausgewählte Kapitel aus Verbrennungskraftmaschine: Hybrid. Skript zur Vorlesung an der Technischen Universität Graz. 2008.
- [37] Reinhard Haas, Maximilian Kloess, Kurt Koenigshofer, Lorenza Canella, Gerfried Jungmeier, Peter Prenninger, and Andreas Weichbold. Elektra. August 2009.
- [38] Bernhard Geringer and Werner K.Tober. *Zukünftige Mobilität: Elektromobilität als Lösung?* Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik ÖVK, Oktober 2010.
- [39] Robert Fischer, Karl Fraidl, Christian Hubmann, Ernst Kapus, Ralf Kunzemann, Bernhard Sifferlinger, and Frank Beste. Range Extender Modul. Wegbereiter für elektrische Mobilität. *MTZ 10/2009*, Jahrgang 70, 2009.
- [40] Ralf Bady and Jan Welm Bierman. Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen. Mai 2000.
- [41] Matthias Küsell. Die Zukunft der Elektromobilität. Bosch - Techniken für Elektrofahrzeuge. 2010.
- [42] Bruno Scrosati, Georg Brasseur, Menahem Anderman, Ming Dong, Xuejie Huang, Zhengde Lu, Sylvain Vitit, Nobuaki Yoshioka, Aishu Yu, David Zuckerbrod, and Dave Hughes. Batteries and Super-Capacitors: Roadmap To Market. In *Challenge Bibendum Shanghai 2007 - Rallying Together Towards Sustainable Road Mobility*, 2007.
- [43] Shell. LKW-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Technical report, Shell Deutschland Oil GmbH, April 2010.
- [44] Simon Godwin, Mariano Bauer, Holger Braess, Toshio Hirota, and Stephane His. *Transport Technologies and Policy Scenarios to 2050*. World Energy Council, 2007.
- [45] Karin Naumann and Franziska Müller-Lang. *Analyse zur Erreichung des Mindestziels von 10 Prozent erneuerbare Energien im Verkehrssektor*. WWF Deutschland, 2010.
- [46] ARAL. Trends beim Autokauf 2009. 2009.

- [47] Michael Schwingshackl. Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW. Verbesserungspotential der Elektromobilität bei Verbrauch und Emissionen im Lebenszyklus. Master's thesis, TU Graz, 2009.
- [48] Per Sandberg. *Mobilität 2030: Die Herausforderung der Nachhaltigkeit meistern*. World Business Council for Sustainable Development WBCSD, 2004.
- [49] European Commission EC. European Energy and Transport - Trends to 2030 Update 2009. August 2010.
- [50] Tremove. *Final Report*. Transport & Mobility Leuven, 2007.
- [51] Manfred Decker. Energy Efficiency in EU 27 Transport Sector 2030. 2010.
- [52] Andreas Weichbold. ELEK-TRA Technische Analyse der Antriebe und deren Komponenten. 2009.
- [53] Maximilian Kloess. ELEKTRA Daten Brunner PKW Bestand 2030 Szenario D. Oktober 2010.
- [54] Wolfram Knörr, Frank Kutzner, Udo Lamprecht, and Alexander Schacht. Fortschreibung und Erweiterung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030"(TREMODO, Version5). März 2010.
- [55] Martin Kaltschmitt, Andreas Wiese, and Wolfgang Streicher. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Martin Kaltschmitt, 2003.
- [56] Palligarnai Vasudevan and Michael Briggs. Biodiesel production - Current state of the art and challenges. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 35:421–430, 2008. 10.1007/s10295-008-0312-2.
- [57] Marcel Suri, Thomas A. Huld, Ewan D. Dunlop, and Heinz A. Ossenbrink. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10):1295 – 1305, 2007.
- [58] Herbert Braun. *Erneuerbare Ressourcen für die energetische Nutzung*. 2008.
- [59] Ausilio Bauen, Göran Berndes, Martin Junginger, Marc Londo, and Francois Vuille. *Bioenergy - A Sustainable and Reliable Energy Source, Main Report*. Number ExCo 2009.06. International Energy Agency IEA-Bioenergy, 2009.
- [60] N. El Bassam. *Handbook of Bioenergy Crops - A Complete Reference to Species, Development and Applications*. Earthscan Ltd, 2010. ISBN: 978-1-84407-854-7.
- [61] Kyle Sander and Ganti Murthy. Life cycle analysis of algae biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15:704–714, 2010. 10.1007/s11367-010-0194-1.
- [62] Ayhan Demirbas. Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35(9):4661 – 4670, 2007.

- [63] Heike Frühwirth, Clemens Borkenstein, Josef Knoblechner, Robert Raudner, Edgar Ahn, Michael Schagerl, Wolfram Weckwerth, and Matthäus Siebenhofer. Energetische Nutzung von Algenbiomasse - AlgenBioDiesel. *Symposium Energieinnovationen Graz*, 2010.
- [64] Ayhan Demirbas. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(5-6):466 – 487, 2005.
- [65] Dadan Kusdiana and Shiro Saka. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*, 91(3):289 – 295, 2004.
- [66] Norbert Schmitz, Jan Henke, and Gernot Klepper. *Biokraftstoffe: Eine vergleichende Analyse*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2009.
- [67] Edgar Ahn, Martin Mittelbach, and Matthäus Siebenhofer. "Waste-To-Biodiesel". With Special Focus On Successful Case Studies in Industrial Scale. *Symposium Energieinnovationen Graz*, 2010.
- [68] Alexander Jäger, Heike Kahr, Alexander Eder, Sarah Helmberger, and Christof Lanzstorfer. Chancen und Potentiale der Bioethanolproduktion aus Stroh. *Symposium Energieinnovationen Graz*, 2010.
- [69] Marc Londo, Sander Lensink, André Wakker, Günther Fischer, Sylvia Prieler, Harrij van Velthuizen, Marc de Wit, André Faaij, Martin Junginger, Göran Berndes, Julia Hansson, Andrea Egeskog, Henrik Duer, Jeppe Lundbaek, Grzegorz Wisniewski, Adam Kupczyk, and Kurt Könighofer. The REFUEL EU road map for biofuels in transport: Application of the project's tools to some short-term policy issues. *Biomass and Bioenergy*, 34(2):244 – 250, 2010. A roadmap for biofuels in Europe.
- [70] Dina Bacovsky, Michal Dallos, and Manfred Wörgetter. Status of 2nd Generation Biofuels - Demonstration Facilities in June 2010. (Report T39-P1b), July 2010.
- [71] Andreas Besenböck. *Biotreibstoffe: Zukunftschance oder globales Krisenpotential*. Oktober 2008.
- [72] Helmut Eichseder, Manfred Klell, Klaus Schaffer, Daniel Leitner, and Markus Sartory. CO₂-freie Mobilität mit einem multivalenten Fahrzeug für variablen Erdgas/Wasserstoff-Mischbetrieb. *Symposium Energieinnovationen Graz*, 2010.
- [73] Warren E. Mabee and Jack N. Saddler. Ethanol from Lignocellulosics: Comparing biofuel technology options. *IEA Task 39 Report T39-P4*, 2006.
- [74] Volker Schindler. *Kraftstoffe für morgen*. 1997.
- [75] M. Specht, U. Zuberbühler, and A. Bandi. Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen - Potenziale, Herstellung, Perspektiven. *FVS Fachtagung*, 2003.
- [76] Deutsche Energie Agentur GmbH DENA. Biomass To Liquid - BTL Realisierungsstudie Zusammenfassung. 2006.

- [77] Andre Faaij. *Bioenergy and global food security*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2008.
- [78] European Environment Agency EEA. TERM 2009 - Towards a resource-efficient transport system. 2010.
- [79] Deepak Rajagopal and David Zilberman. Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. *World Bank Policy Research Working Paper No. 4341*, 2007.
- [80] Greg Hemighaus, Tracy Boval, Carol Bosley, Roger Organ, John Lind, Rosanne Brouette, Toni Thompson, Joanna Lynch, and Jacqueline Jones. *Alternative Jet Fuels*. Technical Report FTR-3/A1, Chevron Corporation, 2006.
- [81] Helmut Schütz and Stefan Bringezu. *Flächenkonkurrenz bei der weltweiten Bioenergieproduktion*. Forum Umwelt & Entwicklung, 2006.
- [82] C. Carpetis. *Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor*. Number DLR-IB-200044417400. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., April 2000.
- [83] Martin Wietschel, Ulrich Bünger, and Werner Weindorf. Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger - Endbericht. Mai 2010.
- [84] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. FNR. Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland. Juni 2010.
- [85] Jürgen Blassnegger. Emissionsminderungspotenziale durch optimierten Biodiesel und nachrüstbare Abgasnachbehandlung. Oktober 2005.
- [86] EPA. *A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. Draft Technical Report*. U.S. Environmental Protection Agency, 2002.
- [87] John Kornerup Bang, Andreas Foller, and Marco Buttazzoni. *Industrial biotechnology - More than green fuel in a dirty economy?* 2009.
- [88] International Energy Agency IEA-Bioenergy. *Algae - The Future for Bioenergy?* ExCo64 *Algae - The Future for Bioenergy - Summary and Conclusions*. 2010.
- [89] Sjors van Iersel and Alessandro Flammini. *Algae based Biofuels - Applications and Co-Products*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010.
- [90] Al Darzins, Philip Pienkos, and Les Edye. *Current Status and Potential for Algal Biofuels Production*. *IEA Task 39 Report T39-T2*, August 2010.
- [91] Anouk Florentinus, Carlo Hamelinck, Saskia de Lint, and Sjors van Iersel. *Worldwide Potential of Aquatic Biomass*. 2008.

- [92] Peer Schenk, Skye Thomas-Hall, Evan Stephens, Ute Marx, Jan Mussnug, Clemens Posten, Olaf Kruse, and Ben Hankamer. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *BioEnergy Research*, 1:20–43, 2008. 10.1007/s12155-008-9008-8.
- [93] Luisa Gouveia and Ana Oliveira. Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36:269–274, 2009. 10.1007/s10295-008-0495-6.
- [94] Peter K. Campbell, Tom Beer, and David Batten. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. *Bioresource Technology*, 102(1):50 – 56, 2011. Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells.
- [95] K. L. Kadam. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy*, 27(10):905 – 922, 2002.
- [96] Andres F. Clarens, Eleazer P. Resurreccion, Mark A. White, and Lisa M. Colosi. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. *Environmental Science & Technology*, 44(5):1813–1819, 2010. PMID: 20085253.
- [97] Sjors van Iersel, Liliana Gamba, Andrea Rossi, Sacha Iberici, Bart Dehue, Jasper van de Staaij, and Alessandro Flammini. *Algae based Biofuels - A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Mai 2009.
- [98] Qiang Li, Wei Du, and Dehua Liu. Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80:749–756, 2008. 10.1007/s00253-008-1625-9.
- [99] Orlando Jorquera, Asher Kiperstok, Emerson A. Sales, Marcelo Embiruçu, and Maria L. Ghirardi. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*, 101(4):1406 – 1413, 2010.
- [100] David Tilman, Jason Hill, and Clarence Lehman. Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science*, 314(5805):1598–1600, 2006.
- [101] Göran Berndes, Monique Hoogwijk, and Richard van den Broek. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25(1):1 – 28, 2003.
- [102] European Environment Agency EEA. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? *EEA Report No 7/2006*, 2006.
- [103] J Wolf, P.S Bindraban, J.C Luijten, and L.M Vleeshouwers. Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. *Agricultural Systems*, 76(3):841 – 861, 2003.

- [104] Günther Fischer, Sylvia Prieler, Harrij van Velthuisen, Göran Berndes, André Faaij, Marc Londo, and Marc de Wit. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures, Part II: Land use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 34(2):173 – 187, 2010. A roadmap for biofuels in Europe.
- [105] Generaldirektion Kommunikation Europäische Kommission. Länder in Europa. (NA-69-05-399-DE-P), März 2006.
- [106] Food and Agriculture Organization Of The United Nations FAO. Carbon sequestration in dryland soils. (World Soil Resources Reports 102), 2004.
- [107] Günther Fischer, Sylvia Prieler, Harrij van Velthuisen, Sander M. Lensink, Marc Londo, and Marc de Wit. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials. *Biomass and Bioenergy*, 34(2):159 – 172, 2010. A roadmap for biofuels in Europe.
- [108] D Rajagopal, S Sexton, D Roland-Holst, and D Zilberman. Challenge of biofuel: filling the tank without emptying the stomach? 2007.
- [109] Gerd Klöck. Biodiesel aus Mikroalgen. *Energy 2.0*, pages 53–55, Juli 2009.
- [110] Frank Seyfried. RENEW - Renewable fuels for advanced powertrains, Scientific Report WP 5.1: Biomass resources assesment. 2004.
- [111] Todd West, Katherine Dunphy-Guzman, Amy Sun, Len Malczynski, and David Reichmuth. Feasibility, Economics, and environmental impact of producing 90 billion gallons of ethanol per year by 2030. 2009.