

# **RENEWABILITY**

## **„Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“**

**FZK 0327546**

Endbericht an das Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit (BMU)

**Berlin, Dezember 2009**

Teil 1: Methodik und Datenbasis

**Öko-Institut e.V. (Büros Darmstadt und Berlin)**  
und  
**DLR-Institut für Verkehrsforschung (Berlin)**

**Öko-Institut e.V.**  
**Geschäftsstelle Freiburg**  
Postfach 50 02 40  
79028 Freiburg, Deutschland  
**Hausadresse**  
Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg, Deutschland  
**Telefon** +49 (0) 761 - 4 52 95-0  
**Fax** +49 (0) 761 - 4 52 95-88

**Büro Darmstadt**  
Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt, Deutschland  
**Telefon** +49 (0) 6151 - 81 91-0  
**Fax** +49 (0) 6151 - 81 91-33

**Büro Berlin**  
Novallisstraße 10  
10115 Berlin, Deutschland  
**Telefon** +49 (0) 30 - 28 04 86-80  
**Fax** +49 (0) 30 - 28 04 86-88

Wissenschaftliche Partner:

- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU)
- Deutsches Biomasse-Forschungszentrum (DBFZ, ehemals Institut für Energetik und Umwelt Leipzig)
- Professur für Verkehrsströmungslehre der Technische Universität Dresden

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen FZK 0327546 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Hintergrund und Ausgangslage .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Renewbility: Das Forschungsprojekt .....</b>	<b>5</b>
1.2.1	Ziele des Forschungsvorhabens .....	5
1.2.2	Arbeitsschritte des Forschungsvorhabens .....	6
1.2.3	Stoffstromanalyse und Partizipation .....	7
<b>1.3</b>	<b>Aufbau des Endberichtes .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Modellierung der Verkehrsnachfrage .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Personenverkehr .....</b>	<b>9</b>
2.1.1	Übersicht zur Methodik der Personenverkehrsmodellierung in Renewbility .....	9
2.1.2	Auswahl der Beispierräume zur Maßnahmenevaluation .....	12
2.1.3	Simulation der Personenverkehrsnachfrage in den Beispierräumen mit dem Mikromodell „TAPAS“ .....	31
2.1.4	Modellintegration der in Renewbility ausgewählten Maßnahmen .....	38
2.1.5	Berechnung der deutschlandweiten Verkehrsnachfrage auf Basis der Beispierräume .....	41
2.1.6	Übertragung der mikroskopisch ermittelten Maßnahmenreaktionen auf Gesamtdeutschland mit Hilfe von VISEVA .....	44
<b>2.2</b>	<b>Güterverkehr .....</b>	<b>47</b>
2.2.1	Methodik der Güterverkehrsmodellierung .....	50
2.2.2	Umsetzung der in Renewbility ausgewählten Maßnahmen .....	59
<b>2.3</b>	<b>Bestimmung der zukünftigen Struktur der Fahrzeugneuzulassungen .....</b>	<b>61</b>
2.3.1	Struktur der Pkw-Zulassungen .....	61
2.3.2	Struktur der Lkw-Zulassungen .....	65
<b>3</b>	<b>Technologiedatenbasis .....</b>	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>GEMIS als Datenbasis und Stoffstrom-Werkzeug .....</b>	<b>72</b>
<b>3.2</b>	<b>Technologiedatenbasis Pkw .....</b>	<b>73</b>
3.2.1	Fahrzeugvarianten .....	75
3.2.2	Konventionelle Otto- und Diesel-Pkw .....	77
3.2.3	Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen .....	96

3.2.4	Pkw mit elektrischem Antrieb .....	98
3.2.5	H <sub>2</sub> -Brennstoffzellen-Pkw .....	127
<b>3.3</b>	<b>Leichte Nutzfahrzeuge .....</b>	<b>137</b>
3.3.1	Kraftstoffverbrauch und Kosten .....	137
3.3.2	Emissionen .....	138
3.3.3	Materialbedarf .....	138
3.3.4	Leichte Nutzfahrzeuge mit elektrischem Antrieb .....	139
<b>3.4</b>	<b>Lkw und Busse .....</b>	<b>144</b>
3.4.1	Bemerkungen zur Datengenerierung .....	145
3.4.2	Technologien zur Kraftstoffverbrauchsminderung .....	149
3.4.3	Fahrzeugvarianten .....	163
<b>3.5</b>	<b>Übrige Verkehrsträger .....</b>	<b>169</b>
3.5.1	Quantifizierungsmethode und Datenqualität .....	169
3.5.2	Fahrzeugdefinition und -varianten .....	170
3.5.3	Verbrauchsminderungstechnologien .....	174
3.5.4	Reduktionspotenzial der Fahrzeugvarianten .....	176
3.5.5	Kraftstoffverbrauch .....	177
3.5.6	Emissionen .....	179
3.5.7	Materialeinsatz .....	180
3.5.8	Zusatzkosten .....	183
<b>3.6</b>	<b>Datenbasis und Methodik für Energieträger- und Kraftstoff-Vorketten .....</b>	<b>185</b>
3.6.1	Systemgrenzen der Vorketten .....	185
3.6.2	Allokation von Koppelprodukten in Vorketten .....	186
3.6.3	Kostenbilanzierung und Energieträgerpreise für Vorketten .....	186
<b>3.7</b>	<b>Datenbasis zu den Vorketten für fossile Energieträger und Kraftstoffe .....</b>	<b>187</b>
<b>3.8</b>	<b>Spezifische Vorketten für regenerative Energien im Bereich Mobilität .....</b>	<b>189</b>
3.8.1	Datengrundlagen zu den biogenen Kraftstoffvorketten .....	190
3.8.2	THG-Emissionen und Kosten der biogenen Kraftstoffvorketten .....	190
<b>4</b>	<b>Stoffstrommodellierung .....</b>	<b>193</b>
4.1	Die Teilmodelle der Stoffstromanalyse .....	194
4.2	Parametertabellen und Zwischenergebnisse .....	195
4.3	Die Interaktion der EDV-Werkzeuge .....	196
4.4	Modellierung von Energieträger- und Kraftstoff-Vorketten: Allokation .....	199
4.5	Monetäre Flüsse und Beschäftigung: Hybride Modellierung .....	199
4.6	Weitere Sub-Modelle .....	199

<b>4.7</b>	<b>Modellbeschreibung MOBIL-SZEN</b>	<b>200</b>
4.7.1	Übersicht der Szenarien und Szenaretten	202
4.7.2	Datenübergabe Verkehrsmodellierung und Käufermodelle	202
4.7.3	Datenübergabe Fahrzeugdaten	204
4.7.4	Teilmodellierung zur Bestandsentwicklung	204
4.7.5	Fahrleistung	205
4.7.6	Durchführung der Berechnungen	205
4.7.7	Auswertung	205
4.7.8	Auswertefunktionen MOBIL-SZEN	205
<b>4.8</b>	<b>Die Teilmodelle der Stoffstromanalyse</b>	<b>208</b>
4.8.1	Berechnung des Energieverbrauchs	208
4.8.2	Berechnung des Materialbedarfs	208
4.8.3	Berechnung der Vorketten	209
<b>4.9</b>	<b>Installation und Bedienung der EDV-Instrumente</b>	<b>209</b>
<b>Literatur</b>		<b>210</b>
4.10	Modellierung der Verkehrsnachfrage (Kapitel 2)	210
4.11	Technologiedatenbasis Pkw und LNF (Kapitel 3.2 - 3.3)	213
4.12	Literatur Materialien Pkw (Kapitel 3.2.2)	216
4.13	Technologiedatenbasis Pkw mit elektrischem Antrieb (Kapitel 3.2.4)	219
4.14	Technologiedatenbasis Brennstoffzellenfahrzeuge (Kapitel 3.2.5)	222
4.15	Technologiedatenbasis Lkw und Busse (Kapitel 3.4)	223
4.16	Technologiedatenbasis Übrige Verkehrsträger (Kapitel 3.5)	229
4.17	Energieträger- und Kraftstoffvorketten (Kapitel 3.6 – 3.8)	230
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>233</b>
5.1	Anhang 1: Wirtschaftsverkehrsklassen	233
5.2	Anhang 2: Vorkettendaten zu LNG, H <sub>2</sub> und synthetischem Rohöl	236
5.2.1	LNG-Bereitstellung - Verflüssigung, Schiffstransport, Terminal	237
5.2.2	H <sub>2</sub> -Bereitstellung - Elektrolyse dezentral und zentral, Verflüssigung, Schiffstransport für LH <sub>2</sub> , Pipelinetransport für GH <sub>2</sub>	245
5.2.3	Syncrude - Ölsandgewinnung und -erstverarbeitung vor Raffinerie	256
5.2.4	Literaturverzeichnis zum Anhang 2	262
5.3	Anhang 3: Vorkettendaten zu Biokraftstoffen	264
5.3.1	Biokraftstoffe im Überblick	264
5.3.2	Technologien für die Bereitstellung ausgewählter Biokraftstoffe	267

---

5.3.3	Biomethan .....	276
5.3.4	Literaturverzeichnis zum Anhang 3 .....	294

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verstädterte Regionen - Auswahl anhand von Indikatorwerten, Basis mittlere 50% .....	19
Tabelle 2:	Ländliche Regionen - Auswahl anhand von Indikatorwerten, Basis mittlere 50% .....	21
Tabelle 3:	Verstädterte Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 1 .....	25
Tabelle 4:	Verstädterte Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 2 .....	26
Tabelle 5:	Ländliche Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 1 .....	28
Tabelle 6:	Ländliche Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 2 .....	29
Tabelle 7:	Daten im Modell TAPAS .....	32
Tabelle 8:	Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für die Mikromodellierung ..	40
Tabelle 9:	Daten im Modell VISEVA/VISUM .....	41
Tabelle 10:	Quelle-Ziel-Gruppen Einteilung - 13er.....	43
Tabelle 11:	Einteilung der Bevölkerung in verhaltenshomogene Bezugspersonengruppen .....	43
Tabelle 12:	Zugauslastung unterteilt nach betrachteten Güterzuggruppen .....	58
Tabelle 13:	Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für die Nachfragemodellierung im Güterverkehr .....	60
Tabelle 14:	Koeffizienten und Signifikanzwerte des Pkw-Zulassungsmodells.....	63
Tabelle 15:	Trendfortschreibung von Lkw und SZM nach Größenklassen .....	68
Tabelle 16:	Durchschnittliche Jahresfahrleistung der Fahrzeugklassen .....	70
Tabelle 17:	Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für das Lkw-Neuzulassungsmodell.....	71
Tabelle 18:	Aufteilung der POLK-Pkw-Segmente auf die drei Größenklassen klein, mittel und groß.....	73
Tabelle 19:	Mittelwerte für verschiedene Spezifikationen nach Größenklasse und Antriebstechnologien bezogen auf das Jahr 2005 .....	74
Tabelle 20:	Markteinführungsszenarien für die in TNO (2006) aufgeführten Einzeltechnologien.....	82
Tabelle 21:	Prozentuale Kostenminderung durch Lernkurveneffekte für die Jahre 2020 und 2030 bezogen auf .....	83

Tabelle 22:	Effizienzsteigerungsraten verschiedener Technologien differenziert nach Fahrsituationen .....	86
Tabelle 23:	Datengrundlage zur Ermittlung der Materialzusammensetzung der Basis-Pkw (Literaturübersicht) .....	88
Tabelle 24:	Materialzusammensetzung [%] der Basisfahrzeuge in der Technologiedatenbasis mit Otto- bzw. Diesel-Motorisierung und differenziert nach den Größenklassen klein, mittel und groß.....	91
Tabelle 25:	Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw durch Motor-Downsizing (entsprechend der Ausgestaltung nach TNO (2006) .....	93
Tabelle 26:	Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw durch die Verbesserung der Aerodynamik.....	94
Tabelle 27:	Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw mit milder Hybridisierung .....	94
Tabelle 28:	Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw mit Voll-Hybridisierung .....	95
Tabelle 30:	Anforderungen an Batteriespeicher für PHEV mit unterschiedlicher elektrischer Reichweite - technologieunabhängig (Literaturauswertung)..	107
Tabelle 31:	Mindestanforderungen an Batterien für den BEV-Einsatz nach CARB (2007) .....	108
Tabelle 32:	Aktueller technischer Entwicklungsstand von Batteriespeichern (Literaturauswertung) .....	108
Tabelle 33:	Materialzusammensetzung von Li-Ionen- und NiMH-Batterien.....	109
Tabelle 34:	Energiebedarf von PHEV im rein-elektrischen Fahrbetrieb (CD-Modus) und relative Verbrauchsänderung gegenüber HEV und CV in verschiedenen Fahrsituationen (Literaturauswertung) .....	110
Tabelle 35:	Relative Veränderung des Kraftstoffbedarfs von PHEV gegenüber HEV und CV im CS-Modus in verschiedenen Fahrsituationen (Literaturauswertung) .....	111
Tabelle 36:	Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen (Literaturauswertung).....	112
Tabelle 37:	Mittlerer Energieverbrauch [kWh/100km] von Elektrofahrzeugen (Literaturauswertung) .....	113
Tabelle 38:	Zusatzkosten [€] von HEV und PHEV unterschiedlicher elektrischer Reichweite in Bezug auf ein konventionelles verbrennungsmotorisches Vergleichsfahrzeug (Literaturauswertung) .....	113
Tabelle 39:	Bauteile und Gewicht eines 50 kW Elektromotors .....	115
Tabelle 40:	Gewicht weiterer zusätzlicher Komponenten des Elektroantriebs und deren Materialbedarf .....	116
Tabelle 41:	Änderung von Fahrzeuggewicht und Materialzusammensetzung durch Motor-Downsizing und den Wegfall der Starter-Batterie .....	116



Tabelle 42:	Fahrzeugcharakteristika von Pkw mit Plug-in-Hybridantrieb in der Renewbility-Technologiedatenbasis.....	119
Tabelle 43:	Verbrauchsminderung, Energiebedarf und elektrische Reichweite der PHEV-Typen in verschiedenen Fahrmodi und -situationen .....	120
Tabelle 44:	Prognostizierte Kostenentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien für den PHEV-Einsatz .....	121
Tabelle 45:	Zusatzkosten des PHEV-Antriebs bei Pkw [€] .....	122
Tabelle 46:	Prognostizierte Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für den PHEV-Einsatz.....	123
Tabelle 47:	Zusatzgewicht des PHEV-Antriebs [kg] .....	123
Tabelle 48:	Fahrzeugcharakteristika der Batterie-elektrischen Pkw in der Renewbility-Technologiedatenbasis .....	124
Tabelle 49:	Energieverbrauch [kWh/100km] von Elektrofahrzeugen in der Technologiedatenbasis .....	125
Tabelle 50:	Batteriekostenprognosen nach CARB (2007), VW (2008) und Batteriesystemkosten.....	125
Tabelle 51:	Veränderter Materialbedarf [kg] von Batterie-elektrischen Pkw der Klassen klein und mittel im Jahr 2010 .....	126
Tabelle 52:	Energieeffizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen und ihren Komponenten (Literaturauswertung) .....	128
Tabelle 53:	Mittlerer Energieverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen (Literaturauswertung) .....	128
Tabelle 54:	Energieverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen in der Technologiedatenbasis.....	129
Tabelle 55:	Kostenprognosen für den Brennstoffzellenantrieb (Literaturauswertung) .	130
Tabelle 56:	Kostenprognosen für Wasserstoff-Speichersysteme (Literaturauswertung) .....	131
Tabelle 57:	Prognostizierter Anteil des Speicherinhalts am Gesamtgewicht des Wasserstofftanks (Tankgewicht bei 5 kg Wasserstoffspeicherung; gasförmig – g / flüssig – f) (Literaturauswertung).....	131
Tabelle 58:	Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge auf Basis von in CARB (2007), CONCAWE (2007), IEA (2005), MIT (2000) formulierten Zielwerten.....	132
Tabelle 59:	Renewbility-Referenzfahrzeug – durchschnittliche Leistung und erforderlicher Energieinhalt des Wasserstoffspeichersystems.....	133
Tabelle 60:	Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge der Größenklassen klein, mittel und groß in der Technologiedatenbasis .....	133
Tabelle 61:	Energieverbrauch von Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugen in der Technologiedatenbasis .....	134

Tabelle 62:	Annahmen zu Batteriekosten (Lithium-Ionen-Batterie) für den Einsatz in Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugen.....	134
Tabelle 63:	Veränderung der Zusatzkosten für die Brennstoffzellen-Hybridvarianten der Größenklassen klein, mittel und groß in der Technologiedatenbasis.....	135
Tabelle 64:	Veränderter Materialbedarf [kg] von BZ- und BZ-Hybrid-Fahrzeugen der Größenklassen klein, mittel und groß .....	136
Tabelle 65:	Fahrzeugcharakteristika von LNF mit Plug-in-Hybridantrieb in der Renewability-Technologiedatenbasis.....	139
Tabelle 66:	Verbrauchsminderung, Energiebedarf und elektrische Reichweite eines PHEV-LNF in verschiedenen Fahrmodi und -situationen.....	140
Tabelle 67:	Zusatzkosten des PHEV-Antriebs für leichte Nutzfahrzeuge [€].....	140
Tabelle 68:	Zusatzgewicht des PHEV-Antriebs [kg] .....	141
Tabelle 69:	Fahrzeugcharakteristika von Batterie-elektrischen LNF in der Renewability-Technologiedatenbasis .....	142
Tabelle 70:	Verbrauchsminderung des elektrischen gegenüber dem konventionellen Antrieb und daraus resultierender Energiebedarf für Batterie-elektrische LNF nach Fahrsituationen differenziert.....	142
Tabelle 71:	Batteriekostenprognosen nach CARB (2007), VW (2008) und Batteriesystemkosten für leichte Nutzfahrzeuge mit Batterie-elektrischem Antrieb .....	143
Tabelle 72:	Veränderter Materialbedarf [kg] von Batterie-elektrischen LNF im Jahr 2010 .....	143
Tabelle 73:	Kraftstoffverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen der Lkw- und Omnibusklassen auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeugauslastung nach TREMOD im Basisjahr 2005. ....	145
Tabelle 74:	Spezifikationen der Lkw- und Omnibusklassen auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeugkapazitäten nach TREMOD.....	147
Tabelle 75:	Spezifikationen der einzelnen Lkw- und Omnibusklasse zur Ableitung der Technologiekosten .....	147
Tabelle 76:	Markteinführungsszenarien für die in Abschnitt 3.4.2 diskutierten Einzeltechnologien bei Lkw und Omnibussen.....	148
Tabelle 77:	Entwicklung des mittleren Kraftstoffverbrauchs der betrachteten Lkw- und Omnibusklassen bis 2030 für Basisfahrzeuge .....	164
Tabelle 78:	Prozentuale Verbrauchsminderung, Kraftstoffverbrauch und Zusatzkosten der Lkw-Varianten; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005 .....	166
Tabelle 79:	Prozentuale Verbrauchsminderung, Energieverbrauch und Zusatzkosten der Solo-Lkw-Varianten mit alternativem Erdgasantrieb; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005 .....	168

Tabelle 80:	Prozentuale Verbrauchsminderung, Kraftstoffverbrauch und Zusatzkosten der Diesel-Omnibus-Varianten; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005 .....	168
Tabelle 81:	Betrachtete Fahrzeugkategorien und -varianten .....	172
Tabelle 82:	Leistungsmerkmale von Neufahrzeugen der jeweiligen Fahrzeugkategorie in 2005 .....	173
Tabelle 83:	Auslastungsgrade der Fahrzeugkategorien und -varianten .....	174
Tabelle 84:	Minderungsraten bei Energieverbrauch (bzgl. Neuzulassungen 2005) ....	177
Tabelle 85:	Kraftstoffverbrauch nach Fahrzeugkategorie und Fahrzeugvariante [MJ/km]. .....	179
Tabelle 86:	Emissionsfaktoren ausgewählter Fahrzeugvarianten (Vorläufige Werte) [g/km] .....	180
Tabelle 87:	Zuordnung der Fahrzeugkategorien für die Bestimmung des Materialeinsatzes .....	180
Tabelle 88:	Materialeinsatz ausgewählter Fahrzeugvarianten [kg] (Quelle: siehe Literaturverzeichnis, Abschätzungen und Berechnungen IFEU 2009).....	182
Tabelle 89:	Anteil der Zusatzkosten am Neuwert des Fahrzeugs.....	183
Tabelle 90:	Fahrzeugbezogene Zusatzkosten [€] (Schätzung) der Varianten .....	184
Tabelle 91:	THG-Emissionen der Energievorketten (inkl. fossilen Kraftstoffen) in GEMIS 4.6 für Renewbility.....	188
Tabelle 92:	THG-Emissionen für Bereitstellung und Nutzung sowie Bereitstellungskosten von Kraftstoffvorketten in Renewbility .....	190
Tabelle 93:	Übersicht zu den Teilmodellen und Datendateien von MOBIL-SZEN .....	201
Tabelle 94:	Prozessdaten Erdgasverflüssigung, Lagerung und Umschlag.....	241
Tabelle 95:	Prozessdaten LNG-Transport .....	243
Tabelle 96:	Prozessdaten LNG-Entladung und -Verdampfung.....	245
Tabelle 97:	Prozessdaten Elektrolyse.....	250
Tabelle 98:	Prozessdaten H <sub>2</sub> -Verflüssigung .....	252
Tabelle 99:	Prozessdaten LH <sub>2</sub> -Transport.....	254
Tabelle 100:	Prozessdaten CGH <sub>2</sub> -Pipeline .....	256
Tabelle 101:	Prozessdaten Synthetisches Rohöl .....	260
Tabelle 102:	Kenndaten für HVO .....	269
Tabelle 103:	Kenndaten für BtL .....	275
Tabelle 104:	Kenndaten Biomethan aus Biogas .....	284
Tabelle 105:	Kenndaten Bio-SNG.....	289
Tabelle 106:	Kenndaten Biowasserstoff .....	293

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Prozess im Renewbility-Verbundvorhaben mit den wichtigsten Arbeitsschritten .....	6
Abbildung 2: Der partizipative Prozess bei Renewbility .....	8
Abbildung 3: Ausgewählte Untersuchungsräume für die mikroskopische Modellierung .....	11
Abbildung 4: Verstädterte Räume (links) und ländliche Räume (rechts) mit Raumtypen hinterlegt .....	15
Abbildung 5: Mittlerer Wertebereich für den Indikator Einwohnerdichte – Basis verstädterte Räume .....	17
Abbildung 6: Mittlerer Wertebereich für den Indikator Pkw-Dichte – Basis verstädterte Räume .....	17
Abbildung 7: Verstädterte Räume (links) und ländliche Räume (rechts) in der engeren Wahl .....	31
Abbildung 8: Ablaufschema des Modells TAPAS .....	36
Abbildung 9: Zusammenwirken von Angebotsplanung (LINOP) und TAPAS .....	37
Abbildung 10: Modellseitige Abbildung ÖPNV-bezogener Maßnahmen .....	38
Abbildung 11: Zusammenspiel der Ausgabegrößen von TAPAS sowie Inputparameter für VISEVA .....	47
Abbildung 12: Mikroskopisches Modellkonzept zur Güterverkehrsmodellierung in Renewbility .....	48
Abbildung 13: Darstellung der Vorgehensweise bei der Güterverkehrsmodellierung .....	50
Abbildung 14: Prinzipielle Darstellung der Anwendung des gekoppelten Verkehrsmodells VISEVA-W/ VISUM .....	52
Abbildung 15: Tourenkonzept in VISEVA-W .....	54
Abbildung 16: Vergleich der tatsächlichen Neuzulassungsanteile mit den im Modell simulierten Anteilen .....	64
Abbildung 17: Trend der Lkw-Neuzulassungen bis 2030 .....	67
Abbildung 18: Bestimmung von Rentabilitätsschwellen .....	69
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Varianten-Entwicklung (Quelle: Öko-Institut) ....	76
Abbildung 20: Schematisches Vorgehen zur Bestimmung der Kosten am Beispiel der Pkw-Variante Otto-mittel (in Anlehnung an TNO 2006) .....	78
Abbildung 21: Vorgehen zur Kostenberechnungen unter Berücksichtigung der zwischen 2002 und 2005 bereits geleisteten Kraftstoffminderung (in Anlehnung an TNO 2006) .....	78
Abbildung 22: Schematische Darstellung zum Vorgehen über TNO (2006) hinaus (Quelle: Öko-Institut) .....	80

Abbildung 23: Kostenreduktionskurve am Beispiel der Start-Stopp-Automatik; den Neuzulassungsanteilen ist die kumulierte Produktionsmenge hinterlegt (Berechnungen: Öko-Institut) .....	83
Abbildung 24: CO <sub>2</sub> -Reduktion und entsprechende Zusatzkosten der verschiedenen Pkw-Varianten Otto-mittel für die Jahre 2010, 2020, 2030 (Berechnungen: Öko-Institut) .....	85
Abbildung 25: CO <sub>2</sub> -Reduktion und entsprechende Zusatzkosten der verschiedenen Pkw-Varianten Diesel-mittel für die Jahre 2010, 2020, 2030 (Berechnungen: Öko-Institut) .....	85
Abbildung 26: Übersicht der Materialanteile für Otto-Pkw der Größenklassen klein, mittel und groß gemäß Literaturangaben und für die daraus abgeleiteten Basisfahrzeuge der Technologiedatenbank (Reference).....	90
Abbildung 27: THG-Emissionen und Bereitstellungskosten von Kraftstoffvorketten in Renewbility .....	192
Abbildung 28: Grundstruktur der Stoffstromanalyse in Renewbility .....	193
Abbildung 29: Die Interaktion der EDV-Werkzeuge zur Stoffstromanalyse „Nachhaltige Mobilität“ .....	195
Abbildung 30: Datenflüsse zwischen den EDV-Werkzeugen von Renewbility .....	197
Abbildung 31: Verarbeitungslogik der Daten in den EDV-Werkzeugen von Renewbility ....	198
Abbildung 33: Bereitstellungspfade zur Nutzenergiebereitstellung aus biogenen Energieträgern .....	265
Abbildung 34: Verfahrensablauf zur BTL-Produktion .....	270
Abbildung 35: Systemkomponenten der bio-chemischen Biomethanbereitstellung .....	277
Abbildung 36: Konversionspfad der thermo-chemischen Biomethanerzeugung .....	285
Abbildung 37: Systemelemente der Wasserstoffproduktion .....	290

## Abkürzungsverzeichnis

AB	Autobahn
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik
AO	außerorts
AU	Länderkürzel für Australien
BAB	Bundesautobahn
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BEV	Battery Electric Vehicle
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BR	Länderkürzel für Brasilien
BtL	biomasss-to-liquids (Bio-Diesel aus Fischer-Tropsch-Synthese)
BVT	Bundesverband der Transpirtunternehmen
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
BZ	Brennstoffzelle
CA	Länderkürzel für Kanada
CACD	Common Artemis Driving Cycle
CD	charge depleting
CEE	Central and Eastern Europe
CHAID	Chi-Squared Automatic Interaction Detection
CNG	Compressed Natural Gas
CS	charge sustaining
CV	conventional vehicle
DBFZ	Deutsches BiomasseForschungsZentrum
DE	Länderkürzel für Deutschland
DVZ	Deutsche Verkehrs-Zeitung
DZ	Länderkürzel für Marokko
EE	Erneuerbare Energien
EEA	European Environment Agency
EtOH	(Bio-)Äthanol

EU	Länderkürzel für die Europäische Union
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
ggü.	gegenüber
GHD	Gewerbe-Handel-Dienstleistungen
GLM	generalisiertes lineares Modell
GLZ	Gliederzug
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfturbine (Kombi-Kraftwerk)
GUS	Länderkürzel für die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten
HH	Hansestadt Hamburg bzw. Abkürzung für Haushalte
HUB	Zentralknoten in einem nach dem Hub-and-Spoke-Verfahren betriebenen Transportsystem
IEA	Internationale Energieagentur
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPTS	Institute for Prospective Technological Studies
IO	innerorts
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KEP	Kurier-Express-Paket-Dienste
KUP	Kurzumtriebs-Plantage
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LINOP	Linienoptimierungsprogramm
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquified/Liquefied Petroleum/Propane Gas, Flüssiggas
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Million
MIV	motorisierter Individualverkehr
Mrd.	Milliarde
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NL	Länderkürzel für Niederlande
NO	Länderkürzel für Norwegen
NZL	Neuzulassungen
OBU	On-Board-Unit

OLS	Ordinary Lease Squares
OPEC	Organisation erdölexportierender Länder
Pkm	Personenkilometer
PM	Particulate matter, Feinstaub
PME	Palmölmethylester
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementinstrumente
RME	Rapsmethylester
RU	Länderkürzel für Russland
SZ/SZM	Sattelzugmaschine
TAPAS	<b>T</b> ransport and <b>A</b> ctivity <b>P</b> atterns <b>S</b> imulation
TEU	Twenty-Food-Equivalent-Units
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
Tsd.	Tausend
ÖV	öffentlicher Verkehr
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle
RFID	Radio Frequency Identification
UBA	Umweltbundesamt
US	Länderkürzel für die USA
WISEVA	<b>V</b> erkehr in <b>S</b> tädten und Regionen <b>E</b> rzeugung, <b>V</b> erteilung und <b>A</b> ufteilung der Verkehrsnachfrage
VISUM	realisierbaren <b>U</b> mlegung
VP 2025	Verkehrsprognose 2025 des BMVBS
WVK	Wirtschaftsverkehrsklasse
WZ	Wirtschaftszweig
zGG	zulässiges Gesamtgewicht
ZR	Zuckerrüben
Zugkm	Zugkilometer



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Ausgangslage

Mobilität ist ein Grundbedürfnis jedes Menschen und gleichzeitig Voraussetzung für eine moderne, arbeitsteilige Gesellschaft in einer globalisierten Welt. Allerdings hat eine umfassende Mobilität auch ihre Schattenseiten: Der Anteil des gesamten Verkehrs an den nationalen, direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen beläuft sich derzeit auf etwa 20 %. Wesentliche Treiber dafür sind zunehmende Mobilitätsansprüche des Einzelnen, vor allem aber auch stark wachsende Gütertransporte. Zudem fühlen sich Menschen direkt oder indirekt von negativen Auswirkungen des Verkehrs wie Lärm und Emissionen betroffen.

Die Verkehrsentwicklung ist daher eine große Herausforderung für den Klimaschutz: Wachsende Pkw-Zulassungszahlen, steigender Individualverkehr, zunehmende Entfernungen im Güter- und Personenverkehr und weltumspannende Transportnetze sind Trends, die der notwendigen Reduzierung von Treibhausgasemissionen entgegenstehen. Ziel einer nachhaltigen Verkehrspolitik muss es sein, ein hohes Maß an Mobilität für alle Teile der Gesellschaft bei gleichzeitiger Minderung der negativen Folgen für Klima und Umwelt sicherzustellen.

Aber wie wird sich die Mobilitätsnachfrage entwickeln? Welche Angebote sind nachhaltig? Und wie wird Verkehr klima- und umweltverträglicher? Dies sind Fragen, denen im Hinblick auf eine nachhaltige Energie- und Verkehrspolitik vor allem unter dem Aspekt des Klimaschutzes große Bedeutung zukommt.

Sollte die Europäische Union ihre Minderungsziele von 30 % bis zum Jahr 2020 umsetzen, so hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt, die nationalen Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 40 % zu senken. Diese ambitionierten Ziele erfordern große Anstrengungen in allen Sektoren – auch dem Verkehr. Gerade hier aber ist die Minderung der Treibhausgase besonders schwierig, denn das Verkehrsaufkommen wird weiter wachsen.

Wie kann es also gelingen, nachhaltige Mobilität für alle sicherzustellen und gleichzeitig die politischen Ziele für eine zukunftsfähige Energiepolitik und wirksamen Klimaschutz zu erreichen? Um diese Frage zu beantworten, fehlten bisher integrative Analyseinstrumente, die den Einfluss politischer Vorgaben sowohl auf das Verkehrsangebot als auch auf die Verkehrsnachfrage abbilden. Solche Instrumente könnten helfen, die Auswirkungen politischer Rahmenbedingungen auf die Entwicklung im Verkehrsbereich zu beurteilen und besonders effektive Maßnahmen zu identifizieren. Mit anderen Worten: Sie bilden eine wesentliche Grundlage zur Analyse, Bewertung und Legitimation zukünftigen politischen Handelns für eine nachhaltige Entwicklung.

Bestehende Analyseinstrumente im Bereich Verkehr fokussieren insbesondere die Wirkung von Einzelmaßnahmen, ohne die Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen und Sektoren zu berücksichtigen. Moderne Verkehrssysteme aber sind

komplex. So werden künftig beispielsweise erneuerbare Energien im Verkehr eine wachsende Rolle spielen, daher müssen die Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (Strom und Wärme) in Überlegungen und Analysen mit einbezogen werden. Auch die Auswirkungen des Fahrzeug- und Kraftstoffangebots auf die Verkehrsnachfrage wird in bisherigen Analysen meist nur unzureichend berücksichtigt.

## **1.2 Renewbility: Das Forschungsprojekt**

### **1.2.1 Ziele des Forschungsvorhabens**

Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wurde daher im Rahmen von „Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ ein in mehrfacher Hinsicht integratives Analyseinstrumentarium entwickelt, das Maßnahmen und Wirkungen einer zukünftigen nachhaltigen Verkehrspolitik abbildet und unter anderem die resultierenden Treibhausgasemissionen und Energieverbräuche sowohl im Verkehrssektor wie auch insgesamt quantifiziert.

Wesentliche Neuerungen des integrativen Modellierungsansatzes sind:

- die gekoppelte, dynamische Betrachtung von Mobilitätsangebot und -nachfrage,
- die Modellierung des Mobilitätsverhaltens im Personenverkehr auf Mikroebene für repräsentative Regionen,
- die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Energiesektor im Hinblick auf die Förderung erneuerbarer Energien,
- die enge Kooperation mit gesellschaftlichen Akteuren bei der Modell- und Szenarioentwicklung.

Betrachtet wurden der innerdeutsche Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und Luftverkehr. Dabei ist es wichtig zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zur Klimaberichterstattung bei der Emissionsbilanzierung im Rahmen von Renewbility nicht nur die direkten Treibhausgasemissionen der Verkehrs- und Energieträger betrachtet wurden, sondern auch Emissionen, die bei der Herstellung der Kraftstoffe im In- und Ausland und bei der Fahrzeugproduktion entstehen.

Das Kernteam des Vorhabens bildeten das Öko-Institut (Projektleitung) und das Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-IVF) Berlin. Als weitere wissenschaftliche Partner haben das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), das Deutsche Biomasse-Forschungszentrum (DBFZ, ehemals Institut für Energetik und Umwelt Leipzig) sowie die Professur für Verkehrsströmungslehre der Technische Universität Dresden (TU-D) im Verbundvorhaben mitgearbeitet.

Die wesentlichen Ziele des Vorhabens waren:

- die Entwicklung eines integrierten Modells zur Abbildung von Instrumenten und Maßnahmen für eine nachhaltige Mobilität im Bereich des Personen- und Güterverkehrs unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit dem Energiesektor;
- die frühzeitige Einbindung wesentlicher gesellschaftlicher Akteure bei der Modellentwicklung und -erprobung;
- die Entwicklung eines konsistenten Klimaschutzszenarios für den Verkehrssektor bis 2030 unter der Beteiligung von Stakeholdern.

### 1.2.2 Arbeitsschritte des Forschungsvorhabens

Für die Entwicklung von Szenarien für einen nachhaltigeren und klimaschonenden Verkehr sind umfangreiche Vorarbeiten und Datensammlungen die wesentliche Grundlage. Im Rahmen von Renewbility wurden vorhandene Nachfragemodelle zur Abbildung der Entwicklungen sowohl im Personenverkehr wie auch im Güterverkehr fortentwickelt. Parallel erarbeitete das Forschungsteam eine Datenbasis, die insbesondere die Emissionsrelevanz von Fahrzeugen und Kraftstoffen inklusive deren Herstellungsketten erfasst. Zudem wurden Potenzialanalysen für die Verfügbarkeit von Energieträgern erstellt. Diese Arbeiten bildeten den ersten Arbeitsschritt im Prozess, die Daten wurden in Experten-Workshops auf Plausibilität und Qualität hin verifiziert.

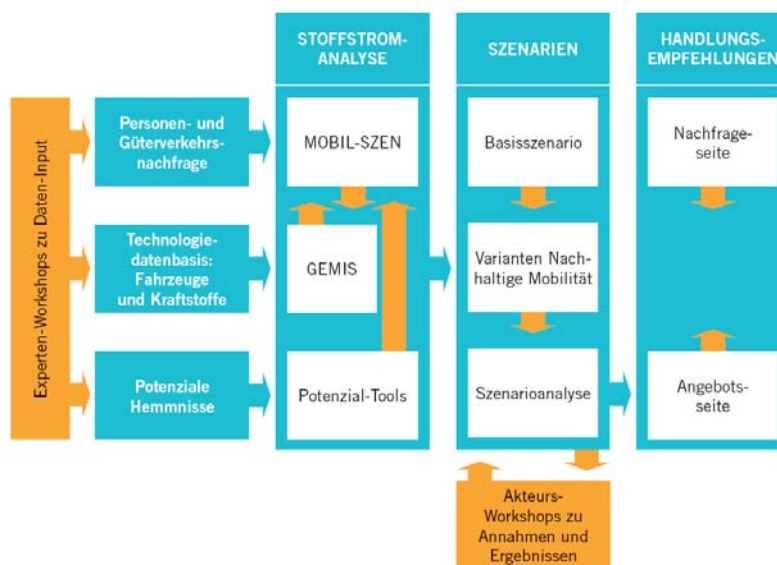


Abbildung 1: Der Prozess im Renewbility-Verbundvorhaben mit den wichtigsten Arbeitsschritten

In einem zweiten Schritt wurden die erarbeiteten Module in einem EDV-Werkzeug zur Stoffstromanalyse miteinander gekoppelt, das sich aus dem Szenario-Tool „MOBIL-SZEN“, dem Prozesskettenmodell GEMIS und Potenzialbestimmungstools

zusammensetzt. Daraus haben das Wissenschaftlerteam gemeinsam mit den beteiligten gesellschaftlichen Akteuren Szenarien abgeleitet, die unterschiedlichste Annahmen und Maßnahmen für eine nachhaltige Mobilität berücksichtigen. Am Ende des Forschungsvorhabens wird die Ableitung von Handlungsempfehlungen bezogen sowohl auf die Nachfrage- als auch auf die Angebotsseite stehen.

### **1.2.3 Stoffstromanalyse und Partizipation**

Das Projekt Renewbility nutzt das Konzept der Stoffstromanalyse, um ökologische und ökonomische Effekte unterschiedlicher Szenarien zur Mobilität auszuloten.

Die Analyse der Stoffströme erfolgt in Prozessketten, die beispielsweise den Lebensweg von Fahrzeugen und Kraftstoffen von der Nutzungsphase über die Produktion und Distribution bis hin zur Ressourcenentnahme zurückverfolgen. Diese Analyse stellt sicher, dass stets sowohl die Nachfrageseite (also der Bedarf an Mobilität) als auch die Angebotsseite (Bereitstellungs- und Produktionsprozesse von Fahrzeugen, Strom und Kraftstoffen) in ihren Wechselwirkungen erfasst werden. Außerdem können auf diese Weise Fragen zur Gewinnung und Nutzung von Ressourcen integriert werden; auch Effekte beispielsweise durch Rohstoff- oder Energieimporte sind abbildbar.

Die entwickelten Stoffstrom-Szenarien erlauben eine belastbare Abschätzung des Potenzials von Instrumenten und Maßnahmen zur Erreichung einer nachhaltigeren Mobilität. Dabei kann nach Personen- und Güterverkehr differenziert werden, und auch die Wechselwirkungen der Instrumente und Maßnahmen untereinander sind einbezogen.

Eine solch komplexe Aufgabe erfordert die Partizipation unterschiedlichster Akteure. Bei Renewbility haben Vertreter aus Verkehrs- und Energiewirtschaft, Technikanbietern und Nicht-Regierungs-Organisationen ihre Positionen und Interessen im Bereich Mobilität eingebracht und diskutiert. Neben einem politischen Begleitkreis und der sogenannten Szenario-Gruppe wurden Einzelexperten im Rahmen eines wissenschaftlichen Beirats und in Workshops zu ausgewählten Themen in die Konsolidierung der Datenbasis und die Qualitätssicherung des Forschungsprozesses einbezogen (Abbildung 2).

In Renewbility wurde erstmal ein solcher partizipativer Prozess mit der wissenschaftlichen Erarbeitung stoffstromorientierter Szenarien gekoppelt. Der zweijährige Arbeitsprozess führte zu einer weitgehenden Verständigung über Szenarioansatz, Datengrundlagen und Modellierungsformen sowie letztlich zu der gemeinsamen Definition explorativer Szenarien für den Verkehr.

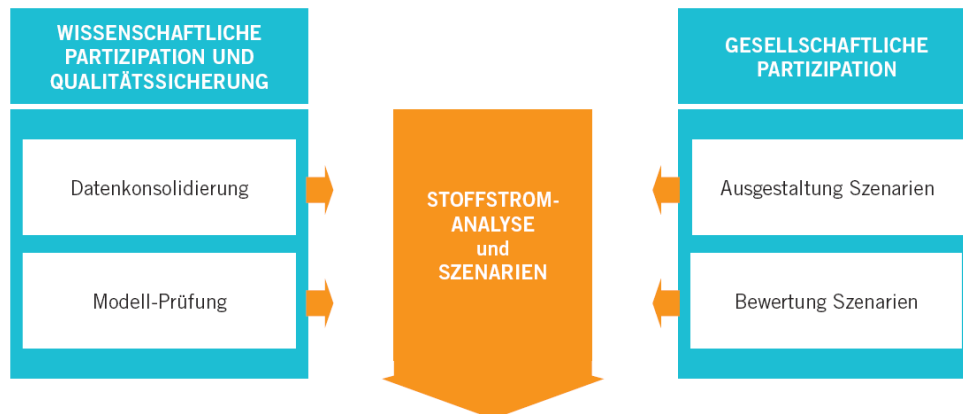


Abbildung 2: Der partizipative Prozess bei Renewbility

### 1.3 Aufbau des Endberichtes

Der Endbericht des Forschungsvorhabens Renewbility besteht aus zwei voneinander unabhängigen Teilen. Der erste Teil geht detailliert auf die Datengrundlagen und Modellentwicklungen ein und es werden die verschiedenen Funktionalitäten des im Rahmen des Projektes entwickelten Analyseinstrumentariums dargestellt. Der zweite Teil beschreibt den Szenario-Prozess, das Basisszenario und die darauf aufbauenden Szenarien und deren Ergebnisse. Entsprechend dieser Unterteilung ist der erste Teil des Endberichtes Renewbility folgendermaßen gegliedert:

- Im **Kapitel 2** wird die Modellierung der Verkehrsnachfrage differenziert nach Personenverkehr, Güterverkehr und Struktur der Fahrzeugzulassungen beschrieben.
- **Kapitel 3** geht auf die Genese der Technologiedatenbasis ein. Dabei werden sowohl die Antriebs- und Fahrzeugtechnologien differenziert nach Pkw, Leichten Nutzfahrzeugen, Lkw und übrigen Verkehrsträgern als auch die Energievorketten und Kraftstoffe beschrieben.
- Die Interaktion und Integration der Modelle in Bezug auf die Stoffstromanalyse wird in **Kapitel 4** beschrieben.
- Die Literaturnachweise zu den einzelnen Kapiteln dieses Teils des Endberichts sind in **Kapitel 5** zu finden.

## 2 Modellierung der Verkehrsnachfrage

### 2.1 Personenverkehr

Die vom Verkehr ausgehenden Umweltwirkungen, Kosten- und Beschäftigungseffekte hängen neben fahrzeugtechnischen Entwicklungen maßgeblich von den Entwicklungen der Verkehrsnachfrage und der daraus resultierenden Verkehrsleistung ab. In der Vergangenheit wurde ein Großteil des technischen Fortschritts zur Reduzierung der fahrzeugspezifischen Emissionen und des Energieverbrauchs durch das starke Anwachsen der Verkehrsleistungen aufgezehrt. Daher kommt der detaillierten Analyse der Verkehrsnachfrage und der modellgestützten Bewertung von verkehrspolitischen Maßnahmen im Rahmen des Projekts Renewbility eine hohe Bedeutung zu.

Aufgabe des Instituts für Verkehrsforschung im Vorhaben Renewbility war es, die vorgenannten Aspekte im Rahmen des Arbeitspaketes 1 „Nachfragemodell im Personenverkehr“ zu bearbeiten.

#### 2.1.1 Übersicht zur Methodik der Personenverkehrsmodellierung in Renewbility

Die klassischen Ansätze von makroskopischen Modellen basieren zumeist auf dem so genannten Vier-Stufen-Algorithmus, in dem vier Teilmodelle – Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl und Verkehrsumlegung – sequenziell oder zum Teil auch simultan abgearbeitet werden.

Diese Modelle sind in der Praxis weit verbreitet und als etablierte Instrumente zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage anerkannt. Der Ansatz zeichnet sich durch eine stärker aggregierte Herangehensweise aus, bei der z. B. Personengruppen gebildet werden, für die ein gleichartiges Verkehrsverhalten angenommen wird. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, dass die Ansprüche an Daten und Rechnerleistung auch für große Untersuchungsgebiete überschaubar bleiben (vgl. Böhnke 2005, 16). In Renewbility kommt das auf dem 4-Stufen-Algorithmus basierende Programmpaket VISEVA/VISUM zur Berechnung der deutschlandweiten Verkehrsnachfrage im MIV zum Einsatz.

Da die Bestimmung der Verkehrsnachfrage im Projekt Renewbility auf sehr differenzierte Weise vorgenommen wird – insbesondere hinsichtlich der Abbildung verkehrspolitischer Maßnahmen – sind folgende Grenzen bzw. Defizite der 4-Stufen-Modelle zu nennen:

- Im Vergleich zu mikroskopischen Modellen, die die Wirkungen von Maßnahmen dezidiert für einzelne Personen im Modell ermitteln können und dabei auch den konkreten Raumkontext des Individuum betrachten, erlauben makroskopische Modelle nur eine aggregierte Abschätzung.

- Der Haushaltskontext bzw. dessen Einfluss auf das Verkehrsverhalten wird in makroskopischen Modellen bei der Bildung der verhaltenshomogenen Personengruppen in der Regel nicht berücksichtigt. Beschränkungen, die sich aus der Interaktion der Haushaltsmitglieder ergeben – beispielsweise die Tatsache, ob der haushaltseigene Pkw bereits von einem anderen Haushaltsmitglied in Benutzung ist – können nicht berücksichtigt werden. Ähnliches gilt für die Beachtung von zeitlichen und finanziellen Beschränkungen, denen der Haushalt bzw. sein Mitglied unterworfen ist.

Um die genannten Defizite auszugleichen, werden in jüngerer Zeit zunehmend mikroskopische aktivitätenbasierte Ansätze verfolgt. Grundidee dieser Ansätze ist, dass das zeitliche Nacheinander von Wegen das Ergebnis der Abfolge von individuellen Aktivitäten ist (Hertkorn 2004, S. 2). Ein Modell, das diesem Ansatz folgt, geht von den Aktivitäten der handelnden Personen, in diesem Fall der Verkehrsteilnehmer, aus. Dabei werden nicht nur die Ausübung der Aktivitäten in ihrer zeitlichen und räumlichen Anordnung betrachtet, sondern auch die jeweils konkret gegebenen Rahmenbedingungen für die Aktivitäten. Solche Rahmenbedingungen sind beispielsweise personen- und haushaltsbezogene Merkmale oder die Berücksichtigung der jeweils aktuellen räumlichen Position des Handelnden (vgl. Arentze et al. 1997, II-J/3). Den erweiterten Möglichkeiten, mit aktivitätenbasierten Modellen Maßnahmen abzubilden, stehen die erhöhten Ansprüche an Datenqualität und Datenverfügbarkeit entgegen.

Für das Forschungsvorhaben Renewability wird das am Institut für Verkehrsforschung entwickelte mikroskopische Modell TAPAS (**T**Travel and **A**ctivity **P**Atterns **S**imulation) angewendet. Es kommt zur Abbildung von Maßnahmenwirkungen in vier verschiedenen Untersuchungsräumen zum Einsatz. Aus den Ergebnissen von TAPAS lassen sich Verhaltensparameter ableiten, die die maßnahmenbedingten Veränderungen beschreiben und an das Makromodell VISEVA weitergegeben werden. Dadurch kann die Wirkung verkehrspolitischer Maßnahmen auf die Gesamtverkehrsleistung in Deutschland berechnet werden.

Das wesentliche Erkenntnisinteresse aus der Modellierung von vier unterschiedlichen Untersuchungsräumen gilt der Frage, ob Personen in Abhängigkeit vom Raumtyp unterschiedlich auf verkehrsbezogene Maßnahmen reagieren und welche Schlussfolgerungen sich daraus für die Wirkmächtigkeit von Maßnahmen ergeben. Eine wichtige Aufgabe bestand folglich darin, geeignete Räume für die Verkehrsnachfragemodellierung zu finden. Mittels einer Analyse von Indikatoren aus den Bereichen Demographie, Raumstruktur und Verkehrsverhalten wurden aus den 97 Raumordnungs- bzw. Analyseregionen des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) vier Untersuchungsräume ausgewählt. Mit den in Abbildung 3 dargestellten Räumen Hamburg, Berlin, Braunschweig und Main-Rhön wurden dabei zwei Räume des BBR-Regionsgrundtypen „Agglomerationsräume“ sowie jeweils ein



Raum der Typen „verstädterte Räume“ und „ländliche Räume“ gewählt. Eine ausführliche Darstellung der Raumauswahl erfolgt im anschließenden Kapitel.

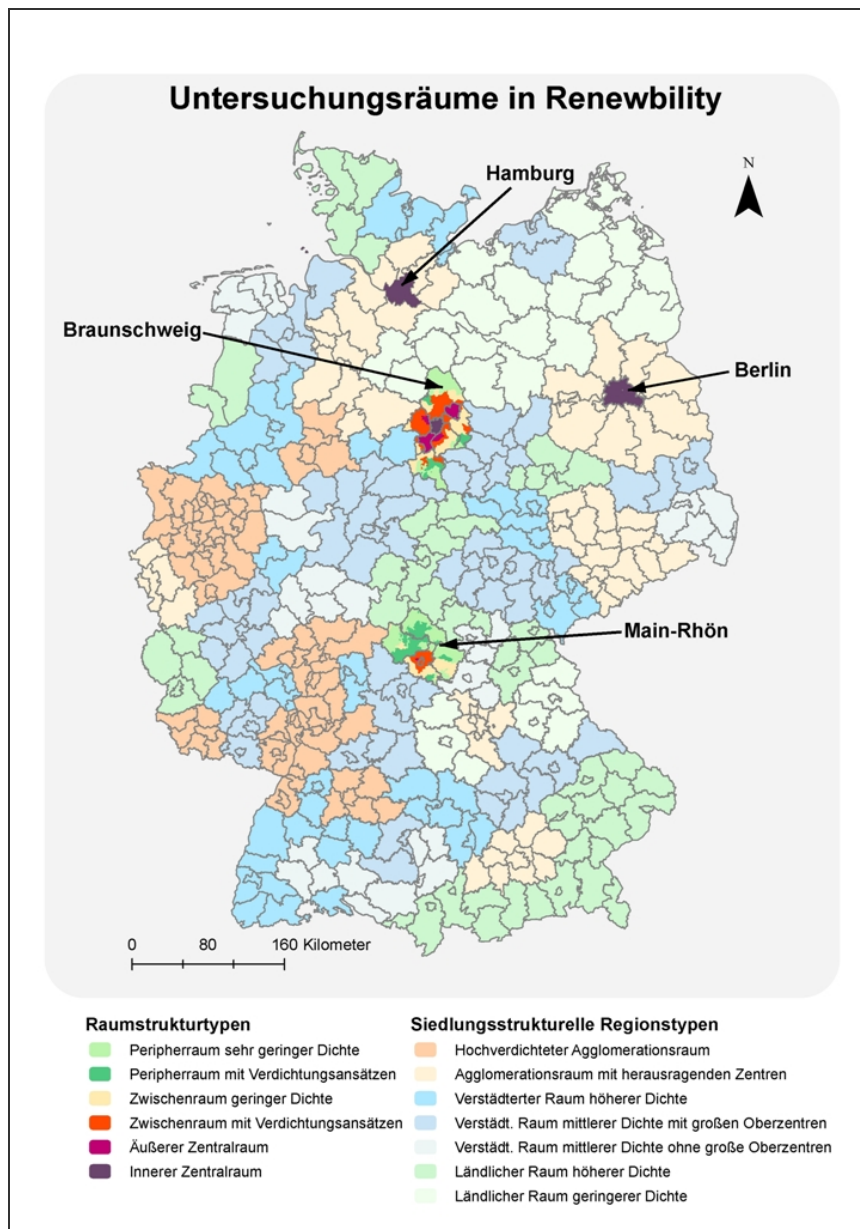


Abbildung 3: Ausgewählte Untersuchungsräume für die mikroskopische Modellierung



### 2.1.2 Auswahl der Beispielräume zur Maßnahmenevaluation

Im Rahmen des Projektes wird die Verkehrsnachfrage mit TAPAS für unterschiedliche Räume abgebildet. Das wesentliche Erkenntnisinteresse gilt der Frage, ob Personen in Abhängigkeit vom Raumtyp unterschiedlich auf verkehrsbezogene Maßnahmen reagieren und welche Schlussfolgerungen sich daraus für die Wirkmächtigkeit von Maßnahmen ergeben. Eine wichtige Aufgabe besteht folglich darin, geeignete Räume für die Verkehrsnachfragemodellierung zu finden. Die ausgewählten Räume sollen sich einerseits deutlich voneinander unterscheiden und ein gewisses Spektrum an Raumtypen abdecken. Andererseits soll darauf geachtet werden, dass die ausgewählten Räume keine allzu großen Besonderheiten aufweisen und nach Möglichkeit für eine größere Zahl an Räumen repräsentativ sind.

Nachfolgend wird zunächst das Verfahren für die Auswahl geeigneter Räume für die Modellierung der Verkehrsnachfrage beschrieben. Im Weiteren werden die Räume, die danach in die engere Wahl fallen, vorgestellt.

#### Verfahren der Raumauswahl

Ausgangsbasis für die Raumauswahl sind die 97 Raumordnungs- bzw. Analyse- regionen des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR).<sup>1</sup> Mit dieser räumlichen Basiseinheit stützt sich das Auswahlverfahren auf Räume, die zumindest annähernd den funktionalräumlichen Zusammenhang von oberzentralen Kernen und Umland“ (BBR 2005) wiedergeben und damit auch der modelltechnischen Anforderung der Raumabgrenzung gerecht werden, dass wesentliche Verkehrsbeziehungen innerhalb des zu modellierenden Raumes stattfinden und nicht über die Grenzen hinausgehen sollen.

Das BBR gliedert die Raumordnungs- bzw. Analyse- regionen in drei Regions- grundtypen: „Agglomerationsräume“, „verstädterte Räume“ und „ländliche Räume“. Zunächst wurde Berlin als beispielhafter Agglomerationsraum in die Modellierung einbezogen, da für Berlin bereits ausführliches Datenmaterial vorlag und auf Vorarbeiten in der Modellentwicklung zurückgegriffen werden konnte. Da Berlin keinen typischen Agglomerationsraum darstellt, wurde Hamburg als weiterer Raum ausgewählt. Die nähere Analyse deutscher Agglomerationsräume zeigte für Hamburg bei Indikatoren wie HH-Nettoeinkommen, Pkw-Dichte, Pendlersaldo und Beschäftigtenquote eng am Durchschnitt liegende Werte. Ferner weist Hamburg keine

---

<sup>1</sup> Die Raumordnungs- bzw. Analyse- regionen des BBR basieren auf den Planungsregionen der Länder. Da sich die Aktionsräume der Menschen zunehmend ausweiten und über administrative Grenzen hinweggehen, hat das BBR anhand von Daten zu Pendlerverflechtungen der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten untersucht, ob wesentliche funktionalräumliche Verflechtungen durch die Abgrenzung der Räume adäquat wiedergegeben, d.h. nicht durch die administrative Grenzziehung durchschnitten werden. Dies hat bei den drei Stadtstaaten dazu geführt, dass die Analyse- regionen weiter gefasst werden und über die Grenzen der Raumordnungsregionen hinweg auch das Umland einbezogen wird. In allen anderen Fällen entsprechen die Analyse- regionen, die die Grundlage für die Raumtypisierung des BBR bilden, den Raumordnungsregionen.

geografische Sondersituation auf wie z. B. Städte im Ruhrgebiet, die die umfangreiche Modellierung benachbarter Städte erforderlich machen würde.

Die Auswahl jeweils eines Raumes aus den 41 verstädterten Räumen und den 23 ländlichen Räumen erfolgte mit den folgenden zwei Arbeitsschritten:

- Visualisierung der Heterogenität der Räume der Kategorie „verstädterter Raum“ sowie der Kategorie „ländlicher Raum“ über die vom BBR neu entwickelte, differenzierte Raumdarstellung anhand der Raumstrukturtypen
- Verwendung von Indikatoren zur Raumbeschreibung

### Visualisierung anhand der Raumstrukturtypen

Bei den siedlungsstrukturellen Gebietstypen erfolgt die Zuweisung der Raumordnungs- bzw. Analyseregionen zu einem der drei Regionsgrundtypen über die Merkmale Bevölkerungsdichte und zentralörtliche Funktion der Kerne von Regionen (Vorhandensein und Größe von Oberzentren). Auf diese Weise werden Räume mit ähnlicher Siedlungsstruktur in einer Kategorie zusammengefasst. Die einer Kategorie zugeordneten Räume weisen jedoch angesichts der groben Dreieinteilung eine recht hohe Heterogenität auf. Um diese Heterogenität sichtbar zu machen und die Auswahl geeigneter Räume auch visuell zu unterstützen, wird auf die neu entwickelte Raumgliederung des BBR, die Raumstrukturtypen, zurückgegriffen.

Der Ansatz der Raumstrukturtypen hat das Ziel, Raumstrukturen unabhängig von administrativen Grenzen geographisch möglichst genau abzubilden. Im Gegensatz zum Top-Down-Ansatz der siedlungsstrukturellen Gebietstypen, bei dem ganze Regionen einem Regionstyp zugewiesen und dann räumlich weiter differenziert werden, wird bei den Raumstrukturtypen der umgekehrte Weg gewählt. Unter Verwendung derselben Abgrenzungskriterien wie bei den siedlungsstrukturellen Gebietstypen – Bevölkerungsdichte und Zentralität – wird ausgehend von einem sehr feinen Raster eine Kategorisierung sehr kleiner Raumeinheiten vorgenommen.

Die Bestimmung der Bevölkerungsdichte erfolgt über Rasterzellen von einem Kilometer Kantenlänge. Für jede Rasterzelle wird bestimmt, wie hoch die Bevölkerung bezogen auf die Ortslagenfläche<sup>2</sup> ausfällt. Die Lagegunst zu zentralen Orten wird über die Zentrenreichbarkeit gemessen (Pkw-Fahrzeit zu hochrangigen Zentren). Über eine Matrix aus Bevölkerungsdichte und Zentrenreichbarkeit werden die Räume den drei Grundtypen Zentralraum, Zwischenraum und Periphererraum zugewiesen. Jede der drei Kategorien wird anhand der Bevölkerungsdichte in zwei Unterklassen eingeteilt. Das Ergebnis ist eine feingliedrige Karte, bei der unabhängig von administrativen Grenzen die zonalen Übergänge zwischen den verschiedenen Raumkategorien sichtbar werden (Schürt et. al. 2005).

---

<sup>2</sup> Bei der Ortslagenfläche handelt es sich um die im Zusammenhang bebaute Siedlungsfläche

Die zur Auswahl stehenden Räume für die Modellierung wurden jeweils mit den Raumstrukturtypen hinterlegt. Das Ergebnis für die verstädterten Räume sowie die ländlichen Räume ist Abbildung 4 zu entnehmen. In beiden Karten wurden die Regionen der jeweils nicht betrachteten Raumkategorien farblich blasser dargestellt.

Die Karten lassen die Heterogenität der inneren Struktur der zur Auswahl stehenden Räume sehr gut erkennen. Während sich bei den verstädterten Räumen z. B. die Region Münster (Raumordnungsregion Nr. 35) im Wesentlichen aus den Kategorien innerer und äußerer Zentralraum sowie den beiden Zwischenraumkategorien zusammensetzt, gibt es ebenso verstädterte Räume, bei denen ein hoher Anteil der Fläche Merkmale des Peripherraums aufweist, wie z. B. die Regionen Oberlausitz-Niederschlesien (Nr. 59) und Ost-Friesland (Nr. 12). Dasselbe gilt für die ländlichen Räume. Nord- (Nr. 53) und Südthüringen (Nr. 55) sowie das Emsland (Nr. 17) sind bspw. Regionen, die auf Basis der Gliederung anhand von Raumstrukturtypen ausschließlich als Peripherraum eingestuft werden. Dagegen weist die Region Trier (Nr. 63) sogar Bereiche mit zentralräumlichem Charakter auf. Die Region Main-Rhön (Nr. 82) ist zu nicht unwesentlichen Teilen ein Zwischenraum.

Um aus diesen heterogenen Räumen je einen auszuwählen, der keine allzu großen Besonderheiten/Unterschiede gegenüber den anderen Räumen desselben Regionstyps aufweist und eine Art mittleres Maß darstellt, werden in einem zweiten Schritt zusätzliche Indikatoren zur Raumbeschreibung herangezogen.

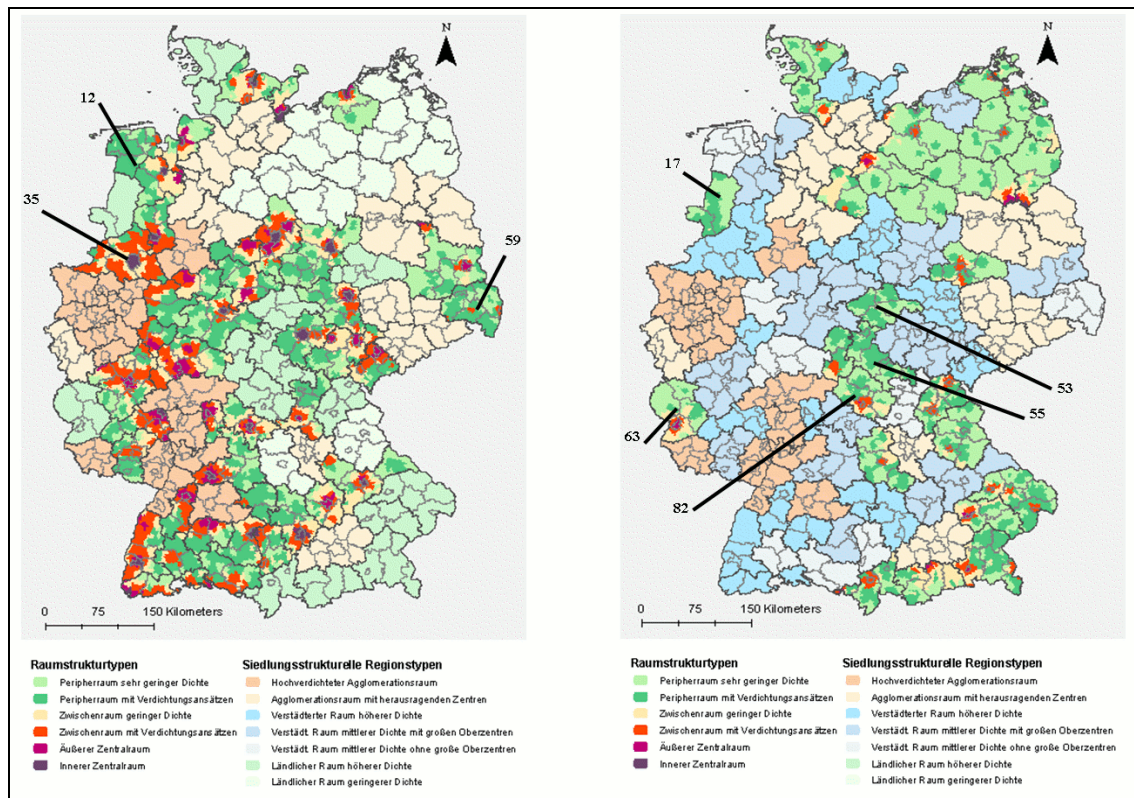


Abbildung 4: Verstädterte Räume (links) und ländliche Räume (rechts) mit Raumtypen hinterlegt.

## Verwendung von Indikatoren zur Raumbeschreibung

Das BBR veröffentlicht jährlich aktualisierte Indikatoren, anhand derer ein Vergleich von Räumen auf Basis von unterschiedlichen räumlichen Bezugsebenen möglich ist (BBR 2005). Aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Indikatoren wurden solche ausgewählt, die für das Personenverkehrsmodell TAPAS relevante Größen beschreiben.

Wichtige Größen für das Modell sind grundsätzlich alle Indikatoren, die einen der folgenden Bereiche betreffen:

- Bevölkerungszusammensetzung
- Orte für die Ausübung von Aktivitäten: Entsprechend sind Indikatoren von Bedeutung, die etwas über das Vorhandensein bestimmter Tätigkeitsgruppen im betrachteten Raum sowie die Verteilung bzw. Dichte von Aktivitätsstandorten aussagen
- Sowie alle Indikatoren die unmittelbar verkehrsrelevante Informationen liefern (z. B. Pkw-Dichte) oder hohe Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten haben (z. B. das Haushaltseinkommen).

Auf Basis dieser Überlegungen wurden folgende Indikatoren für die Untersuchung ausgewählt:

- Einwohner je km<sup>2</sup> – die Einwohnerdichte ist ein Maß, das u. a. Aufschluss über die Infrastrukturausstattung und –Auslastung eines Raumes gibt;
- Beschäftigungsquote – diese erfasst die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort;
- Regionales Bevölkerungspotenzial der Gemeinden im Umkreis von 100 km – dieses ist ein Maß für die zur Verfügung stehenden räumlichen Interaktionsmöglichkeiten;
- Personen je Haushalt
- Schüler je 100 Einwohner
- Studenten je 1.000 Einwohner
- Verfügbares Haushaltseinkommen
- Durchschnittliche Pkw-Fahrzeit zum nächsten Oberzentrum in Minuten
- Pkw-Dichte
- Heutige Altersstruktur (2003)
- Altersstruktur 2020 und Bevölkerungsindex 2020 im Vergleich zu 2002 – für die Raumauswahl ist auch die zukünftige Bevölkerungszusammensetzung sowie die zu erwartende Bevölkerungsdynamik von Bedeutung; mangels Daten für das vom Modell abzubildende Jahr 2030 werden die vom BBR für das 2020 zur Verfügung gestellten Daten genutzt.

Zur Bestimmung eines Raumes, der ansatzweise als repräsentativ für die jeweilige Raumkategorie bezeichnet werden kann, wurde für jeden Indikator einmal auf Basis aller verstädterten Räume und einmal auf Basis aller ländlichen Räume ein mittlerer Wertebereich berechnet. D. h. es wurden pro Indikator die Werte ermittelt, zwischen denen der Wert einer Region liegen muss, um im Vergleich mit allen anderen Regionen weder nach oben noch nach unten zu stark abzuweichen. Der mittlere Wertebereich wurde dabei einmal als das mittlere Drittel und einmal als die mittleren 50 % der Werte aller Regionen definiert. Die Abbildung 5 und die Abbildung 6 stellen für die Indikatoren Einwohnerdichte und Pkw-Dichte die Ergebnisse der Berechnungen für die Gruppe der verstädterten Räume dar.

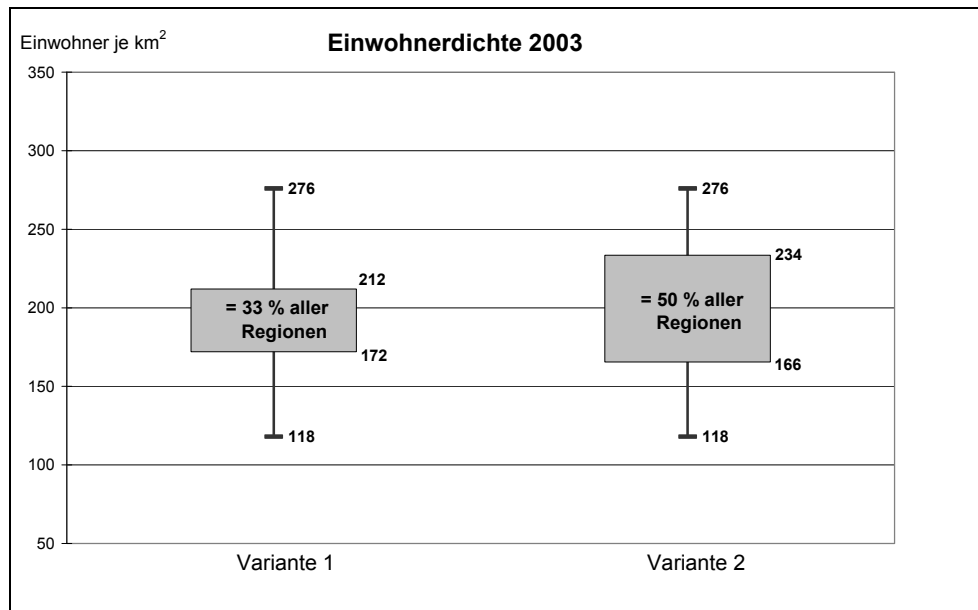


Abbildung 5: Mittlerer Wertebereich für den Indikator Einwohnerdichte – Basis verstärkte Räume

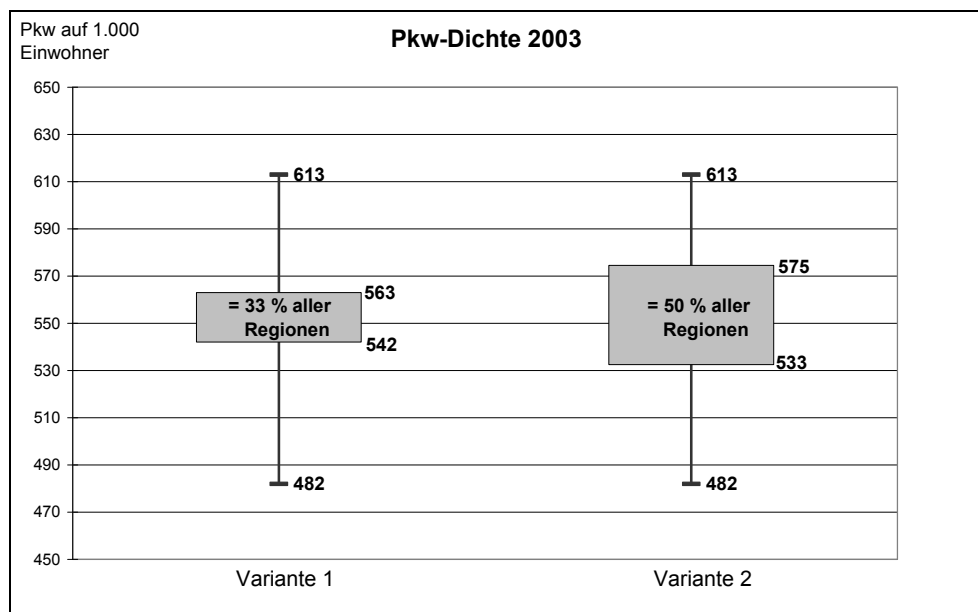


Abbildung 6: Mittlerer Wertebereich für den Indikator Pkw-Dichte – Basis verstärkte Räume

Ziel ist es nun, jene Regionen herauszufiltern, die bei möglichst vielen Indikatoren im mittleren Wertebereich liegen. Da sowohl der Indikator heutige als auch der Indikator zukünftige Altersstruktur jeweils anhand mehrerer Variablen abgebildet wird (insgesamt



12), für alle anderen Indikatoren dagegen jeweils nur eine einzige Variable zur Verfügung steht, wurden die Indikatoren in zwei Gruppen eingeteilt. Auf diese Weise soll vermieden werden, dass die Altersvariablen einen übermäßig hohen Einfluss darauf haben, ob eine Region in die nähere Wahl kommt oder nicht. Für beide Indikatorengruppen wurde nun getrennt ermittelt, welche Regionen möglichst oft im mittleren Wertebereich der Indikatoren liegen. Die Ergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle 1 und Tabelle 2 zu entnehmen. Da sich die Anforderung, dass die Werte der Regionen bei möglichst vielen Indikatoren im mittleren Drittel des Wertebereichs liegen müssen, als relativ hoch erwies, ist die 50 %-Variante die Basis für die Auswahl der Regionen. Um ablesen zu können, wie die so ausgewählten Regionen bei der Variante mit den höheren Anforderungen abschneiden, sind die Ergebnisse auch für die 33 %-Variante in den Tabellen aufgeführt.

Die Tabellen sind wie folgt aufgebaut: Auf der rechten Seite erfolgen die Auswahl und das Ranking der Regionen über die Altersindikatoren.<sup>3</sup> D. h. Regionen, die bei besonders vielen dieser Indikatoren im mittleren Wertebereich liegen, stehen oben in der Tabelle. Auf der linken Seite der Tabelle erfolgen die Auswahl und das Ranking der Regionen über die sonstigen Indikatoren.<sup>4</sup> Da für die Modellierung geeignete Regionen in beiden Indikatorengruppen gut abschneiden müssen, sind für die Regionen jeweils auch die Ergebnisse für die Indikatorengruppe aufgelistet, die nicht Basis für das Ranking waren. Die Regionen der engeren Wahl sind in der Tabelle nach folgendem Schema farblich gekennzeichnet:

orange =	Region schneidet bei beiden Indikatorengruppen gut ab; gut bedeutet, dass mindestens drei Viertel der Werte im mittleren Bereich liegen; die Anforderung wird nicht nur bei der 50 %-, sondern auch bei der 33 %-Variante erfüllt
dunkles gelb =	Region schneidet auf Basis der 50 %-Variante bei beiden Indikatorengruppen gut ab
helles gelb =	Region schneidet auf Basis der 50 %-Variante nur bei einer der beiden Indikatorengruppen gut ab; bei der anderen Indikatorengruppe liegen mindestens noch zwei Drittel der Werte im mittleren Bereich

3 Einwohner in 2003 nach Anteilen der Altersgruppen: unter 6 Jahre, 6 bis unter 18 Jahre, 18 bis unter 25 Jahre, 25 bis unter 30 Jahre, 30 bis unter 50 Jahre, 50 bis unter 65 Jahre, 65 Jahre und älter, Hochbetagte (75 Jahre und älter); Einwohner in 2020 nach Anteilen der Altersgruppen: unter 20 Jahre, 20 bis 60 Jahre, 60 Jahre und älter; Bevölkerungsindex 2020 gegenüber 2002

4 Einwohnerdichte, Beschäftigungsquote, Regionales Bevölkerungspotenzial, Personen je Haushalt, Studenten je 1.000 Einwohner, Schüler je 100 Einwohner, Haushaltseinkommen, Durchschnittliche Pkw-Fahrzeit zum nächsten Oberzentrum, Pkw-Dichte

Tabelle 1: Verstädterte Regionen - Auswahl anhand von Indikatorwerten, Basis mittlere 50%

Region	Ranking anhand der sonstigen Indikatoren				Region	Ranking anhand der Altersindikatoren			
	erfüllte Indikat. (50 %-Var.)		erfüllte Indikat. (33 %-Var.)			erfüllte Indikat. (50 %-Var.)		erfüllte Indikat. (33 %-Var.)	
	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren		Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren
Augsburg	8	10	7	9	Nordschwarzwald	12	5	11	3
Oldenburg	8	5	7	3	Siegen	12	3	12	2
Braunschweig	7	10	3	6	Mittelhessen	11	6	10	5
Würzburg	7	9	4	6	Donau-Iller (Bayern)	11	6	7	3
Bodensee	7	6	5	5	Schleswig Holstein	11	5	6	2
Hildesheim	7	6	5	2	Oberfranken West	11	4	11	3
Osnabrück	7	5	3	2	Bayerischer Untermain	11	4	9	3
Mittelhessen	6	11	5	10	Augsburg	10	8	9	7
Donau-Iller	6	11	3	7	Braunschweig	10	7	6	3
Westpfalz	6	10	5	5	Westpfalz	10	6	5	5



Mittelrhein-	6	9	5	7	Arnsberg	10	4	8	4
Nordhessen	6	8	4	1	Rheinhessen-Nahe	10	4	8	4
Mittelthüringen	6	5	3	3	Würzburg	9	7	6	4
Paderborn	6	3	4	3	Mittelrhein-Westerwald	9	6	7	5
Donau-Iller (BW)	6	2	5	1	Hochrhein-Bodensee	9	5	9	5
Nordschwarzwald	5	12	3	11	Schwarzw.-Baar-	9	5	9	3
Schlesw.-H Mitte	5	11	2	6	Ostwürttemberg	9	4	7	2

Tabelle 2: Ländliche Regionen - Auswahl anhand von Indikatorwerten, Basis mittlere 50%

Region	Ranking anhand der sonstigen Indikatoren				Region	Ranking anhand der Altersindikatoren			
	erfüllte Indikat. (50 %-Var.)		erfüllte Indikat. (33 %-Var.)			erfüllte Indikat. (50 %-Var.)		erfüllte Indikat. (33 %-Var.)	
	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren		Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren	Alters-indikatoren	sonstige Indikatoren
Trier	8	9	5	6	Schleswig-Holstein	10	7	9	6
Schleswig-Holstein	7	10	6	9	Main-Rhön	10	7	9	4
Main-Rhön	7	10	4	9	Oberpfalz-Nord	10	6	8	3
Südthüringen	7	5	6	3	Allgäu	10	6	6	4
Südostoberbayern	6	10	5	5	Südostoberbayern	10	6	5	5
Allgäu	6	10	4	6	Osthessen	10	5	9	3
Oberpfalz-Nord	6	10	3	8	Trier	9	8	6	5
Donau-Wald	6	8	6	6	Westmittelfranken	9	5	6	5
Schleswig-Holstein	6	8	5	5	Südheide	9	4	5	2
Lüneburg	6	8	3	7	Oberfranken-Ost	9	3	7	3
Landshut	6	5	3	1	Lüneburg	8	6	7	3

Dessau	6	2	2	1	Donau-Wald	8	6	6	6
Osthessen	5	10	3	9	Schleswig-Holstein	8	6	5	5
Westmittelfranken	5	9	5	6	Oberland	8	5	8	3
Oberland	5	8	3	8	Westmecklenburg	8	4	3	2

Die Ergebnisse in Tabelle 1 machen deutlich, dass eine Reihe von Regionen jeweils nur bei einer der Indikatorengruppen häufig Werte im mittleren Wertebereich aufweist. So erfüllt bei den verstädterten Räumen bspw. Siegen die Voraussetzung bei allen 12 Altersvariablen und tut dies im Übrigen auch bei der 33-Variante. In der Gruppe der sonstigen Indikatoren genügt Siegen dagegen nur bei drei von insgesamt neun Indikatoren den Anforderungen. Das umgekehrte Verhältnis liegt z. B. bei Oldenburg vor. Während die Region in Bezug auf die Einwohnerdichte, Beschäftigtenquote, Haushaltseinkommen und Pkw-Dichte etc. mit einer Ausnahme (der Schülerzahl) immer im mittleren Wertebereich liegt, weist sie in Bezug auf die Alterszusammensetzung deutliche Abweichungen vom Durchschnitt auf.

Im nachfolgenden Kapitel werden alle Räume, die in Tabelle 1 und Tabelle 2 farblich gekennzeichnet sind und in der engeren Wahl stehen, beschrieben.

## Beschreibung der Räume in der engeren Wahl

### Verstädterte Räume

Von den 41 verstädterten Räumen schneiden vor allem Augsburg und Braunschweig sowie Würzburg sehr gut ab. Des Weiteren kamen folgende Räume für die Modellierung in Frage: Mittelhessen, Donau-Iller (Bayern), Westpfalz und Mittelrhein-Westerwald. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Werte, die diese Regionen bei den einzelnen Indikatoren erzielen, dargestellt. Um den jeweiligen Wert beurteilen zu können, enthalten die Tabellen darüber hinaus für jeden Indikator den auf alle verstädterten Räume bezogenen höchsten und niedrigsten Wert sowie die beiden Perzentilwerte (25 % und 75 %), die den mittleren Wertebereich der 50 %-Variante markieren. Grau hinterlegte Werte bedeuten, dass die Anforderung, im mittleren Wertebereich zu liegen, erfüllt ist. Die Tabelle 5 und Tabelle 6 enthalten dieselben Angaben für die ländlichen Räume der engeren Wahl.

In Bezug auf die erste Indikatorengruppe (siehe Tabelle 3) weisen die ausgewählten städtischen Regionen folgende Merkmale auf:

- Die **Region Augsburg** erfüllt mit einer Ausnahme bei allen Indikatoren die Anforderung, im mittleren Wertebereich zu liegen und schneidet damit von allen Regionen am besten ab. Lediglich die Erreichbarkeit der Oberzentren fällt in Augsburg deutlich schlechter aus. Betrachtet man die Indikatoren, die von der Region erfüllt werden, so zeigt sich, dass Augsburg ein tendenziell hohes Haushaltseinkommen aufweist.
- Die **Region Braunschweig** hat eine überdurchschnittlich hohe Beschäftigtenquote. Damit einher geht eine leicht unterhalb des mittleren Wertebereichs liegende Personenzahl je Haushalt. Betrachtet man auch hier zusätzlich die Indikatoren, die von der Region erfüllt werden, so wird deutlich, dass Braunschweig eine – wenn auch im Wertebereich liegende – hohe

Einwohnerdichte hat und entsprechend der vergleichsweise niedrigen Personenzahl je Haushalt einen recht niedrigen Schüleranteil aufweist.

- In der **Region Würzburg** fällt das regionale Bevölkerungspotenzial vergleichsweise niedrig aus. Angesichts der Studentenstadt Würzburg weist die ganze Region einen weit über dem mittleren Wertebereich liegenden Anteil an Studenten auf. Die Indikatoren, die von der Region erfüllt werden, lassen eine vergleichsweise geringe Einwohnerdichte, eine hohe Beschäftigtenquote und eine gute Erreichbarkeit von Oberzentren erkennen.
- Von der Region **Mittelhessen** werden drei der insgesamt neun Indikatoren nicht erfüllt. In Mittelhessen liegt die Beschäftigtenquote leicht unter dem mittleren Wertebereich. Auch hier fällt der Anteil der Studenten besonders hoch aus. Darüber hinaus sind Oberzentren deutlich besser zu erreichen als in fast allen anderen städtischen Regionen.
- In der Region **Donau-Iller** sind die Haushalte überdurchschnittlich groß, der Anteil der Studenten an der Gesamtbevölkerung ist sehr gering, die Pkw-Dichte erreicht einen Wert oberhalb des mittleren Wertebereichs.
- Die **Westpfalz** ist durch eine niedrige Beschäftigtenquote und ein niedriges durchschnittliches Haushaltseinkommen sowie eine hohe Pkw-Dichte gekennzeichnet.
- Die Region **Mittelrhein-Westerwald** weist ein hohes regionales Bevölkerungspotenzial auf, eine niedrige Beschäftigtenquote und eine überdurchschnittlich hohe Pkw-Dichte.

Tabelle 3: Verstädterte Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 1

	Einwohner je km <sup>2</sup>	Reg. Bevölkerungspotenzial im Umkreis von 100 km	Beschäftigtenquote (in %)	Personen je Haushalt (n)	Studenten je 1.000 Einwohner (n)	Schüler je 100 Einwohner (n)	Verfügbares Haushaltseinkommen (EUR)	Erreichbarkeit Oberzentren (Pkw- Fahrzeit in Min.)	Pkw-Dichte (Pkw auf 1.000 Einwohner)
<b>Gesamt</b>									
Maximum	276	491	54,8	2,4	47,4	14,9	1554	48	613
Minimum	118	115	39,3	1,98	0	8,8	1158	22	482
<b>Mittlerer Wertebereich</b>									
Max. (75 %-Perz.)	233,5	310,5	49,9	2,33	30,8	13,1	1419,5	34,5	574,5
Min. (25 %-Perz.)	165,5	224,5	44,7	2,09	8,6	11,9	1.274,5	26	532,5
<b>Augsburg</b>	210	269	48,6	2,22	19,7	12,3	1419	40	553
<b>Braunschweig</b>	230	270	51,5	2,07	21,3	11,9	1336	26	571
<b>Würzburg</b>	168	220	49,4	2,19	42,2	12,2	1335	26	559
<b>Mittelhessen</b>	198	289	43,7	2,23	41,3	12,4	1312	23	565
<b>Donau-Iller</b>	180	240	49,6	2,37	3,2	13,0	1380	26	584
<b>Westpfalz</b>	178	300	40,9	2,15	23,4	12,1	1274	30	582
<b>Mittelrhein-Westerwald</b>	199	328	43,0	2,25	9,0	12,2	1343	32	583

\* Summe der mit der Fläche gewichteten Gemeindebevölkerung im Umkreis von 100 km Luftlinie

Betrachtet man die zweite Indikatorengruppe (siehe Tabelle 4), so gibt es zwei Regionen, in denen die gegenwärtige Altersstruktur der Bevölkerung vergleichsweise gut den Durchschnitt verstädterter Regionen repräsentiert: Augsburg und Mittelhessen. Bei allen anderen Regionen liegen die Werte von einer, i.d.R. eher von zwei oder drei der acht Variablen, die die Altersstruktur beschreiben, außerhalb des mittleren

Wertebereichs. Dabei sind zwei unterschiedliche Altersstrukturen in den Regionen erkennbar. Zum einen gibt es Regionen mit einem niedrigen Anteil junger Menschen (zwischen 18 und 25/30 Jahren) und einem hohen Anteil Hochbetagter (ab 75 Jahren). Hierzu gehören Braunschweig und Mittelrhein-Westerwald sowie – mit etwas schwächerer Ausprägung – die Westpfalz. Zum anderen gibt es Regionen, bei denen der Anteil junger Personen über dem mittleren Wertebereich liegt. Dies ist in Würzburg der Fall und angesichts des hohen Studentenanteils auch wenig überraschend. In Donau-Iller liegt der Anteil der unter 6-jährigen leicht oberhalb des mittleren Wertebereichs.

In Bezug auf die zukünftige Bevölkerungsentwicklung weisen lediglich drei Regionen leichte Besonderheiten auf. In Augsburg ist bis 2020 eine Bevölkerungszunahme zu erwarten, die leicht oberhalb des mittleren Wertebereichs liegt. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass der Anteil der Personen zwischen 20 und 60 Jahren in den Regionen Augsburg, Würzburg und Mittelhessen etwas höher als der mittlere Wertebereich ausfällt.

Tabelle 4: Verstädterte Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 2

	Einwohner in 2003 (nach Altersgruppen, Anteile in %)								Einwohner in 2020 (Anteile in % bzw. Indexwert)			
	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	18 bis unter 25 J.	25 bis unter 30 J.	30 bis unter 50 J.	50 bis unter 65 J.	65 und älter	Hochbetagte (75+)	unter 20 Jahren	20 bis unter 60	60 und älter	Bev.index 2020 vs. 2002
<b>Gesamt</b>												
Maximum	6,6	15,2	10,3	6,2	32,4	21,5	21,9	9,7	20,2	55,6	37,9	112
Minimum	4,1	10,4	7,2	4,8	28,6	16,1	15,7	6,2	14,5	47,1	25,2	83,6
<b>Mittlerer Wertebereich</b>												
Max. (75 %-Perz.)	6,2	14,5	8,7	5,9	31,5	18,9	19,5	8,3	19,1	54,3	31,7	104,3
Min. (25 %-Perz.)	5,3	12,8	7,9	5,3	30,2	17,2	16,8	7,3	16,8	51,8	27,2	94,6
<b>Augsburg</b>	6,0	14,0	8,0	5,8	31,3	17,9	17,0	7,5	18,1	54,5	27,4	104,7
<b>Braunschweig</b>	5,4	12,8	7,6	5,4	30,5	18,8	19,5	8,7	17,3	53,0	29,8	96,4

<b>Würzburg</b>	5,3	13,2	9,3	6,2	31,3	17,2	17,4	7,8	17,0	55,1	27,9	101,8
<b>Mittelhessen</b>	5,6	13,4	8,5	5,9	31,3	17,5	17,7	7,9	17,5	54,4	28,1	99,6
<b>Donau-Iller</b>	6,3	14,5	8,2	5,6	30,7	17,8	16,9	7,5	19,1	53,1	27,8	103,2
<b>Westpfalz</b>	5,3	13,5	7,9	5,2	30,6	18,2	19,4	8,4	17,4	52,6	30,0	96,7
<b>Mittelrhein- Westerwald</b>	5,7	13,9	7,8	5,1	30,3	18,1	19,0	8,6	18,0	52,6	29,3	102,7

In Abbildung 7 links sind alle verstädterten Räume der engeren Wahl nochmals mit der Hinterlegung der Raumstrukturtypen dargestellt. Diese Darstellung verdeutlicht, dass es mit Ausnahme der Regionen Donau-Iller und der Westpfalz in allen Regionen einen zentralen Kern gibt, der entweder dem inneren oder dem äußeren Zentralraum zuzuordnen ist. Nach außen folgen zonale Übergangsbereiche. In den Regionen Mittelhessen und Augsburg liegt dieser Kern am Rand der Region. Damit liegt eine für das Verkehrsmodell schwierig abzubildende Lage des Siedlungskerns vor, wenn man davon ausgeht, dass es zwischen dem Siedlungskern und der Nachbarregion wesentliche Verkehrsbeziehungen gibt. In der Region Augsburg, die in Bezug auf die Indikatoren am besten abschneidet, kommt die Nähe zu München hinzu. Vor diesem Hintergrund erscheinen insbesondere Braunschweig und Würzburg gut für die Modellierung der Verkehrsnachfrage geeignet zu sein. Die **Region Braunschweig** schneidet dabei in Bezug auf die Indikatorwerte etwas besser als Würzburg ab. Für Braunschweig spricht zudem, dass die Region eine polyzentrische Struktur mit zwei dichteren Siedlungskernen aufweist und damit einen guten Gegenpol zu dem bereits feststehenden, monozentrischen Agglomerationsräumen Berlin und Hamburg bildet.

### Ländliche Räume

Auf Basis der Indikatorwerte kommen von den 23 ländlichen Räumen v. a. die Regionen Trier, Schleswig-Holstein Nord und Main-Rhön als Modellregion in Frage. Etwas schlechter als die genannten - aber immer noch gut - schneiden die Regionen Südostoberbayern, Allgäu und Oberpfalz-Nord ab.

In Bezug auf die erste Indikatorengruppe (siehe Tabelle 5) weisen die ausgewählten ländlichen Regionen folgende Merkmale auf:

- Die Werte der Region **Trier** liegen mit einer Ausnahme alle im mittleren Wertebereich. Lediglich der Anteil der Studenten liegt in der Region aufgrund der Universitätsstadt Trier weit über dem Durchschnitt.



- Die Region **Schleswig-Holstein Nord** weist ein sehr geringes regionales Bevölkerungspotenzial auf. Der Anteil der Schüler liegt leicht über dem mittleren Wertebereich.
- Die Region **Main-Rhön** hat eine überdurchschnittlich hohe Beschäftigtenquote und eine hohe durchschnittliche Personenzahl pro Haushalt.
- Alle nachfolgenden Regionen liegen bei jeweils drei der neun Indikatoren außerhalb des mittleren Wertebereichs. Die Region **Oberpfalz-Nord** hat eine bessere Erreichbarkeit der nächsten Oberzentren als die meisten anderen ländlichen Regionen. Die Pkw-Dichte liegt etwas über dem mittleren Wertebereich, der Anteil der Studenten dagegen deutlich darunter.
- Die Regionen **Allgäu** und **Südostoberbayern** haben beide eine überdurchschnittlich hohe Einwohnerdichte. Südostoberbayern erreicht hier den maximalen Wert aller ländlichen Regionen. In beiden Regionen liegt das Haushaltseinkommen über dem mittleren Wertebereich. Südostoberbayern weist darüber hinaus ein höheres regionales Bevölkerungspotenzial auf.

Tabelle 5: Ländliche Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 1

	Einwohner je km <sup>2</sup>	Reg. Bevölkerungspotenzial im Umkreis von 100 km *	Beschäftigtenquote (in %)	Personen je Haushalt (n)	Studenten je 1.000 Einwohner (n)	Schüler je 100 Einwohner (n)	Verfügbares Haus-haltseinkommen (EUR)	Erreichbarkeit Ober-zentren (Pkw- Fahrzeit in Min.)	Pkw-Dichte (Pkw auf 1.000 Einwohner)
<b>Gesamt</b>									
<b>Maximum</b>	152	261	51,1	2,62	32,9	14,4	1509	68	600
<b>Minimum</b>	50	69	37,7	2,08	0	9,2	1125	20	519
<b>Mittlerer Wertebereich</b>									
<b>Max. (75 %-Perz.)</b>	121	184	46,1	2,34	13,3	12,8	1343	49	579
<b>Min. (25 %-Perz.)</b>	95	138	41,3	2,17	2,7	10,9	1161	29	538
<b>Trier</b>	104	175	42,8	2,17	30,8	12,7	1212	39	573

<b>Schleswig-Holstein Nord</b>	108	103	42,3	2,18	13,3	13,0	1246	41	550
<b>Main-Rhön</b>	114	171	50,1	2,36	3,7	12,8	1274	30	578
<b>Südostoberbayern</b>	152	191	45,4	2,30	4,6	12,3	1381	42	566
<b>Allgäu</b>	139	182	48,1	2,20	5,4	12,5	1374	29	565
<b>Oberpfalz-Nord</b>	97	144	46,1	2,33	2,6	12,4	1272	26	584

In Bezug auf die momentane Bevölkerungsstruktur (siehe Tabelle 6) gibt es wie bei den verstädterten auch bei den ländlichen Regionen Räume mit einem über dem mittleren Wertebereich liegenden Anteil Hochbetagter und einem zumindest teilweise niedrigeren Anteil an jungen Personen. Hierzu gehören die Regionen Trier und Allgäu. Demgegenüber weisen die beiden Regionen Main-Rhön und Oberpfalz-Nord über dem mittleren Wertebereich liegenden Anteile an Personen im Alter von 6 bis 18 Jahren auf. Eine überdurchschnittlich hohe Bevölkerungszunahme bis 2020 ist lediglich für die Region Südostoberbayern zu erwarten.

Tabelle 6: Ländliche Regionen in der engeren Auswahl – Ergebnisse Indikatorengruppe 2

Einwohner in 2003 (nach Altersgruppen, Anteile in %)									Einwohner in 2020 (Anteile in % bzw. Indexwert)			
	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.	unter 6 J.	6 bis unter 18 J.
<b>Gesamt</b>												
Maximum	6,8	16,2	10,1	5,7	32	21,2	20,4	9,2	20	55,1	38,1	111,7
Minimum	3,9	10,8	6,9	4,7	29,6	16,4	15,9	6,2	14,1	47,8	26,6	79,9
<b>Zu erzielender Wertebereich</b>												
Max. (75%-	6,0	14,3	9,4	5,5	31,2	19	19	8,4	18,2	53,5	34,6	103,9
Min. (25%-	4,5	12,2	7,8	5,2	30,2	17,5	17,8	7,4	16,2	49,7	28,4	90,1
<b>Trier</b>	5,5	13,6	8,3	5,5	30,7	17,2	19,0	8,7	17,6	53,9	28,4	102,0

<b>Schleswig-Holstein Nord</b>	5,9	14,1	7,8	5,4	29,6	18,8	18,4	8,1	18,6	51,6	29,8	100,7
<b>Main-Rhön</b>	5,6	14,6	8,1	5,1	30,5	17,5	18,6	8,3	17,5	51,8	30,6	95,6
<b>Südostoberbayern</b>	5,9	13,8	7,8	5,5	30,6	18,6	17,9	8,4	17,8	53,8	28,4	107,8
<b>Allgäu</b>	6,0	14,1	7,8	5,3	30,0	18,5	18,4	8,7	18,2	53,0	28,8	103,9
<b>Oberpfalz-Nord</b>	5,7	14,4	8,1	5,4	30,9	17,3	18,1	7,8	17,9	53,5	28,6	99,9

In Abbildung 7 rechts sind alle ländlichen Räume, die sich potenziell als zu modellierende Region eignen, mit Raumstrukturtypen hinterlegt. Dabei wird deutlich, dass bis auf die Region Main-Rhön alle Regionen direkt an ein Nachbarland Deutschlands angrenzen. Um die Verkehrsnachfrage dieser Räume sinnvoll simulieren zu können, müssten Daten über die jeweils angrenzende Region des Nachbarlandes herangezogen werden, da nur so die zwischen den Regionen vorhandenen Verkehrsströme weitgehend abgebildet werden können. Dieser schwierig einzuschätzende, zusätzliche Aufwand soll nach Möglichkeit vermieden werden. Da die **Region Main-Rhön** zusätzlich zu der Tatsache, dass sie nicht an ein Nachbarland grenzt, auch bei den Indikatorwerten sehr gut abschneidet, wurde diese Region als Beispielraum für ländliche Räume ausgewählt.

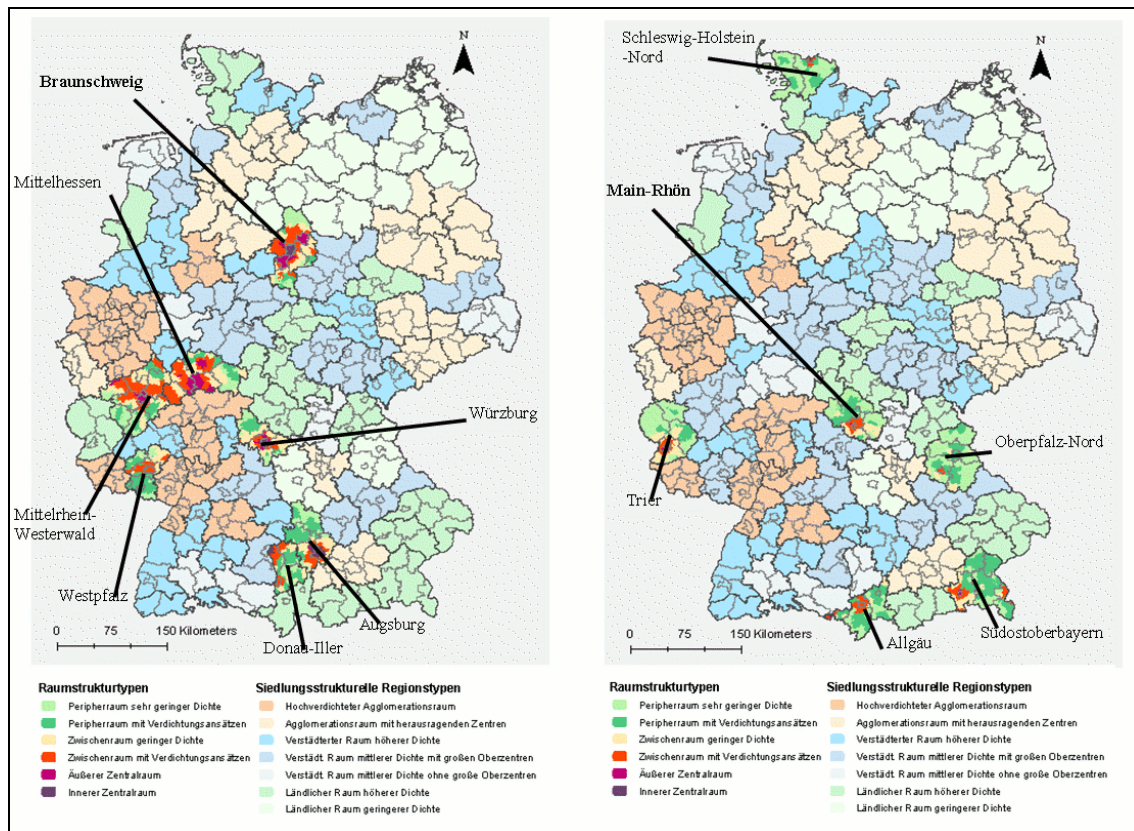


Abbildung 7: Verstädterte Räume (links) und ländliche Räume (rechts) in der engeren Wahl

## Anwendung von TAPAS für die Beispielregionen

Für die ausgewählten Beispielregionen Hamburg und Berlin (Agglomerationsraum), Braunschweig (verstädterter Raum) sowie Main-Rhön (ländlicher Raum) wurden die für die mikroskopische Modellierung der Personenverkehrsnachfrage notwendigen Inputdaten beschafft und aufbereitet. Die hierzu verwendeten Datenquellen sowie die Funktionsweise des Mikrosimulationsmodells TAPAS werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

### 2.1.3 Simulation der Personenverkehrsnachfrage in den Beispielräumen mit dem Mikromodell „TAPAS“

TAPAS ist ein aktorszentriertes, aktivitätenbasiertes Simulationsmodell, das Verkehrsverhalten als Ergebnis von Aktivitätsmustern interpretiert und abbildet. TAPAS ist modular aufgebaut, bildet den Verkehr in einem abgegrenzten Raum – z. B. einer Stadt oder einem Landkreis – ab und ermöglicht eine besonders detaillierte Abbildung individueller Verhaltensweisen bzw. Reaktionen auf Maßnahmen.

Für die ausgewählten Beispielräume wird im Rahmen dieser mikroskopischen Ermittlung des Verkehrsaufkommens eine synthetische Bevölkerung aufgebaut. Das Simulationsmodell bildet für jede einzelne Person dieser Bevölkerung die täglichen Aktivitäten sowie die damit verbundenen Wege räumlich und zeitlich ab. Dabei werden die individuellen Einflüsse auf das Verkehrsverhalten, die sich aufgrund der Raumstruktur und dem Aufwand ihrer Überwindung, zeitlichen und finanziellen Beschränkungen sowie dem Haushaltskontext ergeben, berücksichtigt.

Für die einzelnen Stufen der Simulation findet eine Vielzahl an Datengrundlagen Verwendung:

- Statistische Bevölkerungsdaten einschließlich personen- und haushaltsbezogenen Informationen, die zum Aufbau der synthetischen Bevölkerung genutzt werden,
- Raum- und Strukturdaten zur Abbildung der Gelegenheiten, d. h. der potenziellen Ziele und ihrer Attraktivität, an denen die Aktivitäten Arbeit, Einkauf, Freizeit etc. ausgeübt werden können,
- Daten zur Zeitverwendung, die mittels Sequenzanalysen und Clusterung aufbereitet werden und als Basis der Aktivitätenpläne dienen,
- Daten zur Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln, den mit ihrer Nutzung einhergehenden zeitlichen und finanziellen Aufwendungen sowie den personengruppen- und aktivitätenspezifischen Verkehrsmittelpräferenzen.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen detaillierten Überblick über die verwendeten Daten einschließlich der Quellen.

Tabelle 7: Daten im Modell TAPAS

<b>Synthetische Bevölkerung und Raumstruktur</b>	
<b>Datentyp</b>	<b>Quelle</b>
Einwohner nach Altersklassen und Geschlecht	Meldeämter, 2005; InfasGeodaten, 2006; Statistik Regional 2006; BBR-Raumordnungsprognose 2020; Bevölkerungsprognose des Rostocker Zentrums für Demographie 2007 / 2008 (Kühntopf & Tivig)
Haushaltsstruktur	Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (Sonderauswertungen Mikrozensus), 2005; Statistisches Bundesamt (Mikrozensus, Deutschland), 2005; Regionale Sonderauswertungen des Mikrozensus 2005; Bevölkerungsprognose des Rostocker Zentrums für Demographie 2007 / 2008 (Kühntopf & Tivig)
Pkw-Bestand	Kraftfahrtbundesamt, 2006; Statistik Regional, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2004; Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2006; Statistik-Amt Nord 2006
Schüler/Schulplätze	Statistik Regional, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2004; Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2006; Niedersächsisches Landesamt für Statistik 2005; Bayrisches

	Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2005
Studierende/ Studienplätze	Statistisches Bundesamt, Hochschulstatistik, 2004/2005; Schulstatistik Hamburg 2006
Haushaltseinkommen	Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (Sonderauswertungen Mikrozensus), 2005; Statistisches Bundesamt (Mikrozensus, Deutschland), 2005; Regionale Auswertungen des Mikrozensus 2005
Mobilitätsbudget	Statistisches Bundesamt, Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, 2003
Erwerbstätigkeit	Infas Geodaten, 2005; Regionale Auswertungen des Mikrozensus, 2005; Statistisches Bundesamt Anfragen zu den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in den großen Städten der Regionen; Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein; BBR-Raumordnungsprognose 2020 ; Bevölkerungsprognose des Rostocker Zentrums für Demographie 2007 / 2008 (Kühntopf & Tivig)
Arbeitsplätze	Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2005; Bundesagentur für Arbeit, 2005; Erwerbstätigenrechnung des Bundes und der Länder, 2005
Verkaufsraumflächen	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2005; Zentrenatlas, Handelsverband Berlin-Brandenburg, 2004; DDS Digital Data Services, 2007 / 2008
Freizeiteinrichtungen	vielfältige, u.a. Senatsverwaltung Berlin; Niedersächsisches Landesamt für Statistik; Bayrisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2005; KlickTel
<b>Verkehrsverhalten</b>	
Anzahl Pkw im Haushalt	Mobilität in Deutschland, 2002; Mobidrive 1999
Führerscheinbesitz	
Verkehrsmittelwahl	
Aktivitätenpläne	Statistisches Bundesamt; Zeitbudgeterhebung 2001/ 2002

Grundlage der Berechnungen für TAPAS bildet eine so genannte synthetische Bevölkerung. Dabei handelt es sich um ein statistisches Abbild einer realen Bevölkerung in einem Untersuchungsraum. Über die Kombination unterschiedlicher Datenquellen werden Personen im Haushaltskontext erstellt, die über eine Vielzahl von für die Modellierung relevanten Merkmalen verfügen. Synthetisch meint, dass in der Summe die Charakteristika der künstlich erstellten Population (z. B. Anzahl der Vier-Personenhaushalte je Bezirk) mit empirischen Randsummen übereinstimmen, während keine Analogien zwischen den künstlichen Datensätzen und realen Einzelindividuen gezogen werden können.

Für jedes einzelne Mitglied der Bevölkerung wird im Zuge der Simulation zunächst im Untersuchungsraum festgelegt, welchen Aktivitäten es im betrachteten Zeitraum nachgeht. Grundlage hierfür sind die Daten der Zeitbudgeterhebung des Statistischen



Bundesamtes<sup>5</sup>. Auf Basis von soziodemographischen und sozioökonomischen Merkmalen der Person erfolgt die Zuweisung von einer der 24 typischen Tagebuchklassen. Anschließend findet die Ermittlung eines spezifischen Tagesplans statt, dessen Aktivitäten(-ketten) seitens der Person auszuführen sind.

Im Anschluss wird für die im Tagesplan beinhalteten Aktivitäten der Ort ihrer Ausführung bestimmt. Diese Gelegenheitswahl basiert auf dem Modell der Intervening Opportunities, bei dem davon ausgegangen wird, dass eine bestimmte Alternative mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit abgelehnt wird. Dabei werden sowohl der vorhergehende Aufenthaltsort der Person als auch das Attraktionspotential bzw. die Kapazität eines Ortes in Betracht gezogen. Gleichzeitig findet eine Berücksichtigung der Verkehrsmittelpräferenzen der Person im Zusammenhang mit der auszuführenden Aktivität, der Erreichbarkeit des Ortes je Verkehrsmittel sowie der jeweiligen Reisezeiten statt. Die Ortswahl erfolgt für alle auszuführenden Aktivitäten gemäß ihrer Bedeutung innerhalb des Tagesplans hierarchisch und sukzessive. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Interdependenzen von Ortsentscheidungen innerhalb von Wegeketten zu berücksichtigen.

Eng verbunden mit der Bestimmung eines Ausführungsortes ist die Wahl eines Verkehrsmittels zu seiner Erreichung. Die Verkehrsmittelwahl beruht auf einem CHAID-Entscheidungsbaum (Chi-Squared Automatic Interaction Detection), der auf Daten der MiD 2002 (infas & DIW 2003) basiert, sowie einem Pivot-Point-Modell<sup>6</sup>. Ein CHAID-Entscheidungsbaum enthält für eine abhängige Variable, in diesem Fall die zu erklärende Verkehrsmittelwahl in der Stichprobe, statistisch signifikante Unterscheidungskriterien sowie die jeweiligen Wahlanteile auf den einzelnen Stufen des Baumes. Für die in TAPAS verwendeten Daten ergeben sich als Trennvariablen in den obersten Stufen des Entscheidungsbaumes vor allem die Anzahl der Pkws im Haushalt, die Distanz der Wege und das Alter der Person. Das Haushaltseinkommen, der Wegezweck sowie das Geschlecht der Person stellen weitere Unterscheidungskriterien dar. Für eine synthetische Person wird dann der Entscheidungsbaum entsprechend der zugehörigen Merkmale durchlaufen. Für jedes potentielle Verkehrsmittel wird auf diese Weise die hinterlegte Auswahlwahrscheinlichkeit bestimmt.

Mit Hilfe eines Pivot-Point-Modells erfolgt zunächst die Berechnung der Nutzenunterschiede, die aus der Veränderung von Kostenelementen der Verkehrsmittelalternativen zwischen einem Basiszustand – in diesem Fall dem Jahr 2002 als Erhebungszeitpunkt der Daten – sowie einem zu untersuchenden Szenario resultieren. Anschließend werden die daraus resultierende Veränderung der Attraktivität eines Verkehrsmittels sowie die Veränderung der Wahlwahrscheinlichkeiten aller Verkehrsmittelalternativen mit Hilfe eines Multinomialen Logitmodells bestimmt. Dem verwendeten Modell liegen dabei der im Rahmen des

5 Informationen zur Zeitbudgeterhebung: Statistisches Bundesamt 2003  
<http://www.destatis.de/presse/deutsch/abisz/zeitbudgeterhebung.htm>

6 Siehe Ortúzar & Willumsen (2006) für eine Beschreibung des Pivot-Point-Ansatzes.

Projektes Mobidrive erhobene Datensatz zu Grunde (König und Axhausen 2001). Dieser zeichnet sich durch die große Fallzahl sowie der enthaltenen Geokodierung der aufgesuchten Orte auf. Die Parameter der Nutzenfunktion, die den Einfluß veränderter Verkehrsmitelegenschaften auf die wahrgenommene Güte der Verkehrsmittelooption beeinflussen, wurden hierbei von König und Axhausen adaptiert. Die so ermittelten Wahlwahrscheinlichkeiten führen letztendlich zur Bestimmung des zu nutzenden Verkehrsmittels.

Nachdem die Zielorte und Verkehrsmittel für die Ausübung von Aktivitäten ausgewählt worden sind, werden mit Hilfe von Reisezeitmatrizen die konkret benötigten Reisezeiten zugewiesen. Abschließend erfolgt eine Validierung des erstellten Tagesplanes für die Untersuchungsperson. Hierbei wird der Tagesplan auf seine zeitliche und finanzielle Durchführbarkeit hin untersucht. Grundlage der Bewertung hinsichtlich der zeitlichen Aufwände ist hierbei die Summe der aufgewendeten Reisezeit im konkreten erstellten Gesamttagungsverlauf. Diese wird verglichen mit den Durchschnittswerten und Varianzen der Zeitaufwendungen, die gemäß der ZBE für Tagebücher der entsprechenden Personengruppe bekannt sind. Für die einzelnen Wege des Tagesplans wird darüber hinaus berechnet, welche Kosten mit den gewählten Verkehrsmitteln assoziiert sind. Für die Summe der daraus resultierenden Mobilitätskosten des Tagesplans wird sodann überprüft, ob sie mit dem Mobilitätsbudget der entsprechenden Person realisierbar sind. Die Höhe des zur Verfügung stehenden Budgets ist dabei abhängig vom Haushaltseinkommen sowie der Haushaltgröße und entspricht den jeweiligen Einkommensanteilen gemäß der EVS 2003. Analog zur VP 2025 wird hierbei davon ausgegangen, dass der für Mobilität aufgewendete Einkommensanteil bis 2025 konstant bleibt.

Mit zunehmender Abweichung der beiden für den Tagesverlauf ermittelten Kenngrößen Gesamtreisezeitaufwand sowie finanzielle Tagesbelastung von den statistisch bekannten Werten sinkt die Annahmewahrscheinlichkeit des erstellten Tagesplans zunächst nur sehr langsam, später jedoch deutlicher. Eine Ablehnung des erstellten Tagesplans resultiert zunächst in einer erneuten Orts- und Modalwahl; kann auf diese Weise keine Verbesserung erzielt werden, wird letztendlich ein anderer Tagesplan gewählt.

Ein schematischer Ablauf der Simulation ist Abbildung 8 zu entnehmen.



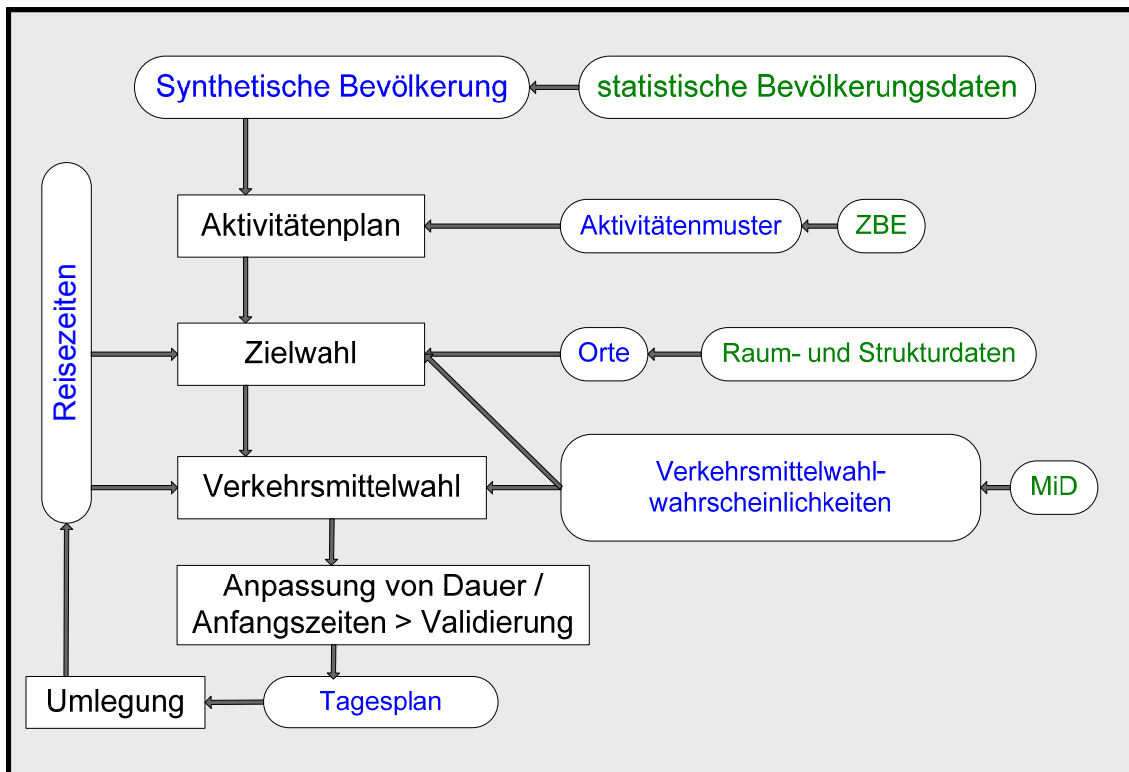


Abbildung 8: Ablaufschema des Modells TAPAS

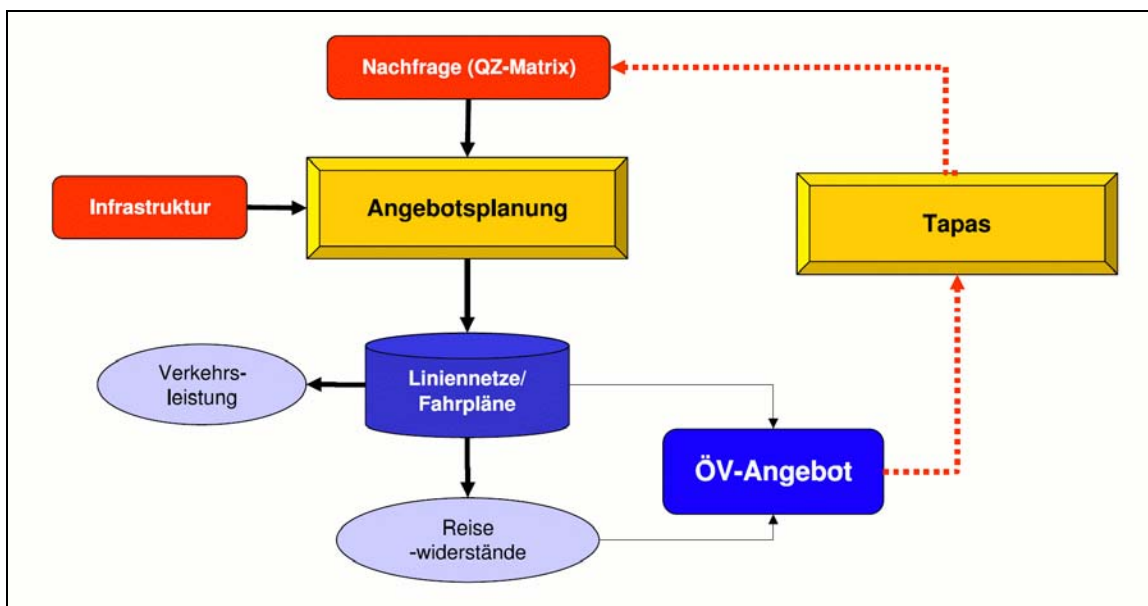
Als Ergebnis der Berechnungen in TAPAS liegen für die einzelnen Mitglieder der synthetischen Population Fahrtenlisten vor. Sie enthalten Start- und Endpunkt der Fahrt, den Wegezweck, die Distanz zwischen Start- und Zielort und das gewählte Verkehrsmittel. Darüber hinaus wird für den MIV der fahrtenzweckspezifische Besetzungsgrad berechnet.

Anhand statistischer Auswertungen erfolgt auf Basis dieser Fahrtenlisten die Ermittlung der nachfolgenden Kenngrößen und Kalibrierungsgrößen für das jeweilige Untersuchungsgebiet, die für eine Weiterverarbeitung in VISEVA zur Verfügung gestellt werden:

- Mittlere Weghäufigkeiten nach Wegezweck und sozioökonomischer Personengruppe,
- Mittlere Weglängen sowie Weglängenverteilung nach sozioökonomischer Personengruppe und Wegezweck,
- Verkehrsmittelanteile nach Personengruppe und Wegezweck,
- Besetzungsgrade im MIV nach Wegezweck.

### Abbildung der raumspezifischen Angebotsstruktur im Personennahverkehr

Um die Verfügbarkeit und Attraktivität des öffentlichen Personennahverkehrs in den Untersuchungsregionen adäquat abzubilden, sind umfangreiche Informationen zum ÖV-Verkehrsinfrastrukturnetz sowie den Beförderungszeiten und –qualitäten notwendig. Dies umfasst sowohl die konkreten Streckenführungen als auch Taktdichte, Umsteigehäufigkeiten und Wartezeiten. Die hierzu in TAPAS verwendete Datengrundlage basiert auf dem Liniennetzoptimierungsprogramm LINOP der TU Dresden (vgl. Nachtigal 2007). LINOP erzeugt mit gegebenen Quelle-Ziel-Nachfragen und einem zur Verfügung stehenden Budget Liniennetze. Die Besonderheit ist die simultane Verkehrsumlegung der Verkehrsströme während des Optimierungsprozesses. So ist es möglich, eine Rückkopplung zwischen verändertem Liniennetz und Verkehrsströmen in jedem Optimierungsschritt zu berücksichtigen. Als Outputgrößen stellt LINOP neben Linienführungen und den Frequenzen der Linien Informationen zu den reisezeitoptimalen Verbindungen zwischen möglichen Start- und Zielorten im Untersuchungsgebiet für die Simulation der Nachfrage in TAPAS (Matrizen der komplexen ÖV-Reisezeiten) sowie die zur Bereitstellung des entsprechenden Angebotes notwendigen Betriebskilometer differenziert nach Zug-, Tram- und Buskilometern je Zeiteinheit zur Verfügung. Das Zusammenspiel von LINOP und TAPAS ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

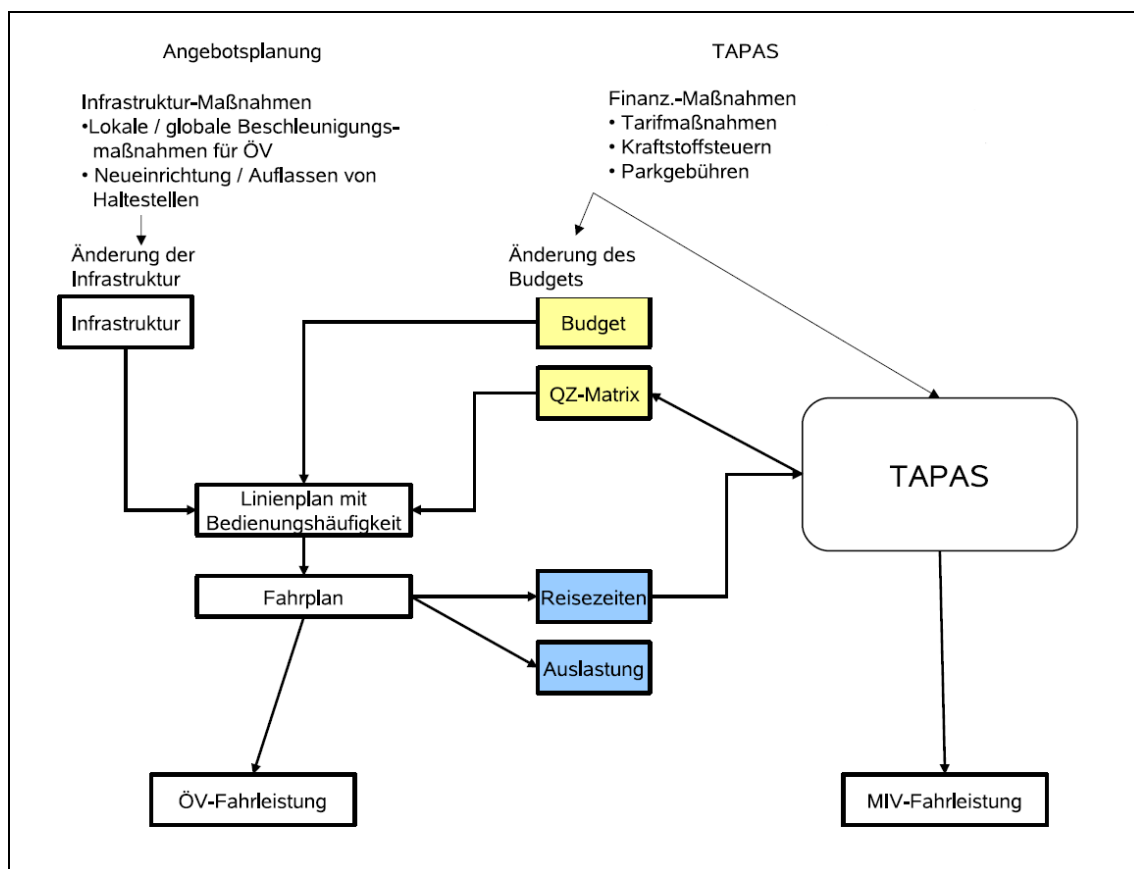


Quelle: Nachtigal 2006, S. 4

Abbildung 9: Zusammenwirken von Angebotsplanung (LINOP) und TAPAS

Ausgehend von der Referenzsituation im Jahr 2005 werden im Rahmen des Projektes sowohl der wahrscheinliche Zustand des ÖPNV-Angebotes im Jahr 2030 als auch

Auswirkungen eines geänderten Angebotes untersucht. Ersteres umfasst die bis zum Jahr 2030 als wahrscheinlich anzusehenden Streckennetzerweiterungen; letzteres betrifft die im Szenario „Klimaschutz im Verkehr“ zu untersuchenden Angebotserweiterungen (vgl. Endbericht Teil 2: Szenario-Prozess und Szenario-ergebnisse (Öko-Institut & DLR-IVF 2009, Kapitel 4.2.1)). Beide Situationen resultieren in veränderten Linienrouten und Taktungen und letztendlich in einer Veränderung der Reisezeiten und Nachfragesituation sowohl im MIV als auch im ÖV. Diesen Wirkungskreislauf stellt Abbildung 10 zusammenfassend dar.



Quelle: In Anlehnung an Nachtigall 2007, S. 19.

Abbildung 10: Modellseitige Abbildung ÖPNV-bezogener Maßnahmen

#### 2.1.4 Modellintegration der in Renewbility ausgewählten Maßnahmen

Die Funktionsweise von TAPAS beruhte in seiner bisherigen Version grundsätzlich auf der Auswertung empirisch belegter Verhaltensweisen. Im Rahmen von Renewbility fand daher eine Erweiterung der Kernelemente des Modells statt, um die Reaktionen auf zukünftige verkehrspolitische Maßnahmen abbilden zu können. Die Erweiterungen

wurden bereits im Hinblick auf die im Szenarioprozess ausgewählten, für das mikroskopische Nachfragemodell relevanten Maßnahmen und Maßnahmenbündel durchgeführt und tangieren alle vier Kernbereiche der Simulation: Wahl der Aktivitäten, ihrer Ausführungsorte, der Verkehrsmittel sowie die Validierung der Tagespläne. Nachfolgend werden die Wirkmechanismen zur Abbildung der Maßnahmenreaktion kurz beschrieben. Weitere Ausführungen zur Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen finden sich im zweiten Teil des Endberichts.

Die wichtigsten Ansatzpunkte zur Abbildung einer Maßnahmenreagibilität in TAPAS stellen folgende Reaktionsmuster dar:

- Veränderte Reisezeiten oder Fahrtkosten für die einzelnen Verkehrsmittel, die für eine Ortsänderung zur Verfügung stehen, führen zu einem veränderten Nutzen des Verkehrsmittels. Bezugsgröße hierbei stellt jeweils der entsprechende Aufwand im Bezugsszenario dar. Da die Kalibrierung der Regionalmodelle anhand der bekannten Kosten und Modal Split-Anteile im Jahr der Erhebung der MiD erfolgt, findet dabei stets ein Bezug auf den Status quo statt. Der Umfang der Nutzenänderung wird hierbei unter Berücksichtigung des Fahrzwecks und des Modus ermittelt. Der veränderte Nutzen einer Verkehrsmittelalternative führt letztendlich zu einer veränderten Auswahlwahrscheinlichkeit des Verkehrsmittels. Grundlage der Kostenbetrachtung im MIV ist dabei der durchschnittliche Kilometerpreis, der sich aus den Komponenten „durchschnittlicher Verbrauch der Fahrzeuge gemäß der Bestandszusammensetzung“, „Kraftstoffpreis“ sowie „Besteuerung“ zusammensetzt. Die Ermittlung der Veränderungen in den zeitlichen Kosten, die durch eine Angebotserweiterung im ÖPNV hervorgerufen werden, erfolgt unter Rückgriff auf die vom Liniennetzoptimierungsmodell LINOP der TU Dresden zur Verfügung gestellten Informationen zum ÖPNV-Angebot in den Vergleichsfällen (Vgl. Abschnitt 2.1.3).
- Die Gelegenheitswahl berücksichtigt nicht nur die Attraktivität eines potentiellen Aufenthaltsortes sondern gleichzeitig auch die finanziellen und zeitlichen Kosten, die mit der Durchführung einer Aktivität an diesem Ort verbunden sind. Modifizierte entfernungs-basierte Kosten der Erreichbarkeit der Orte oder Kosten des Aufenthalts führen somit zu einer Veränderung der Attraktivität eines Ortes. Im Falle des MIV handelt es sich hierbei neben den entfernungs-basierten Treibstoffkosten und zeitlichen Kosten um etwaig anfallende Park- oder Mautkosten.
- Die abschließende Validierung der Tagespläne hinsichtlich ihrer Realisierungsmöglichkeit unter Beachtung der zeitlichen und finanziellen Budgetbeschränkungen, denen eine Person unterworfen ist, ermöglicht es, die Durchführung alternativer Tagespläne als mögliche Reaktion auf eine Maßnahme in Betracht zu ziehen. Modellseitig bedeutet dies, dass ein erstellter Tagesplan dann verworfen wird, wenn auch bei mehrmaligen

Anpassungsversuchen (erneute Gelegenheitswahl, wiederholte Modalwahl) keine Vereinbarkeit zwischen den personenbezogenen Beschränkungen der zeitlichen und finanziellen Mitteln und dem erstellten Tagesplan erzielt werden kann. Die finanziellen Budgetgrenzen orientieren sich dabei an den gemäß des Basisszenarios zu erwartenden Einkommensentwicklungen.

Im Rahmen des Szenarioprozesses wurde gemeinsam mit den Teilnehmern das Szenario „Klimaschutz im Verkehr – Perspektiven bis 2030“ erarbeitet (Vgl. Endbericht Teil 2: Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse (Öko-Institut & DLR-IVF 2009, Kapitel 4)). Ferner wurde Variationen des Szenarios in Form von Szenaretten vorgenommen. In der Darstellung Tabelle 8 sind diejenigen Maßnahmen aufgeführt, die eine Integration im mikroskopischen Nachfragemodell erforderlich machen. Gleichzeitig werden die primären Ansätze der Modellintegration skizziert.

Tabelle 8: Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für die Mikromodellierung

Maßnahmenpaket	Einzelmaßnahme	Integration in TAPAS
<b>Förderung von zusätzlichen Angeboten im Öffentlichen Verkehr</b>	Ausweitung des Angebots im Öffentlichen Verkehr; Individuelle Optimierung des Angebots je nach Regionstyp	Integration veränderter Zugangs-, Abgangs- und Reisezeiten gemäß der von LINOP (TU Dresden) ermittelten Angebotsverbesserung und somit veränderte Kosten der ÖV-Nutzung
<b>Effizienz Pkw</b>	CO <sub>2</sub> -Flottengrenzwerte mit unterschiedlichen Grenzwerten	Anpassung der Kilometerpreise im MIV entsprechend der erzielten Effizienzsteigerung
<b>Erhöhung der Kraftstoffpreise</b>	Anstieg der Kraftstoffpreise und Umstellung der Mineralölsteuer	Anpassung der Kilometerkosten im MIV
<b>Biokraftstoffe und andere alternative Kraftstoffe</b>	Beimischungsquote bzw. Nachhaltigkeitsstandards	Anpassung der Kilometerpreise im MIV durch erhöhte Kraftstoffpreise
<b>Kraftstoffsparende Fahrweise</b>	Förderung Sprit-Spar-Training allgemein	Anpassung der Kilometerpreise im MIV
<b>Steuerreform</b>	Neustrukturierung der Kfz-Steuer	Anpassung der Kilometerpreise im MIV gemäß der erzielten GesamtfloTTeneffizienzänderung
<b>Steuerreform</b>	Abschaffung der Pendlerpauschale	Berücksichtigung der zusätzlichen Kilometerkosten bei Haushalten mit entsprechenden Einkommen
<b>Förderung effizienter</b>	Technologieförderung	Anpassung der Kilometerpreise im MIV entsprechend der erzielten

Maßnahmenpaket	Einzelmaßnahme	Integration in TAPAS
Kraftfahrzeuge		Effizienzsteigerung der Gesamtflotte

### 2.1.5 Berechnung der deutschlandweiten Verkehrsnachfrage auf Basis der Beispielflächen

Vor der Berechnung der deutschlandweiten Nachfrage, waren zunächst weitere Daten zu beschaffen und aufzubereiten, im Wesentlichen zum Verkehrsverhalten und zur Raumstruktur. Die Informationen zum Verkehrsverhalten (spezifisches Verkehrsaufkommen, Modal Split, Besetzungsgrade) und damit die relevanten Parameter zur Modellierung des Status quo gehen zurück auf Auswertungen der bereits erwähnten deutschlandweiten Haushaltsbefragung MiD 2002.

Zur Abbildung der Raumstruktur wurden Daten zu Einwohnern (nach Altersklassen), Studenten, Schülern, zum Erwerbsstatus, Führerschein- und PKW-Besitz sowie zu Arbeitsplätzen, Schulen, Universitäten und Einkaufseinrichtungen genutzt. Die nachstehende Tabelle 9 fasst die eingegangenen Daten und entsprechenden Quellen zusammen.

Tabelle 9: Daten im Modell VISEVA/VISUM

Datentyp	Quelle
	<b>Raumstruktur</b>
Einwohner nach Altersklassen	Statistik Regional, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Ausgabe 2005
Erwerbstätige	InfasGeodaten, 2005
Arbeitsplätze	Bundesagentur für Arbeit, 2005 / Erwerbstätigenrechnung des Bundes und der Länder, 2005
Schüler / Schulplätze	Statistisches Bundesamt, 2004/2005
Studierende / Studienplätze	Statistisches Bundesamt, Hochschulstatistik 2004/2005
Verkaufsraumsflächen	Hauptverband des deutschen Einzelhandels, 2005
	<b>Verkehrsverhalten</b>
PKW-Verfügbarkeit	Mobilität in Deutschland (MiD), 2002
Spezifisches Verkehrsaufkommen	
Modal Split	
Besetzungsgrade	

Die hier dargestellten Datengrundlagen bilden die Basis für die Modellierung des Status quo in 2005. Da für Renewbility das Ausgangsjahr für die Berechnung von Szenarien das Basisszenario in 2030 bildet, waren die Eingangsdaten – soweit möglich – bis zum Jahr 2030 fortzuschreiben. Die dafür verwendeten Prognosen z. B. zur Bevölkerungsentwicklung werden im zweiten Teil des Endberichts näher beschrieben (Öko-Institut & DLR-IVF 2009, Kapitel 3).

Zur Berechnung der Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV)<sup>7</sup> wurde das Programmpaket VISEVA/VISUM genutzt. Dieses wurde von der PTV AG bereits zu vergleichbaren Zwecken angewandt und stellt in Verkehrsplanungsbüros eine Standardsoftware dar. VISEVA ist dazu geeignet, die Kenngrößen aus der maßnahmensensitiven Mikromodellierung mit TAPAS weiter zu verwenden. Hierzu gehören Wegehäufigkeiten, Wegelängen, Verkehrsmittelanteile und Besetzungsgrade jeweils nach Wegezweck und Personengruppe.

In Anlehnung an den 4-Stufen-Algorithmus sind in VISEVA die ersten drei Stufen von „Verkehr in Städten und Regionen Erzeugung, Verteilung und Aufteilung der Verkehrsnachfrage“ Gegenstand der Betrachtungen. Im Zusammenwirken mit der in VISUM realisierbaren Umlegung (4. Stufe des Algorithmus) und einem darauf basierenden Rückkopplungsprozess einer sich wiederholenden Verkehrsnachfrage- und Angebotsberechnung lässt sich im betrachteten Verkehrsnetz ein Nutzergleichgewicht ermitteln.

Die **Verkehrserzeugung** wird in VISEVA unter Anwendung des Quelle-Ziel-Gruppen Konzepts durchgeführt. Dabei wird das Verkehrsgeschehen in homogene Teilbereiche untergliedert, der Annahme folgend, dass ausgewählte Aktivitätenpaare (z. B. Wohnen-Arbeiten, Wohnen-Einkauf, Wohnen-Freizeit) von dafür maßgebenden verhaltenshomogenen Personengruppen durchgeführt werden. Die Aufteilung des Gesamtverkehrsgeschehens in aktivitätenhomogene Schichten und damit verbundene Personengruppen kann je nach Planungsfall und entsprechender Datenverfügbarkeit für jedes Projekt individuell bestimmt werden. Im Rahmen von Renewbility erwiesen sich die nachstehenden Gruppenbildungen für Wegzwecke (Quelle-Ziel-Gruppen) und Personen als geeignet.<sup>8</sup>

---

7 Mit der im Folgenden wiederholt genutzten Abkürzung „MIV“ ist im Rahmen von Renewbility ausschließlich der individuell motorisierte Verkehr mit Pkw gemeint. Üblicherweise werden auch die motorisierten Zweiräder als MIV bezeichnet. Die hier beschriebenen Modellrechnungen mit VISEVA/VISUM reduzieren sich auf die Pkw-Nachfrage, die Nachfrage im Bereich von Motorrädern wurde nicht explizit berechnet.

8 Die eigenständige Quelle-Ziel-Gruppe „Fernverkehr“ beinhaltet alle Wege mit einer Länge von über 100km im MIV.



Tabelle 10: Quelle-Ziel-Gruppen Einteilung - 13er

	Wohnung	Arbeit	Schule	Universität	Einkaufen	Freizeit/Sonstiges	Fernverkehr
Wohnung	-	WA	WB	WU	WE	WS	WFern
Arbeit	AW	SS					
Schule	BW						
Universität	UW						
Einkaufen	EW						
Freizeit/Sonstiges	SW						
Fernverkehr	FernW						

Abkürzungshinweis: WA steht z. B. für die Beziehung Wohnung-Arbeitsplatz, EW für Wege der Beziehung Einkaufen-Wohnung, SS fasst die nicht-heimgebundenen Wege zwischen einzelnen Aktivitäten zusammen (Sonstiges-Sonstiges).

Tabelle 11: Einteilung der Bevölkerung in verhaltenshomogene Bezugspersonengruppen

1	Schüler
2	Studenten
3	Erwerbstätige 18 bis unter 45 mit Pkw
4	Erwerbstätige 18 bis unter 45 ohne Pkw
5	Nichterwerbstätige 18 bis unter 45 mit Pkw
6	Nichterwerbstätige 18 bis unter 45 ohne Pkw
7	Erwerbstätige 45 bis unter 65 mit Pkw
8	Erwerbstätige 45 bis unter 65 ohne Pkw
9	Nichterwerbstätige 45 bis unter 65 mit Pkw
10	Nichterwerbstätige 45 bis unter 65 ohne Pkw
11	Rentner mit Pkw
12	Rentner ohne Pkw

Für jede Kombination aus Personen- und Quelle-Ziel-Gruppe, z. B. Erwerbstätige mit Einkaufswegen, wird im Schritt der Verkehrserzeugung die ungerichtete Nachfrage ermittelt. Dies erfolgt unter Verwendung so genannter spezifischer Verkehrsaufkommen. Damit sind gruppenspezifische Mobilitätsraten gemeint, also durchschnittliche Wegeaufkommen pro Person, Tag und Wegzweck.

Eine wesentliche Eigenschaft von VISEVA ist die simultane Berechnung von **Ziel- und Verkehrsmittelwahl**.<sup>9</sup> Die in Renewability genutzten Aufteilungswerte für die Verkehrsmittelwahl im Status quo beruhen auf Auswertungen der Studie „Mobilität in Deutschland – MiD 2002“. Die zur Verkehrsverteilung notwendig zu berechnenden Bewertungswahrscheinlichkeiten<sup>10</sup> resultieren aus berechneten Aufwendungen

9 Zur mathematischen Lösung der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl siehe auch die ausführliche Beschreibung bei Lohse et al. 1997 oder in Zusammenfassungen Lohse et al. 2006a sowie Lohse et al. 2006b.

10 Die Funktion zur Bewertung der mit unterschiedlichen Kosten besetzten Quelle-Ziel-Beziehungen ergibt einen Zahlenwert zwischen 0 und 1. Im wahrscheinlichkeitstheoretischen Sinn beschreibt der Wert die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Ortsveränderung mit einem bestimmten Verkehrsmittel durchgeführt wird.



(Reisezeiten zwischen Verkehrszellen) aus dem vorliegenden Verkehrsnetz.<sup>11</sup> Die Erstellung der Quelle-Ziel-Matrix für die MIV-Nachfrage erfolgte auf Basis der 439 Kreise und kreisfreien Städte in Deutschland. Die **Umlegung** wurde im genannten VISUM-Netz realisiert, aus dem dann die für Renewability relevante Fahrleistung in Fahrzeugkilometern ermittelt werden konnte.<sup>12</sup>

Für den öffentlichen Verkehr wurde auf der Basis einer identischen Differenzierung nach Personengruppen und Wegzwecken ein eigenständiges Hochrechnungsmodell zur Bestimmung der Gesamtverkehrsnachfrage in Deutschland entwickelt. Dieses verwendet die Ergebnisse der differenzierten Modellierung in den Untersuchungsräumen. Eine Umlegung analog zum MIV ist hier aus methodischen Gründen nicht möglich bzw. würde die Kenntnis von Betriebsmodellen der öffentlichen Nah- und Fernverkehrsanbieter erfordern.

Die Berechnungen zur Nachfrage im öffentlichen Verkehr beruhen analog zum Vorgehen im MIV auf der Aufteilung in die oben genannten Personen- und Quelle-Ziel-Gruppen. Nachdem der Modal Split aus den empirischen Daten der MiD ermittelt wurde, konnte unter Verwendung der Mobilitätsparameter (spezifisches Verkehrsaufkommen) das Aufkommen im ÖPNV ermittelt werden. Die differenzierte Darstellung der Nachfrage ist auch im ÖPNV von elementarer Wichtigkeit, um die durch das mikroskopische Modell TAPAS ermittelten Veränderungen im Verkehrsverhalten und deren Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage adäquat abbilden zu können. Zur Berechnung des Status quo, des Basisszenarios für 2030 sowie den sich daran anschließenden Berechnungen zu einzelnen Maßnahmen wurde im Kooperation mit der TU Dresden ein Hochrechnungsmodell erstellt, das es ermöglicht Änderungen im Modal Split oder in den Aufkommensraten sowie deren Auswirkungen auf die Fahrleistung der unterschiedlichen Verkehrsarten im öffentlichen Verkehr zu berechnen. Das Hochrechnungsmodell beruht auf umfangreichen Analysen von Verkehrsstatistiken zum Zusammenhang zwischen Nachfrage und Angebot im öffentlichen Verkehr.

### 2.1.6 Übertragung der mikroskopisch ermittelten Maßnahmenreaktionen auf Gesamtdeutschland mit Hilfe von VISEVA

In den Beschreibungen der beiden Personenverkehrsmodelle in den Abschnitten 2.1.3 und 2.1.5 wird deutlich, dass sie sich in ihren Ansätzen (Makro-Mikro) grundsätzlich unterscheiden. Dies betrifft insbesondere die Fähigkeit, die Wirkung von verkehrsrelevanten Maßnahmen auf das Einzelindividuum im Modell detailliert abzubilden und nachzuverfolgen. Im Makromodell VISEVA besteht zwar durchaus die

---

11 Das IVF verfügt über ein deutschlandweites Hauptverkehrsstraßennetz, das in VISUM vorgehalten wird. Auf dieser Basis können Reisezeiten zwischen Verkehrszellen ermittelt werden. Das Netz wurde für die Szenarienrechnung gemäß Absprachen mit dem BMVBS zur Realisierung des BVWP auf 2030 angepasst.

12 Die Umlegung erfolgte in zwei Schritten: Zunächst wurde die Nachfrage zwischen den Kreisen umgelegt, dann wurde die bestehende Binnenverkehrsnachfrage (Wege innerhalb der Kreise) disaggregiert und eigenständig auf das Verkehrsnetz umgelegt.

Möglichkeit, externe Veränderungen über eine entsprechende Parametrisierung auf aggregierter Ebene zu berücksichtigen<sup>13</sup>, TAPAS hingegen bietet durch den Einsatz einer synthetischen Bevölkerung und individueller, detaillierter Aktivitätenmuster vielfältige Möglichkeiten, das Individuum betreffende Maßnahmen bzw. deren Wirkungen innerhalb des Modells zu ermitteln. Bei derzeitigem Stand der Modellentwicklung ist es jedoch nicht möglich, mikroskopische Ansätze im großen räumlichen Maßstab, z. B. auf der Ebene eines Nationalstaates, anzuwenden.

Die Berechnungsergebnisse, die für die drei ausgewählten Regionen bei der Simulation mit TAPAS erzielt werden, werden daher mit Hilfe des auf makroskopischer Ebene arbeitenden Modells VISEVA weiterverarbeitet. Durch die Berechnung der Verkehrsnachfrage auf aggregierter Ebene besitzt VISEVA die Fähigkeit, die notwendigen Rechenprozesse für große Räume mit einer hohen Anzahl von Verkehrszellen durchzuführen. Die mit TAPAS bestimmten Wirkmächtigkeiten verkehrspolitischer Maßnahmen werden hierbei genutzt, um Verhaltensparameter für die untersuchten Raumtypen abzuleiten und die Veränderung der Verkehrsleistung in Gesamtdeutschland zu extrapolieren. Die ermittelten Maßnahmenreaktionen durch die Verkehrsteilnehmer in TAPAS werden somit in angepasste Mobilitätsparameter als Eingangsgrößen für VISEVA übersetzt.

Grundlage für diese Verbindung zwischen beiden Modellansätzen bildet die inhaltliche Ausarbeitung der bestehenden Interpretationsebene bzw. Informationslücke, die zwischen Modelloutput TAPAS und Modellinput VISEVA besteht. Ausgangspunkt ist, dass quantifizierte Maßnahmenreaktionen in TAPAS nicht ohne weiteres nach VISEVA übertragen werden können. Angesichts manifester räumlicher Verkehrsverhaltensunterschiede im nationalen Kontext (städtisch-ländlich; Zentrum-Peripherie), besteht die Notwendigkeit, die Ergebnisse singulärer Modellierungen der Verkehrsnachfrage durch einen zusätzlichen Interpretationsschritt für deren Anwendung in einem deutschlandweiten Modell aufzubereiten. Dabei muss den Besonderheiten der drei untersuchten Räume Rechnung getragen werden. Die Untersuchung einer Maßnahme für die Region Berlin liefert zwar quantifizierte Ergebnisse, die für andere Großstädte aber z. B. vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Ausbaugrads des öffentlichen Verkehrs für die Verwendung in VISEVA interpretiert werden müssen. Dabei wird die Interpretation auch von der betrachteten Maßnahme selbst abhängen.

Ausgehend von den mit TAPAS erzielten Ergebnissen der drei ausgewählten Räume wird über anteilige Gewichtung des jeweiligen Raumtyps u.a. das spezifische Verkehrsaufkommen nach Personengruppen für VISEVA generiert. Nach diesem interpretativen Arbeitsschritt der Übertragung der Parameter auf alle Regionen des entsprechenden Typs erfolgt in VISEVA die Hochrechnung der Auswirkungen auf die gesamte Personenverkehrsnachfrage.

---

13 Dabei würde z. B. eine Verteuerung des Individualverkehrs als Änderung eines Parameters abgebildet werden. Für den Parameter „durchschnittliche Anzahl der Fahrten im Freizeitverkehr pro Tag und Person“ würde sich der Wert verringern.

Als Ergebnis der Berechnungen in TAPAS liegen für die einzelnen Mitglieder der synthetischen Population Fahrtenlisten vor. Sie enthalten Start- und Endpunkt der Fahrt, den Wegezweck, die Distanz zwischen Start- und Zielort und das gewählte Verkehrsmittel. Darüber hinaus wird für den MIV der fahrtenzweckspezifische Besetzungsgrad berechnet.

Statistische Auswertungen dieser Fahrtenlisten ermöglichen die Ermittlung der nachfolgenden Kenngrößen und Kalibrierungsparameter für die ausgewählten Referenzregionen, die für eine Weiterverarbeitung in VISEVA zur Verfügung gestellt werden:

- Mittlere Weghäufigkeiten nach Wegezweck und sozioökonomischer Personengruppe
- Mittlere Weglänge sowie Weglängenverteilung nach sozioökonomischer Personengruppe und Wegezweck
- Verkehrsmittelanteile nach Personengruppe und Wegezweck
- Besetzungsgrade im MIV nach Wegezweck

Das Zusammenspiel der Berechnungen in TAPAS und VISEVA ist in Abbildung 11 graphisch dargestellt.

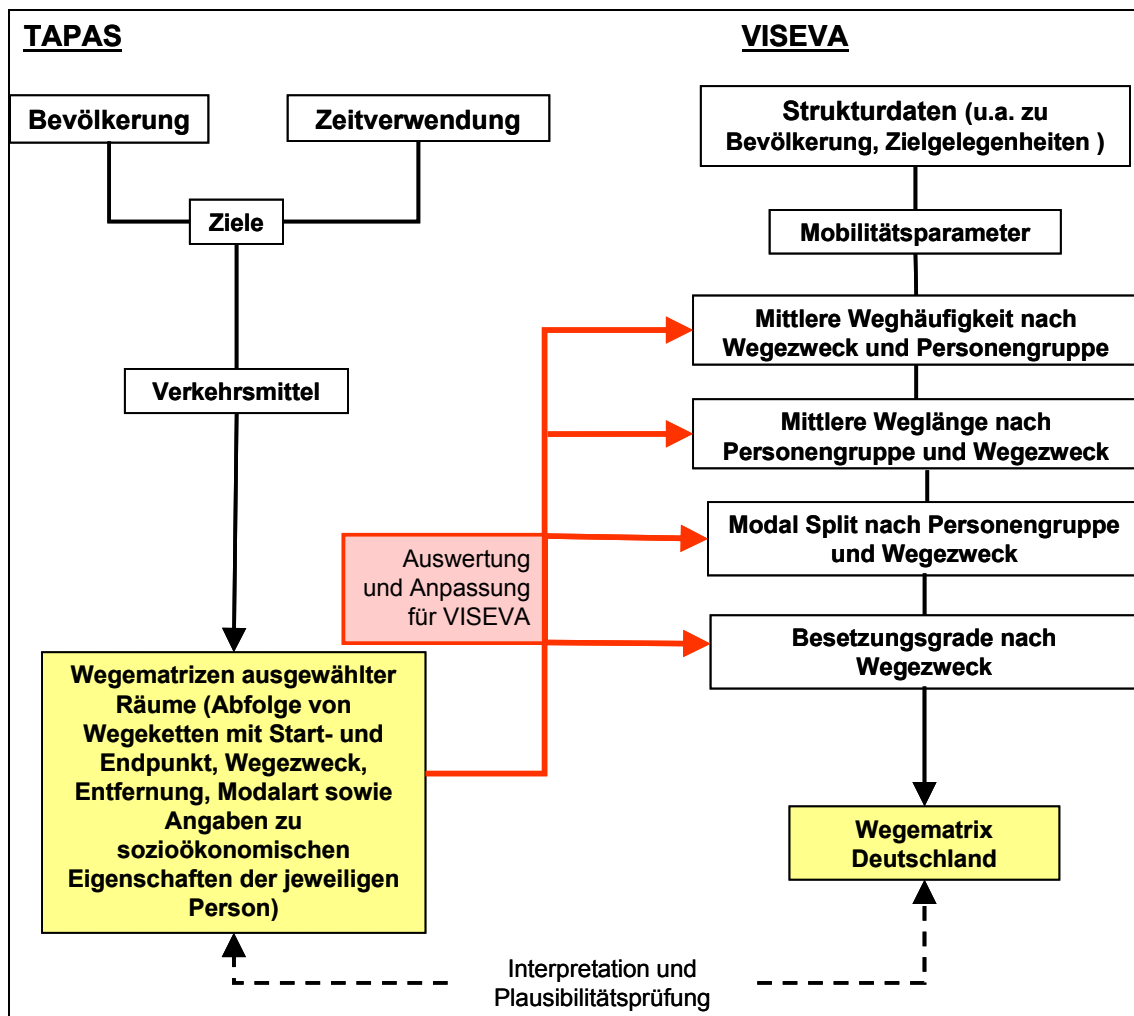


Abbildung 11: Zusammenspiel der Ausgabegrößen von TAPAS sowie Inputparameter für VISEVA

## 2.2 Güterverkehr

Für die Modellierung des Güterverkehrs entwickelte das Institut für Verkehrsforschung zunächst ein mikroskopisches und bezüglich der Eingangsdaten ein äußerst disaggregiertes Modellkonzept. Ziel war es, mit diesem neuen Forschungsansatz die Sensitivität speziell bei der Verkehrsmittelwahlentscheidung präziser abbilden zu können, als dies bei einer makroskopischen Modellierung erfolgt.

Für das disaggregierte Modell wurde eine virtuelle Wirtschaftsstruktur entwickelt. Diese enthält Informationen zu den Betrieben in Deutschland, deren Anzahl an Beschäftigten, deren Produktionsmenge sowie deren Zuordnung zu einem Wirtschaftszweig. Räumlich werden die Betriebe für ganz Deutschland zu Kreisen und Gemeinden zugeordnet, so dass am Ende eine virtuelle Wirtschaftsstruktur entsteht. In weiteren

Modellierungsschritten wurden die Warenströme dieser Betriebe mit anderen nationalen Betrieben und dem Ausland generiert und in Losgrößen unterteilt, die versendet werden. Im nächsten Modellierungsschritt erfolgte die Verkehrsmittelwahl. Abschließend wurde der Transport dieser Sendungen mit den einzelnen Verkehrsträgern vom disaggregierten Modell simuliert (Abbildung 12).

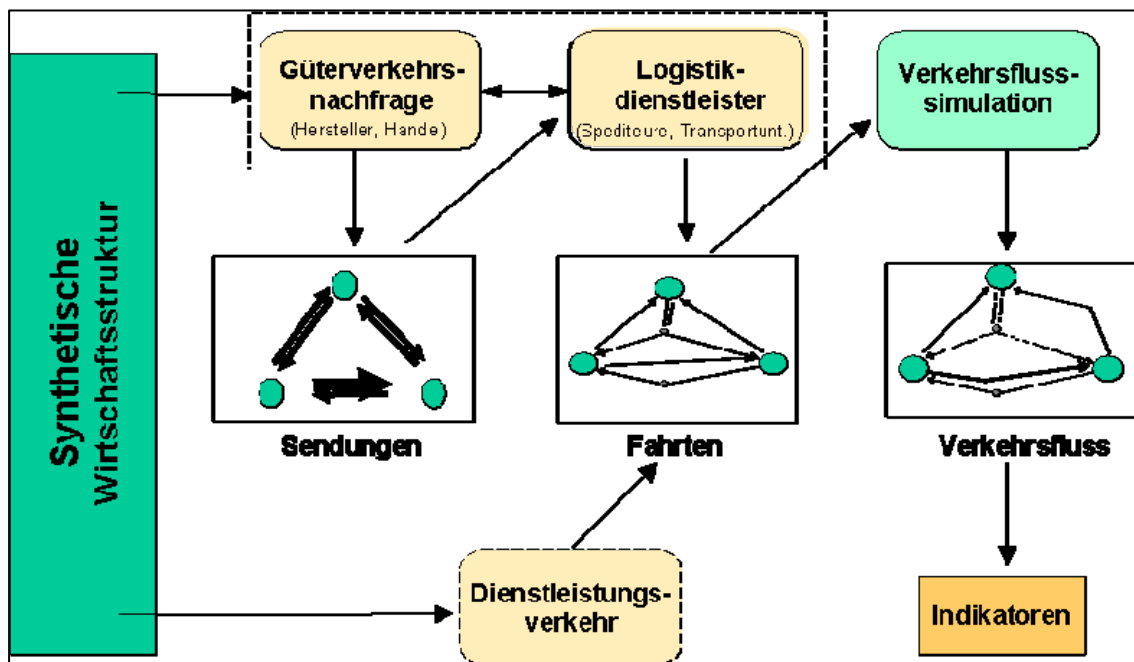


Abbildung 12: Mikroskopisches Modellkonzept zur Güterverkehrsmodellierung in Renewbility

Als erster wesentlicher Entwicklungsschritt konnte der Aufbau einer synthetischen Wirtschaftsstruktur erfolgreich abgeschlossen werden. Dabei werden vorhandene Wirtschaftsdaten deutschlandweit erhoben und fehlende Daten mit Hilfe von wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen zu einem konsistenten Datensatz vervollständigt. Die synthetische Wirtschaftsstruktur zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass Siedlungsstrukturdaten verschiedenster Wirtschaftszweige auf sehr feinräumigem Niveau deutschlandweit generiert werden konnten. Damit ist erstmalig im deutschen Sprachraum ein wichtiges und zentrales Element zur vertieften Nutzung und Weiterentwicklung von Wirtschaftsverkehrsnachfragemodellen (sowohl mikroskopisch als auch makroskopisch) fertig gestellt. Allein dieser Ansatz wird einen großen Entwicklungssprung innerhalb der Wirtschaftsverkehrsnachfragemodellierung ermöglichen. Auf Grundlage dieser synthetischen Wirtschaftsstruktur konnte eine konsistente Verkehrserzeugung für die entsprechenden Wirtschaftszweige berechnet werden.

Dagegen konnten die Modellkomponenten für die Verflechtung der Warenströme zwischen den Betrieben mit der darin eingebetteten Zielwahl nicht zu Ende geführt werden. Nach Auswertung erster Modellierungsergebnisse zeigte sich, dass infolge der

Komplexität der verwendeten Modelleingangsdaten und Modellalgorithmen sowie den bei einzelnen Modellierungsschritten notwendigen Annahmen keine validen Aussagen zu den Maßnahmewirkungen möglich waren. Auch eine Veränderung einzelner Modelleingangsdaten und -algorithmen erbrachte keine grundlegende Verbesserung der Ergebnisse. Die auftretenden Probleme resultierten aus der aufwändigen Kalibrierung der Simulationsergebnisse. Methodische Alternativen, die einen geringeren Zeitaufwand erwarten ließen, konnten den geforderten Qualitätsstandards nicht entsprechen. Da die mehrmals zu durchlaufende Kalibrierung jedoch ein elementarer Schritt in der Modellerstellung ist, wurde entschieden, die Modellierung des Güterverkehrs nicht auf Grundlage des entwickelten Modellansatzes fortzusetzen (sondern mit dem später beschriebenen Modell VISEVA-W), um so den erfolgreichen und zeitgerechten Projektabschluss sicherzustellen.

Die aufgetretenen negativen Ergebnisse bezüglich der Ziel- und Verkehrsmittelwahl waren aus Forschungssicht nicht vorauszusehen. Trotz dieser immer wieder in der Forschung auftretenden Rückschläge, lassen auch diese Ergebnisse wertvolle Rückschlüsse für zukünftige Forschungen an Wirtschaftsverkehrsnachfragemodellen zu. So werden beispielsweise aus diesen Erkenntnissen neue Modellstrukturen am DLR entwickelt, welche auf die Problematik eingehen, dass die Betrachtung eines Teilraumes/einer Region – wie im Personenverkehrsmodell TAPAS – zur Reduzierung der in die Modellierung einbezogenen Datenmengen im Wirtschaftsverkehr angesichts der nationalen und internationalen Verflechtungen der Unternehmen nicht möglich ist. Damit verbunden ist, dass derzeit nicht generierbare Daten künftig mit verbesserten makroskopischen Modellen ermittelt und dann ebenfalls neu zu entwickelnden mikroskopischen Modellen zugeführt werden. Somit können Teilräume aus einem großen makroskopischen Modell, welches die europäische Ebene abbildet, „ausgeschnitten“ und mikroskopisch simuliert werden. Aber nicht nur der Erkenntnisgewinn über die Einsatzgrenzen von mikroskopischen Modellen, sondern auch die entwickelten Ziel- und Verkehrsmittelwahlalgorithmen, werden als Grundlage zur Entwicklung neuer verbesserter Wahlansätze dienen und sind unverzichtbare Grundlagen. Diese Elemente, Erkenntnisse und Ableitungen werden in ein neues Modellkonzept des DLR integriert, welches am Institut für Verkehrsforschung entwickelt wird, das allerdings bis zu seiner Fertigstellung noch etwa 3-4 Jahre Forschungs-, Entwicklungs- und Erprobungszeit benötigt.

Zur Durchführung der Modellierung des Straßengüterverkehrs wählte das Institut für Verkehrsforschung ersatzweise das makroskopische Modell VISEVA-W/VISUM der PTV AG aus. Es handelt sich dabei um ein anerkanntes, kommerzielles Modellierungswerkzeug zur Verkehrsplanung mit umfangreicher Dokumentation und vielen in Veröffentlichungen dokumentierten Anwendungen, so dass die Validität der Modellierung als sicher vorausgesetzt werden kann. Da das Modell VISEVA-W grundlegend nur zur Modellierung des Straßengüterverkehrs konzipiert ist, wurden für den Schienengüterverkehr und den Güterverkehr mit Binnenschiffen weitere spezielle Modellwerkzeuge entwickelt, die es ermöglichten, die von den Maßnahmen bewirkten

Veränderungen bei Bahn und Binnenschiff in Abhängigkeit der Veränderungen des Straßengüterverkehrs einzuschätzen (siehe Abbildung 13).

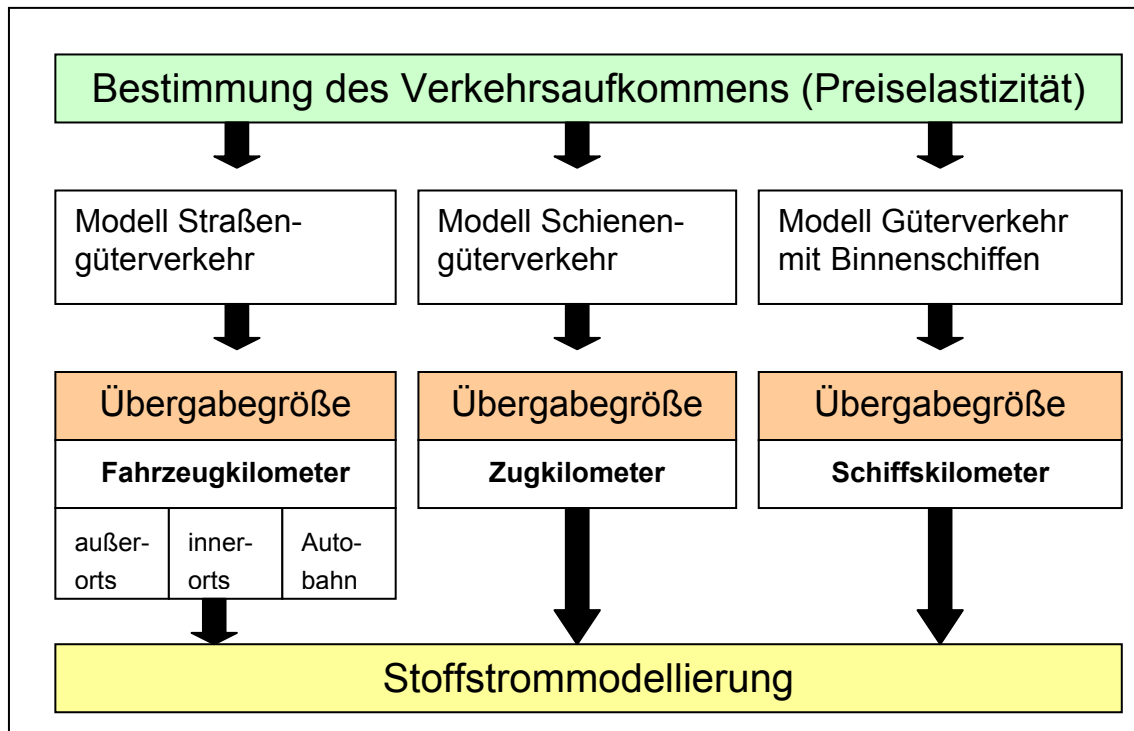


Abbildung 13: Darstellung der Vorgehensweise bei der Güterverkehrsmodellierung

Der Luftfrachtverkehr in Deutschland war nicht Gegenstand der Modellierung, da national keine reinen Luftfrachtflüge stattfinden. Bei nationalen Luftfrachttransporten handelt es sich entweder um Zuladungen zu Passagierflugzeugen oder diese Transporte finden im Luftfracht-Ersatzverkehr zwischen den deutschen Flughäfen hauptsächlich auf der Straße statt. Somit sind die entsprechenden Verkehrs- bzw. Fahrleistungen entweder bereits beim nationalen Passagierflugverkehr enthalten oder werden als Straßengüterverkehr berücksichtigt.

Die international durchgeführten Flüge mit Luftfrachtmaschinen wurden allerdings nicht berücksichtigt, da diese Flüge von den ausgewählten Maßnahmen nicht betroffen wären.

### 2.2.1 Methodik der Güterverkehrsmodellierung

Die Grundlage der Bestimmung des Güterverkehrsaufkommens bildete eine verkehrsträgerspezifische Kostenkalkulation zur Berechnung der Transportkosten.

Für den Straßengüterverkehr wurde aufbauend auf den vom Bundesverband der Transportunternehmen (vgl. BVT 2003) und in Fachzeitschriften (vgl. hierzu die Fahrzeugkostenberechnungen in Verkehrsrundschau, Deutsche Verkehrszeitung



(DVZ), lastauto und omnibus) genutzten Berechnungsmethoden zur Fahrzeugkostenrechnung eine maßnahmensensitive Kostenberechnung zur Bestimmung der verkehrsträgerbezogenen Transportkosten für die betrachteten Lkw entwickelt, mit dem die einzelnen Maßnahmen abgebildet werden konnten. Der erforderliche Dateninput wurde aus Fachzeitschriften und durch persönliche telefonische Recherche u.a. bei Versicherungen und Verbänden generiert.

Durch die Rückkoppelung der Fahrzeugkosten mit dem aktuellen maßnahmen-spezifischen Flottenverbrauch wurden die Strukturveränderungen der Lkw-NZL durch die Einführung effizienter Fahrzeugalternativen über die Erneuerung der Fahrzeugflotte beachtet.

Für die nachfolgende Berechnung des Verkehrsaufkommens wurden umfassende Informationen über Nachfragereaktionen durch Preisänderungen genutzt. Diese sind in wissenschaftlichen Veröffentlichungen nur für einzelne Fälle (z. B. einzelne Relationen, Case Studies) oder Verkehrsträger bzw. für den Kombinierten Verkehr zu erhalten. Beuthe et al. haben im Jahr 2001 durch Modellierung generierte Daten zur direkten und Kreuz-Elastizität der Nachfrage auf Basis eines detaillierten geografischen Informationssystems mit Hilfe eines mikroskopischen Güterverkehrsmodells für Belgien geschätzt und anhand von empirischen Untersuchungen validiert. Hierbei haben die Autoren sowohl zwischen Nah- und Fernverkehr als auch zwischen Veränderungen der totalen Kosten und der Transportkosten für alle drei Verkehrsträger unterschieden.

Dieses Modell zur Bestimmung der Verkehrsaufkommen wurde ebenfalls im Jahr 2009 von Transport & Mobility Leuven (TML 2008) zur Abschätzung der Wirkungen von 25-Meter-Lkw auf die europäische Verkehrsnachfrage genutzt. Nach eingehender Recherche der Literatur wurde deshalb das Modell als geeignet angesehen, wobei vereinfachend von einem linearen Zusammenhang zwischen Transportpreisänderung und resultierender Veränderung des Straßentransportaufkommens ausgegangen wurde.

### **Straßengüterverkehr**

Mit Hilfe des Verkehrsmodells VISEVA-W/VISUM wurden die Modellierungsstufen Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsumlegung berechnet. Die Aufteilung des Verkehrsaufkommens erfolgte bereits durch die Elastizitätsberechnung vor der Modellanwendung von VISEVA-W/VISUM. Anschließend wurde die Übergabegröße Fahrzeugkilometer als Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugtyp und Straßentyp ermittelt und zur Berechnung der Emissionen weitergegeben.

Zur Bestimmung der Modellierungsparameter für VISEVA-W sowie deren Kalibrierung wurde ein Berechnungsprozess der Nachfragemodellierung vorgeschaltet.

Das Modellierungskonzept ist in Abbildung 14 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.



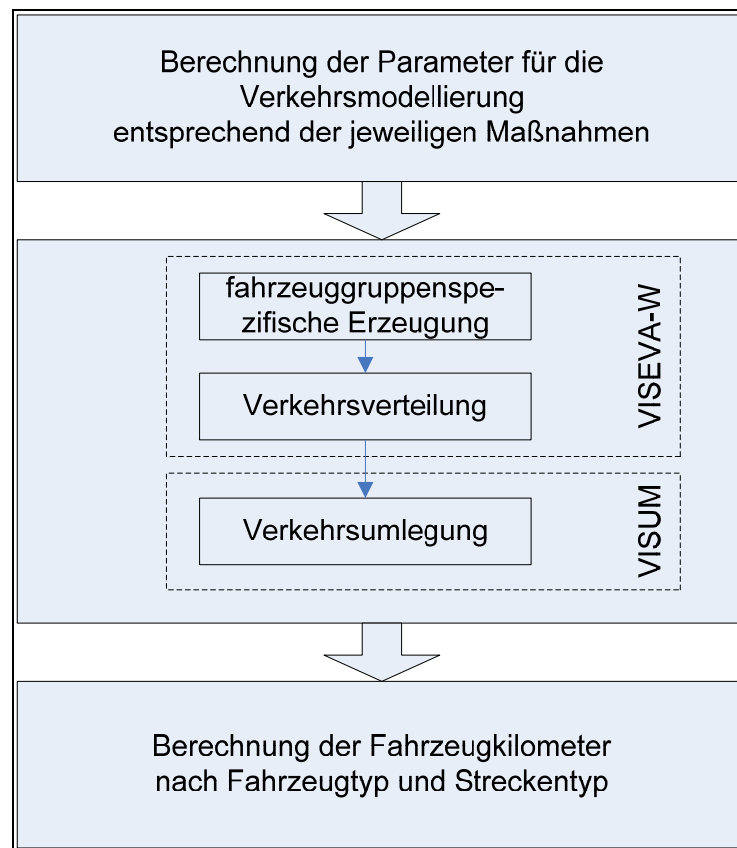


Abbildung 14: Prinzipielle Darstellung der Anwendung des gekoppelten Verkehrsmodells VISEVA-W/VISUM

Im Projektbericht wird darauf verzichtet, auf die den beiden Modellen VISEVA-W und VISUM zu Grunde liegenden Formeln und Theorien vertieft einzugehen. Hierfür wird auf die Erläuterungen in den Handbüchern der PTV AG verwiesen sowie auf Veröffentlichungen zu diesen Modellen (vgl. Lohse1998, ptv 2009).

### Ausgangsdaten

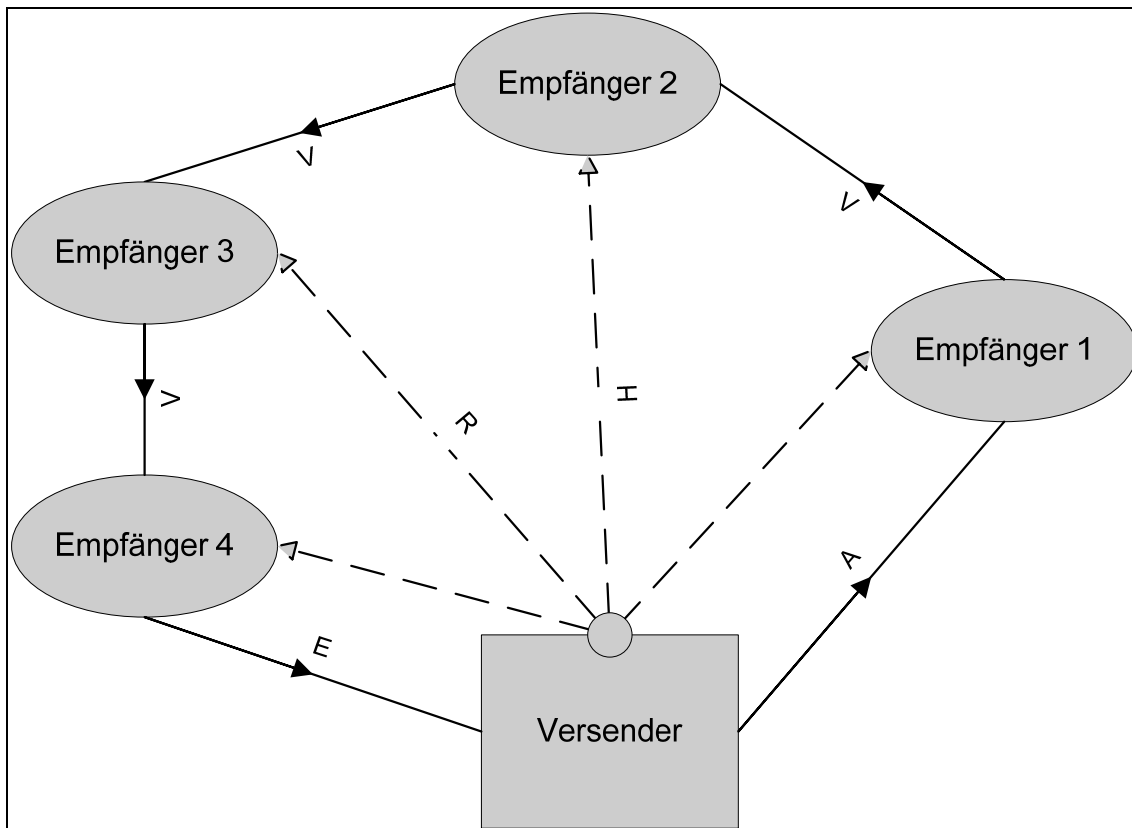
Die Modellsoftware VISEVA-W modelliert den Straßengüterverkehr auf der Basis von Touren, bei dem der Startpunkt am Ende einer Tour wieder angefahren wird. Als Planungszeitraum wurde deshalb ein Jahr gewählt, um im Modell auch Fahrten abzubilden, die ihren Tourenaussgangspunkt weniger häufig anfahren als beispielsweise regionale Verteil- und Sammelfahrten. Verschiedene Modellierungsparameter in VISEVA-W dienen zur Beschreibung der Touren einzelner verhaltenshomogener Gruppen, sogenannter Wirtschaftsverkehrsklassen (WVK). Eine WVK entspricht im Modell einer Kombination aus Fahrzeugtyp und Wirtschaftszweig<sup>14</sup>, beispielsweise

<sup>14</sup> Teilweise wurden mehrere Wirtschaftszweige zusammengefasst.

WVK 1 = Wirtschaftszweig A und Sattelzugmaschine (siehe die Auflistung im Anhang Kapitel 5).

Die quell- und zieleitigen Verkehrsaufkommen aller Verkehrsbezirke werden durch die in diesen vorhandenen Bezugspersonen (z. B. Einwohner, Beschäftigte) bestimmt. Die Modellparameter der Verkehrserzeugung sind die Anzahl der Touren je Strukturgröße sowie die Anzahl der Stopps in einer Tour. Der Parameter „Potenzial der Verkehrsattraktion“ drückt aus, wie häufig Fahrten zu einer Verkehrszelle stattfinden. Er wird in VISEVA-W mittels der (zielseitigen) Erzeugungsraten für jede Strukturgröße umgesetzt. Weitere VISEVA-W Parameter dienen der Beschreibung des Verkehrsverhaltens der Verkehrsteilnehmer (z. B. Transportweiten und -zeiten.).

Ein Beispiel für eine Tour mit vier Stopps und Raumparametern wird in Abbildung 15 dargestellt. Die räumliche Ausdehnung einer Tour wird mit der Zuordnung von Entfernungen für Anfangsfahrten, Verbindungs- und Endfahrten (A, V, E) sowie durch die Parametrisierung der Entfernung der Stopps zum Ausgangspunkt (H, R) im Modell abgebildet. In VISEVA-W gehen die genannten Parameter in Bewertungsfunktionen ein, welche die a-priori-Wahrscheinlichkeit aus der Versenderperspektive ausdrücken, bestimmte Entfernungen zu akzeptieren oder zu ignorieren.



Quelle: Vgl. Lohse (1998), S.7.

Abbildung 15: Tourenkonzept in VISEVA-W

Die genannten Parameter der Verkehrserzeugung sowie des räumlichen Verhaltens wurden als Basisparameter von VISEVA-W für alle Wirtschaftsverkehrsklassen als Eingabegrößen für das Modell in einem vorbereitenden Berechnungs- und Bewertungsprozess bestimmt.

In diesem Vorgehen sind auch die Grenzen der Anwendung von VISEVA-W bei der Modellierung von Maßnahmen zu sehen. So müssen Veränderungen bei den Tourenmustern infolge einer Weiterentwicklung von Logistikkonzepten zum Beispiel durch den Telematikeinsatz und eine in Zukunft zu erwartende Verschiebung der Marktsegmente (Werkverkehr, Systemverkehr, Kontraktlogistik, Spotverkehr) modellextern ermittelt und in Modellparametern ausgedrückt werden. Die am Ende berechneten Fahrleistungsveränderungen sind somit sehr stark von diesen Veränderungen der Modellparameter bestimmt. Auch die eigentliche Verkehrsmittelwahl wird separat anhand von Kreuzelastizitäten im Vorfeld der eigentlichen Modellierung angewendet. Weitere für die Modellierung wichtige Randbedingungen wurden so gestaltet, dass diese für das Basisszenario und das Szenario "Klimaschutz im Verkehr" identisch sind. Damit wurde unter anderem

sichergestellt, dass Veränderungen durch die Verteilung von Leerfahrten auf die Bezirke und die Wahl der Fahrzeugklasse bei allen Modelldurchläufen nach einem einheitlichen Vorgehen erfolgen.

Damit die spezifischen Strukturunterschiede im Güterverkehr getrennt betrachtet sowie auch eine erhöhte Maßnahmensensitivität des Modells erreicht werden konnte, wurde aufgrund unterschiedlicher Werte für die verwendeten Parameter mit drei parallelen Teilmodellen gearbeitet:

- I. Teilmodell für die leichten Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zGG (LNF)
- II. Teilmodell für die Ladungsfahrten der Lkw ab 3,5 t zGG und Sattelzugmaschinen (SZM)
- III. Teilmodell für die Leerfahrten der Lkw ab 3,5 t zGG und SZM

Der Transitverkehr wurde nicht explizit mit VISEVA-W modelliert, da er von den Maßnahmen nicht oder nur gering betroffen wäre. Bei allen Maßnahmen wurde angenommen, dass sich die internationalen Quelle-Ziel-Beziehungen nicht verändern. Der Straßengütertransitverkehr konnte aus den Verkehrsverflechtungen der VP2025 (BVU & Intraplan Consult 2007) selektiert und in eine Fahrtenmatrix transformiert werden. Bei der Routenwahl wurde der Transitverkehr in das Modell integriert und mit den anderen Lkw Verkehren unter Zugrundelegung der Netzbelastung durch den Personenverkehr in VISUM auf das Straßennetz umgelegt. Der Transitverkehr reagierte somit bei der Routenwahl auf angebotsseitige Maßnahmen, wie beispielsweise eine veränderte Lkw-Maut. Die berechnete Fahrleistung auf dem deutschen Straßennetz wurde als Ausgabegröße des Verkehrsmodells bei den weiteren Rechnungen ebenfalls berücksichtigt.

Annahmen und Ausgangsdaten im Teilmodell I für LNF:

- Bei der Modellierung wurden acht Wirtschaftszweige (WZ) unterschieden (A, B, C, D, F, G, H, I, J bis Q und E) (vgl. Statistisches Bundesamt 2006)<sup>15</sup>. Das Verkehrsverhalten von Fahrzeugen, die einem WZ zugeordnet sind, wurde als homogen angenommen.
- Eine Auswertung der KiD (Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002) für die relevanten WZ lieferte die Basisparameter für VISEVA-W. Diese Auswertung erfolgte nur für Güterverkehrsfahrten und die drei Kreistypen: Agglomerationsraum, verstärkter und ländlicher Raum (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2009).

<sup>15</sup> Bezeichnung von Abschnitten in der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ) mittels Großbuchstaben, Erläuterungen siehe Anhang Kapitel 5.

- Weiterhin sind aus amtlichen Statistiken Strukturgrößen, wie die Anzahl der Einwohner und sozialversicherungspflichtig Beschäftigten, für jeden Verkehrsbezirk aufbereitet worden. Diese Strukturgrößen werden im Modell für die Quantifizierung des Verkehrsaufkommens eingesetzt.

Annahmen und Ausgangsdaten für die Teilmodelle II und III für Ladungs- und Leerfahrten von Lkw und SZM:

- Es wurden bei Lkw und SZM nur vier WZ unterschieden (A bis F, G bis H, I, J bis Q und E), weil die vorhandenen Datensätze zum Güterkraftverkehr dieser Fahrzeuge für eine differenziertere Auswertung nicht ausreichend waren. Mit vier Fahrzeugtypen und vier WZ wurden 16 verschiedene Gruppen im Modell abgebildet, denen ein jeweils gleiches Verkehrsverhalten für ihre Ladungs- und Leerfahrten zugewiesen wurde.
- Die Fallzahlen für diese Fahrzeuggruppe in der KiD waren so gering, dass eine Gruppierung der WZ für die verhaltenshomogenen Gruppen notwendig und die Differenzierung nach Kreistypen nur eingeschränkt möglich war.
- Die Strukturgrößen für die Teilmodelle der Ladungs- und Leerfahrten sind analog zu denen des Teilmodells I.
- Leerfahrten finden üblicherweise nicht als Touren sondern als einzelne Fahrten statt. Im Leerfahrtenmodell wurde deshalb der Parameter für die Anzahl der Stopps bei einer Tour mit dem Wert zwei festgelegt und in VISEVA-W somit die Touren mit jeweils einer Hin- und einer Rückfahrt räumlich verteilt. Die berechnete Fahrtenmatrix ist anschließend mit 0,5 multipliziert worden, um eine Direktfahrtenmatrix zu erzeugen.

Das Ergebnis eines jeden Teilmodells ist eine Fahrtenmatrix je Verkehrssystem. Diese Matrizen wurden mit dem Programm VISUM umgelegt. Insgesamt bestehen der Planungsraum Deutschland aus 439 Verkehrszellen sowie der weitere Planungsraum aus 258 ausländischen Verkehrszellen für internationale Verkehrsverflechtungen. Für die Auswertung der Fahrzeugkilometer wurden nur auf dem bundesdeutschen Straßennetz verlaufende Fahrten berücksichtigt und aus VISUM exportierte Daten als Kreuztabellen nach Fahrzeugtyp sowie nach den Streckentypen Bundesautobahn, Straßen innerorts und Straßen außerorts ausgewertet.

Eine Kalibrierung zur Sicherstellung der Qualität der Modellierungsergebnisse für das Basisjahr 2005 erfolgte mit Daten des KBA zum Güterkraftverkehr deutscher und europäischer Lastfahrzeuge sowie der Fahrleistungserhebung 2002 (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2005a, Kraftfahrt-Bundesamt 2005b, Hautzinger et al. 2002).

### **Umsetzung der Basisentwicklung bis 2030**

Die Änderung des Aufkommens bis 2030 musste in eine Änderung von Fahrten für VISEVA-W transformiert werden. Die Tonnage-Fahrten-Korrelation wurde aus KBA-Daten berechnet, deren Signifikanz ( $R\text{-Quadrat} = 0,966$ ) sich mit einer Regressionsanalyse für die Jahre 1996 bis 2006 nachweisen ließ.

Die Anzahl der Leerfahrten wurden aus den Ladungsfahrten für jede Wirtschaftsverkehrsklasse (WVK) berechnet, da auch ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladungs- und der Leerfahrten besteht ( $R\text{-Quadrat} = 0,809$ ).

### **Schienengüterverkehr und Güterverkehr mit Binnenschiffen**

Parallel zum Straßengüterverkehr war es erforderlich, Veränderung bei der Fahrleistung im Schienengüterverkehr und bei den Binnenschiffen zu betrachten. Diese Modellierung basiert auf verkehrsträgerspezifischen Kennziffern zur Auslastung und wird mit Hilfe von bekannten Abhängigkeiten zwischen Verkehrsaufkommen und Fahrleistung (Zug- und Schiffskilometer) berechnet. Dabei wurde unterstellt, dass in der VP 2025 getroffene Annahmen zum Ausbau der Infrastruktur ebenfalls ohne Einschränkungen gültig seien. Folglich werden weder Einschränkungen der Kapazität von Schienenstrecken, Wasserstraßen oder Umschlaganlagen noch Weiterentwicklungen der Leistungsqualität dieser Verkehrsträger sowie von systemtechnischen Basisgrößen (z. B. Zuglänge, -gewicht, -geschwindigkeiten oder neuer Schubkonfigurationen) berücksichtigt.

Für den Schienengüterverkehr wurden folgende Ausgangsgrößen in die Rechnung einbezogen:

- Das Verkehrsaufkommen für den Schienengüterverkehr aus der VP 2025 für das Jahr 2004 und das Jahr 2025 wurde analog zum Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben und dadurch das Basisszenario in Übereinstimmung mit der in der VP 2025 dargestellten Entwicklung gebracht.
- Für konventionelle Züge (Ganzzüge und Züge im Einzelwagenverkehr) sowie Züge im Kombinierten Verkehr wurde nach Diskussion mit einem Vertreter der DB AG in der Szenariogruppe das durchschnittliche Nettozuggewicht festgelegt. Die Grundlage hierfür lieferte eine Auswertung von Ist-Daten der DB AG für die 14. bis 23. Kalenderwoche aus dem Jahr 2007. Für andere Anbieter im Schienengüterverkehr wurde die Annahme getroffen, dass sich die durchschnittlichen Nettozuggewichte gegenüber den Daten der DB AG nicht unterscheiden. Zusätzlich wurde in der Diskussion ein Standardzug für den Kombinierten Verkehr bestehend aus 52 TEU (Twenty-Food-Equivalent-Units) definiert, der zu 70 % beladen und 10 % leer ist. Das durchschnittliche Ladungsgewicht eines TEU wurde mit ca. 2,3 t festgelegt.

Tabelle 12: Zugauslastung unterteilt nach betrachteten Güterzuggruppen

**Stichprobe aller Zugfahrten  
in den Kalenderwochen 14-23/2007**

	<b>Ant. Zugfahrten</b>	<b>Auslastung</b>
	%	t/Zug
Einzelwagenverk.	69,3%	358
Ganzzugverkehr	21,4%	656
Kombinierter Verk.	9,3%	561
Einzelwagen- und Ganzzugverkehr	90,7%	428
alle	100,0%	441

\*) Die Auslastungsangaben beziehen sich auf das  
Ladungsgewicht einschließlich Container

Quelle: Angaben des Bahn-Umwelt-Zentrums der DB AG<sup>16</sup>

- Zur Festlegung der Fahrleistung in Zugkilometern (Zugkm) aller Züge im Schienengüterverkehr aus dem Jahr 2004 wurde auf einen Wert aus dem Geschäftsbericht der Güterverkehrssparte der DB AG zurückgegriffen (DB AG 2005) und um den Marktanteil anderen Anbieter im Schienengüterverkehr ergänzt.
- Entsprechend dem Trend bis zum Jahr 2025 wurde die durchschnittliche Transportweite der Züge aus der VP 2025 bis zum Jahr 2030 fortgeschrieben. Hierdurch ergeben sich bis zum Jahr 2030 beim Kombinierten Verkehr Veränderungen in Höhe von +7 % und im konventionellen Ganzzug- und Einzelwagenverkehr von +29,5 %.

Bei einer ersten Berechnung der Fahrleistungen wurden Daten zu durchschnittlichen Nettozuggewichten aus der Studie "External Costs of Transport" von (IWW/Infras 2004) verwendet, die sich auf das Jahr 2000 bezogen. Diese Daten konnten jedoch nicht genutzt werden, da es der DB AG im Rahmen des Projektes MORA C (Krempel 2001) bis zum Jahr 2004 gelungen war, bei gleichbleibendem bzw. leicht steigendem Verkehrsaufkommen vor allem den Einzelwagenverkehr effizienter durchzuführen und die Zugkilometer gegenüber dem Jahr 2000 beträchtlich zu reduzieren.

Die durchschnittlichen Nettozuggewichte wurden über den gesamten Betrachtungszeitraum als konstante Größe angenommen. Dies wird damit begründet, dass durch die Maßnahmen keine Veränderung der Schieneninfrastruktur angenommen wurde, die es ermöglicht, die Zuglängen und damit die Nettozuggewichte zu erhöhen.

<sup>16</sup> Diese Angaben des Bahn-Umwelt-Zentrums der DB AG beruhen auf einer Auswertung von realen Zugdaten im Zeitraum 14. - 23. Kalenderwoche im Jahr 2007 (E-Mail vom 07.05.2009).

Auch bei der Binnenschifffahrt wurde für die Szenarioberechnung davon ausgegangen, dass diese bis 2030 keine über die in der VP 2025 bereits beschriebenen Verbesserungen hinausgehenden Veränderungen bei strukturellen oder technologischen Entwicklungen vollziehen wird. Analog zum Verkehrsträger Schiene sind keine Kapazitätseinschränkungen berücksichtigt, die sich ggf. bei Hafenanlagen oder Kapazitäten von Schleusen ergeben könnten. Basierend auf einer entsprechenden Kennziffer des Nettogewichts je Schiff ist den Berechnungen ein einheitlicher Auslastungswert zu Grunde gelegt worden. Daraus resultiert eine absolute Veränderung der Fahrleistung (Schiffskilometer) bei einer Veränderung des Verkehrsaufkommens.

### **2.2.2 Umsetzung der in Renewbility ausgewählten Maßnahmen**

Die Integration der ausgewählten Maßnahmen erfolgte durch die Anpassung der maßnahmenbezogenen Eingangsgrößen und Modellparameter. Die für den Güterverkehr wirksamen Maßnahmen sind in Tabelle 13 aufgeführt sowie deren Integration im Modell skizziert. Der Großteil dieser Maßnahmen wirkt auf die Transportkosten ein und führt dadurch zu einem veränderten Verkehrsaufkommen für jeden Verkehrsträger. Die durch einzelne Maßnahmen verursachten Kostenveränderungen (z. B. Kraftstoffkosten, Maut, Abschreibungen) ließen sich so genau abbilden, dass die bei der Modellierung verwendeten VISEVA-Parameter für jede Maßnahme neu bestimmt werden konnten.



Tabelle 13: Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für die Nachfragemodellierung im Güterverkehr

Maßnahmenpaket	Einzelmaßnahme	Integration in VISEVA-W/ VISUM
<b>Erhöhung der Kraftstoffpreise</b>	Verschiedene Stufen	Erhöhung der Kraftstoffkosten <sup>17</sup> (variable Betriebskosten)
<b>Kfz-Steuer Lkw</b>	Umstellung auf CO <sub>2</sub> -Basis	Veränderung der Betriebskosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>Lkw - Maut</b>	Mauterhöhung, Einbezug externer Kosten, Mautbonus, Ausweitung der Maut auf das gesamte Straßennetz	Veränderung der Betriebskosten (variable Fahrzeugkosten) Bemautung der Strecken in VISUM
<b>Förderung effizienter Lkw (Technologie-förderung)</b>	Subventionen beim Kauf effizienter Fahrzeuge	Reduzierung der Abschreibungen und Kapitalkosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für LNF</b>	CO <sub>2</sub> -Abgabe auf den Neupreis bei Grenzwertüberschreitung	Erhöhung der Abschreibungen und Kapitalkosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>BEV und PHEV</b>	Einführung von BEV und PHEV für LNF	Einführung neuer Antriebsvarianten für LNF
<b>Biokraftstoffe und andere alternative Kraftstoffe</b>	Quote bzw. Nachhaltigkeitsstandards	Erhöhung der Kraftstoffkosten
<b>25-Meter-Lkw</b>	Einführung eines Lkw mit höherer Volumenkapazität	Einführung einer neuen Fahrzeugklasse Integrierung eines neuen Fahrzeugtyps in die Fahrzeugwahl Veränderte Transportkosten für den Straßengüterverkehr
<b>Logistik-optimierung</b>	Einsatz von Logistik optimierenden Telematiksystemen	Anpassung der Fahrzeugauslastung und Anpassung des Leerfahrtenanteils

Dabei wurde erreicht, dass alle im Projekt notwendigen Anpassungsmöglichkeiten der Parameter durch Maßnahmen berücksichtigt sind. Im Einzelnen zählen dazu: die Transportkosten je Verkehrsträger als Summe fixer und variabler Kosten, Ladungs- und Leerfahrten, Fahrzeugklassen, Auslastung der Fahrzeuge sowie eine

<sup>17</sup> Die Vorgehensweise zur Bestimmung von Transportkosten ist in Kapitel 3 dokumentiert.

Differenzierung nach Wirtschaftszweig und teilweise nach Raumtypen<sup>18</sup>. Die Maut, differenziert nach Strecken- und Fahrzeugtyp, konnte in VISUM vollständig umgesetzt werden.

## **2.3 Bestimmung der zukünftigen Struktur der Fahrzeugneuzulassungen**

### **2.3.1 Struktur der Pkw-Zulassungen**

Im Kontext nachhaltiger Mobilität nimmt die Kaufentscheidung bei neuen Pkw einen hohen Stellenwert ein. Die Wahl eines bestimmten Fahrzeugs beim Neukauf beeinflusst unmittelbar den Erfolg der Einführung effizienterer Fahrzeugtechnologien und ist dafür entscheidend, wie sich die Umweltwirkungen in den folgenden Jahren entwickeln. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen von Renewbility ein ökonometrisches Modell entwickelt, das zur Abschätzung der zukünftigen Struktur der Neuzulassungen diene.

Die Basis für das ökonometrische Modell bilden detaillierte Neuzulassungsdaten für Deutschland der Jahre 1995 bis 2005 der R. L. Polk Germany GmbH. Die Daten enthalten die jährlichen Neuzulassungen auf der Ebene einzelner Modellversionen, d.h. nicht nur nach einzelnen Typen wie z. B. VW Golf, Opel Vectra oder Renault Megane differenziert, sondern auch nach Karosserieversionen wie z. B. Limousine oder Kombi und nach Motorisierungs- und Getriebeversionen. Für jede Version liegen technische Daten zu Größe, Gewicht, Motorleistung und Verbrauch sowie des Grundpreises vor. Für einige wenige Versionen enthielten die Daten lediglich die Zulassungszahl, jedoch keine technischen Daten. Im Falle von mehr als 5.000 Zulassungen wurden die Angaben mit Hilfe von Auto-Katalogen (ADAC) ergänzt bzw. aus ähnlichen Versionen abgeleitet.

Die Datenbasis wurde mit der detaillierten Datenbank des Kraftfahrt-Bundesamtes, wie sie für die Emissionsberechnung in TREMOD beim IFEU vorliegt, abgeglichen. Beide Datenbanken ergeben die gleichen jährlichen Gesamtsummen an Fahrzeugen und weisen auch hinsichtlich mittlerer technischer Kennwerte für einzelne Hubraumklassen keine nennenswerten Abweichungen auf.

Entscheidend für die erfolgreiche Erstellung eines Modells ist zum einen die Wahl des methodischen Ansatzes des Modells und zum anderen die Strukturierung der verwendeten Daten. Ausgehend von früheren Arbeiten des DLR-Instituts für Verkehrsforschung im Auftrag der Generaldirektion Umwelt der Europäischen Kommission (Mehlin et al. 2004), in denen mit dem gleichen Datensatz ähnliche Fragestellungen verfolgt wurden, und weiteren Veröffentlichungen (Berry 1994), wurde ein generalisiertes lineares Modell (GLM) mit einer logistischen Regression erstellt. Dieses baut auf sogenannten „Submodellen“ als Beobachtungseinheit auf. Zielgröße

---

18 Die Unterteilung nach Raumtypen konnte nur für leichte Nutzfahrzeuge umgesetzt werden.

ist hierbei nicht die absolute Zahl der Neuzulassungen, sondern der Anteil am Gesamtmarkt.

Der Modellansatz lautet wie folgt:

$$\ln[p/(1-p)] = \beta X$$

mit  $p$ : Anteil der Zulassungen

$X$ : ist eine  $n \times k$  Matrix für  $n$  Beobachtungen und  $k-1$  Variable plus Konstanten

$\beta$ : ist ein  $k \times 1$  Vektor der Koeffizienten

Der Neuwagenpreis fließt hierbei als logarithmische Variable ein, alle anderen Variablen in linearer Form.

Da das Ziel der Datenaufbereitung war, Fahrzeuge mit sehr ähnlichen Eigenschaften zu bündeln (andernfalls würden sie als unabhängige Beobachtungen gelten), wurde auf einen klassischen Ansatz der Gruppierung anhand der Antriebsarten Benzin und Diesel sowie nach Hubraumklassen verzichtet. Ein solcher Ansatz würde zwar Vorteile für die Kompatibilität mit anderen Forschungsarbeiten bieten, doch der Zusammenhang zwischen Hubraumgröße und Fahrzeuggröße hat sich in den vergangenen Jahren stark abgeschwächt. Unter anderem findet eine Konzentration bei bestimmten Motorgrößen statt wie z. B. bei ca. 2 l Hubraum für Dieselmotoren. Motoren dieser Größe werden im Rahmen von sogenannten Plattformstrategien oder Baukastenkonzepten fast über die gesamte Angebotspalette der Hersteller verwendet. Auch bei Benzinmodellen werden verstärkt Antriebe mit identischem Hubraum verwendet, die lediglich durch andere elektronische Einstellungen oder technische Details die unterschiedlichen Leistungsstufen abbilden. Ferner kann heute aus einem gegebenen Hubraum eine deutlich höhere Leistung generiert werden, als es noch vor zehn Jahren möglich war.

Daher wurde mit der Generierung und Anwendung von sogenannten „Submodellen“ ein deutlich feinerer und hinsichtlich Maßnahmengestaltung und der Ergebnisdarstellung bzw. Segmentierung ein deutlich variablerer Ansatz gewählt. Die Submodelle sind Aggregate, die die Fülle der Einzelversionen eines Fahrzeugmodells zusammenfassen, sich jedoch nach Antriebsart und Getriebevariante unterscheiden. Modelle mit unterschiedlichen Typenbezeichnungen, die lediglich eine andere Version bezeichnen, wurden ebenfalls zusammengefasst (z. B. Alfa Romeo 145 und 146 für drei- bzw. fünftürige Version). Viele Hersteller führen aus Marketinggründen andere Namen für erneuerte Modelle ein. Da diese aber die alten bezüglich der Marktpositionierung meist genau ersetzen, werden diese nicht als unabhängig betrachtet und daher in einem Submodell zusammengefasst (z. B. Volkswagen Jetta, Vento und Bora). Auf diese Weise wurden für den deutschen Markt rund 600 Submodelle generiert.

Für alle Submodelle wurde die jährliche Kfz-Steuer anhand der damals geltenden gesetzlichen Bestimmungen in den Datensatz integriert und die Kraftstoffkosten mit durchschnittlichen Jahrespreisen für Benzin und Diesel ermittelt. Die übrigen Variablen konnten anhand der technischen Daten im Datensatz erstellt werden.

Die Modellschätzung ergab die in Tabelle 14 dargestellten Koeffizienten, die das Ergebnis der Zusammenhänge aller einzelnen Submodelle wiedergibt. Die für das Projekt genutzten Variablen sind hochsignifikant und weisen das erwartete Vorzeichen auf. Das heißt, höhere Kosten führen zu geringeren Anteilen der Fahrzeuge (unter sonst gleichbleibenden Bedingungen). Für die Berechnung der Szenarien werden folgende Variablen genutzt, deren Veränderung sich dann aus den getroffenen politischen Maßnahmen bzw. aus den Varianten der Technologiedatenbasis ergeben:

- Neuwagenpreis
- jährliche Kfz-Steuer
- spezifische Kraftstoffkosten als Produkt aus spezifischem Verbrauch und Kraftstoffpreis

Tabelle 14: Koeffizienten und Signifikanzwerte des Pkw-Zulassungsmodells

	Koeffizient	Signifikanz p
<b>Neuwagenpreis</b>	-0,32999	0,000
<b>Kfz-Steuer</b>	-0,0024554	0,011
<b>Kraftstoffkosten je km</b>	-0,0060457	0,000
<b>Motorleistung</b>	0,0014905	0,558
<b>Hubraum</b>	0,0005553	0,000
<b>Fahrzeuggröße (Länge x Breite)</b>	0,000001	0,005
<b>Manuelle Schaltung</b>	0,973954	0,000
<b>Deutscher Hersteller</b>	1,51004	0,000
<b>Beobachtungen</b>		5007

Die Variablen für die Motorleistung, den Hubraum sowie die Fahrzeuggröße (Länge x Breite) weisen ebenfalls in die erwartete Richtung und signalisieren zunehmende Zulassungsanteile bei stärkeren und größeren Fahrzeugen (unter sonst gleichbleibenden Randbedingungen, also insbesondere konstantem Preis).

Die Variablen „Manuelle Schaltung“ und „Deutscher Hersteller“ wurden als Dummy-Variablen verwendet, die ebenfalls hochsignifikante Werte aufweisen. Mit der Variablen für die deutsche Herkunft des Fahrzeugs wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass es eine Präferenz der Käufer für deutsche Modelle mit deren charakteristischen technischen Eigenschaften gibt.

Um die Qualität des Modells zu zeigen, wurde die bisherige Entwicklung simuliert. Dabei sind die Submodelle zur Ergebnisdarstellung zu jeweils drei Segmenten für

Benzin und Diesel zusammengefasst worden. Wie in Abbildung 16 zu sehen, entsprechen die simulierten Ergebnisse recht gut den tatsächlichen Anteilen der Neuzulassungen.

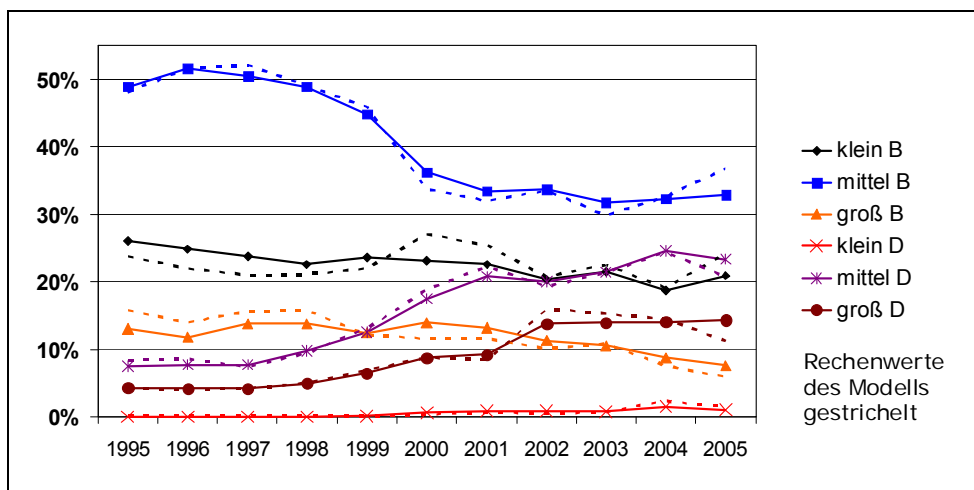


Abbildung 16: Vergleich der tatsächlichen Neuzulassungsanteile mit den im Modell simulierten Anteilen

Mit dem Modellansatz sind somit statistische Zusammenhänge aus den Jahren 1995 bis 2005 beschrieben, die für die Berechnung der zukünftigen Anteile im Rahmen der Szenarien genutzt werden. Die Bestimmung der Variablenwerte für die Simulationen in den Szenarien baut auf zwei Säulen auf:

- Zum einen ergeben sie sich aus den politischen Maßnahmen, wie sie während des Szenarioprozesses definiert wurden,
- zum anderen sind sie das Resultat der technischen Entwicklung auf der Angebotsseite (siehe Kapitel 3.2).

Aus beiden Quellen zusammengefasst leiten sich mittelbar oder unmittelbar geänderte Kosten bzw. Preise für die Anschaffung, den Unterhalt oder den Betrieb der Fahrzeuge ab. Zur Bestimmung der Anteile der unterschiedlichen Technologie-Varianten je Segment wurden hierzu mehrere Teilszenarien gerechnet, in denen jeweils alle Variablen konstant gehalten wurden und lediglich die Daten der unterschiedlichen Varianten eines Segments variiert wurden. Insbesondere durch ordnungspolitische Maßnahmen können auch Restriktionen für bestimmte Fahrzeuggruppen entstehen, wie z. B. absolute Emissionsgrenzwerte oder spezifische Obergrenzen bezogen auf das Gewicht oder einen Nutzenindikator. Die Vorgehensweise für diese Fälle ist der jeweiligen Maßnahmenbeschreibung im Teil 2 des Endberichts „Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse“ zu entnehmen.

### 2.3.2 Struktur der Lkw-Zulassungen

Ziel dieses Arbeitspakets war es, Aussagen über die Anteile der Fahrzeugalternativen, die in der Technologiedatenbasis enthalten sind, bezüglich der Gesamtzulassungen zu treffen. Hierfür wurde zunächst die Anzahl der neu zugelassenen Lkw und Sattelzugmaschinen bis zum Jahr 2030 nach Größenklassen differenziert für ein Basisszenario abgeschätzt und anschließend die Auswirkungen der Maßnahmen in den einzelnen Szenarien auf die Struktur dieser Fahrzeugzulassungen bestimmt. Die Struktur wurde durch die Anteile und die Zusammensetzung der Größenklassen und der Antriebskonzepte festgelegt. Um den unterschiedlichen Kraftstoffverbrauch und die Fahrleistungen der Fahrzeuge abbilden zu können, wurden die Lkw in fünf Fahrzeugklassen unterteilt:

- leichte Nutzfahrzeuge ( $< 3,5$  t zGG),
- leichte Lkw ( $\geq 3,5$  -  $< 7,5$  t zGG),
- nicht mautpflichtige schwere Lkw ( $\geq 7,5$  -  $< 12$  t zGG)
- schwere Lkw ( $\geq 12$  t zGG) und
- Sattelzugmaschinen (SZM).

Für die Analyse und Bestimmung der Lkw-Neuzulassungen (NZL) wurden ausgewählte Daten aus den amtlichen Statistiken des KBA von deutschen Lkw und Sattelzugmaschinen der Jahre von 1992 bis 2007 genutzt:

- Neuzulassungsstatistik (Reihe 1: Fahrzeugneuzulassungen Kraftfahrt-Bundesamt (a))
- Bestandsstatistik (Reihe 2: Fahrzeugbestand Kraftfahrt-Bundesamt (b))
- Ergänzt wurden die Zulassungs- und Bestandsdaten durch aufbereitete KBA-Statistiken des Verbands der Automobilindustrie (VDA 2008).
- Kraftverkehrsstatistik (Reihe 8: Kraftverkehr) zu Leistungsdaten des Güterkraftverkehrs deutscher Lastkraftfahrzeuge (Kraftfahrt-Bundesamt, Bundesamt für Güterverkehr).

Die Jahresfahrleistungserhebung 2002 (Hautzinger et al. 2005), enthält aufgeschlüsselt nach Haltergruppen oder Größenklassen die mittlere jährliche Fahrleistung der deutschen Lkw.

Die Technologiedatenbasis stellte Informationen über Minderverbräuche und Zusatzinvestitionen ausgewählter Effizienzsteigerungstechnologien für die Lkw-Größenklassen und Kraftstoffarten getrennt nach Jahren zur Verfügung. Maximal vier Fahrzeugvarianten wurden hierbei neben der Basisvariante unterschieden.

Um einen Ausgangswert für die Bestimmung der Strukturveränderungen zu erhalten, wurde zunächst die Gesamtanzahl der NZL bis zum Jahr 2030 bestimmt. Dies war notwendig, weil die Entwicklung der Neuzulassungen in keiner der vorliegenden Studien enthalten ist.

Zunächst sollte die Trendextrapolation durch ein ökonometrisches Modell erfolgen, in das sowohl die preisbereinigte Bruttowertschöpfung für Deutschland nach Wirtschaftszweigen als auch die Haltergruppen der NZL eingingen. Hierfür wurde eine Regressionsanalyse mit der Methode der kleinsten Quadrate (OLS – Ordinary Least Squares) vorgenommen. Für dieses Vorgehen sprach, dass mit nur zwölf Datenpunkten eine sehr geringe Anzahl an Beobachtungen vorlag und die abhängige Variable (Neuzulassungen) eine kontinuierliche Variable darstellte. Im Rahmen der Untersuchung wurden verschiedene Modellspezifikationen getestet, einschließlich linearer und nicht linearer Spezifikationen. So wurde z. B. ein Modell getestet, bei dem die Variable Zulassungsjahr quadratisch spezifiziert wurde. Schließlich wurde ein log-log-Ansatz gewählt, bei dem die erklärende Variablen (Bruttowertschöpfung, Zulassungsjahr) logarithmiert in die Modellrechnungen eingingen. Weitere, erklärende Variablen waren binäre Indikatoren, die Haltergruppe und das zulässige Gesamtgewicht der Fahrzeugklasse. Als abhängige Variable wurde die Anzahl der Neuzulassungen definiert.

Die Bestimmung der NZL mit Hilfe dieses Modellansatzes führte jedoch zu keinen verwertbaren Ergebnissen, so dass ein einfacherer Weg gewählt wurde.

Die Regressionsanalyse der Vergangenheitsdaten zeigte, dass der durchschnittliche Anstieg der NZL von 1960 bis 1996 mit annähernd derselben Steigung wie von 1991 bis 2007 erfolgte. Aus diesem Grund wurde eine weiter linear verlaufende Steigung bis zum Jahr 2030 angenommen und die Anzahl der NZL für das Lkw-NZL-Modell im Status quo mit 255 Tsd. Fahrzeugen und für die folgenden Jahren mit 270 Tsd. (2010), 284 Tsd. (2020) und 299 Tsd. (2030) Fahrzeugen festgelegt.



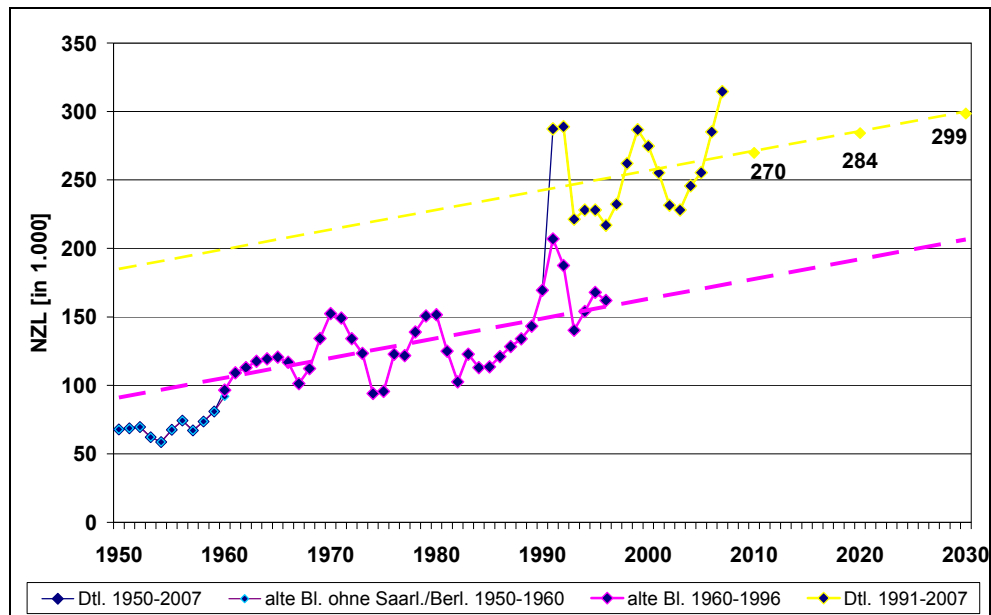


Abbildung 17: Trend der Lkw-Neuzulassungen bis 2030

In einem weiteren Schritt erfolgte die Fortschreibung der Anzahl an Neuzulassungen von Lkw und SZM nach den oben beschriebenen fünf Fahrzeugklassen und zwei Antriebsarten bis zum Jahr 2030. Mittels linearer und nicht-linearer Regression konnten anschließend die absoluten Lkw-NZL der fünf Größenklassen unter der Randbedingung der maximalen Gesamt-Lkw-NZL extrapoliert werden. Die Auswahl der geeigneten Regressionsgleichungen erfolgte nach dem Prinzip des größtmöglichen Bestimmtheitsmaßes.

Auf eine Bestimmung von Anteilen der im Projekt Renewbility möglichen alternativen Nutzfahrzeug-Antriebe (CNG – Compressed Natural Gas) wurde verzichtet. Hierfür waren die folgenden Gründe ausschlaggebend:

- Die Projektaufgabe bestand darin, eine einfache Abschätzung der Lkw-NZL bis 2030 durchzuführen. Die modellhafte Fortschreibung der Lkw-NZL ist vergangenheitsbasiert und antizipiert die Zukunft, indem sie davon ausgeht, dass sich die Verhältnisse der Rahmenbedingungen für die Fahrzeug-Typen untereinander nicht ändern. Somit kam es mit dieser Bestimmungsmethode zu beträchtlichen NZL von CNG-Fahrzeugen, insbesondere bei den LNF.
- Die Shell-Studie (vgl. Shell 2009) geht für 2030 von 2 % und in einem höheren Szenario von 3 % CNG-Anteil im Personenverkehr aus. Eine Übertragung auf den Lkw-Bereich ist nur für die LNF möglich, für die 2 - 3 % bereits eine beachtliche Größe darstellen würde.



- Erdgas als Ausgangsstoff des CNG ist ein fossiler Brennstoff, dessen staatliche Förderung ausläuft und in naher Zukunft endet, so dass diesem Kraftstoff nur eine – wenn auch große – Nischenrolle bleibt.
- Anhand von Vergleichsrechnungen mit Fahrzeug-Daten der Technologie-Datenbank konnte gezeigt werden, dass CNG-Fahrzeuge nur für das Jahr 2010 ab 84.000 km ggü. dem Dieselantrieb günstiger werden würden. Dies entspräche 5.000 Lkw-NZL (= 2,75 % der LNF-Lkw-NZL; zum Vergleich 2005: 2.223 Fz. = 1,3 %). Der Punkt der Kostengleichheit erhöht sich im Basis-Szenario bis zum Jahr 2030 auf eine Jahresfahrleistung von 100.000 km. Im Szenario „Klimaschutz im Verkehr“ ist der CNG-Antrieb zu keiner Zeit kostengünstiger als der Dieselantrieb, da entweder andere Diesel-Alternativen günstiger sind oder sich die Fahrzeugkosten bedingt durch den hohen CNG-Kraftstoffpreis immer weiter voneinander entfernen.

Tabelle 15 gibt die Ergebnisse der Trendfortschreibung getrennt nach Größenklassen für den Status quo des Jahres 2005 und die Fortschreibungsjahre 2010, 2020 und 2030 wieder.

Tabelle 15: Trendfortschreibung von Lkw und SZM nach Größenklassen

Jahr	<3,5 t	3,5 - 7,5 t	7,5 - 12 t	≥12 t incl. GLZ	SZM
2005	170.926	21.838	8.288	21.881	32.460
2010	181.507	20.753	8.427	21.201	38.275
2020	187.338	16.969	11.127	19.235	48.903
2030	191.423	14.318	13.827	17.856	58.128

Die Abschätzung der Strukturveränderungen innerhalb der Größenklassen aufgrund der in den Szenarien wirkenden Maßnahmen erfolgt mit Hilfe eines statischen Kostenmodells auf Kalkulationsbasis der Fahrleistung. Dieses differenziert nach max. vier Fahrzeugvarianten je Größen-Klasse (siehe Technologiedatenbank Kapitel 3.4 und 3.5) und nutzt als Eingangsgrößen fixe und variable Betriebskosten.

Als fixe Betriebskosten gehen die Zusatzinvestitionen zum Erreichen der Effizienzsteigerung über die jährlichen Abschreibungen, die Kapitalkosten und die Kraftfahrzeug-Steuer in das Modell ein. Das Kostenmodell vernachlässigt nachträgliche Umbaumaßnahmen von neu zugelassenen Fahrzeugen. Ein Wechsel der Kaufentscheidung von Diesel zu CNG wird nicht abgebildet.

Als variable Betriebskosten werden die Treibstoffkosten über die Parameter Kraftstoffverbrauch und Treibstoffpreis sowie die Mautgebühren über den Mautsatz und den Mautanteil berücksichtigt. Eine Mautspreizung für unterschiedlich effiziente Fahrzeuge wird im Rahmen des Projektes nicht berechnet.

Durch Gegenüberstellung der relevanten Kosten- und Nutzenveränderungen der einzelnen Fahrzeugalternativen werden die Rentabilitätsschwellen bestimmt (vgl. Abbildung 18). Hierfür wird zunächst die minimale Kostenfunktion ( $K_{12}$ ) aller Fahrzeugvarianten (Var 1 / Var 2) in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung ( $x$ ) bestimmt. Anschließend werden die Schwellenwerte ( $x_{12}$ ) ebenfalls in Abhängigkeit der Fahrleistung als Übergang von einer Fahrzeugalternative zur nächsten berechnet.

Die Anzahl der neu zugelassenen Fahrzeuge einer Variante ergibt sich schließlich als Fläche unter der Häufigkeitsfunktion (NZL) der Neuzulassungen in Abhängigkeit der Schwellenwerte ( $x_{12}$ ). Es handelt sich hierbei um eine Maximalanzahl an Fahrzeugen, da die Modellannahme  $\Delta \text{Kosten} \leq \Delta \text{Nutzen}$  zu einer positiven Kaufentscheidung führt.

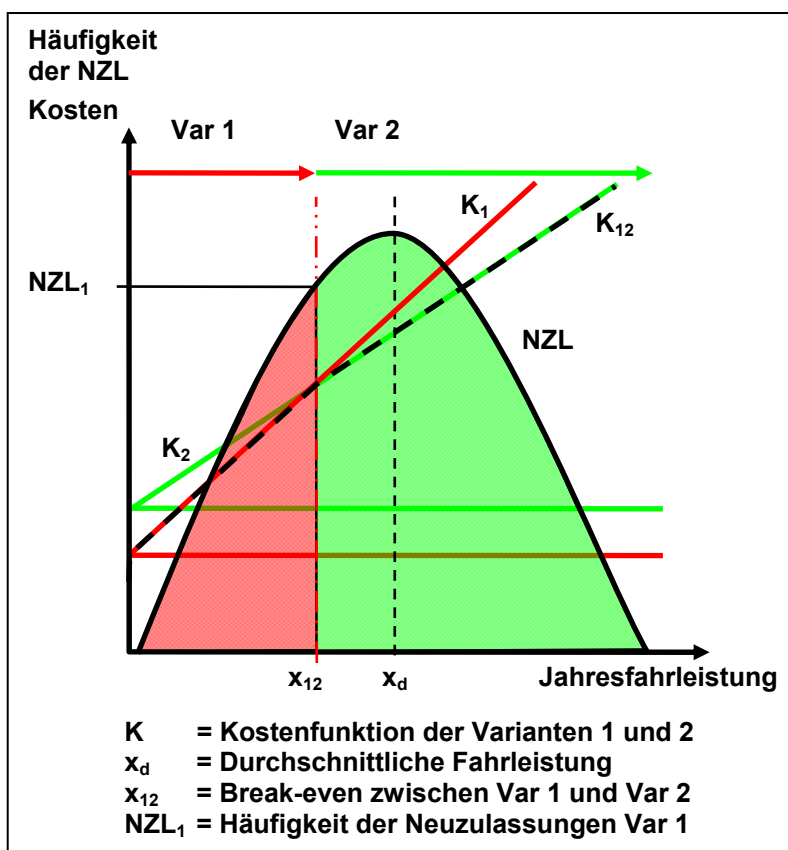


Abbildung 18: Bestimmung von Rentabilitätsschwellen

Eine weitere Modellannahme ist die Zahl der Neuzulassungen als normalverteilte Funktion der Jahresfahrleistung. Da eine größenklassenabhängige Standardabweichung nicht vorlag, wurde in Höhe von  $SD = 37.667$  km diejenige über alle Größenklassen gewählt. Als durchschnittliche Jahresfahrleistung gehen die in der folgenden Tabelle aufgeführten Werte aus der Fahrleistungserhebung in die Modellrechnung ein.

Tabelle 16: Durchschnittliche Jahresfahrleistung der Fahrzeugklassen

Fahrzeugklasse	durchschnittliche Jahresfahrleistung [km]
<3,5 t	19.489
3,5 - 7,5 t	22.458
7,5 - 12 t	32.744
>12 t	48.003
<b>SZM/GLZ</b>	<b>90.871</b>

Quelle: Vgl. Hautzinger et al. (2005).

Die Fahrzeugklasse der schweren Lkw (>12 t zGG) werden sowohl als Solo-Lkw wie auch vor Gliederzügen (GLZ) als Motorwagen eingesetzt und weisen damit ein ähnliches Einsatzspektrum wie SZM auf, wobei der Verbrauch jedoch um ca. 5 % höher liegt. Der Einsatzanteil der NZL >12 T zGG in GLZ beträgt ca. 69 %<sup>19</sup> und wird im weiteren Verlauf in der Fahrzeugklasse der SZM mit berücksichtigt.

---

<sup>19</sup> Berechnung nach Daten aus Kraftfahrt-Bundesamt, Bundesamt für Güterverkehr.

Tabelle 17: Maßnahmen aus den Szenarien mit Relevanz für das Lkw-Neuzulassungsmodell

Maßnahmenpaket	Einzelmaßnahme	Integration im Lkw-NZL-Modell
<b>Erhöhung der Kraftstoffpreise</b>	Verschiedene Stufen	Erhöhung der Kraftstoffkosten (variable Betriebskosten)
<b>Kfz-Steuer Lkw</b>	Umstellung auf CO <sub>2</sub> -Basis	Veränderung der Betriebskosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>Lkw- Maut</b>	Mauterhöhung, Einbezug externer Kosten, Mautbonus, Ausweitung der Maut auf das gesamte Straßennetz	Veränderung der Betriebskosten (variable Fahrzeugkosten)
<b>Förderung effizienter Lkw (Technologieförderung)</b>	Subventionen beim Kauf effizienter Fahrzeuge	Reduzierung der Abschreibungen und Kapitalkosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für LNF</b>	CO <sub>2</sub> -Abgabe auf den Neupreis bei Grenzwertüberschreitung	Erhöhung der Abschreibungen und Kapitalkosten (fixe Fahrzeugkosten)
<b>BEV und PHEV</b>	Einführung von BEV und PHEV für LNF	Einführung neuer Antriebsvarianten für LNF
<b>Biokraftstoffe und andere alternative Kraftstoffe</b>	Quote bzw. Nachhaltigkeitsstandards	Erhöhung der Kraftstoffkosten
<b>25-Meter-Lkw</b>	Einführung eines Lkw mit höherer Volumenkapazität	Einführung einer neuen Fahrzeugklasse

### 3 Technologiedatenbasis

#### 3.1 GEMIS als Datenbasis und Stoffstrom-Werkzeug

Um Lebensweganalysen praktisch durchzuführen, muss eine große Datenmenge erhoben und verarbeitet werden, die auch geographische Unterschiede der Vorketten, Brennstoffqualitäten, Transportentfernungen usw. umfasst.

Das Öko-Institut verfügt mit dem Computermodell GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) seit 1989 über eine für diese Fragen spezialisierte Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung von Umwelt- und Kostenaspekten im Energie-, Stoff- und Verkehrssektor, die zu Projektbeginn in der Version 4.3 vorlag und im Rahmen von Renewability zur Version 4.6 weiterentwickelt wurde.

GEMIS ist ein kostenloses, öffentlich verfügbares EDV-Modell mit integrierter Datenbank, das kontinuierlich weiterentwickelt, aktualisiert und ergänzt wird<sup>20</sup>.

Alle Produkt- und Prozessinformationen sind in GEMIS transparent und disaggregiert enthalten, und auch die generelle Nachvollziehbarkeit ist unabhängig vom Modell über die von UBA und Öko-Institut gemeinsam betriebene Internet-Datenbank ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementinstrumente) gegeben<sup>21</sup>.

#### Der Datenumfang von GEMIS

Der aktuelle Datenbestand in GEMIS 4.6 umfasst inklusive der im Projekt entwickelten Technologiedatenbasis mehr als 12.500 Prozesse und über 1.500 Produkte aus ca. 70 Ländern. Für fossile Energieträger sind ca. 3.000 Prozesse gespeichert, für regenerative Energieträger (ohne Biomasse) ca. 500 und für Biokraftstoffe (inkl. Vorketten) ca. 2.000 Prozesse.

So bildet die im Rahmen des Forschungsprojekts Renewability entwickelte Technologiedatenbasis, auf Basis des aktuellen internationalen Wissensstandes, alle relevanten Verkehrsträger und Antriebstechnologien für den Zeitraum von 2005 bis 2030 ab. Um eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus' zu ermöglichen, werden neben den direkten Effekten (Emissionen und Kosten) auch vor- bzw. nachgelagerte Prozesse wie Herstellung und Entsorgung bilanziert und entsprechende Angaben zu Materialbedarfen in der Technologiedatenbasis erfasst. Die Grundlagen und Auswertungen, auf denen die Technologiedatenbasis Verkehrsträger beruhen, sind im Folgenden erläutert und dokumentiert. Daran schließen sich die Kraftstoffe und Energieträger an.

20 Dies erfolgt im Rahmen von F&E-Vorhaben für eine große Anzahl von Institutionen – darunter BMBF, BMU, BMELV, UBA, EU-Kommission, GTZ, US-DOE und Weltbank.

21 ProBas wird kontinuierlich aktualisiert und verbessert (vgl. [www.probas.umweltbundesamt.de](http://www.probas.umweltbundesamt.de)).

### 3.2 Technologiedatenbasis Pkw

Die Datengenerierung erfolgt auf der Basis von Literaturwerten für folgende In- und Output-Gruppen bezogen auf das Basisjahr 2005:

- Kraftstoffverbrauch (Energiebedarf)
- Emission (NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NMHC, CH<sub>4</sub>, CO, PM<sub>10</sub>)
- Materialeinsatz
- Zusatzkosten

Eine besondere Rolle spielt die Fahrzeugdefinition, da hiervon die konkreten Daten für alle betrachteten In- und Output-Gruppen abhängen.

Das Fahrzeug wird nach:

- Größenklasse und
- Antriebsart definiert.

Die Datenbasis, hier vor allem Effizienzsteigerungsraten und deren Kosten, wurden in drei Experten-Workshops mit Teilnehmern aus Automobilindustrie und Wissenschaft diskutiert.

#### Größenklasse

Die Definition der Größenklassen, die sich typischerweise durch Nutzungsweisen und eingesetzte Technologien unterscheiden, erfolgt für das Jahr 2005 für Pkw gemäß der Studie (TNO 2006), bei der die verschiedenen Fahrzeugsegmente nach Polk auf die drei Größenklassen klein, mittel und groß aufgeteilt werden (Tabelle 18).

Tabelle 18: Aufteilung der POLK-Pkw-Segmente auf die drei Größenklassen klein, mittel und groß

POLK	TNO/Renewability
Mini	Klein
Kleinwagen	
Untere Mittelklasse	Mittel
Mittelklasse	
Obere Mittelklasse	Groß
Oberklasse	
Sportwagen	
Kleine Nutzfahrzeuge	
Off-Road	
Van	

Eine Auswertung für die in Deutschland im Jahr 2005 neu zugelassenen Pkw ergibt die in der Tabelle 19 angegebenen durchschnittlichen Spezifikationen für die einzelnen Größenklassen im Basisjahr.

Tabelle 19: Mittelwerte für verschiedene Spezifikationen nach Größenklasse und Antriebstechnologien bezogen auf das Jahr 2005

	Einheit	Benzin			Diesel		
		Klein	Mittel	Groß	Klein	Mittel	Groß
CO <sub>2</sub>	g/km	146,8	181,4	242,8	116,4	153,8	205,3
Leergewicht	kg	1.043	1.261	1.609	1.067	1.384	1.808
Motorleistung	kW	54	90	165	50	88	129
Hubraum	cm <sup>3</sup>	1.248	1.724	2.975	1.265	1.884	2.623
Fläche	m <sup>2</sup>	6,4	7,6	8,4	6,1	7,9	8,7
Neupreis	€	12.863	21.823	43.456	14.270	23.858	38.907

Quelle: Polk-Neuzulassungsdaten 2005

## Antriebsarten

Die Antriebsart ist definiert durch die Konversionstechnik. Das bedeutet, dass zwischen Otto-, Dieselmotor, Brennstoffzelle und Elektromotor unterschieden wird. Die Fahrzeuge, die mit gasförmigen Kraftstoffen betrieben werden, wie Erdgasfahrzeuge oder Fahrzeuge mit H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor, werden in der fahrzeugseitigen Technologiedatenbasis separat betrachtet, da vor allem die zusätzlichen Kosten gegenüber dem benzinbetriebenen Otto-Motor nicht vernachlässigbar sind.

## Fahrzyklen

Die Emissionen und Kraftstoffverbräuche von Fahrzeugen hängen maßgeblich von den zu Grunde gelegten Fahrzyklen ab. Im Rahmen von Renewbility werden der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen der Pkw entsprechend TREMOD auf Basis des „Handbuchs für Emissionsfaktoren“ getrennt für die Straßenkategorien „innerorts“, „außerorts“ und „Autobahn“ generiert und in die Datenbank eingegeben (HBEFA 2004). Rechtlich vorgeschriebener Fahrzyklus ist der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), in dem die offiziell angegebenen Kraftstoffverbräuche bestimmt werden. Die Verbräuche, die in TREMOD angenommen werden, basieren auf mehreren verschiedenen Fahrsituationen und wurden in weiteren Fahrzyklen, wie dem Common Artemis Driving Cycle (CADC) oder dem Bundesautobahnzyklus ermittelt. Zum einen wird damit dem Versuch Rechnung getragen, möglichst reale Verbräuche und Emissionen zu modellieren, und zum anderen ist es so möglich, zwischen innerorts, außerorts und Autobahn-Fahrten zu unterscheiden. Gewichtet werden diese Fahrten dann entsprechend den Annahmen zu den Fahrleistungen in den einzelnen

Straßenkategorien differenziert nach Antriebsart, Größenklasse und Alter der Fahrzeuge in TREMOD. Das hat unter anderem zur Folge, dass die Kraftstoffverbräuche und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit knapp 7 % höher liegen, als im NEFZ angegeben. Grundsätzlich stellt dies jedoch kein Problem dar, da die Effizienzsteigerungsraten der verschiedenen Technologien immer relativ angenommen werden. Bei Minderungstechnologien, die unterschiedlich stark in den verschiedenen Fahrzyklen wirken, wird dies entsprechend berücksichtigt (z.B. Start/Stopp vor allem innerorts oder Luftwiderstandsoptimierung vor allem auf der Autobahn). Im Folgenden werden zur besseren Vergleichbarkeit mit den offiziellen NEFZ-Daten die TREMOD-Werte um etwa 7 % reduziert angegeben.

### 3.2.1 Fahrzeugvarianten

#### Basis-Pkw

Die Basis-Variante stellt ein in einem bestimmten Jahr neu zugelassenes durchschnittliches Fahrzeug einer bestimmten Größenklasse dar. Für das Basisjahr 2005, für das reale Zulassungsdaten vorliegen, kann es entsprechend den CO<sub>2</sub>-Emissionen in Tabelle 19 charakterisiert werden. Dieses Fahrzeug hat kein reales Pendant, sondern entspricht einem Durchschnitt, der in dieser Größenklasse neu zugelassenen Fahrzeuge. Der Basis-Pkw wird zunächst basierend auf der EU-Richtlinie zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen der neu zugelassenen Pkw fortgeschrieben. Das bedeutet für die in Deutschland neu zugelassenen Pkw im Jahr 2015 durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen von 141 g/km zuzüglich 7 g/km für die sogenannten Eco-Innovationen. Nach dem Jahr 2015 wird dann der Trend, der von 1998 und 2007 beobachtet werden konnte, fortgeschrieben. Das führt zu in einer weiteren CO<sub>2</sub>-Minderung von 1 % pro Jahr. Des Weiteren wird angenommen, dass ab etwa 2012 Otto- und Diesel-Pkw im Durchschnitt etwa gleich hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen. Dieser Verlauf dient in Renewbility als Ausgangswert für die Basis-Varianten.

#### Pkw-Varianten

Als szenariounabhängige Varianten zu den Basis-Fahrzeugen waren zunächst prospektive Realfahrzeuge vorgesehen, d.h. Fahrzeuge, die mit bestimmten Technologien ausgestattet sind ohne Berücksichtigung ihrer möglichen Verbreitung (die in den Szenarien definiert wird). Diese Fahrzeug-Varianten sind notwendig, um das über den Trend hinaus Machbare und die damit verbundenen Kosten bei der Minderung verkehrsbedingter Stoffströme unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. rechtlichen Regelungen, Energiepreise) zu bestimmen. In diesen Varianten sollen Technologien zur spezifischen Kraftstoffverbrauchsreduktion hinterlegt werden, die es gleichzeitig ermöglichen, die Spezifikationen wie Leistung etc. je Größenklassen beizubehalten. Es werden in der Fahrzeugkategorie Pkw pro Antriebsart Otto und Diesel jeweils vier verschiedene Varianten mit unterschiedlich hoher Effizienzsteigerung und den entsprechenden Kosten betrachtet.



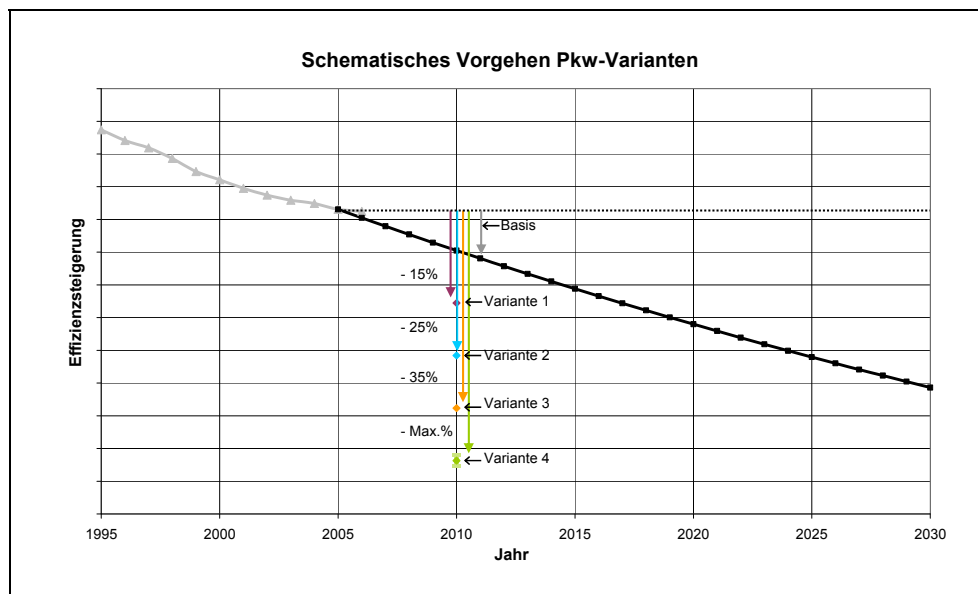


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Varianten-Entwicklung (Quelle: Öko-Institut)

Die Ausgestaltung der Varianten vor allem bezogen auf die Effizienzsteigerungsraten und die damit zusammenhängenden Zusatzkosten wurde im Rahmen eines ersten Experten-Workshops zu Antrieben und Fahrzeugeffizienz im Dezember 2006 intensiv diskutiert. Ergebnis war vor allem, dass von den Teilnehmern im Konsens angeregt wurde,

1. bezüglich der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale Cluster (geringe, mittlere, hohe und maximale Effizienzsteigerung) für die Pkw-Varianten technologieunspezifisch zu bilden und nicht die zunächst angedachten prospektiven Realfahrzeuge zu verwenden und
2. für diese unterschiedlichen Effizienzsteigerungsraten von den Teilnehmern Kostenvorschläge abzufragen.

Dieses Vorgehen begründet sich neben der Schwierigkeit der Prognose bis 2030 vor allem damit, dass von den verschiedenen Herstellern unterschiedliche Strategien zur Effizienzsteigerung verfolgt werden, so dass es schwierig ist, sich im Rahmen des Projektes detailliert auf bestimmte Verteilungen von Technologien in den Varianten festzulegen. Entsprechend wurden plausible Minderungsraten für die einzelnen Varianten abgeleitet. Auf deren Basis wurden in persönlichen Gesprächen oder per Telefon mit den Herstellern die Einschätzungen zu den verschiedenen Effizienzsteigerungsraten, deren ungefähren Kosten und den möglichen Technologien zu deren Realisierung diskutiert. Nahezu einstimmig wurde vorgeschlagen, die Kosten aus der Studie "Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars"/Brüssel 2006 (TNO 2006) zu übernehmen. Begründet wurde dies unter anderem

damit, dass es sich hierbei um eine Studie handelt, die in einem sehr aufwendigen Prozess über ACEA abgestimmt wurde und damit auch innerhalb der einzelnen Unternehmen bereits Konsensfähigkeit besitzt. Zusammengefasst war der grundsätzlicher Tenor damit, dass die TNO-Studie als Basis zur Kostenabschätzung herangezogen werden sollte, da sie ein klares und transparentes Vorgehen erlaubt und auf Grund der Anerkennung durch die ACEA auch über den notwendigen Konsens bei den Automobilherstellern verfügt.

### **3.2.2 Konventionelle Otto- und Diesel-Pkw**

#### **Kraftstoffverbrauchsreduktion**

In der TNO-Studie werden Kosten für effizientere Pkw für das Jahr 2012 abgeleitet (TNO 2006). Ausgegangen wird von verschiedenen Technologien zur Effizienzsteigerung, deren Effizienzsteigerungspotenzialen und den zugehörigen Kosten. Abgeleitet wurden diese auf Basis von Literaturauswertungen und Herstellerbefragungen. Diese Technologien wurden differenziert für die drei Pkw-Größenklassen und nach Antriebsart Otto/Diesel zu einer Vielzahl von theoretisch möglichen Technologiepaketen gebündelt. Es wurden je Größenklasse über 1000 Technologiepakete mit entsprechenden Minderungspotenzialen und Zusatzkosten generiert und in einem Kosten-CO<sub>2</sub>-Minderungsdiagramm als Punktwolken abgebildet (siehe auch Abbildung 20). Durch diese Punktwolken wurden dann Kostenkurven gelegt. Die Unsicherheit bei den TNO-Kosten liegt in der Punkteschar aus theoretisch möglichen Technologiepaketen und den damit verbundenen Kosten. Die Anpassung der Kostenkurven an die Punkteschar erfolgt in der Art, dass 2/3 der Punkte links und 1/3 rechts von der Kurve liegen. Da jeder Minderungs-Kosten-Punkt für ein reales Technologiepaket steht, müsste eigentlich von der Berücksichtigung der kosteneffizientesten Kostenpunkte ausgegangen werden. Andererseits wurden die prozentualen Effizienzsteigerungsraten der Einzelmaßnahmen in den Technologiepaketen das Produkt von (1 minus Effizienzsteigerung in %) für n Technologieoptionen gebildet und keine Wechselwirkungen der verschiedenen Technologien untereinander berücksichtigt, so dass dadurch eine geringere CO<sub>2</sub>-Reduktion pro angenommener Kosten entstehen kann.

#### **Kosten für 2010**

Die Kostenkurven, die entsprechend dem Vorgehen in Renewbility auch nach kleinen, mittleren und großen Otto- und Diesel-Pkw differenziert betrachtet werden, können für das Jahr 2010 grundsätzlich direkt übernommen werden. Bei allen Kosten handelt es sich um die zusätzlichen Kosten für den Hersteller. In TNO (2006) wird als Umrechnungsfaktor für die Verbraucherpreise 1,44 verwendet, der im Rahmen von Renewbility entsprechend übernommen wird. Verschiedenen CO<sub>2</sub>-Minderungsraten werden über eine in TNO (2006) veröffentlichte Funktion Kosten zugeordnet. Das Vorgehen zur Ableitung der Kosten für die einzelnen Pkw-Varianten zeigt die Abbildung 20 am Beispiel eines Otto-Pkw mittel.

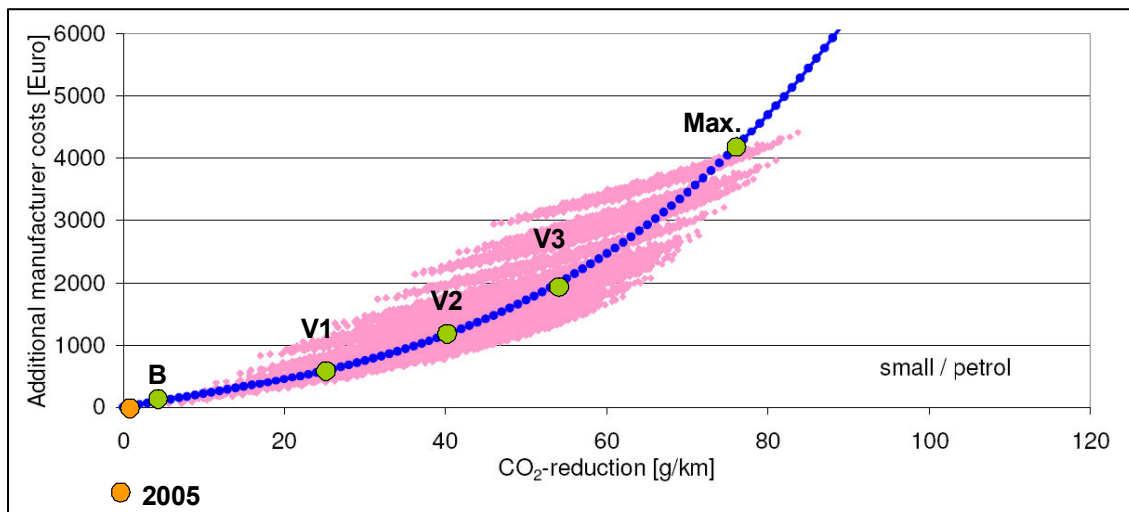


Abbildung 20: Schematisches Vorgehen zur Bestimmung der Kosten am Beispiel der Pkw-Variante Otto-mittel (in Anlehnung an TNO 2006)

Zu berücksichtigen ist, dass in TNO (2006) die Kostenkurven basierend auf das Jahr 2002 abgeleitet wurden. Das Bezugsjahr in Renewability ist jedoch 2005. Das heißt, dass möglicherweise bereits verschiedenen Effizienzsteigerungstechnologien zwischen 2002 und 2005 eingesetzt wurden und damit berücksichtigt werden muss, dass keine der Technologien doppelt angerechnet wird. Daher werden die Kosten für die einzelnen Varianten zwischen 2002 und 2005 von den aus der Kostenkurve abgeleiteten Kosten abgezogen. Die Abbildung 21 zeigt dieses Vorgehen schematisch.

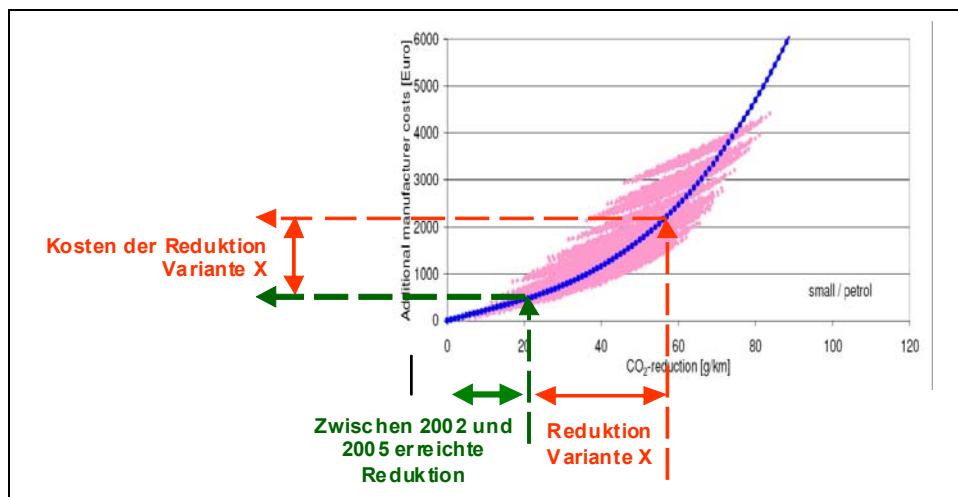


Abbildung 21: Vorgehen zur Kostenberechnungen unter Berücksichtigung der zwischen 2002 und 2005 bereits geleisteten Kraftstoffminderung (in Anlehnung an TNO 2006)

Im Rahmen eines zweiten Experten-Workshops wurde dieses Vorgehen grundsätzlich von allen Beteiligten akzeptiert, auch wenn die Meinungen über die Kosten der TNO-Studie differierten.

Die Anwendung der TNO-Kostenkurven im Rahmen von Renewbility birgt wegen des technologieunabhängigen Ansatzes einige offene Punkte, die nicht evident über die Kostenkurven abgebildet werden können:

1. Im Rahmen des Expertenworkshops wurde die Marktfähigkeit der Maximalvarianten (Variante 4) für das Jahr 2010 diskutiert und wurde entsprechend überprüft.
2. Ein weiterer Punkt war die Frage, wie für den Zeitraum nach 2012 weiter verfahren wird, da zum einen Lernkurveneffekte die Kosten senken und zum anderen Technologieverbesserung die Effizienz weiter steigern können.
3. TNO differenziert wegen der technologieunabhängigen Effizienzsteigerungspakete nicht nach IO/AO/AB.
4. Die Technologieunabhängigkeit des Ansatzes in TNO verhindert auch eine Quantifizierung des möglicherweise veränderten Werkstoffeinsatzes. Da im Rahmen der Stoffstromanalyse auch Materialflüsse betrachtet werden, wurden für die einzelnen Pkw-Varianten entsprechende Technologieinformationen benötigt.

Die Effizienzsteigerungsraten der Pkw-Varianten 1-4 wurden daher zunächst mit jeweils drei konkreten Technologiemixen hinterlegt. Dieses Vorgehen ermöglichte zum einen die in Renewbility notwendige Differenzierung nach Fahrsituationen und die Ableitung von Materialflüssen. Zum anderen ist es transparenter und nachvollziehbarer, auf spezifische Technologien Lernkurveneffekte bis 2030 anzuwenden, auch wenn diese abschließend in den Technologiepaketen wieder zusammengeführt werden. Die folgende Abbildung zeigt dieses Vorgehen schematisch.

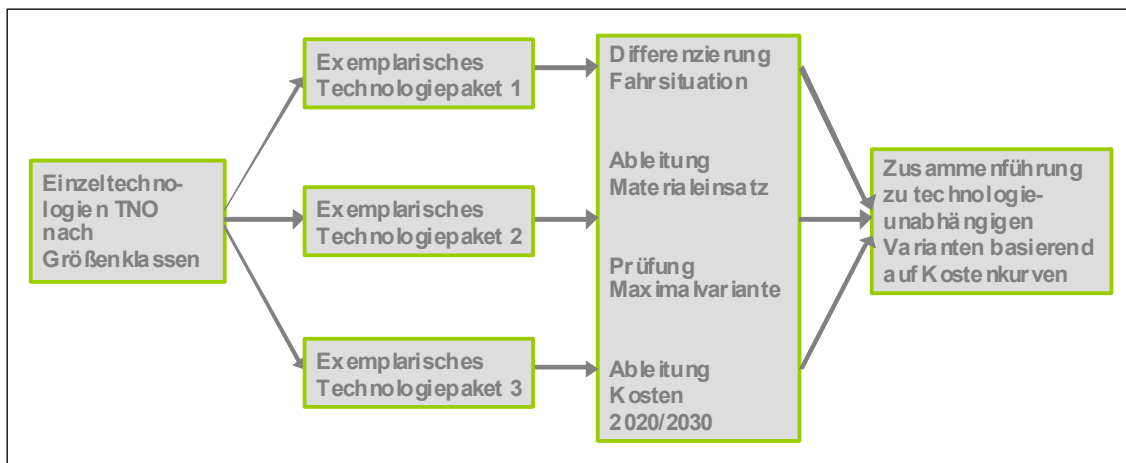


Abbildung 22: Schematische Darstellung zum Vorgehen über TNO (2006) hinaus (Quelle: Öko-Institut)

In einem ersten Schritt wurde anhand der exemplarischen Technologiepakete überprüft, inwiefern verschiedene Minderungsraten plausibel und theoretisch marktfähig sind. Die Auswertung hat ergeben, dass sich grundsätzlich alle Minderungsraten, die innerhalb der Punktwolken liegen, mit den in TNO (2006) angegebenen Technologien theoretisch realisieren lassen. Da aber bis zum heutigen Zeitpunkt für die Variante 4 – also die Maximalvariante – keine derartigen Fahrzeuge angekündigt wurden, ist mit einem Angebot dieser Variante bis 2010 nicht zu rechnen. Daher wird die Variante 4 für das Jahr 2010 nicht mit in die Technologiedatenbasis aufgenommen.

### **Kosten bis 2030**

In der TNO-Studie wurden die Kostenkurven für das Jahr 2012 modelliert. Daher mussten im Rahmen von Renewability die Kosten der unterschiedlichen Effizienzsteigerungsgrade für die Jahre 2020 und 2030 entsprechend abgeleitet werden. Eine bewährte Möglichkeit zur transparenten und methodisch einheitlichen Beschreibung von Kostenentwicklungen unterschiedlicher Technologien ist die Lernkurvenmethodik. Hierbei wird von bekannten Investitionskosten zu einem bestimmten Startzeitpunkt ausgegangen und auf deren Basis die Kosten zu einem späteren Zeitpunkt abgeschätzt. Bei der Lernkurvenmethodik handelt es sich um die bestmögliche Vorgehensweise, Kostenentwicklungen für die Zukunft abzuschätzen. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass es sich dabei nicht um exakte Prognosen für zukünftige Kosten handelt; nicht oder nur unzureichend abgebildet werden können politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen, die zum Teil massiven und auch sprunghaften Einfluss auf die Kostenentwicklungen nehmen können.

Allgemein formuliert beschreiben Lernkurven den Kostenverlauf eines Produktes über einen bestimmten Zeitraum. Hierbei wird von einer fixen relativen Kostendegression,

dem Degressionsfaktor, eines Produktes bei jeder Verdopplung der kumulierten Produktanzahl ausgegangen.

Berechnet wird die Degressionskurve nach der folgenden Formel:

$$C_2/C_1 = (P_2/P_1)^{(\log f / \log 2)}$$

mit

- $C_1$  – Kosten der Technologien zum Zeitpunkt 2010: Hier wurden die Technologiekosten der TNO-Studie verwendet. Diese ist zwar auf das Jahr 2012 ausgelegt, im Rahmen der Ungenauigkeiten bei Kostenabschätzungen können die Kostenkurven für das Jahr 2010 trotz der zwei Jahre Differenz verwendet werden.
- $C_2$  – Kosten der Technologien zum Zeitpunkt  $t_2$ : Hierbei handelt es sich um die zu ermittelnde Größe, also die Kosten der verschiedenen Pkw-Varianten für die Jahre 2020 und 2030.
- $f$  – Degressionsfaktor: Im Bereich Pkw gibt es nur wenige Studien zu Degressionsfaktoren bei der Pkw-Produktion. Bei IEA (2007) werden für Hybrid- und Plug-In-Fahrzeuge hauptsächlich bezogen auf die Batterien Faktoren von 0,80 angegeben. Abernathy/Wayne (1974) analysiert die Produktionslinie des Ford Model T. Vom Zeitpunkt seiner Einführung 1909 bis zu seiner Ablösung im Jahr 1927 konnte im Zuge der kumulierten Produktion eine deutliche Kostensenkung mit einem Degressionsfaktor von 0,85 erreicht werden. Eine der ausführlichsten Analysen zu Lernkurven ist in Ghemawat (1985) zu finden. Im Mittel über 97 untersuchte Technologien ergibt sich eine Rate von 0,85. Becker et al. (1996) gibt für den Produktionszweig "Pkw" eine Rate von 86 % und damit einen Degressionsfaktor  $f$  von 0,86 an. Dieser Wert liegt innerhalb des in den vorhandenen Studien angegebenen Wertebereichs und wurde daher für die Berechnungen der Kostendegression verwendet.
- $P_1$  und  $P_2$  – Kumulierte Produktionsmenge zum Zeitpunkt 2010 bzw. 2020/2030: Die Produktionsmenge wurde abgeleitet über den relativen Anteil der neu zugelassenen Pkw. Das impliziert die Randbedingung, dass die Nachfrage in ganz Europa ähnlich ausfällt und damit die gesamte Produktion für den europäischen Markt entsprechend ausgerichtet wird. Angenommen wurde, dass alle Technologien ab dem Jahr 2000 mit unterschiedlichen Anteilen eingeführt werden. Auf dieser Basis (relativer Marktanteil an den neu zugelassenen Pkw) wurde die ab dem Jahr 2000 kumulierte Produktionsmenge  $P_1$  bei einer konstanten Neuzulassungsanzahl über die Jahre für den Zeitpunkt 2010 und später abgeleitet. Die unterschiedliche Marktdurchdringung der Einzeltechnologien im Jahr 2010 wird damit berücksichtigt. In der folgenden Tabelle ist aufgeführt, welche ungefähren Anteile an den Neuzulassungen

hinterlegt wurden. Darauf basierend konnte dann für alle Jahre die kumulierte Produktionsmenge der Einzeltechnologien abgeleitet werden, die zur Berechnung der Kostendegression erforderlich war.

Tabelle 20: Markteinführungsszenarien für die in TNO (2006) aufgeführten Einzeltechnologien

Einzeltechnologien nach TNO (2006)	Anteil an den neu zugelassenen Pkw		
	2010	2020	2030
Red. Motorenreibung, rollwiderstandsoptimierte Reifen, Abgasnachbehandlungssysteme, optimierte Schaltpunkte	90-100%	90-100%	90-100%
Verbesserung Aerodynamik, AGR, leichte Gewichtsreduktion,	20-30%	40-60%	70-90%
DI homogen Otto, leichtes Downsizing Diesel, Variable Ventilsteuerung, Optimierung Kühlkreislauf, Start-Stopp, mittleres Downsizing mit Aufladung Otto	5-15%	20-30%	30-50%
Start-Stopp mit Rekuperation, Mild Hybrid, mittlere Gewichtsreduktion, mittleres Downsizing Diesel	2-5%	3-10%	10-20%
DI schichtgeladen Otto, starkes Downsizing mit Aufladung Otto, starkes Downsizing Diesel, Optimierter Kühlkreislauf mit el. Wasserpumpe, Autom. Schaltgetriebe, Doppelkupplung, Full Hybrid, starke Gewichtsreduktion, el. unterstützte Lenkung	1-2%	2-3%	3-8%
Zylinderdeaktivierung, CVT, VVC	0-1%	0-1%	0-1%

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Über die kumulierte Produktionsmenge und den Degressionsfaktor für den Produktionszweig „Pkw“ kann die Kostenentwicklung der Einzeltechnologien betrachtet werden. Die Abbildung 23 zeigt das Ergebnis dieses Vorgehens am Beispiel der Start-Stopp-Automatik. Den Neuzulassungsanteilen wurde bei der Berechnung der Kostendegression die kumulierte Produktionsmenge hinterlegt.

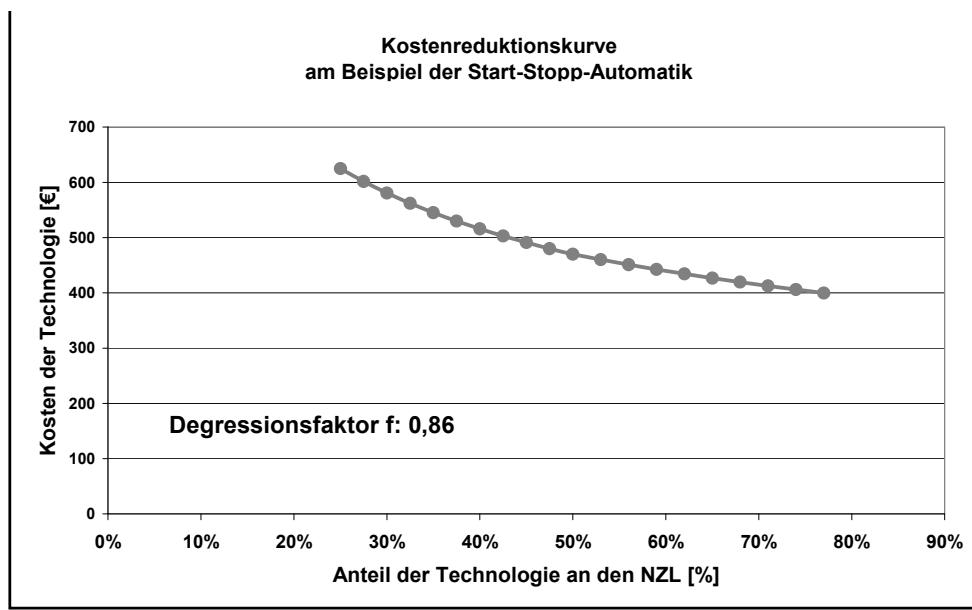


Abbildung 23: Kostenreduktionskurve am Beispiel der Start-Stopp-Automatik; den Neuzulassungsanteilen ist die kumulierte Produktionsmenge hinterlegt (Berechnungen: Öko-Institut)

Die so abgeleiteten Kosten der Einzeltechnologien für die Jahre 2020 und 2030 wurden entsprechend der Abbildung 22 über die exemplarischen Technologiepakete zu den Kosten für die Varianten zusammengeführt. Die resultierende Kostenreduktion pro Fahrzeugvariante setzt sich dann entsprechend aus den Kostenreduktionen der Einzeltechnologien zusammen. Insgesamt ergaben sich nach dieser Methode für die verschiedenen Varianten die in der Tabelle 21 angegebenen Kostendegressionen für die Jahre 2020 und 2030 gegenüber den TNO-Kosten. Grundsätzlich wurden keine plötzlichen Produktionsschübe für einzelne Technologien unterstellt, sondern ein moderates Vorgehen gewählt (entsprechend der Tabelle 20).

Tabelle 21: Prozentuale Kostenminderung durch Lernkurveneffekte für die Jahre 2020 und 2030 bezogen auf

	Basis	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
<b>2020 Diesel</b>	18%	19%	20%	20%	21%
<b>2030 Diesel</b>	31%	32%	32%	33%	32%
<b>2020 Otto</b>	19%	20%	21%	21%	21%
<b>2030 Otto</b>	31%	31%	31%	32%	31%

Quelle: TNO 2006



Insgesamt weisen die einzelnen Pkw-Varianten sehr ähnliche Minderungsraten für die Kosten auf. Sensitivitätsanalysen haben ergeben, dass dies auf das moderate Vorgehen bei den Annahmen zu den Marktanteilen zurückzuführen ist, hier die Kostendegression also vergleichsweise robust ist. Daher wurde zur Vereinfachung der weiteren Berechnungen eine einheitliche Minderung jeweils für Otto und Diesel-Pkw für die einzelnen Varianten gewählt: 19 % im Jahr 2020 und 31 % im Jahr 2030.

Zu berücksichtigen ist, dass die Varianten erst in den Szenarien relevant werden, so dass im Voraus noch nicht eindeutig auf deren potenziellen Marktanteil geschlossen werden kann. Werden in den Szenarien Maßnahmen abgebildet, die die Nachfrage nach effizienteren Pkw verstärken, dann steigt die Produktionsmenge der Technologien, die den Varianten hinterlegt sind, und damit sinken die Kosten der Varianten. Dies sollte optimaler Weise in einer Rückkopplung mit dem Käufermodell abgebildet werden, was jedoch eines sehr großen Rechenaufwandes bedarf. Daher wurden zunächst den Produktionsmengen in den Varianten hypothetische Annahmen einer erfolgten Marktdurchdringung hinterlegt. Auf Basis der durch das Käufermodell für die verschiedenen Szenarien modellierten Nachfrage nach den einzelnen Pkw-Varianten wurde dann jedoch die Plausibilität der Produktionsmenge (also dem Marktanteil der einzelnen Varianten an den Neuzulassungen) überprüft.

Zusätzlich zu einer Kostendegression ist damit zu rechnen, dass weitere Effizienzsteigerungspotenziale bis 2020 und 2030 erschlossen werden können. Da hierzu die TNO-Studie keine Aussage macht, wurde eine moderate, technologieunabhängige Erweiterung der Maximalvariante von 3 % für 2020 und 6 % für 2030 angenommen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die CO<sub>2</sub>-Minderungen und Kosten für die einzelnen Varianten nach Antrieben, Zeitscheiben und Antriebsart differenziert.

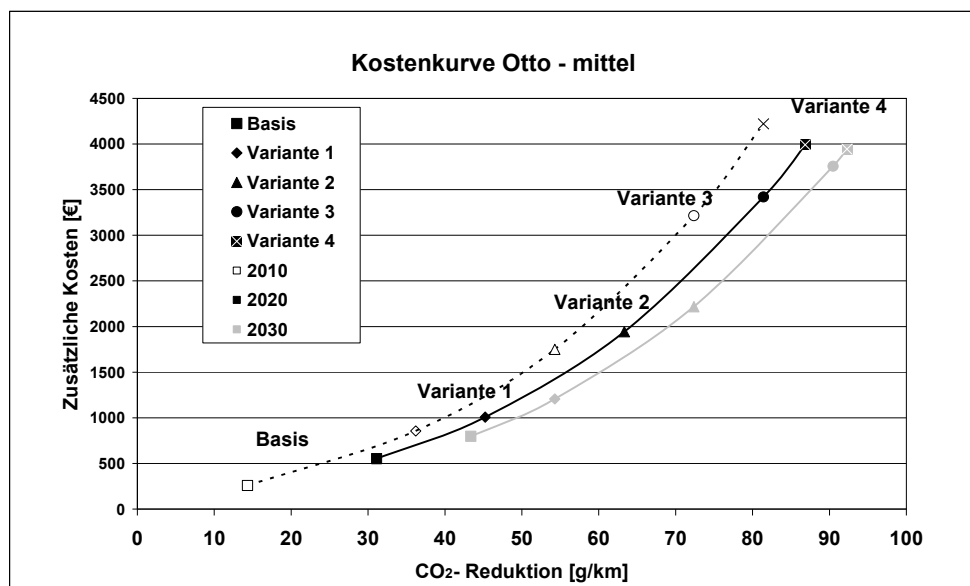


Abbildung 24: CO<sub>2</sub>-Reduktion und entsprechende Zusatzkosten der verschiedenen Pkw-Varianten Otto-mittel für die Jahre 2010, 2020, 2030 (Berechnungen: Öko-Institut)

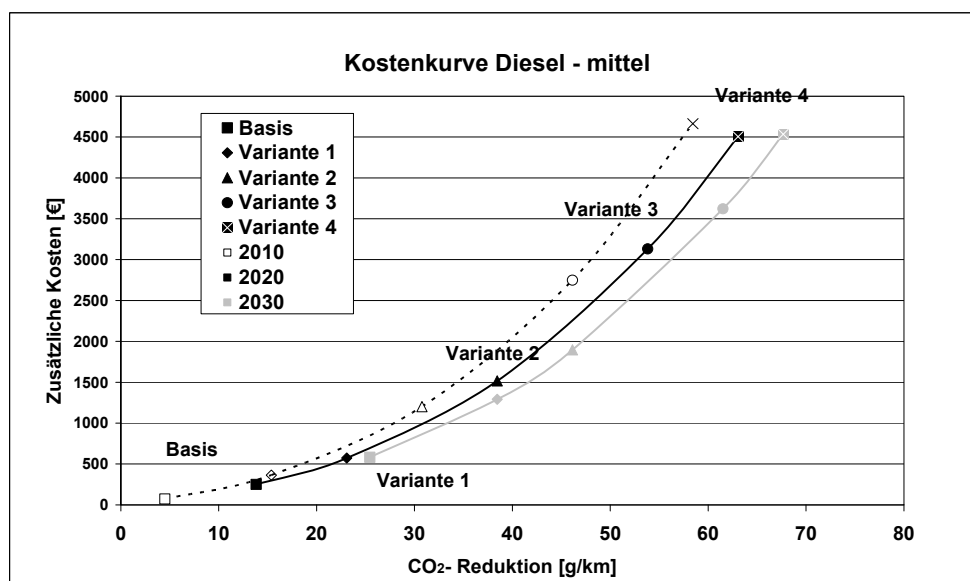


Abbildung 25: CO<sub>2</sub>-Reduktion und entsprechende Zusatzkosten der verschiedenen Pkw-Varianten Diesel-mittel für die Jahre 2010, 2020, 2030 (Berechnungen: Öko-Institut)

Im Juni 2008 wurde im BMU ein dritter Experten-Workshop zu den Pkw-Technologien durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf dem beschriebenen Vorgehen zur Ableitung und Anwendung von Lernkurveneffekten auf Effizienzsteigerungstechnologien lag. Ergänzend zu den Teilnehmern, die auch bei an den vorangegangenen Workshops teilgenommen haben, wurde zusätzlich der Projektleiter der Studie TNO (2006) Dr. R.

Smokers zu diesem Treffen eingeladen. Grundsätzlich wurde das Vorgehen auf Basis der TNO-Studie noch einmal von allen Experten unterstützt. Weiteres Ergebnis des Workshops war, dass die Berücksichtigung von Lernkurven für grundsätzlich plausibel gehalten wurde.

### **Differenzierung der Effizienzsteigerung nach Fahrsituationen**

Verschiedene Technologien zur Effizienzsteigerung haben unterschiedliche Effizienzsteigerungsraten für die Fahrsituationen innerorts, außerorts und Autobahn. Die wesentlichen Technologien sind in der Tabelle 22 aufgelistet, wobei aus den Effizienzsteigerungsraten von TNO (2006) für die Einzeltechnologien jeweils die Raten nach Fahrsituation abgeleitet wurden. Als wesentliche Technologien sind Start-Stopp-Automatiken und Hybridantriebe zu nennen, die jeweils innerorts eine deutlich höhere Minderung als auf der Autobahn aufweisen. Auch Rollwiderstandsoptimierung und verbesserte Aerodynamik führen zu unterschiedlichen Steigerungsraten. Diese sind jedoch mit wenigen Prozent vergleichsweise gering und zusätzlich gegenläufig. Da es sich um kostengünstige Technologien handelt, die voraussichtlich früh und auch gleichzeitig umgesetzt werden, heben sich die Effekte gegenseitig nahezu auf und werden bei der Differenzierung der Fahrsituation nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 22: Effizienzsteigerungsraten verschiedener Technologien differenziert nach Fahrsituationen

Technologie	Durchschnittsminderung nach TNO (NEFZ-basiert) [%]	Innerorts Minderung [%]	Außerorts Minderung [%]	AB Minderung [%]
Rollwiderstandsoptimierte Reifen	2	2,3	1,5	1
Verbesserung der Aerodynamik	1,5	1,4	1,75	2
Start-Stopp -Funktion(Otto)	4	5	2	0
Start-Stopp + Rekuperation (Otto)	7	8,5	4	0
Mild hybrid (Otto)	11	13	7	3
Full hybrid (Otto)	22	27	12	6
Start-Stopp-Funktion (Diesel)	3	4	1	0
Start-Stopp + Rekuperation (Diesel)	6	7,5	3	0
Mild hybrid (Diesel)	10	12	6	2
Full hybrid (Diesel)	18	23	9	4

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Signifikant unterschiedliche Kraftstoffverbrauchsminderungen existieren für alle Hybrid-Varianten auf den Straßenkategorien Innerorts (IO), Außerorts (AO) und auf Autobahnen (AB). Diese Maßnahmen kommen vor allem in den Varianten zwei bis vier zum Tragen. Für diese Varianten wurde daher der Energiebedarf nach IO, AO, AB differenziert. Ausgangspunkt waren die Minderungsraten nach TNO (2006). Diese beziehen sich jedoch auf den NEFZ, so dass die resultierende Minderung im Rahmen von Renewbility von der in TNO (2006) ausgewiesenen abweicht. Für die Ableitung wurde die Näherung gemacht, dass sich der NEFZ aus zwei Teilen innerorts und einem Teil außerorts zusammensetzt (Tabelle 22). Auch hier wurde wieder entsprechend dem Schema aus Abbildung 22 vorgegangen. Für die exemplarischen Technologiepakete wird die Effizienzsteigerung differenziert nach IO, AO, AB abgeleitet und anschließend zu den Varianten zusammengeführt.

### **Materialbedarf**

Die Technologiedaten zum fahrzeugbedingten Materialeinsatz wurden im Projektverlauf weiter differenziert, so dass in der Endversion nun spezifische Angaben für alle betrachteten Fahrzeugvarianten und differenziert nach bis zu 24 Materialien bzw. Materialkategorien vorliegen.

Grundlage der Materialbetrachtung stellt die Definition der Materialzusammensetzung der Basisfahrzeuge im Basisjahr 2005 differenziert nach den betrachteten Größenklassen (klein, mittel, groß) und der Antriebsart (Diesel bzw. Otto) dar. Basierend auf deren Materialzusammensetzung wurden weitere Veränderungen des Materialbedarfs durch die Anwendung von Effizienztechnologien bzw. einer veränderten Antriebsart (bspw. Elektromotor) für die weiteren Fahrzeugvarianten in den Jahren 2010 bis 2030 in der Datenbank berücksichtigt.

### **Datengrundlage**

Die Definition der Referenzfahrzeuge bezüglich Fahrzeugklasse, Motorisierung und Fahrzeuggewicht bezieht sich auf die Polk-Neuzulassungsdaten für das Jahr 2005 (siehe auch Tabelle 19).

Die Materialzusammensetzung der betrachteten Fahrzeugkategorien wurde auf Grundlage einer Analyse zahlreicher Veröffentlichungen verschiedener Europäischer Fahrzeughersteller und wissenschaftlicher Publikationen ermittelt.

Da sich der Differenzierungsgrad bei der Materialbetrachtung zwischen den untersuchten Literaturquellen deutlich unterscheidet, konnte ein Vergleich der verschiedenen Datensätze lediglich auf einem höher aggregierten Niveau von Materialklassen erfolgen. Um eine höher auflösende Betrachtung von Einzelmaterien in der Technologiedatenbasis zu gewährleisten, wurden diese Materialklassen auf Basis ausgewählter Datenquellen jedoch weiter differenziert.

Tabelle 23: Datengrundlage zur Ermittlung der Materialzusammensetzung der Basis-Pkw (Literaturübersicht)

Quelle	Autor / Titel	Beschreibung
Stau 2006	Stauber, R. (2006): Werkstoffe im Automobilbau - Anforderungen und Trends	Materialzusammensetzung der BMW 3er und 7er Serie
Daim 2005	Daimler AG (2005): Environmental Certificate Mercedes-Benz S-Class	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz S-Klasse
Daim 2007	Daimler AG (2007): Environmental Certificate Mercedes-Benz C-Class	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz C-class
Daim 2008	Daimler AG (2008): Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz A-Klasse	Materialzusammensetzung der Mercedes-Benz A-class
Opel 2002	Opel AG (2002): Nachhaltigkeitsbericht; Teil 3: Öko-Effizienz & Klimaschutz	Materialzusammensetzung des Opel Corsa
VW 2008	Volkswagen AG (2008): Der Golf: Umweltprädikat – Hintergrundbericht	Materialzusammensetzung des VW Golf
VW 2008a	Volkswagen AG (2008): Der Passat: Umweltprädikat – Hintergrundbericht	Materialzusammensetzung des VW Passat
VW 2006	Volkswagen AG (2006): Verwertungsanalysen von Neufahrzeugen	Materialzusammensetzung des VW Golf (A1 to A5)
Stodol 1995	Stodolsky, F. et al. (1995): Life-cycle energy savings potential from aluminium-intensive vehicles; Argonne National Laboratory – Transportation Technology R&D Center	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen US Pkw (1994)
Cheah 2007	Cheah, L. et al. (2007): Factor of two: Halving the fuel consumption of new U.S. automobiles by 2035; Massachusetts Institute of Technology – Laboratory for Energy and Environment	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen US Pkw (2006)
Weiss 2000	Weiss, M.A. et al. (2000): On the road in 2020 – a life-cycle analysis of new automobile technologies; Massachusetts Institute of Technology – Energy Laboratory	Materialzusammensetzung eines US Pkw (1996)
IFEU 2006	Patyk, A. (2006): Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Straßenfahrzeugen – Anhang	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen Otto/Diesel-Pkw (2005)
IPTS 2007	Institute for Prospective Technological Studies: Environmental Improvement of Cars (IMPRO-car) – Reference Report	Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen europ. Pkw (2007)

INFRA 2002	INFRA (2002): Transport and Environment Database System (TRENDS) - Report 5: Waste from Road Transport	Materialzusammensetzung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw
Umicore 2008	Müller, F. (Umicore AG): PGM-Beladung nach Motorisierung und Fahrzeugschadstoffklassen. Hanau 2008 (personal communication)	PGM-Beladung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw
Schade 2008	Schade, W. (2008): Impact on resource use and emissions of transport by using renewable energy and hydrogen as transport fuel. In: Hartard, S. et al. (Hrsg.): Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte	PGM-Beladung eines Euro 5 Otto/Diesel-Pkw

### **Materialien / Materialkategorien**

In der Technologiedatenbasis wurden für Pkw letztlich die folgenden Materialien bzw. Materialkategorien differenziert ausgewiesen und bezüglich ihrer Vorketten in der Stoffstromanalyse betrachtet:

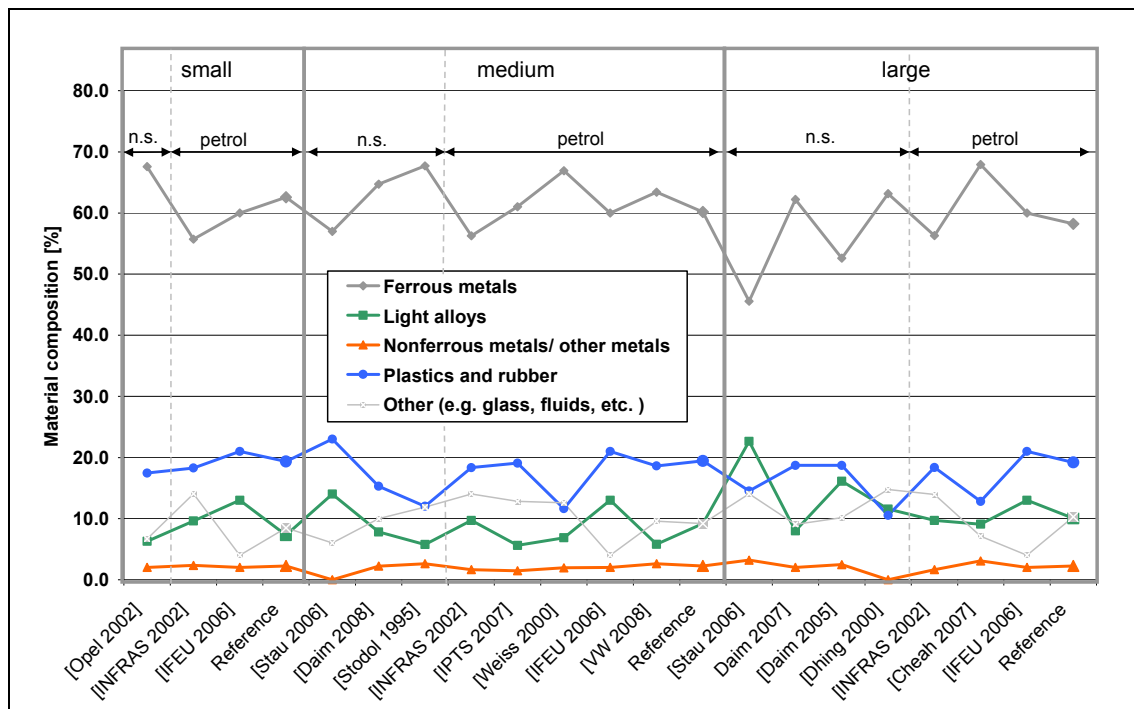
- Eisen
- Stahl
- Hochfeste Stähle
- Kupfer
- Zink
- Nickel
- Platingruppenmetalle: Platin, Palladium, Rhodium
- Blei
- Aluminium
- Magnesium
- Mangan
- Andere Metalle
- Glas
- Kunststoffgruppen: PP/PE bzw. PUR/ABS/PET/andere Kunststoffe
- Gummi
- Silica
- Textilien
- Öl
- Kältemittel
- Andere Flüssigkeiten
- Sonstige Materialien

## Materialanteile

Gemäß Tabelle 19 weisen neu zugelassene Diesel-Pkw ein deutlich höheres Fahrzeuggewicht als Otto-Pkw derselben Fahrzeugklasse auf. Dies ist zum einen durch die tendenziell stärkere Nachfrage von größeren Dieselfahrzeugen innerhalb einer Fahrzeugklasse als auch durch die größere und damit schwerer Motorisierung von Diesel-Pkw bedingt. Diesem Sachverhalt wird in der Technologiedatenbasis Rechnung getragen, in dem für Otto- und Diesel-Fahrzeugen eine unterschiedliche relative Materialverteilung zugeordnet wird. Dem gewählten Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass die Dieselmotorisierung zu einem Anstieg des Fahrzeuggewichts gegenüber einem entsprechenden Modell mit Otto-Motor von 3 % führt.

In der folgenden Abbildung wird am Beispiel der Otto-Pkw eine Übersicht der Anteile der wichtigsten Materialgruppen nach Größenklasse und Fahrzeuggröße gegeben. Dem jeweiligen Basisfahrzeug der Technologiedatenbasis (Reference) sind die Angaben aus der Literatur für die drei Größenklassen differenziert (small, medium, large) gegenübergestellt.

Abbildung 26: Übersicht der Materialanteile für Otto-Pkw der Größenklassen klein, mittel und groß gemäß Literaturangaben und für die daraus abgeleiteten Basisfahrzeuge der Technologiedatenbank (Reference)



Quelle: Öko-Institut

Tabelle 24 gibt eine detaillierte Übersicht der Anteile einzelner Materialien für kleine, mittlere und große Pkw mit Otto- bzw. Dieselmotorisierung in der Technologiedaten-

basis. Die Materialzusammensetzung der Basisfahrzeuge zeichnet sich insbesondere durch eine Abnahme des Stahleinsatzes, die durch den verstärkten Einsatz von Aluminium kompensiert wird, aus. Diese Annahme berücksichtigt, dass größere und verhältnismäßig teurere Fahrzeuge bereits heute einen höheren Anteil an Leichtbaumaterialien enthalten. Der höhere Materialanteil von Aluminium, aber auch Eisen, bei Dieselfahrzeugen begründet sich mit dem höheren Eigengewicht des Dieselmotors im Vergleich zu einem Ottomotor derselben Klasse. Andere Materialien weisen nur geringe Unterschiede bezüglich der Anteile zwischen den 6 betrachteten Fahrzeugklassen in der Basisausgestaltung auf.

Tabelle 24: Materialzusammensetzung [%] der Basisfahrzeuge in der Technologiedatenbasis mit Otto- bzw. Diesel-Motorisierung und differenziert nach den Größenklassen klein, mittel und groß

Motorisierung	Otto			Diesel		
Fahrzeuggröße	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß
Eisen	9.6	9.5	9.4	10.5	10.4	10.3
Stahl	43.2	40.9	39.2	43.1	40.8	39.3
Hochfeste Stähle	9.8	9.8	9.6	9.5	9.5	9.3
Kupfer	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Zink	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Platin	0.00006	0.00005	0.00003	0.00019	0.00034	0.00049
Palladium	0.00010	0.00022	0.00032	0.00000	0.00000	0.00000
Rhodium	0.00003	0.00004	0.00004	0.00000	0.00000	0.00000
Blei	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Aluminium	7.1	9.0	9.8	7.5	9.3	10.1
Magnesium	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Andere Metalle	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Glas	2.2	2.4	2.4	2.2	2.3	2.4
PP	9.1	9.0	8.8	8.9	8.8	8.5
PE	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3
Palladium	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
PVC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ABS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
PUR	2.1	2.3	2.6	2.1	2.3	2.5
PET	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Andere Kunststoffe	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Gummi	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
Textilien	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Öl	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Kältemittel	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Andere Flüssigkeiten	1.7	2.1	2.6	1.7	2.0	2.5
Sonstige Materialien	2.8	2.8	3.6	2.8	2.7	3.4

Quelle: Berechnungen Öko-Institut



### ***Materialänderung der Effizienzvarianten***

Neben der Basisausgestaltung der genannten Fahrzeugkategorien, werden auch weitere Effizienzvarianten für den Betrachtungszeitraum bis 2030 auf Basis der, in der TNO-Studie (TNO 2006) diskutierten, Effizienztechnologien berücksichtigt. Zwar weist TNO (2006) sowohl Kosten als auch Effizienzpotenziale für Einzeltechnologien aus, die Auswirkungen auf den Materialeinsatz werden jedoch nicht dokumentiert.

Im Rahmen der Renewability-Technologiedatenbasis wurden daher auf Basis der definierten Referenzfahrzeuge auch für die weiteren Effizienzvarianten Materialänderungen auf Grundlage von Literaturrecherchen bestimmt, um somit Rückschlüsse auf die Gesamtmaterialeänderung der betrachteten Fahrzeugvarianten zu ermöglichen. Das Vorgehen hier entspricht auch dem in der Abbildung 22 dargestellten Schema, so dass der technologieunabhängige Ansatz weiter verfolgt werden konnte.

Die Betrachtung von Materialänderungen für einzelne Effizienztechnologien fokussiert auf Technologien, die mit einer relevanten Materialänderung verbunden sind. Maßnahmen, die lediglich mit einer geringfügigen Veränderung der Materialzusammensetzung einhergehen, wie beispielsweise der Einsatz von Leichtlaufreifen oder die Optimierung von Reibungsverlusten in Motoren, werden als näherungsweise materialneutral betrachtet.

Effizienztechnologien die eine relevante Veränderung des Materialeinsatzes verursachen sind:

- mäßig bis starkes Motoren-Downsizing
- Verbesserung der Aerodynamik
- Milde Hybridisierung
- Voll-Hybridisierung
- mäßiger bis starker Fahrzeuggestaltung

### ***Motoren-Downsizing***

Basieren auf der Auswertung verschiedener Literaturquellen UBA (2007), Weiss (2006), IFEU (2006) wird näherungsweise angenommen, dass eine Erhöhung der Fahrzeugeffizienz durch Motoren-Downsizing um 1 % mit einer Minderung des Motorengewichts um etwa 3,5 kg einhergeht. Diese allgemeine Annahme differenziert nicht weiter zwischen verschiedenen Motorentypen und Fahrzeuggrößenklassen, jedoch wird dies durch unterschiedliche Effizienzpotenziale für verschiedene Fahrzeugklassen bereits in TNO (2006) berücksichtigt. Entsprechend der getroffenen Annahmen zu Minderungspotenzialen ergeben sich die in Tabelle 25 illustrierten Gewichtsminderungen. Die Veränderung des Einsatzes von Einzelwerkstoffen wird auf Basis von IPTS (2005) abgeleitet und beruht auf der Annahme, dass eine Verringerung

der Motorengröße insbesondere mit einer Verringerung des Einsatzes von Eisen, Stahl und Aluminium einhergeht.

Tabelle 25: Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw durch Motor-Downsizing (entsprechend der Ausgestaltung nach TNO (2006))

	Eisen	Stahl	Aluminium	Gesamt
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Otto, klein</b>			
Mäßiges Downsizing	–	–	–	–
Mittleres Downsizing	-8.4 kg	-8.4 kg	-11.9 kg	-29.7 kg
Starkes Downsizing	-12.6 kg	-12.6 kg	-16.8 kg	-42.0 kg
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Otto, mittel</b>			
Mäßiges Downsizing	–	–	–	–
Mittleres Downsizing	-10.5 kg	-10.5 kg	-14.0 kg	-35.0 kg
Starkes Downsizing	-12.6 kg	-12.6 kg	-16.8 kg	-42.0 kg
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Otto, groß</b>			
Mäßiges Downsizing	–	–	–	–
Mittleres Downsizing	-10.5 kg	-10.5 kg	-14.0 kg	-35.0 kg
Starkes Downsizing	-12.6 kg	-12.6 kg	-16.8 kg	-42.0 kg
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Diesel, klein</b>			
Mäßiges Downsizing	-3.15 kg	-3.15 kg	-4.2 kg	-10.5 kg
Mittleres Downsizing	-5.25 kg	-5.25 kg	-7.0 kg	-17.5 kg
Starkes Downsizing	–	–	–	–
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Diesel, mittel</b>			
Mäßiges Downsizing	-3.15 kg	-3.15 kg	-4.2 kg	-10.5 kg
Mittleres Downsizing	-5.25 kg	-5.25 kg	-7.0 kg	-17.5 kg
Starkes Downsizing	-7.35 kg	-7.35 kg	-9.8 kg	-24.5 kg
<b>Fahrzeugkategorie</b>	<b>Diesel, groß</b>			
Mäßiges Downsizing	-3.15 kg	-3.15 kg	-4.2 kg	-10.5 kg
Mittleres Downsizing	-5.25 kg	-5.25 kg	-7.0 kg	-17.5 kg
Starkes Downsizing	-10.5 kg	-10.5 kg	-14.0 kg	-35.0 kg

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Verbesserung der Aerodynamik

In der Literatur (Beau 2008, Elli 2006) werden insbesondere Maßnahmen wie die Verringerung der Fahrzeughöhe, die Veränderung des Zuschnitts von Front- und Heckpartie, eine veränderte Form der Außenspiegel als auch das Anbringen von Unterbodenverkleidung, Radschachtverkleidungen, Heckspoilern und Seitenschürzen genannt. Lediglich in IFEU (2006) wird eine Abschätzung des Materialbedarfs von Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik gegeben. Diese dient als Grundlage für die Bestimmung des Materialbedarfs für diese Effizienzmaßnahme in der Technologiedatenbank.

Tabelle 26: Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw durch die Verbesserung der Aerodynamik

Motorisierung	Otto			Diesel		
Fahrzeuggröße	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß
Aluminium	+3.5 kg	+4.6 kg	+5.4 kg	+4.0 kg	+5.0 kg	+6.3 kg
Kunststoffe	+3.5 kg	+4.6 kg	+5.4 kg	+4.0 kg	+5.0 kg	+6.3 kg

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Milde Hybridisierung

Die milde Hybridisierung führt zu veränderten Materialbedarfen, die im Wesentlichen durch den zusätzlichen Batteriespeicher, den Elektromotor, Steuerungselektronik und Spannungswandler, sowie ein mögliches Motor-Downsizing bedingt sind. Die Veränderung der Materialzusammensetzung von Fahrzeugen mit milder Hybridisierung ist in IPTS (2005) dokumentiert und bildet die Grundlage für die Angaben in der Technologiedatenbasis. Dort wird ein Batteriesystem auf NiMH-Basis angenommen. Die Auswirkungen auf die Gesamtmaterialbilanz für die betrachteten Fahrzeugkategorien ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw mit milder Hybridisierung

Motorisierung	Otto			Diesel		
Fahrzeuggröße	klein	mittel	klein	mittel	klein	mittel
Aluminium	+2.9 kg	+3.7 kg	+4.4 kg	+3.2 kg	+4.1 kg	+5.1 kg
Eisen	+4.9 kg	+6.3 kg	+7.4 kg	+5.4 kg	+6.9 kg	+8.6 kg
Stahl	+0.5 kg	+0.7 kg	+0.8 kg	+0.6 kg	+0.7 kg	+0.9 kg
Kupfer	+3.8 kg	+5.0 kg	+5.8 kg	+4.3 kg	+5.4 kg	+6.8 kg
Kunststoffe	+3.2 kg	+4.2 kg	+4.9 kg	+3.6 kg	+4.6 kg	+5.8 kg
Nickel	+3.5 kg	+4.6 kg	+5.4 kg	+4.0 kg	+5.0 kg	+6.3 kg
Kohlenstoff	+0.5 kg	+0.7 kg	+0.8 kg	+0.6 kg	+0.7 kg	+0.9 kg
Silica	+2.7 kg	+3.5 kg	+4.0 kg	+3.0 kg	+3.7 kg	+4.7 kg
Zirkonium	+0.4 kg	+0.6 kg	+0.7 kg	+0.5 kg	+0.6 kg	+0.8 kg
Sonstige	+1.8 kg	+2.4 kg	+2.8 kg	+2.1 kg	+2.6 kg	+3.3 kg
Gesamt	+24.4 kg	+31.7 kg	+36.9 kg	+27.2 kg	+34.3 kg	+43.2 kg

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Voll-Hybridisierung

Die Bestimmung der Materialänderung durch eine Voll-Hybridisierung von Fahrzeugen lehnt sich an die Annahmen für milde Hybride nach IPTS (2005) an. Durch die stärkere Hybridisierung ist jedoch ein leistungsfähigerer Elektromotor sowie ein größeres Batteriesystem erforderlich, gleichzeitig kann aber auch ein stärkeres Downsizing des Verbrennungsmotors sowie ein Verzicht auf die Blei-Batterie erfolgen. Es wird entsprechend IPTS (2005) angenommen, dass auch mittelfristig vorzugsweise NiMH-Batterien in Hybridfahrzeugen zu Einsatz kommen. Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich für Voll-Hybridfahrzeuge folgende Materialänderungen für die betrachteten Fahrzeugkategorien.

Tabelle 28: Veränderung des Materialeinsatzes für Otto- und Diesel-Pkw mit Voll-Hybridisierung

Motorisierung	Otto			Diesel		
Fahrzeuggröße	klein	mittel	klein	mittel	klein	mittel
Aluminium	+7.1 kg	+9.2 kg	+10.7 kg	+7.9 kg	+10.0 kg	+12.6 kg
Eisen	+28.0 kg	+36.4 kg	+42.4 kg	+31.2 kg	+39.4 kg	+49.6 kg
Stahl	+1.3 kg	+1.6 kg	+1.9 kg	+1.4 kg	+1.8 kg	+2.2 kg
Kupfer	+15.3 kg	+19.9 kg	+23.1 kg	+17.1 kg	+21.5 kg	+27.1 kg
Kunststoffe	+10.1 kg	+13.1 kg	+15.3 kg	+11.3 kg	+14.3 kg	+17.9 kg
Nickel	+14.8 kg	+19.3 kg	+22.5 kg	+16.6 kg	+20.9 kg	+26.3 kg
Kohlenstoff	+1.4 kg	+1.8 kg	+2.1 kg	+1.6 kg	+2.0 kg	+2.5 kg
Silica	+7.0 kg	+9.1 kg	+10.6 kg	+7.8 kg	+9.9 kg	+12.4 kg
Zirkonium	+1.7 kg	+2.2 kg	+2.6 kg	+1.9 kg	+2.4 kg	+3.0 kg
Blei	-6.0 kg	-7.8 kg	-9.1 kg	-6.7 kg	-8.4 kg	-10.6 kg
Sonstige	+7.7 kg	+10.1 kg	+11.7 kg	+8.7 kg	+10.9 kg	+13.8 kg
Gesamt	+84.9 kg	+110.3 kg	+128.6 kg	+94.8 kg	+119.7 kg	+150.6 kg

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Fahrzeugleichtbau

Die Annahmen zur Umsetzung verschiedener Leichtbaustrategien basieren auf einer umfangreichen Literaturrecherche sowie ergänzenden Expertengesprächen. Im Folgenden werden die Grundzüge der Annahmen zur Umsetzung von mäßigem, mittlerem und starkem Fahrzeugleichtbau in der Technologiedatenbasis dokumentiert.

Eine mäßige Minderung des Fahrzeuggewichts wird im Wesentlichen durch einen höheren Anteil an hochfesten Stählen und eine Verringerung des Einsatzes von konventionellem Stahl erreicht. Es wird angenommen, dass je Einheit eingesetzten

hochfesten Stahls eine Minderung des Gewichts gegenüber konventionellem Stahl um 20 % erzielt wird.

Eine stärkere Minderung des Fahrzeuggewichts (mittlerer Fahrzeugleichtbau) wird durch einen weiter verstärkten Ersatz von konventionellem Stahl durch hochfeste Stähle erreicht.

Starker Fahrzeugleichtbau ist von der Annahme getragen, dass neben einem erhöhten Einsatz von hochfesten Stählen auch eine Zunahme des Aluminiumanteils erforderlich ist, um das Fahrzeuggewicht weiter zu senken. Entsprechend verschiedener Literaturangaben und nach Expertenschätzungen können beim Einsatz von Aluminium etwa 40 % Gewicht gegenüber dem Einsatz von Stahl eingespart werden. Die Umsetzung in der Technologiedatenbasis beruht auf der Annahme, dass zwei Drittel der direkten Gewichtsreduzierung über den Einsatz von hochfesten Stählen und ein Drittel über den Einsatz von Aluminium realisiert werden können. Durch das deutlich verringerte Fahrzeuggewicht können weitere Sekundäreffekte, wie beispielsweise ein leichteres Chassis und eine kleinere Auslegung weiterer Fahrzeugkomponenten, erschlossen werden.

#### *Alternative Antriebe*

Auswirkungen einer veränderten Antriebsart (Elektromotor und Brennstoffzelle) auf den Materialeinsatz werden für Pkw separat in Abschnitt 3.2.4 und 3.2.5 diskutiert. Die Grundlage für deren Bilanzierung bildet jedoch ebenfalls die Materialzusammensetzung der bereits diskutierten Basisfahrzeuge.

### **Emissionen**

Als nicht direkt verbrauchsabhängige Schadstoffe werden im Rahmen von Renewability  $\text{NO}_x$ , Partikel,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ , CO, NMVOC, Methan und  $\text{N}_2\text{O}$  berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren werden für die jeweils relevante Antriebsart und für alternative Motorkonzepte und Kraftstoffe auf TREMOD-Faktoren basierend abgeleitet (IFEU 2006a). Die Emissionsfaktoren spiegeln die gültige Rechtslage bezogen auf die bereits verabschiedeten Grenzwertstufen wieder.

Aus TREMOD direkt werden die Emissionsfaktoren von  $\text{NO}_x$ , CO, NMVOC, Methan und  $\text{N}_2\text{O}$  für Otto-Pkw bzw.  $\text{O}_x$ , Partikel, CO, NMVOC, Methan und  $\text{N}_2\text{O}$  für Diesel-Pkw entnommen. Die Emissionsfaktoren von  $\text{NO}_x$ , Partikel, CO, NMVOC, Methan,  $\text{N}_2\text{O}$  für alternative Motorkonzepte und Kraftstoffe werden auf Basis der TREMOD-Daten abgeleitet. Partikelemissionen aus Otto-Pkw orientieren sich an INFRAS (2004) und  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$  für alle Pkw-Konzepte werden in Anlehnung an Schubert (2002) gleich den Gesamtpartikelemissionen abgeleitet.

### **3.2.3 Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen**

Otto- und Dieselmotoren und die zu ihrer Substitution geeigneten Kraftstoffe (z.B. Erdgas, Ethanol, RME) unterscheiden sich zum Teil deutlich in ihren Verbrennungseigenschaften. Daraus resultieren, zusätzlich zu den massen- und

volumenbezogenen verschiedenen Verbräuchen, Wirkungsgradunterschiede. Hinzu können ggf. Verbrauchserhöhungen kommen, wenn die Kraftstoffe besonders schwere Speicher erfordern (Erdgas, Wasserstoff). Die Annahmen zu diesen Effekten werden im Folgenden beschrieben.

**Erdgas und Biogas (Druckspeicher):** Bei dem noch weit verbreiteten Pkw für Benzin- und Erdgasbetrieb sind die Verbräuche im Gasbetrieb höher als im Benzinbetrieb. In Kolke (2004) werden für Kleinwagen im Gasbetrieb in 2010 gleiche Wirkungsgrade und höhere Verbräuche (Resultat der höheren Fahrzeugmasse) angesetzt als für mit Ottokraftstoff betriebene Fahrzeuge. In CONCAWE (2006) werden für 2010+ mit etwa 0,3 % sehr geringe Vorteile gegenüber Ottomotoren im Benzinbetrieb angegeben. In Stan (2005) und Umierski (2004) werden für optimierte Gasmotoren Wirkungsgrade im Bereich von Dieselmotoren erwartet. In der Datenbasis wird für die zukünftig verstärkt bzw. überwiegend zum Einsatz kommenden Pkw für reinen Gasbetrieb (bzw. darauf optimierte Motoren) von einer Angleichung der Verbräuche ausgegangen.

Die zusätzlichen Herstellungskosten für Erdgasfahrzeuge wurden TNO (2006) entnommen und betragen für das Jahr 2010 1.450, 1.750 und 2.050 € für klein, mittel und große Pkw.

Für die Schadstoffemissionen werden die entsprechenden Otto-Pkw-Faktoren mit Anpassungsfaktoren nach IFEU (2005) skaliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Summe der NMHC und CH<sub>4</sub> gleich denen des PKW-Otto ist, aber zu 95 % aus CH<sub>4</sub> besteht; die Emissionswerte der anderen Schadstoffe wurden denen des PKW-Otto gleichgesetzt.

Die Ausgangsdaten für die Materialzusammensetzung entsprechen den Otto-Pkw. Zusätzliche Materialien durch das Tanksystem wurden CONCAWE (2006) entnommen und entsprechend auf die verschiedenen Größenklassen skaliert, so dass sich durch den Stahltank ein zusätzliches Gewicht in Höhe von 97 kg, 117 kg und 137 kg ergeben.

**Flüssiggas (LPG):** LPG-betriebene Otto-Pkw werden hier nur bis 2010 betrachtet, da nicht davon auszugehen ist, dass diese in Deutschland über diesen Zeitpunkt hinaus eine nennenswerte Rolle spielen werden. Derzeit geht der Trend deutlich stärker in Richtung Erdgasfahrzeuge unter anderem wegen der Option, hier Biogas einsetzen zu können. Ihr Verbrauch wird basierend auf CONCAWE (2006) gleich dem von Benzin-betriebenen Otto-Pkw gesetzt.

**Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>):** In CONCAWE (2006) wird für 2010+ ein deutlicher Verbrauchsvorteil gegenüber Otto-Pkw angegeben, in Kolke (2004) ein etwas geringerer Nachteil (gleicher Wirkungsgrad und höherer Verbrauch durch höhere Fahrzeugmasse). Für die hier relevanten Bezugsjahre 2020/30 werden die Wirkungsgrade aus CONCAWE (2006) angesetzt, was einen Verbrauchsvorteil gegenüber Otto-Pkw von 11,8 % bedeutet.

Für die zusätzlichen Kosten werden die Angaben aus CONCAWE (2006) verwendet und entsprechend der Motorleistung skaliert. Entsprechend der Literatur werden die

zusätzlichen Tankkosten und der Wegfall der Abgasnachbehandlung berücksichtigt, so dass sich zusätzliche Kosten in Höhe von 3.500 €, 5.700 € und 9.000 € für das Jahr 2010 ergeben.

Bei H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotoren können C-haltige Schadstoffe allenfalls aus der Verbrennung von Schmierstoffen entstehen. Die Mengen sind vernachlässigbar und werden gleich Null gesetzt. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen entsprechen etwa 10 % des SULEV-Wertes (0,2 g/Meile).

Materialbezogene Ausgangsdaten sind die Materialien von Pkw-Otto sowie Daten aus CONCAWE (2006) für das zusätzliche Tankgewicht (109 kg), wobei von einem Stahltank ausgegangen wird. Der entfallende Benzintank wurde mit 6 kg Kunststoff angesetzt. Beide Angaben wurden mit sich aus den Motorleistungen ergebenden Faktoren auf klein, mittel und groß angepasst.

**Ethanol:** Alkohole verbrennen mit höheren Wirkungsgraden als Kohlenwasserstoffe. In Koßmehl (1995) werden für optimierte Motoren 10 % und mehr angegeben. CONCAWE (2006) und Kolke (2004) weisen dagegen gleiche Verbräuche wie für Otto-Pkw im Benzinbetrieb aus. Darauf basierend werden hier ebenfalls gleiche Verbräuche angesetzt. Die Schadstoffemissionsfaktoren werden gleich denen von Otto-Pkw im Benzinbetrieb gesetzt.

### 3.2.4 Pkw mit elektrischem Antrieb

In Ergänzung zu den konventionellen Fahrzeugantrieben wurde die Technologiedatenbasis um mehrere elektrische Antriebsoptionen erweitert, um deren Potenzial zur Minderung der Emissionen im Verkehr und die entstehenden Zusatzkosten im Rahmen des Projekts bilanzieren zu können. Berücksichtigung in der Technologiedatenbasis finden Batterie-elektrische Pkw sowie Plug-In-Hybrid-Pkw in unterschiedlicher Ausgestaltung. Wesentliche Betrachtungskategorien für die einzelnen Fahrzeugtypen stellen der Kraftstoff- bzw. Energiebedarf, die entstehenden Technologiekosten sowie der veränderte Materialbedarf dar.

Da die genannten Antriebstechnologien sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und großteils die Marktreife noch nicht erreicht haben, stellen die getroffenen Annahmen lediglich mögliche plausible Entwicklungspfade dar. In Abhängigkeit vom jeweiligen Antriebskonzept variiert die Quantität und Qualität der verfügbaren Ausgangsdaten, so dass auch deren Berücksichtigung in der Technologiedatenbasis auf unterschiedlich detaillierten Analysen beruht.

## Fahrzeugkonzepte

### Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV)

Plug-in-Hybridfahrzeuge stellen eine Weiterentwicklung des bereits in Serie erprobten Hybridkonzepts dar. Durch den Einsatz eines leistungsfähigeren Energiespeichersystems wird ein rein-elektrisches Fahren über eine größere Reichweite gewährleistet und gleichzeitig die Reichweitenrestriktion von rein-



elektrischen Fahrzeugen vermieden. Die Ladung der Batterie erfolgt nicht nur über Bremsenergieerückgewinnung und den Verbrennungsmotor im Fahrbetrieb, sondern vor allem stationär über das Stromnetz. Durch den höheren Fahranteil im elektrischen Betrieb können wesentlich höhere Verbrauchsreduktionen als für HEV erreicht werden, da der Verbrennungsmotor nur im Bedarfsfall – bei hoher Fahrgeschwindigkeit oder geringem Batterieladestatus – zugeschaltet wird (NREL 2006a).

Zwar sind marktfähige PHEV bisher nicht verfügbar, es haben jedoch mehrere Hersteller eine zeitnahe Einführung entsprechender Fahrzeuge angekündigt bzw. arbeiten an deren Entwicklung. Den technologischen Flaschenhals bei der Entwicklung stellt die verfügbare Energiespeichertechnologie dar.

### ***Batterie-elektrische Fahrzeuge (BEV)***

Batterie-Elektrische Fahrzeuge verzichten gänzlich auf den Einsatz eines Verbrennungsmotors und werden in allen Fahrsituationen elektrisch betrieben. Der Elektromotor des Fahrzeugs wird über eine leistungsfähige Batterie versorgt, die über das Stromnetz stationär geladen wird. Als besonders vorteilhaft stellen sich der emissionsfreie Fahrzeugbetrieb und die hohe Effizienz des Fahrzeugantriebs dar. Wesentliche Herausforderungen verbleiben hinsichtlich der erforderlichen Batterietechnologie und der damit verbundenen eingeschränkten Leistungsfähigkeit und Reichweite sowie des hohen Gewichts Batterie-elektrischer Fahrzeuge. Der Einsatz von BEV wird daher zunächst insbesondere für den Einsatz im innerstädtischen Bereich diskutiert und entsprechende Fahrzeuge von mehreren Herstellern entwickelt.

## **Übersicht möglicher Fahrzeugkonfigurationen**

### ***Plug-in-Hybridfahrzeuge***

Die Effizienz von Plug-In-Hybridfahrzeugen wird neben den Wirkungsgraden der Antriebskomponenten im Wesentlichen von deren Konfiguration und Nutzungsweise bestimmt. Da bisher noch keine PHEV am Markt verfügbar sind, können hinsichtlich deren Ausgestaltung und Nutzung lediglich Annahmen getroffen werden. Zur Bestimmung der Mindestanforderungen an die Leistungsfähigkeit von PHEV werden in der Literatur generell durchschnittliche konventionelle Fahrzeuge (CV) als Referenz herangezogen. Unterschiedliche Ausgestaltungsmöglichkeiten bestehen bezüglich der elektrischen Reichweite, dem Grad der Hybridisierung und der Wahl zwischen einem Fahrmodus, der einen rein elektrischen oder nur einen gemischten (elektrisch-konventionellen) Betrieb des Fahrzeugs ermöglicht.

Neben einer Optimierung hinsichtlich der Energieeffizienz stellen ein möglichst kosteneffizienter Einsatz des elektrischen Antriebs (insbesondere der Batterie) und die Berücksichtigung des Fahrprofils weitere Kriterien bei der Fahrzeugkonfiguration dar.



### *Elektrische Reichweite*

Die elektrische Reichweite eines PHEV ist im Wesentlichen von der Kapazität der Batterie abhängig und definiert die Strecke, die im rein elektrischen Betrieb zurückgelegt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass diese je nach Fahrsituation stark variieren kann. Analysen in MIT (2007) für PHEV mit 16, 48 und 97 Kilometern elektrischer Reichweite (kurz: PHEV-16) ermittelten einen abnehmenden Grenznutzen mit ansteigender elektrischer Reichweite, da der größere Energiespeicher mit einem starken Anstieg des Batteriegewichts und der abnehmenden relativen Nutzung der Batterie einhergeht. Der kosteneffizienteste Einsatz von PHEV wird laut ARG (2008) erreicht, wenn die durchschnittliche Tagesfahrleistung dem 1- bis 2-fachen der elektrischen Reichweite des Fahrzeugs entspricht und somit eine optimale Nutzung des Batteriespeichers gewährleistet ist. Dies würde entsprechend der durchschnittlichen US-Fahrleistung Fahrzeugen mit einer elektrischen Reichweite zwischen 16 und 32 km entsprechen.

### *Hybridisierungsgrad*

Der Hybridisierungsgrad eines PHEV ist definiert als Anteil der Maximalleistung des elektrischen Antriebs an der Gesamtleistung des Fahrzeugs. In enger Verbindung dazu steht die Frage, ob ein PHEV einen rein elektrischen Fahrbetrieb ermöglicht oder auf einem gemischten Fahrmodus beruht, der bei hohen Leistungsanforderungen auf die Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor zurückgreift.

Ein Mischmodus (kombinierte Nutzung von Elektro- und Verbrennungsmotor) ermöglicht eine reduzierte Auslegung des elektrischen Antriebs und eine Kostenminimierung gegenüber dem rein elektrischen Betrieb, da der elektrische Antrieb im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang unter den gegebenen Bedingungen wesentlich teurer ist. Dem gegenüber stehen Vorteile eines rein elektrischen Fahrmodus, der erst nach dem Erreichen eines geringen Batterieladezustands auf den konventionellen Antrieb umstellt. In diesem Fall können häufige – energieineffiziente – Kaltstarts des Verbrennungsmotors vermieden und insbesondere für Kurzstrecken und bei entsprechender Ladung der Batterie eine maximale Kraftstoffverbrauchsminderung durch den rein elektrischen Antrieb erzielt werden.

In MIT (2007) wird für PHEV ein möglichst hoher Hybridisierungsgrad (44 %) und ein Fahrzeugbetrieb im Mischmodus als günstigste Option bewertet, da diese ein breites Leistungsspektrum im elektrischen Betrieb zu verhältnismäßig geringen Kosten ermöglicht. Analysen in ARG (2008) weisen ebenfalls auf einen besonders effizienten Fahrzeugbetrieb im Mischmodus und bei starker Hybridisierung hin.

### **Batterie-elektrische Fahrzeuge**

Batterie-elektrische Fahrzeuge zeichnen sich durch die höchste Energieeffizienz im Fahrzeugbetrieb aus. Im Vergleich zum Plug-In-Hybridantrieb stellt die Ausgestaltung des Fahrzeugantriebs beim reinen Elektrofahrzeug eine geringere Herausforderung

dar, da die Bandbreite der Optionen sich – angesichts des Verzichts auf einen zweiten Antriebsstrang – als wesentlich kleiner darstellt. Die Entwicklung des elektrischen Antriebsstrangs gilt als weitestgehend ausgereifte Technologie. Demgegenüber steht die Tatsache, dass bei BEV bei hohem Leistungsbedarf und hoher Fahrleistung nicht – wie bei hybridisierten Antrieben – auf den Verbrennungsmotor zurückgegriffen werden kann, und daher der gesamte Leistungs- und Energiebedarf durch die Batterie gewährleistet werden muss. Dies bedeutet, dass das Energiespeichersystem eines BEV eine wesentlich höhere Energie- und Leistungskapazität aufweisen und als bedeutendster Parameter bei der Konfiguration von Batterie-elektrischen Fahrzeugen Berücksichtigung finden muss. Um Minimalanforderungen an Fahrzeugleistung und -reichweite gerecht zu werden, sind eine sehr hohe Energie- und Leistungsdichte der Batterie erforderlich. Weiter stellt der rein-elektrische Fahrbetrieb hohe Anforderungen an die Zyklenfestigkeit der Batterie, da diese häufig und unterschiedlich stark be- und entladen werden.

Angesichts der gegebenen Restriktionen der Batterietechnologie erscheint wahrscheinlich, dass mittelfristig Batterie-elektrische Fahrzeuge insbesondere bei kleinen und mittleren Pkw und für ausgewählte Anwendungen bei leichten Nutzfahrzeugen (bspw. Zustellverkehr) zum Einsatz kommen und sich gegenüber ihren konventionellen Fahrzeugpendants durch eine geringere Leistungsfähigkeit und Reichweite auszeichnen. Ambitioniertere Fahrzeugkonfigurationen würden insbesondere im Hinblick auf die Zusatzkosten als auch das Zusatzgewicht und den Platzbedarf der Batterie starke Hemmnisse für einen energie- und vor allem kosteneffizienten Fahrzeugbetrieb darstellen. Mittelfristig scheinen elektrische Reichweiten von 100 bis 200 Kilometern fahrzeugtechnisch bezüglich Gewicht und Platzbedarf realisierbar, wobei die effizienteste Ausgestaltung der Batteriegröße wesentlich durch die Fahrzeugnutzung bestimmt wird.

#### **Exkurs: Annahmen zur Konfiguration zukünftiger PHEV (Literaturauswertung)**

PHEV – Hybridfahrzeuge mit der Möglichkeit der elektrischen Ladung über das Stromnetz – bewegen sich technologisch zwischen konventionellen Hybridfahrzeugen (HEV) und Batterie-elektrischen Fahrzeugen. Oberhalb eines kritischen Batterieladezustandes wird das PHEV im Batterieentlade-Modus „charge depleting“ (CD) betrieben und nutzt die durch die Batterie zur Verfügung gestellte Energie für den Fahrzeugantrieb, ähnlich einem BEV. Wird der kritische Batterieladezustand erreicht, so wechselt das Fahrzeug in den „charge sustaining“ (CS) Modus, der dem Betrieb im HEV entspricht und die Batterie im Durchschnitt nicht weiter entlädt sondern lediglich als Zwischenspeicher (bspw. für zurück gewonnene Bremsenergie) nutzt.

Die Bestimmung der elektrischen Reichweite von PHEV ist bisher nicht eindeutig definiert und hängt stark vom zu Grunde gelegten Fahrzyklus und der tatsächlich nutzbaren Speicherenergie ab. Im Allgemeinen wird die elektrische Reichweite als die Strecke definiert, die mit einem Fahrzeug im CD-Modus rein elektrisch zurückgelegt werden kann.

In der Literatur werden verschiedenen Hybridkonzepte (seriell, parallel, split-hybrid) diskutiert. In der Technologiedatenbasis wird – entsprechend der mehrheitlichen Expertenmeinung – für PHEV eine parallele Hybridisierung angenommen, da diese insbesondere bei geringer bis mittlerer elektrischer Reichweite gegenüber einer seriellen Umsetzung für die Pkw-Anwendung als vorteilhaft bewertet wird (MIT 2007).

Ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche und den dort formulierten Leistungsmindestanforderungen an PHEV kann eine erste Übersicht für verschiedene mögliche Fahrzeugkonfigurationen (in Bezug auf die elektrische Reichweite) gegeben werden, die erste Rückschlüsse auf die Auslegung einzelner Fahrzeugkomponenten, den zusätzlichen Materialbedarf und insbesondere die entstehenden Zusatzkosten erlauben. Bei der Betrachtung der PHEV-Konfigurationen ist zu beachten, dass diese auf unterschiedlichen Ausgangsfahrzeugen beruhen und daher nicht unmittelbar zueinander in Bezug gesetzt werden können; dennoch können wesentliche Trends anhand der verfügbaren Daten aufgezeigt werden. Die Konfiguration von HEV ist zu Vergleichszwecken mit aufgeführt.

Die aufgeführten Konfigurationen entsprechen bezüglich ihrer Leistung konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen der Mittel- bis Oberklasse. Die betrachteten Fahrzeugkonzepte weisen Hybridisierungsgrade von 33 bis 66 % mit einer Häufung in der Spannbreite von 35 bis 45 % auf. Diese Annahmen stehen in gutem Einklang mit den Analysen zu einer möglichst effizienten Ausgestaltung des Hybridantriebs. Die Annahmen zur Leistung von Verbrennungs- und Elektromotor variieren hingegen beträchtlich zwischen den Studien und weisen tendenziell eine höhere Gesamtleistung als durchschnittliche verbrennungsmotorische Fahrzeuge derselben Klasse auf. Dies mag unter anderem durch die unterschiedliche Referenz begründet sein, die insbesondere für US-amerikanische Studien auf leistungsstärkeren Fahrzeugen beruht bzw. dem durch die Batterie verursachten hohen Zusatzgewicht Rechnung tragen. In logischer Konsequenz davon variieren die Annahmen zur erforderlichen Batteriekapazität entsprechend der angenommenen Fahrzeugleistung. Die Annahmen zur Batteriekapazität von PHEV zeigen jedoch einen plausibel ansteigenden Verlauf von Fahrzeugen mit geringerer hin zu größerer elektrischer Reichweite. Die erforderliche Batterieleistung steht in enger Kopplung zum Hybridisierungsgrad der Fahrzeuge. Dieser Sachverhalt wird durch die hierzu getroffenen Annahmen der Konzeptfahrzeuge gestützt, die bei zunehmender Hybridisierung einen Anstieg der erforderlichen Batterieleistung ausweisen.

Das Verhältnis von Leistung zu Energie der Batterie nimmt – insbesondere wegen des Anstiegs der Batterieenergie – mit zunehmender elektrischer Reichweite ab; der Grad der Batterienutzung (mögliche maximale Entladungstiefe) steigt hingegen mit zunehmender Batteriegröße tendenziell an. Die Angaben zum Energieverbrauch der Konzeptfahrzeuge umfassen den konventionellen Kraftstoffverbrauch sowie den Verbrauch an elektrischer Energie. Angesichts der bisher fehlenden standardisierten Messmethodik sind diese Angaben jedoch nur von eingeschränkter Aussagekraft. Neben dem Fehlen von Verbrauchsangaben für ein baugleiches konventionelles Referenzfahrzeug sind keine detaillierten Informationen zum zugrunde gelegten Fahrzyklus dokumentiert. Dennoch zeigen die Energieverbrauchsangaben auf, dass mit ansteigender elektrischer Reichweite der Kraftstoffverbrauch ab- und der elektrische Energiebedarf zunehmen.

Tabelle 29: Übersicht von PHEV-Konfigurationen für unterschiedliche elektrische Reichweiten (Literatursauswertung)

Quelle	Fahrzeugtyp <sup>1</sup>	Gewicht [kg]	Motor [kW]	E-Motor [kW <sub>9</sub> ]	Hybridisierung (DOH) [%]	Batterieenergie [kWh]	Batterieleistung [kW]	kW-kWh-Verhältnis	Max. Entladetiefe der Batterie [%]	Kraftstoffverbrauch [l/100km]	Elektr. Energieverbrauch [kWh/100km]
NREL 2006a	HEV	1451	78	38	33	1.5	50	33.4	37	7.5	0
IEA 2007	HEV	1516	68	57	46	1.4	37	26.4	n.b.	n.b.	n.b.
MIT 2007	PHEV-16	1280	n.b.	n.b.	n.b.	3.6	49	13.5	60	n.b.	n.b.
NREL2006a	PHEV-16	1571	82	44	35	6.9	59	8.6	41	6.7	3.3
IEA 2007	PHEV-16	1541	69	58	46	3.4	48	14.1	70	n.b.	n.b.
IEA 2007	PHEV-30	1561	70	60	46	6.6	50	7.6	70	n.b.	n.b.
DUV 2005	PHEV-32	n.b.	61	51	46	5.9	54	9.2	n.b.	n.b.	n.b.
NREL2006a	PHEV-32	1531	81	43	35	11.8	58	4.9	47	5.7	5.8
MIT 2007	PHEV-48	1340	50	40	44	8.2	45	5.5	70	2.6	6.3
CARB 2007	PHEV-48	n.b.	57	20 / 50	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	73	n.b.	n.b.
NREL2006a	PHEV-48	1569	82	44	35	15.9	59	3.7	53	5	7.8
IEA 2007	PHEV-64	1602	71	61	46	13.3	51	3.8	70	n.b.	n.b.
MIT 2007	PHEV-97	1430	42	53	44	16.5	48	2.9	75	n.b.	n.b.
DUV 2005	PHEV-97	-	38	75	66	17.9	99	5.5	n.b.	n.b.	n.b.
NREL2006a	PHEV-97	1636	84	46	35	23.6	61	2.6	73	3.7	12

<sup>1</sup>: Bezeichnung von Plug-in-Hybridfahrzeugen mit x Kilometern elektrischer Reichweite (PHEV-x)

## Batterietechnologie für die Fahrzeuganwendung

### *Übersicht der Energiespeicheroptionen*

Mit dem zunehmenden Anteil des elektrischen Fahrzeugbetriebs steigen die Anforderungen an das Energiespeichersystem. Ausgehend von der gewöhnlichen Starterbatterie auf Bleibasis wurden zahlreiche leistungsfähigere Batteriekonzepte entwickelt. Im Folgenden sollen die wesentlichen Ansprüche an Batterien im Fahrzeugbetrieb zusammengefasst und die wichtigsten Speichersysteme und ihre Anwendung vorgestellt werden.

Um den elektrischen Fahrzeugbetrieb zu ermöglichen, müssen Batterien eine zunehmende Energie- und Leistungsdichte aufweisen, um sowohl eine hohe Reichweite als auch eine angemessene Leistung bei akzeptablem Batteriegewicht und -volumen gewährleisten zu können. Gleichzeitig muss durch den mobilen Einsatz die Gefahr der plötzlichen und unkontrollierten Energieentladung durch Kurzschluss, Überladung oder Überhitzung möglichst ausgeschlossen sein. Die Lebensdauer der Batterie sollte mindestens der durchschnittlichen Fahrzeugnutzung (jedoch mindestens 8 Jahren) entsprechen. Generell verschlechtert sich die Batteriekapazität über die kalendarische Lebensdauer, unabhängig von der Nutzungsweise, als auch durch die Anzahl und die Art der Ladezyklen. Entsprechend ihrer Nutzung werden Batterien bezüglich ihrer Leistungs- und Energiekapazität unterschiedlich ausgelegt. Die Batterie muss gegenüber Temperaturschwankungen und Ladestatusschwankungen unempfindlich sein und die Anforderungen an Leistung und Energie davon unabhängig gewährleisten. Da die Batteriekosten die wesentlichen Zusatzkosten beim Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen darstellen, entscheiden diese über die Rentabilität eines entsprechenden Fahrzeugs (CARB 2007).

Nickel-Cadmium-Batterien kamen in den 90<sup>er</sup> Jahren in ersten Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Insbesondere aufgrund ihrer hohen Selbstentladung und der geringen Toleranz gegenüber häufigen Lade- und Entladevorgängen wurde diese Technologie weitgehend verdrängt (ENG 2007). Im letzten Jahrzehnt konnte der Preis von NiCd-Batterien drastisch reduziert werden, weitere Kostensenkungen sind jedoch nicht zu erwarten, da die Batteriekosten im Wesentlichen vom Nickel-Rohstoffpreis bestimmt werden (MUNT 2007).

Sogenannte ZEBRA-Batterien auf Natrium-Nickelchlorid-Basis arbeiten im hohen Temperaturbereich und kommen hauptsächlich bei Nutzfahrzeugen zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer und Robustheit aus und verfügen über eine relativ hohe Energiedichte bei moderaten Kosten. Aufgrund ihrer geringen Leistungsdichte genügen sie jedoch nicht den Leistungsanforderungen von HEV, PHEV und BEV und werden daher nur in geringer Stückzahl (1.500 pro Jahr) produziert. Einsatzmöglichkeiten bieten sich bei kleinen BEV (Bsp. Smart ed in London) und für hybridisierte Nutzfahrzeuge und Linienbusse (CARB 2007).

Die Nickel-Metallhydrid-(NiMH-)Batterie stellt momentan die Standardenergiespeichertechnologie für Hybridfahrzeuge dar und wird auch in den bisher entwickelten

Elektrofahrzeugen vorzugsweise eingesetzt. NiMH-Batterien zeichnen sich durch eine relativ hohe Leistungsdichte, eine hohe Zyklenfestigkeit und Lebensdauer bei vernachlässigbaren Sicherheitsrisiken aus. In Japan werden ausgereifte Hochleistungs-NiMH-Batterien in einer jährlichen Stückzahl von 500.000 bei weiterhin hohen Kosten produziert. Diese Technologie stellt die Grundlage für marktfähige HEV, wie den Toyota Prius dar. Mittlere-Leistung/Energie-Batterien auf NiMH-Batterien würden einen Einsatz bei PHEV mit geringer elektrischer Reichweite erlauben. Hochenergie-NiMH-Batterien sind weiterhin sehr kostenintensiv und es sind kaum technologische Fortschritte zu erwarten (CARB 2007).

Angesichts der – in Bezug auf Lithium-Ionen-Batterien – wesentlich geringeren Energiedichte von NiMH-Batterien und nur geringen technologischen Entwicklungspotenzialen, wird der Einsatz dieser Technologie für PHEV mit größerer Reichweite und BEV als unwahrscheinlich bewertet. [Ein Fahrzeug mit einer elektrischen Reichweite von 100-150 km auf Basis einer NiMH-Batterie mit 30 kWh würde beispielsweise ein Zusatzgewicht von 540 bis 600 kg haben.] Im Fokus der NiMH-Entwicklung steht primär die Kostenreduktion der bestehenden Speichertechnologie für den Einsatz in HEV (CARB 2007).

Lithium-Ionen-Batterien stellen die momentan aussichtsreichste Energiespeichertechnologie dar. Ausgehend von der Entwicklung entsprechender Batterien für elektronische Kleingeräte, wird in den letzten Jahren verstärkt an deren Einsatz im Automobilsektor geforscht. Durch die elektrochemisch bedingte höhere Spannung von Lithium-Ionen-Zellen im Vergleich zu den bisher diskutierten Energiespeichern, können Batterien auf Lithium-Ionen-Basis wesentlich höhere Energiedichten erzielen. Weiter zeichnet sich dieser Batterietyp durch eine relativ hohe Zyklenfestigkeit und lange Lebensdauer sowie eine geringe Selbstentladungsrate aus. Zwar ist die Lithium-Ionen-Zelle empfindlich gegenüber Überladung, Sicherheitsrisiken aufgrund von elektrischen, elektrochemischen, thermischen und mechanischen Einwirkungen gelten jedoch als beherrschbar. Bei den bisher erfolgten etwa 200 Fahrzeugtests mit Lithium-Ionen-Batterien wurden keine nennenswerten Zwischenfälle beobachtet (CARB 2007). Die bislang erzielte Energie- und Leistungsdichte von Li-Ionen-Batterien erfüllt bereits die Minimalanforderungen für kleine und mittlere BEV sowie für PHEV mit geringer elektrischer Reichweite bei einer nur mäßigen Steigerung des Fahrzeuggewichts. Der Einsatz modifizierter Materialien (u.a. Elektroden) könnte perspektivisch eine weitere Steigerung der Energiedichte und Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie nach sich ziehen (CARB 2007). Insbesondere die weiterhin hohen Kosten dieses Batterietyps sowie noch bestehender Forschungsbedarf bei der Konstruktion von Li-Ionen-Batteriesystemen für den Fahrzeugeinsatz haben den Markteintritt dieser Technologie verzögert. Die prognostizierte Kostendegression in Abhängigkeit von der Produktionsmenge variiert beträchtlich.

Langfristig stellt die Lithium-Schwefel-Batterie eine weitere Option mit der höchsten theoretischen Energiedichte aller Batteriesysteme dar. Angesichts der schwierigen Handhabbarkeit von metallischem Lithium, der Gefahr einer zellinternen



elektrochemischen Entladung, der bislang geringen Zyklenfestigkeit und hohen Kosten ist mit der Marktfähigkeit mittelfristig nicht zu rechnen (CARB 2007).

Abschließend lässt sich in der Batterieentwicklung seit dem Jahr 2000 ein deutlicher Fortschritt konstatieren, der im Wesentlichen von der Entwicklung von Energiespeichern für tragbare elektronische Geräte und vom neuen Marktsegment der HEV getrieben ist und die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie gefördert hat. In Zukunft werden, laut Einschätzung der Hersteller (CARB 2007), im Automobilsektor hauptsächlich die NiMH- und die Li-Ionen-Technologie zum Einsatz kommen, wobei bei NiMH-Batterien eine weitere Kostenminderung bei der Herstellung und eine Ausrichtung auf den HEV-Massenmarkt im Fokus steht. Lithium-Ionen-Batterien werden als Alternativtechnologie für den HEV-Einsatz entwickelt und kurzfristig die Marktreife erreichen. Li-Ionen-Hochenergiebatterien für die PHEV- und City-BEV-Anwendung werden angesichts der weiterhin hohen Kosten und noch ungeklärten Anforderungen seitens der Automobilhersteller an die Speichertechnologie bisher nur in kleinen Produktionsmengen geplant.

Die zukünftige Entwicklung der Batterietechnologie steht in enger Kopplung mit dem Fahrzeugmarkt. Sollte sich die Nachfrage nach Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb stark erhöhen, so ist auch damit zu rechnen, dass durch einen höheren Kapitaleinsatz weitere technologische Fortschritte und Kostenminderungen erzielt werden können. Diese sind allerdings nur schwer zu prognostizieren.

#### *Anforderungen an Batterien für die PHEV-Anwendung*

Der Einsatz von Energiespeichern in PHEV ist gegenüber HEV durch eine größere Batterie mit einer höheren Batteriekapazität gekennzeichnet; im Vergleich zu BEV ist die erforderliche Batteriekapazität und -leistung jedoch geringer. Die Anforderungen an die Batterieleistung hängen vom gewählten Hybridisierungsgrad ab und steigen mit diesem an.

In Tabelle 30 sind die in der Literatur formulierten Anforderungen an Energiespeicher für PHEV mit unterschiedlicher elektrischer Reichweite formuliert. Zu Vergleichszwecken sind diese Angaben ebenfalls für HEV und BEV aufgeführt. Ausgehend von den Anforderungen an Batterieenergie und -leistung für die jeweilige PHEV-Anwendung wurden die hier dokumentierten Zielwerte für die Energie- und Leistungsdichte formuliert, die eine markttaugliche fahrzeugtechnische Umsetzung erlauben würden. Bei Überschreitung dieser Richtwerte würde der erforderliche Energiespeicher durch sein Eigengewicht und -volumen im Fahrzeug kaum integrierbar sein. Die Angaben zu den spezifischen Batteriekosten stellen nicht die aktuellen Kosten dar, sondern unterstellen eine fortschreitende Technologieentwicklung und eine zunehmende Nachfrage nach entsprechenden Energiespeichern. Die Werte in Klammern stellen langfristige Kostenziele dar, die ab einem jährlichen Produktionsvolumen von 100.000 Batteriesystemen und bis zum Jahr 2030 als erreichbar eingeschätzt werden. Es ist zu beachten, dass die spezifischen Kosten sich mit zunehmender Batteriegröße grundsätzlich verringern, da der Kostenanteil der Herstellung, des Batteriegehäuses und der Steuerung sinkt (CARB 2007). Daher

stellen sich größere Batteriesysteme für bspw. BEV relativ betrachtet zu Batterien für die HEV-Anwendung kostengünstiger dar. Bei kleinen Produktionsvolumina sind insbesondere die Herstellungskosten dominant, mit fortschreitender Technologieentwicklung und ansteigenden Produktionsvolumina werden die Materialkosten zum wesentlichen Kostenfaktor (MIT 2007). Die Kostenannahmen berücksichtigen nicht einen möglichen Anstieg der Rohstoffpreise bei zunehmender Batterieproduktion.

Tabelle 30: Anforderungen an Batteriespeicher für PHEV mit unterschiedlicher elektrischer Reichweite - technologieunabhängig (Literatúrauswertung)

Quelle	Fahrzeugtyp	Batterie-energie [kWh]	Batterie-leistung [kW]	spez. Energie [Wh/kg]	Spez. Leistung [W/kg]	Spez. Batteriekosten [€/kWh]
MIT 2007	HEV	1.3	28	100	3000	550 (440) <sup>1</sup>
CARB 2007	PHEV-16	4	n.b.	110	1500	420-640 (290-440) <sup>1</sup>
MIT 2007	PHEV-16	3.2	43	110	n.b.	310 (250) <sup>1</sup>
NREL 2007	PHEV-16	4.9	46	n.b.	n.b.	n.b.
CARB 2007	PHEV-32	7	65	50	540	320-430 (220-300) <sup>1</sup>
MIT 2007	PHEV-48	10	40	135 (100-300)	750	310 (230) <sup>1</sup>
MIT 2007	PHEV-48	8.2	44	135	750	310 (230) <sup>1</sup>
CARB 2007	PHEV-64	14 (12)	50	75	400	280-320 (190-220) <sup>1</sup>
NREL 2007	PHEV-64	16.6	50	n.b.	n.b.	n.b.
MIT 2007	PHEV-97	16.5	48	140	400	200 (160) <sup>1</sup>
MIT 2007	BEV-200	48	80	150	300	180 (150) <sup>1</sup>
CARB 2007	BEV	40	100	100	400	215 (150) <sup>1</sup>

<sup>1</sup>: langfristiges Szenario (bei hoher Produktionsmengen und starkem techn. Fortschritt)

### Anforderungen an Batterien für die BEV-Anwendung

Die Batterieanforderungen für kleine und mittlere BEV (Tabelle 31) orientieren sich an den in CARB (2007) getroffenen Angaben, welche auch weitestgehend mit den Zielwerten des U.S. Advanced Battery Consortiums (USABC) und des FreedomCar Programms übereinstimmen. Diese werden auch von weiteren Autoren als Mindestanforderungen genannt (u.a. in MIT (2000)). Ob die Technologieentwicklung diese Zielwerte in den nächsten Jahren für fahrzeugtaugliche Batteriesysteme erreichen kann, wird von Experten unterschiedlich eingeschätzt, jedoch werden diese Vorgaben grundsätzlich als sehr ambitioniert bewertet. Im Vergleich zur PHEV-Anwendung erfordert der Betrieb von BEV eine wesentlich höhere (doppelte) Batterieleistung und – je nach elektrischer Reichweite – auch eine höhere Batteriekapazität. Um eine sinnvolle fahrzeugtechnische Umsetzung gewährleisten zu



können, werden daher ambitionierte Anforderungen an die Leistungs- und Energiedichte der Batterie gestellt. Laut Expertenmeinung wird mittelfristig mit der Erfüllung der erforderlichen Batterieeigenschaften insbesondere durch die Lithium-Ionen-Speichertechnologie gerechnet.

Tabelle 31: Mindestanforderungen an Batterien für den BEV-Einsatz nach CARB (2007)

Fahrzeugklasse	Gewicht [max. kg]	Spitzenleistung [min. kW]	Leistungsdichte [min. W/kg]	Energiespeicher- kapazität [min. kWh]	Energiedichte [min. Wh/kg]
Pkw - klein	250	50	200	25	100
Pkw - mittel	250	100	400	40	150

### Aktueller Stand der Batterieentwicklung

Eine Übersicht über den aktuellen Entwicklungsstand der Batteriespeicher gibt Tabelle 32. Grundsätzlich unterscheiden sich Li-Ionen- von NiMH-Batterien durch eine wesentlich höhere Energiedichte, aber auch höheren Kosten und einer noch nicht erfolgten serientauglichen Kopplung von Einzelzellen zu robusten Batteriesystemen. Sollten diese technischen Probleme jedoch überwunden werden, so würde die Energiedichte von Li-Ionen-Batterien den Anforderungen für den Einsatz in PHEV und BEV gerecht werden. Die Leistungsdichte von NiMH- und Li-Ionen-Systemen unterscheidet sich nur unwesentlich und stellt für die PHEV-Anwendung – und die BEV-Anwendung mit den oben genannten Einschränkungen – kein Hemmnis dar. Bei den bestehenden spezifischen Batteriekosten würde ein PHEV-/BEV-Batteriesystem, je nach elektrischer Reichweite, Zusatzkosten von mehreren tausend bis zehntausend Euro verursachen.

Tabelle 32: Aktueller technischer Entwicklungsstand von Batteriespeichern (Literaturauswertung)

Quelle	Batterietyp	spez. Energie [Wh/kg]	Spez. Leistung [W/kg]
VW 2008	NiMH für HEV (nach METI)	40	1300
CONTI 2008	NiMH	40-50	1300-1800
IEA 2007	NiMH (Hochenergiebatterie)	60-80	200-600
ZSW 2007	Li-Ionen	70	2000
VW 2007	Li-Ionen	100	1000
VW 2008	Li-Ionen für HEV (nach METI)	70	1800
CONTI 2008	Li-Ionen, aktuell	75-90	4000
MIT 2007	Li-Ionen (Hochenergiebatterie)	150-180	n.b.
MIT 2007	Li-Ionen	80-110	400-2500
IEA 2007	Li-Ionen (Hochenergiebatterie)	110-220	200-600

Eine Abschätzung der Materialzusammensetzung von NiMH- und Li-Ionen für die Anwendung in Hybridfahrzeugen ist in Tabelle 33 für die wichtigsten Werkstoffe dokumentiert. Angesichts der fortschreitenden Speichertechnologieentwicklung ist eine veränderte Materialzusammensetzung von Batterien für die PHEV- und BEV-Anwendung denkbar, jedoch liegen hierzu keine detaillierten Daten vor und können daher zunächst nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 33: Materialzusammensetzung von Li-Ionen- und NiMH-Batterien

Batterietyp	Materialien					
	Aluminium	Kupfer	Mangan	Stahl	Kunststoffe	Andere
Li-Ionen	31,5 %	14,5 %	12,1 %	9,6 %	10,1 %	22.20%
NiMH	Nickel	Eisen	PVC,PP	Zirkonium	Kaliumhydroxid	Andere
	40.2%	21.8%	12.2%	4.7%	4.3%	16.8%

Quelle: DHIN 2001, IPTS 2005

## Energieeffizienz und Energiebedarf

### Plug-in-Hybridfahrzeuge

Der Energiebedarf von PHEV wird insbesondere bestimmt von der elektrischen Reichweite, der Konfiguration (rein elektrischer versus Mischmodus) und der Fahrsituation. Wie bereits erläutert, kommen im PHEV-Betrieb zwei unterschiedlichen Energieträgern (konventioneller Kraftstoff und Strom) zum Einsatz, die je nach Fahrmodus variieren. In den folgenden Betrachtungen wird vereinfachend lediglich von zwei Fahrmodi ausgegangen, die in der Realität vermutlich nicht in dieser Trennschärfe auftreten, jedoch die Abschätzung des Energieverbrauchs wesentlich vereinfachen. Es wird die Annahme getroffen, dass PHEV entsprechend ihrer elektrischen Reichweite zunächst bis zu einem kritischen Ladestand der Batterie rein elektrisch betrieben werden und danach im gemischten Modus, der dem gewöhnlichen Hybridantrieb entspricht, weiter betrieben werden. Dies bedeutet, dass im elektrischen Fahrbetrieb lediglich Strom aus dem Batteriespeicher verbraucht wird (im sogenannten Charge Depleting-Modus) und im folgenden Charge Sustaining-Modus die Batterie lediglich der Funktionalität in einem gewöhnlichen Hybridfahrzeug entspricht und konventioneller Kraftstoff den Energiebedarf des Antriebs deckt.

Weiter ist zu beachten, dass der Energieverbrauch zwischen verschiedenen Fahrsituationen stark variiert. Daher wird der erforderliche Energieeinsatz für verschiedene Fahrsituationen differenziert ausgewiesen.

#### Fahrmodus 1 (rein elektrisch – Charge Depleting-Modus)

In Tabelle 34 sind Literaturangaben zum Energiebedarf von PHEV unterschiedlicher elektrischer Reichweite bei rein-elektrischem Fahrbetrieb im CD-Modus überblicksartig zusammengestellt und deren relative Verbrauchsminderung gegenüber konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (CV) und konventionellen

Hybridfahrzeugen für verschiedene Fahrsituationen aufgeführt. Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass diese großteils aus Fahrzeugsimulationen hervorgegangen sind und daher nur eingeschränkt den tatsächlichen Verbrauch im Realbetrieb widerspiegeln können. Dennoch zeigen die Verbrauchsangaben erste Trends auf und ermöglichen eine Abschätzung von Verbrauchsminderungspotenzialen gegenüber konventionellen Pkw.

Es gilt zu beachten, dass die ermittelten Energieverbräuche auf der Annahme basieren, dass die Leistungsanforderungen des jeweiligen Fahrzyklus vollständig durch den elektrischen Antriebsstrang gewährleistet werden können. Da dies nicht für den ARTEMIS Motorway-Fahrzyklus gilt, sind die hierfür ermittelten Energiebedarfe nur eingeschränkt belastbar.

Grundsätzlich weisen PHEV im elektrischen Betrieb deutliche Energieeinsparungen sowohl gegenüber CV als auch HEV auf, wobei insbesondere im niedrigen bis mittleren Geschwindigkeitsbereich und bei häufig sich ändernder Fahrdynamik die höchsten Potenziale erreicht werden.

Tabelle 34: Energiebedarf von PHEV im rein-elektrischen Fahrbetrieb (CD-Modus) und relative Verbrauchsänderung gegenüber HEV und CV in verschiedenen Fahrsituationen (Literaturauswertung)

Quelle	Fahrzeugtyp	Fahrsituation	Verbrauch [kWh/100km]	Verbrauchsänderung bzgl. HEV (Benzin)	Verbrauchsänderung bzgl. CV (Benzin)
ARG 2008 / IEA 2007	PHEV-16/-64	UDDS <sup>1</sup>	11,2 / 11,6 (16,9 / 17,7) <sup>6</sup>	-60 / -58 % (-58 / -56 %)	-80 / -80 % (-78 / -77%)
ARG 2008 / IEA 2007	PHEV-16/-64	HWY <sup>2</sup>	12,6 / 12,8 (18,1 / 18,6) <sup>6</sup>	-61 / -60 % (-60 / -59 %)	-69 / -68 % (-68 / -67 %)
IEA 2007	PHEV-16/-64	Artemis Urban <sup>3</sup>	14,4 / 14,7	-56 / 56 %	-83 / -83 %
IEA 2007	PHEV-16/-64	Artemis Road <sup>4</sup>	12,5 / 12,8	-59 / 58 %	-74 / -73 %
IEA 2007	PHEV-16/-64	Art. Motorway <sup>5</sup>	26,1 / 26,6	- 74 / 73 %	-59 / -58 %
ENG 2007	PHEV-30	innerorts	14,4	-	-83 %
ENG 2007	PHEV-30	außerorts	19,6	-	-64 %
ENG 2007	PHEV-30	kombiniert	17,9	-	-73 %
WWF 2008	PHEV-x	-	17,0	-	-75 %

<sup>1</sup>: U.S. urban dynamometer driving schedule (~12 km à ~31 km/h)

<sup>2</sup>: U.S. highway driving cycle (16,3 km à 77,1 km/h)

<sup>3</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Urban Cycle, on-road)

<sup>4</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Road Cycle, on-road)

<sup>5</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Motorway Cycle, on-road)

<sup>6</sup>: geschätzter Realverbrauch (berücksichtigt Kaltstarts, Energieverbrauch der Nebenaggregate, reales Fahrverhalten)

### Fahrmodus 2 (hybridisiert – Charge Sustaining-Modus)

Der Betrieb von PHEV im CS-Modus setzt nach Erreichen eines kritischen Ladezustands der Batterie und vorausgegangenem rein-elektrischem Betrieb ein und entspricht im Wesentlichen dem konventionellen Hybridantrieb, der den Verbrennungsmotor als Hauptantrieb und die Batterie lediglich als Zwischenspeicher für kurzfristig überschüssige Energie nutzt, aber nicht weiter entlädt.

Die Simulationsergebnisse für den Hybridbetrieb im CS-Modus weisen zwar weiterhin eine deutlich Minderung des Kraftstoffbedarfs in allen Fahrsituationen gegenüber CV auf, allerdings werden höhere Kraftstoffverbräuche als bei HEV generiert. Der Verbrauchsnachteil von PHEV lässt sich im Wesentlichen mit dem höheren Fahrzeuggewicht und einem weniger günstigen Betrieb des Verbrennungsmotors erklären.

Tabelle 35: Relative Veränderung des Kraftstoffbedarfs von PHEV gegenüber HEV und CV im CS-Modus in verschiedenen Fahrsituationen (Literaturauswertung)

Quelle	Fahrzeugtyp	Fahrsituation	Verbrauchsänderung bzgl. HEV (Benzin)	Verbrauchsänderung bzgl. CV (Benzin)
ARG 2008	PHEV-16/-32/-64	UDDS <sup>1</sup>	+8 / +10 / +13 %	- 48 / -47 / -46%
IEA 2007*	PHEV-16/-32/-64	UDDS <sup>1</sup>	+3 / +3 / +6 %	-50 / -50 / -48 %
IEA 2007	PHEV-16/-32/-64	UDDS <sup>1</sup>	+10 / +11 / +13 %	- 47 / -47 / -46 %
ARG 2008	PHEV-16/-32/-64	HWY <sup>2</sup>	+20 / +22 / +14%	-42 / -42 / -45 %
IEA 2007*	PHEV-16/-32/-64	HWY <sup>2</sup>	+3 / +3 / +3 %	-18 / -18 / -22 %
IEA 2007	PHEV-16/-32/-64	HWY <sup>2</sup>	+7 / +9 / +11%	-15 / -14 / -12 %
IEA 2007	PHEV-16/-32/-64	Artemis Urban <sup>3</sup>	+5 / +5 / +8 %	-60 / -59 / -58 %
IEA 2007	PHEV-16/-32/-64	Artemis Road <sup>4</sup>	+8 / +9 / +10 %	-32 / -32 / -31 %
IEA 2007	PHEV-16/-32/-64	Art. Motorway <sup>5</sup>	-44 / -44 / -42 %	-14 / -13 / -9 %

\*: erste Simulationsergebnisse ohne Anpassung der Antriebskomponenten für rein-elektrisches Fahren

<sup>1</sup>: U.S. urban dynamometer driving schedule (~12 km à ~31 km/h)

<sup>2</sup>: U.S. highway driving cycle (16,3 km à 77,1 km/h)

<sup>3</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Urban Cycle, on-road)

<sup>4</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Road Cycle, on-road)

<sup>5</sup>: Common ARTEMIS driving cycle (Motorway Cycle, on-road); Qualität der Simulationsergebnisse laut Autor fragwürdig

Die ARTEMIS-Fahrzyklen weisen im Vergleich zu den US-Fahrzyklen (HWY & UDDS) eine wesentlich stärkere Orientierung am realen Fahrverhalten auf und generieren daher auch höhere absolute Energieverbräuche. Die US-Fahrzyklen unterschätzen hingegen insbesondere das Beschleunigungs- und Bremsverhalten im Realbetrieb (IEA 2007). Da die Veränderung des Energiebedarfs von PHEV gegenüber CV als relative Größe betrachtet wird, sind diese Effekte jedoch weitestgehend vernachlässigbar.

### Batterie-elektrische Fahrzeuge

In der Literatur werden unterschiedliche Energieeffizienzzraten (Tabelle 36) und Energiebedarfe (Tank-to-Wheel) für BEV ausgewiesen.

Tabelle 36: Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen (Literaturauswertung)

Quelle	Ladung	Selbst-entladung	Elektrischer Motor	Getriebe	Energieverteilung / elektr. Widerstand	Gesamteffizienz (Tank-to-Wheel)
ILEA 2005	-5%	-7%	-4%	-2%	-6%	76%
ENG 2007	-10 bis -15%	-	-	-	-	-
MIT 2000	keine Angabe	-5%	-8%	-5%	keine Angabe	61,5% (io) 58,8% (ao)
ZSW 2007	-5%	-	-	-	-	-
ABERN 2006	-	-	-	-6%	-14%	80%
WWF 2008	-	-	-	-	-	65%
IEA 2005	- 11%	- 6%	-	- 11%	-	74%

Die aufgeführten Energieverbräuche (Tabelle 37) beziehen sich entweder auf Messungen von Testfahrzeugen (CARB 2007, EDIS 1999, ENG 2007) oder sind auf Basis der in Tabelle 36 aufgeführten Gesamteffizienz abgeschätzt (MIT 2000). In CARB (2007) werden Energieverbräuche von etwa 15 Testfahrzeugen mit elektrischem Antrieb ausgewiesen. EDIS (1999) dokumentiert ausführliche Fahrtests des NISSAN ALTARA-EV mit einer Batterie auf Lithium-Ionen-Basis. Die Annahmen zum Energieverbrauch von BEV in ENG (2007) basieren auf einem Testfahrzeug des Cleanova-Programms. MIT (2000) schätzt den Energieverbrauch über den Energieverbrauch in Bezug auf ein konventionell angetriebenes Fahrzeug (29 %) ab. Es gilt zu beachten, dass die Verbrauchsangaben unter unterschiedlichen Bedingungen ermittelt und teilweise lediglich Bandbreiten angeben wurden; jedoch nicht auf Basis eines standardisierten Messzyklus' ermittelt wurden. Ob die Verbrauchswerte die Verluste beim Ladevorgang bereits mitberücksichtigen ist nur teilweise dokumentiert. Beim weiteren Vorgehen werden Ladeverluste bei der Energieverbrauchsangabe jedoch einbezogen. Weiter bleibt offen, wie sich der elektrische Betrieb von Nebenaggregaten und mögliche Standverluste der Batterie auf den durchschnittlichen Energieverbrauch auswirken. Wie sich das durch den Einsatz der Traktionsbatterie verursachte Zusatzgewicht des Fahrzeugs auf den Energieverbrauch auswirkt oder ob dieses durch entsprechende Leichtbaumaßnahmen kompensiert wird, ist für die erwähnten Testfahrzeuge nicht ersichtlich.

Tabelle 37: Mittlerer Energieverbrauch [kWh/100km] von Elektrofahrzeugen (Literaturauswertung)

Fahrzeugklasse	ENG 2007	CARB 2007	EDIS 1999	MIT 2000
klein	12 (io) / 18 (ao)	-	-	-
mittel	15 (io) / 20 (ao)	20-25	16-25 (io) / 19-24 (ao)	16 (io) / 11,7 (ao)

## Zusatzkosten des elektrischen Antriebs

### Plug-in-Hybridfahrzeuge

Die Zusatzkosten von Hybridfahrzeugen gegenüber konventionellen verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeugen werden in der aktuellen Literatur (siehe Tabelle 38) mit etwa 3.000 bis 5.000 € beziffert. Dies entspricht einem Kostenaufschlag von 15 bis 20 % (IPTS 2005). Nach Expertenschätzungen (in IPTS 2005) ist jedoch bis 2010 auf Grund von zu erwartenden Skaleneffekten durch technologische und Produktionsfortschritte mit einer Minderung der Mehrkosten bis 2010 um 30 % und bis 2020 um 50 % zu rechnen.

Für PHEV werden auf Grund des erforderlichen größeren Energiespeichers wesentlich höhere Zusatzkosten veranschlagt, die jedoch in der Literatur, je nach den getroffenen Annahmen zur Batteriekostenentwicklung, stark variieren. Bei optimistischen Annahmen zur Speicherentwicklung werden die Zusatzkosten für PHEV mit 30 bis 50 Kilometern elektrischer Reichweite mit etwa 2.800 und bis zu 8.000 € beziffert.

Tabelle 38: Zusatzkosten [€] von HEV und PHEV unterschiedlicher elektrischer Reichweite in Bezug auf ein konventionelles verbrennungsmotorisches Vergleichsfahrzeug (Literaturauswertung)

Quelle	HEV	PHEV-16	PHEV-30	PHEV-50	PHEV-60	PHEV-100
PLOT 2001	4.000-4.700	-	7.200-8.000	-	-	-
EPRI 2001	4.000	-	6.000	-	-	10.500
EPRI 2001	2.300	-	-	-	-	6.900
DUV 2002	2.600	-	4.300	-	7.800	-
IPTS 2005	3.000-5.000	-	-	-	-	-
CARB 2007	-	-	-	5.800	8.000	-
IEA 2005	-	-	3.200-4.900	-	-	6.000-8.300
IPTS 2005	3.200 (1.665/1.243) <sup>1</sup>	-	-	-	-	-
MIT 2007	1.400 (1.200) <sup>1</sup>	2.200 (2.000) <sup>1</sup>	-	3.100 (2.800) <sup>1</sup>	-	4.500 (3.800) <sup>1</sup>

<sup>1</sup>: langfristiges Szenario (bei hoher Produktionsmengen und starkem techn. Fortschritt)

Eine detaillierte Betrachtung der Zusatzkosten von PHEV weist auf die besondere Bedeutung des Energiespeichers als Hauptkostenfaktor – insbesondere bei großer elektrischer Reichweite – hin. Weitere Zusatzkosten werden durch die weiteren Komponenten des elektrischen Antriebs, wie Elektromotor / Generator, Motorsteuerung, aber auch durch zusätzlich erforderliche Verkabelung, das Ladegerät und weitere Nebenaggregate verursacht. Kosten mindernd wirken sich insbesondere die kleinere Ausgestaltung des Verbrennungsmotors und der mögliche Verzicht auf ein mechanisches Getriebe aus.

### **Batterie-elektrische Fahrzeuge**

Die Zusatzkosten von Batterie-elektrischen Fahrzeugen gegenüber ihrem konventionellen verbrennungsmotorischen Pendant werden in noch stärkerem Maße durch den erforderlichen leistungsfähigen – und weiterhin kostenintensiven – Energiespeicher verursacht.

Die prognostizierten Batteriekosten bewegen sich in einer großen Spannbreite und sind – wie der technische Fortschritt bei der Lithium-Ionen-Batterieentwicklung – mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die Kostenentwicklung ist im Wesentlichen an die Marktdurchdringung, und somit an die produzierte Stückzahl, gekoppelt. Entsprechend werden in der Literatur für verschiedene Marktdurchdringungsszenarien unterschiedliche Preisspannen angegeben.

Bei den aktuellen Kostenprognosen von Herstellern und Experten, würde dies für die betrachteten Fahrzeugklassen folgende Zusatzkosten bedeuten:

- Beim aktuellen Preis der Li-Ionen-Technologie (1000 €/kWh): 25.000 € (Pkw – klein) bzw. 40.000 € (Pkw – mittel) und mittelfristig (100-300 €/kWh) 5.000 € bzw. 6.000 € für das erforderliche Batteriespeichersystem.
- Auf Basis der Schätzung der aktuellen NiMH-Kosten nach CARB (2007) von etwa 240 bis 310 €/kWh würden sich für einen Kleinwagen Batteriesystemkosten von 6.000 bis 7.700 € und für einen Mittelklassewagen von 9.500 bis 12.700 € ergeben.
- Die Batteriekosten für ein leichtes Nutzfahrzeug mit elektrischem Antrieb und etwa 100 Kilometern elektrischer Reichweite würde sich unter ähnlichen Annahmen zwischen kurzfristig 33.000 € und längerfristig 7.500 € bewegen.
- Die Batteriekostenprognose (CARB 2007) rechnet bei einem jährlichen Produktionsvolumen von 20.000 Li-Ionen-Batteriesystemen langfristig mit Kosten von etwa 215 €/kWh und bei einem Volumen von 100.000 Stück mit etwa 150 €/kWh.

Für die Kostenabschätzung der Renewbility-Elektrofahrzeuge wird die Batteriekostenprognose nach CARB (2007) als Grundlage herangezogen, da sie auf umfangreichen Herstellerbefragungen basiert und auch in ihrer Tendenz von anderen



Autoren bestätigt wird. Für 2010 werden ergänzend die in der METI-Studie für dieses Jahr prognostizierten Kosten für Lithium-Ionen-Speicher – unter der Annahme von fortschreitender technologischer Entwicklung und Skaleneffekten – von 660 €/kWh (VW 2008) angenommen, die Kostenabschätzung für 2020 bezieht sich auf die oben genannten Produktionsvolumen von 20.000 entsprechenden Batteriesystemen, für 2030 auf 100.000. Bezogen auf den Fahrzeugneupreis würden sich unter diesen Annahmen für Batterie-elektrische Fahrzeuge im Jahr 2010 Zusatzkosten von über 100 % ergeben, die sich mit zunehmender Kostendegression bis 2030 auf 30 bis 35 % reduzieren würden.

## Veränderter Materialbedarf

### Plug-in-Hybridfahrzeuge

Neben dem Einsatz eines leistungsfähigen Energiespeichers, der die wesentlichste Veränderung des Materialeinsatzes bedingt, erfordert der elektrifizierte Antrieb in PHEV die Veränderung weiterer Antriebskomponenten und einem entsprechend modifizierten Werkstoffeinsatz. Wesentliche zusätzliche Komponenten sind:

- der Elektromotor bzw. Generator,
- Strom- und Spannungsregler,
- Gleich-/Wechselstromwandler,
- Steuerungsmodule / Elektronik.

Gleichzeitig kann bei einer zunehmenden Hybridisierung die Größe des Verbrennungsmotors verringert (Downsizing) und auf die konventionelle Blei-Starterbatterie sowie die Lichtmaschine verzichtet werden.

In Hybridfahrzeugen kommen unterschiedliche Elektromotoren/Generatoren zum Einsatz. Für die Bilanzierung des Zusatzgewichts sowie der Materialänderung, die durch den Elektromotoreinsatz in PHEV verursacht wird, wird ein 50 kW Gleichstrom-Elektromotor als Referenz (siehe Tabelle 39) herangezogen.

Tabelle 39: Bauteile und Gewicht eines 50 kW Elektromotors

Bauteil	Eisenkern	Verkabelung	Gehäuse	Gesamt
Material	Eisen	Kupfer	Aluminium	-
Gewicht [kg]	30	15	5	50

Quelle: Berechnungen Öko-Institut nach IPTS 2005

Unterschiedliche Spannungshöhen im System erfordern entsprechende Strom- und Spannungsregler, die entsprechend (siehe Tabelle 40) für Hybridfahrzeuge bilanziert



werden. Der Einsatz eines Drehzahlreglers wird in der Literatur (IPTS 2005) mit einem Zusatzgewicht von 15 kg für ein 70 kW System angegeben. Steuerungsmodul und weitere Elektronik werden mit einem Zusatzgewicht von 10 kg gegenüber einem konventionellen Fahrzeug bilanziert.

Tabelle 40: Gewicht weiterer zusätzlicher Komponenten des Elektroantriebs und deren Materialbedarf

Bauteil	Hauptwandler	Zusatzwandler	Drehzahlregler	Steuerungsmodul		
Gewicht [kg]	10	3	15	10		
Material	Aluminium	Kupfer	Kohlenstoff	Stahl	Silizium	Kunststoffe
Gewicht [kg]	7.6	5.7	1.9	5.7	9.5	7.6

Quelle: Berechnungen Öko-Institut nach IPTS 2005

Die zunehmende Hybridisierung des Fahrzeugantriebs geht mit einer Minderung der Leistungsanforderung an den Verbrennungsmotor einher und ermöglicht somit eine Verringerung seiner Größe. Weiter ermöglicht der Hybridantrieb mittelfristig den Verzicht auf die konventionelle Starterbatterie. Diese beiden Effekte schlagen sich in einer Minderung des Fahrzeuggewichts und des Materialbedarfs nieder, die in Tabelle 41 für eine Hybridisierung mit einer Minderung der verbrennungsmotorischen Leistung um 30 % dargestellt sind.

Tabelle 41: Änderung von Fahrzeuggewicht und Materialzusammensetzung durch Motor-Downsizing und den Wegfall der Starter-Batterie

Bauteil / Maßnahme	Motor-Downsizing			Starter-Batterie
Material	Aluminium	Eisen	Stahl	Blei
Gewicht [kg]	- 3	- 3	- 4	- 13

Quelle: Berechnungen Öko-Institut nach IPTS 2005

### Batterie-elektrische Fahrzeuge

Die wesentlichste Materialänderung durch die Elektrifizierung des Antriebs stellt – wie auch bei PHEV – der Einsatz des Batteriespeichers dar. Die Blei-Starterbatterie wird durch die wesentlich leistungsfähigere, aber auch schwerere Traktionsbatterie ersetzt. Die Materialanteile der Batterie werden auf Basis von IPTS (2005) für die 5 dominanten Werkstoffe ermittelt (Tabelle 33); Lithium wird dabei, aufgrund seines geringen Anteils bisher nicht bilanziert. Weiter ist zu beachten, dass angesichts der fortlaufenden Lithium-Ionen-Batterieentwicklung deren endgültige Zusammensetzung im Fahrzeugbau noch nicht geklärt ist und somit durchaus geänderte Materialanteile

längerfristig möglich sind. Bisher liegen hierzu jedoch in der Literatur keine detaillierteren Angaben vor.

Neben dem erforderlichen Speichersystem werden durch den elektrischen Antrieb weitere Fahrzeugkomponenten verändert bzw. ersetzt; diese werden jedoch bei der Materialbetrachtung für BEV nur teilweise berücksichtigt. Näherungsweise wird lediglich der Ersatz des Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor auf Basis von Tabelle 39 und Tabelle 40 abgeschätzt, da detaillierte Daten zur Materialänderung, anders als für Hybridfahrzeuge, bisher für BEV nicht veröffentlicht sind.

## **Pkw mit elektrischem Antrieb in der Renewbility-Technologiedatenbasis**

### ***Fahrzeugkategorien***

In der Renewbility-Technologiedatenbasis werden Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb in unterschiedlicher Ausgestaltung und für mehrere Fahrzeugklassen dokumentiert, um deren Potenziale im Rahmen der Renewbility-Szenarien analysieren zu können. Da weder Batterie-elektrische noch Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge die Marktreife für die betrachteten Fahrzeugklassen erreicht haben, wurden für die Technologiedatenbasis prospektive Realfahrzeuge konstruiert, die sich am Status quo der Fahrzeug- und Speichersystemtechnologie und den prognostizierten Entwicklungen, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, orientieren.

Der Betrachtungszeitraum umfasst die Jahre 2010 bis 2030 und erfordert damit eine dynamische Abbildung der prognostizierten Technologie- und Kostenentwicklung. Diese wird durch die Definition von unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen je Fahrzeugklasse für die Jahre 2010, 2020 und 2030 berücksichtigt.

Batterie-elektrische Fahrzeuge werden in der Technologiedatenbasis für Personenkraftwagen der Größenklassen klein und mittel betrachtet.

Plug-in-Hybridfahrzeuge wurden für Personenkraftwagen der Größenklassen klein, mittel und groß entwickelt.

Berücksichtigung finden in der Technologiedatenbasis je Fahrzeugklasse die Kategorien: Energiebedarf, Zusatzkosten, Materialbedarf.

**Hinweis:** In den Renewbility- Szenarien werden Plug-in-Hybrid- und Batterie-elektrische Fahrzeuge lediglich für den Zeitraum von 2020 bis 2030 betrachtet. Entsprechend sind für die Szenarienrechnung auch nur die Technologiedaten für die Jahre 2020 und 2030 relevant. Die hier illustrierten Technologiedaten und Kostenangaben für Fahrzeuge in 2010 sollen lediglich den aktuellen Stand illustrieren. Insbesondere mit Blick auf die Höhe der Zusatzkosten basieren die Daten für 2010 näherungsweise auf Produktionskosten vor der Markteinführung bzw. bei sehr geringen Produktionsvolumen; es ist jedoch davon auszugehen, dass nach erfolgter Markteinführung bereits deutliche Kostendegressionen erzielt werden können.

Die Betrachtung von Plug-In-Hybrid-Pkw in Szenario 4 beschränkt sich für die Jahre 2020 und 2030 auf jeweils eine Ausgestaltungsvariante. Im Jahr 2020 werden lediglich

Fahrzeuge mit einer elektrischen Reichweite von 50 km (PHEV-50), im Jahr 2030 Fahrzeuge mit einer Reichweite von 75 km (PHEV-75) berücksichtigt.

### **Renewability-Referenzfahrzeuge**

Die Grundlage für die Betrachtung von Pkw mit elektrischem Antrieb bilden die konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugpendants (siehe Tabelle 18). Auf deren Ausgangsdaten wurden die erforderliche Leistungsfähigkeit und Nutzen der entsprechenden Elektrofahrzeuge derselben Kategorie bestimmt und der ermittelte Energiebedarf, die Zusatzkosten und der Materialeinsatz hierzu in Bezug gesetzt.

### **Plug-in-Hybridfahrzeuge**

Grundlage der Ausgestaltung von Plug-in-Hybrid-Pkw in der Technologiedatenbasis stellen die dort definierten Größenklassen- und Leistungsmerkmale für konventionelle Pkw dar und die Annahme, dass diese auch von den konzipierten Plug-in-Fahrzeugen weitestgehend erreicht werden und somit keine Einschränkungen in der Fahrzeugnutzung entstehen. Es wird angenommen, dass PHEV sowohl auf Basis einer Otto- als auch einer Diesel-Motorisierung entwickelt werden. Daher wird jeweils der Bezug zu den durchschnittlichen Fahrzeugeigenschaften von konventionellen Otto- bzw. Diesel-Pkw der Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“ (Polk-Neuzulassungsdaten 2005) hergestellt. Im Folgenden wird jedoch lediglich das Vorgehen für PHEV mit Otto-Motorisierung illustriert.

In der Technologiedatenbasis werden PHEV mit durchschnittlichen elektrischen Reichweiten von 20, 50, 75 bzw. 100 Kilometern für die Größenklassen „klein“, „mittel“ und „groß“ definiert. Auf Basis der in Tabelle 19 dokumentierten durchschnittlichen Motorenleistung und der Annahme eines Hybridisierungsgrads von 44 % wird die Leistung von Verbrennungs- bzw. Elektromotor bestimmt. Die erforderliche Batteriekapazität leitet sich aus den Annahmen zum Energiebedarf im elektrischen Fahrzeugbetrieb, zur möglichen Entladungstiefe der Batterie und der elektrischen Reichweite des Fahrzeugs ab. Die Batterieleistung leitet sich für PHEV der Größenklasse „mittel“ aus Literaturwerten ab und wird für die weiteren Größenklassen über die Motorenleistung entsprechend skaliert.

Die ermittelten Fahrzeugcharakteristika (Tabelle 42) bewegen sich im Rahmen der in der Literatur dokumentierten Angaben und bilden die Grundlage für die weiteren Betrachtungen.

Tabelle 42: Fahrzeugcharakteristika von Pkw mit Plug-in-Hybridantrieb in der Renewability-Technologiedatenbasis

Größenklasse	Klein				Mittel				Groß			
Fahrzeugtyp	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100
<b>Leistung</b>												
Elektrische Reichweite [km]	20	50	75	100	20	50	75	100	20	50	75	100
Motor [kW]	30	30	30	30	50	50	50	50	92	92	92	92
E-Motor [kW]	24	24	24	24	40	40	40	40	73	73	73	73
Hybridisierung (DOH) [%]	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
<b>Batterie</b>												
Batteriekapazität [kWh]	6	14	19	24	7	17	23	29	10	23	32	40
Batterieleistung [kW]	27	27	27	27	45	45	45	45	82.5	82.5	82.5	82.5
kW-kWh-Verhältnis	5	2	1	1	6	3	2	2	8	4	3	2
Max. Entladungstiefe [%]	60	65	70	75	60	65	70	75	60	65	70	75

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Energiebedarf

In Anlehnung an die obigen Ausführungen zum Energiebedarf von PHEV wird die Verbrauchsminderung der betrachteten PHEV-Typen gegenüber konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen für verschiedene Fahrsituationen und die Fahrmodi „rein elektrischer“ und „Hybridbetrieb“ abgeschätzt. Durch die Bezugnahme auf die Ausgangsverbräuche der konventionellen Fahrzeugpendants in der Technologiedatenbasis lassen sich somit absolute Energieverbräuche von PHEV bestimmen (siehe Tabelle 43). Die elektrische Reichweite variiert dabei je nach Fahrsituation und trägt den unterschiedlichen fahrsituationsspezifischen Energieverbräuchen Rechnung.

Die höchste Minderung des Energieverbrauchs wird im Stadtverkehr und im rein-elektrischen Betrieb erzielt; etwas geringere Minderungsraten werden außerorts und bei Autobahnfahrten erzielt. Einen vergleichbaren Trend weisen die Verbrauchsminderungen im Hybridbetrieb auf, wobei jedoch grundsätzlich wesentlich geringere Minderungsraten als im elektrischen Betrieb erzielt werden. Bezogen auf absolute Energiebedarfe ergibt sich für die Fahrsituation „außerorts“ ein Optimum; für die Fahrsituation „innerorts“ ergeben sich geringfügig höhere, für „Bundesautobahn“ wesentlich höhere, Energiebedarfe. Entsprechend variiert die maximal mögliche elektrische Reichweite je nach Fahrsituation.

Tabelle 43: Verbrauchsminderung, Energiebedarf und elektrische Reichweite der PHEV-Typen in verschiedenen Fahrmodi und -situationen

Größenklasse	Klein				Mittel				Groß			
Fahrzeugtyp	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100
<b>Verbrauchsminderung im rein-elektrischer Fahrzeugbetrieb (CD-Modus)</b>												
io	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
ao	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
BAB	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
<b>Verbrauchsminderung im Hybridbetrieb (CS-Modus)</b>												
io	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%
ao	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
BAB	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
<b>Energiebedarf im rein-elektrischen Fahrzeugbetrieb [kWh/100km]</b>												
io	15	15	15	15	20	20	20	20	26	26	26	26
ao	14	14	14	14	17	17	17	17	24	24	24	24
BAB	24	24	24	24	28	28	28	28	40	40	40	40
<b>Energiebedarf im Hybridbetrieb [kWh/100km]</b>												
io	34	34	34	34	46	46	46	46	58	58	58	58
ao	33	33	33	33	40	40	40	40	55	55	55	55
BAB	52	52	52	52	60	60	60	60	84	84	84	84
<b>Elektrische Reichweite [km]</b>												
io	23	59	88	117	21	54	81	107	23	58	87	115
ao	26	64	96	128	26	64	96	128	25	63	94	126
BAB	15	37	55	73	16	39	58	78	15	37	56	75

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

### Zusatzkosten

Die Abschätzung der Zusatzkosten von PHEV erfolgt auf Basis der in Tabelle 42 dokumentierten Fahrzeugtypen für die Jahre 2010, 2020 und 2030. Die Kostenbilanzierung berücksichtigt die erforderliche Batterie, den Elektromotor und die Motorsteuerung sowie die Anpassung des Verbrennungsmotors (Downsizing). Weitere Komponenten, wie Ladegerät, Verkabelung und Nebenaggregate, werden im Rahmen der Unschärfe nicht explizit berücksichtigt.

Es gilt zu beachten, dass die hier aufgeführten Kosten Herstellernkosten darstellen; die entsprechenden Verkaufspreise unterliegen der Annahme einer weiteren Kostensteigerung um 44 % (TNO 2006). Das heißt, die ausgewiesenen Kosten müssen mit dem Faktor 1,44 multipliziert werden um die Höhe des Verkaufspreises zu erhalten.

Den Hauptkostenfaktor stellt der Energiespeicher dar. Für PHEV wird mittelfristig der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien erwartet und eine Kostendegression mit zunehmender Technologieentwicklung (siehe Tabelle 44) unterstellt. Unter der Annahme, dass sich die Batterietechnologie für die BEV- und PHEV-Anwendung in ähnlicher Weise entwickelt, werden für Plug-in-Hybridfahrzeuge wie auch für BEV die ambitionierten Zielwerte aus CARB (2007) als Bezugsgrundlage bis 2030 herangezogen (siehe Tabelle 30). Entsprechend der Annahme, dass größere Batteriesysteme günstiger produziert werden können, wurden die spezifischen Kosten auf Basis der erforderlichen Batteriekapazität für PHEV mit unterschiedlicher elektrischer Reichweite differenziert. Daraus ergeben sich die geringsten spezifischen Batteriekosten für PHEV mit einer elektrischen Reichweite von 100 Kilometern.

Tabelle 44: Prognostizierte Kostenentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien für den PHEV-Einsatz

Kosten [€/kWh]	2010	2020	2030
<b>PHEV-20</b>	1100	360	270
<b>PHEV-50</b>	920	300	220
<b>PHEV-75</b>	770	250	180
<b>PHEV-100</b>	660	215	150

Quelle: Annahmen Öko-Institut, in Anlehnung an die Zielwerte aus CARB (2007)

Weitere Zusatzkosten des elektrischen Antriebs stellen der Elektromotor sowie die Motorsteuerung dar. Kosten mindernd wirkt sich die mögliche Verkleinerung des konventionellen Verbrennungsmotors im PHEV aus. Der Anteil des Energiespeichers an den Gesamtzusatzkosten beträgt bei hoher elektrischer Reichweite (100 km) bis zu 95 %. Eine aggregierte Übersicht der Kostenbilanzierung wird in Tabelle 45 gegeben. Bis zum Jahr 2030 wird – auf Basis dieser Annahmen – eine Degression der Gesamtzusatzkosten von etwa 75 % gegenüber den prognostizierten Technologiekosten im Jahr 2010 erzielt.

Tabelle 45: Zusatzkosten des PHEV-Antriebs bei Pkw [€]

Größenklasse	Klein				Mittel				Groß			
Fahrzeugtyp	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100
<b>Zusatzkosten Batterie</b>												
2010	6.546	12.634	14.728	15.710	8.009	15.458	18.020	19.221	10.868	20.975	24.452	26.082
2020	2.142	4.120	4.782	5.118	2.621	5.041	5.851	6.262	3.557	6.840	7.939	8.496
2030	1.607	3.021	3.443	3.570	1.966	3.696	4.213	4.369	2.668	5.016	5.716	5.928
<b>Zusatzkosten Elektromotor, Motorsteuerung &amp; Motor-Downsizing</b>												
2010	796	796	796	796	1.327	1.327	1.327	1.327	2.433	2.433	2.433	2.433
2020	482	482	482	482	804	804	804	804	1.474	1.474	1.474	1.474
2030	169	169	169	169	281	281	281	281	516	516	516	516
<b>Gesamtzusatzkosten</b>												
2010	7.342	13.430	15.524	16.506	9.336	16.785	19.347	20.548	13.300	23.408	26.885	28.515
2020	2.625	4.602	5.264	5.600	3.425	5.845	6.655	7.066	5.031	8.314	9.413	9.971
2030	1.775	3.190	3.612	3.739	2.247	3.978	4.494	4.650	3.183	5.531	6.232	6.443

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

### Materialbedarf

Auf Basis der konventionellen Referenzfahrzeuge der Renewbility-Technologiedatenbasis wird der Einfluss des PHEV-Antriebs auf die Materialzusammensetzung der betrachteten Fahrzeugklassen quantifiziert. Wesentliche Fahrzeugkomponenten, die zu einer Veränderung der Materialbilanz führen und Berücksichtigung finden, sind die Batterie, der Elektromotor bzw. Generator, weitere Komponenten des elektrischen Antriebs, wie Haupt- und Nebenschwandler, Drehzahlregler und Steuerungsmodule, sowie die Verkleinerung des Verbrennungsmotors und der Verzicht auf die konventionelle Starterbatterie.

Die stärkste Materialänderung geht vom Einsatz der Batterie aus, die bis zu 80 % des zusätzlichen Werkstoffbedarfs verursacht. Während der Einfluss auf das Fahrzeuggewicht für die weiteren Zusatzkomponenten über den Betrachtungszeitraum als näherungsweise konstant betrachtet wird, reduziert sich das Batteriegewicht mit fortschreitender Technologieentwicklung auf Grund einer erwarteten Erhöhung der Energiedichte von Speichersystemen (siehe Tabelle 46). Die Materialzusammensetzung des Lithium-Ionen-Speichers wird auf Basis der Angaben aus Tabelle 33 für die wichtigsten Werkstoffe abgeschätzt.

Tabelle 46: Prognostizierte Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für den PHEV-Einsatz

	2010	2020	2030
Energiedichte [Wh/kg]	90	120	160

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Die Bestimmung der Veränderung des Werkstoffeinsatzes für die weiteren Fahrzeugkomponenten erfolgt auf Basis der im Abschnitt "Veränderter Materialbedarf" getroffenen Annahmen. Die Anpassung auf die betrachteten Größenklassen erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen fahrzeugspezifischen Motorenleistung bzw. Batteriekapazität.

Durch den PHEV-Antrieb ergibt sich – mit Größenklasse und elektrischer Reichweite ansteigend – ein Zusatzgewicht von 10 % bis 37 % (2010) bzw. 8 % bis 25 % (2030) gegenüber dem jeweiligen konventionellen Referenzfahrzeug (Tabelle 47).

Tabelle 47: Zusatzgewicht des PHEV-Antriebs [kg]

Größenklasse	Klein				Mittel				Groß			
Fahrzeugtyp	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100	PHEV-20	PHEV-50	PHEV-75	PHEV-100
<b>Zusatzgewicht Batterie</b>												
2010	66	153	213	264	81	187	260	324	110	253	353	439
2020	50	114	159	198	61	140	195	243	82	190	265	329
2030	37	86	120	149	46	105	146	182	62	142	198	247
<b>Zusatzgewicht Elektromotor, weitere Komponenten des elektrischen Antriebs &amp; Motor-Downsizing</b>												
2010	43	43	43	43	80	80	80	80	157	157	157	157
2020	43	43	43	43	80	80	80	80	157	157	157	157
2030	43	43	43	43	80	80	80	80	157	157	157	157
<b>Gesamtzusatzgewicht</b>												
2010	109	195	255	307	161	267	340	404	267	411	510	596
2020	92	157	202	241	141	220	275	323	240	347	422	487
2030	80	129	162	192	125	185	226	262	219	300	356	404

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut



### Batterie-elektrische Fahrzeuge

In der Technologiedatenbasis werden Batterie-elektrischen Pkw nur für die Fahrzeuggrößenklassen „klein“ und „mittel“ angenommen, da für die Klasse „groß“ angesichts der limitierten Batterieleistungsfähigkeit auch längerfristig nicht mit der Erfüllung von Mindestleistungsanforderungen an die Speichertechnologie bezüglich Leistungs- und Energiedichte, Gewicht und Zusatzkosten zu rechnen ist. Die konzipierten Elektrofahrzeuge orientieren sich an – in CARB (2007) formulierten – Batteriemindestanforderungen (siehe Tabelle 31); diese Fahrzeuge stellen damit aber keinen gleichwertigen Ersatz bezüglich Leistung, Geschwindigkeit und Reichweite von konventionell angetriebenen Pkw dar und erfordern daher eine detaillierte Nutzungsanalyse, die diese Restriktionen im Fahrzeugbetrieb berücksichtigen. Als Batteriespeichersystem wird die Lithium-Ionen-Technologie zugrunde gelegt. Hiermit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Mehrheit der Automobilhersteller mittelfristig den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien im BEV-Sektor für am wahrscheinlichsten hält.

Bei Erfüllung der Batterieanforderungen nach CARB (2007) (siehe Tabelle 31) würde dies für die definierten Elektrofahrzeuge langfristig ein zusätzliches Batteriegewicht von 250 kg (Kleinfahrzeug) bzw. 267 kg (Mittelklassefahrzeug) und eine theoretische Reichweite bei vollständiger Batterieentladung von 145 km (io) / 109 km (ao) für ein Kleinfahrzeug und 179 km / 143 km für ein Mittelklassefahrzeug bedeuten. Real ist aber maximal mit der Nutzungsmöglichkeit von 80 % des Energiegehalts der Batterie zu rechnen (VW 2008), womit sich die Reichweite der Fahrzeuge um mindestens 20 % reduziert.

Die in Tabelle 48 zusammengefassten Fahrzeugeigenschaften bilden die Grundlage für die Betrachtung von Batterie-elektrischen Pkw in der Technologiedatenbasis.

Tabelle 48: Fahrzeugcharakteristika der Batterie-elektrischen Pkw in der Renewability-Technologiedatenbasis

Fahrzeugtyp	Leistung [kW]	Batteriekapazität [kWh]	Max. Entladungstiefe [%]	Elektrische Reichweite [km]
Pkw – klein	50	25	80	110
Pkw - mittel	100	40	80	145

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Energiebedarf

Auf Basis der dokumentierten Verbrauchsangaben und Energieeffizienzen für Elektrofahrzeuge, wurden für die in Renewability betrachteten Fahrzeugklassen Energieverbräuche für die Straßenkategorien „innerorts“, „außerorts“ und „Bundesautobahn“ abgeleitet und auf Plausibilität geprüft; dabei wurden die ermittelten Energiebedarfe den in MIT (2000), ILEA (2005) und CONCAWE (2007) aufgeführten Wirkungsgraden von konventionellen Fahrzeugen gegenübergestellt. Tabelle 49 zeigt

die in der Technologiedatenbasis für Elektrofahrzeuge gemäß dem beschriebenen Vorgehen ermittelten Energieverbräuche differenziert nach Fahrsituation.

Tabelle 49: Energieverbrauch [kWh/100km] von Elektrofahrzeugen in der Technologiedatenbasis

Fahrzeugklasse	Energieverbrauch		
	innerorts	außerorts	Autobahn
klein	15	14	24
mittel	20	17	28

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Zusatzkosten

Für die Kostenabschätzung (Herstellerekosten) der Renewbility-Elektrofahrzeuge wird die Batteriekostenprognose nach CARB (2007) als Grundlage herangezogen (Tabelle 50), da sie auf umfangreichen Herstellerbefragungen basiert und auch in ihrer Tendenz von anderen Autoren bestätigt wird. Für 2010 werden ergänzend die in der METI-Studie für dieses Jahr prognostizierten Kosten für Lithium-Ionen-Speicher von 660 €/kWh (VW 2008) angenommen, die Kostenabschätzung für 2020 bezieht sich auf die oben genannten Produktionsvolumen von 20.000 entsprechenden Batteriesystemen, für 2030 auf 100.000. Die höheren spezifischen Kosten von Energiespeichern für kleine BEV erklären sich mit dem höheren Kostenanteil von Batteriesteuerung, Gehäuse und Herstellung (siehe Abschnitt „Batterietechnologie für die Fahrzeuganwendung“).

Tabelle 50: Batteriekostenprognosen nach CARB (2007), VW (2008) und Batteriesystemkosten

Jahr	Batteriekosten [€/kWh]			Batteriesystemkosten [€]		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Jährliches Produktionsvolumen	aktuell	20.000	100.000	aktuell	20.000	100.000
Pkw - klein	770	250	180	19.250	6.250	4.500
Pkw - mittel	660	215	150	26.400	8.600	6.000

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut

Laut Literaturangaben (CARB 2007) wurden bei den weiteren Fahrzeugkomponenten, wie Elektromotor, Elektronik und Nebenaggregaten bereits beträchtliche Kostenfortschritte erzielt, so dass diese nahezu mit konventionellen Fahrzeugen konkurrenzfähig sind. Angesichts der hohen Batteriekosten werden diese jedoch nicht als Hemmfaktor für die Markteinführung bewertet. Durch den Verzicht auf den Verbrennungsmotor bei BEV kann näherungsweise von einer kostenneutralen

Umsetzung dieser Komponenten ausgegangen werden und es wird auf eine Betrachtung weiterer Zusatzkosten in der Technologiedatenbasis daher verzichtet.

### Materialbedarf

Grundlage für die Materialabschätzung der Elektrofahrzeuge bilden die Angaben zu den Renewability-Referenzfahrzeugen Otto-klein und Otto-mittel (Tabelle 51). Die wesentlichste Materialänderung durch die Elektrifizierung des Antriebs stellt der Einsatz des Batteriespeichers dar. Die Blei-Starterbatterie wird durch die wesentlich leichtere Lithium-Ionen-Batterie ersetzt. Die Materialanteile der Batterie werden auf Basis von IPTS (2005) für die 5 dominanten Werkstoffe ermittelt; Lithium wird dabei, aufgrund seines geringen Anteils bisher nicht bilanziert. Die Grundlage für die Bestimmung des Batteriegewichts stellen die Annahmen zur Entwicklung der Energiedichte in Tabelle 46 dar.

Neben dem erforderlichen Speichersystem werden durch den elektrischen Antrieb weitere Fahrzeugkomponenten verändert bzw. ersetzt; insbesondere wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt und entsprechend dem Vorgehen für PHEV hier näherungsweise bezüglich seiner Materialbilanz berücksichtigt. Grundannahme bildet ein 150 bzw. 110 kg schwere Verbrennungsmotor (Pkw – klein bzw. Pkw – mittel), der durch einen 50 bzw. 100 kg schweren Elektromotor ersetzt wird.

Die in Tabelle 51 aufgeführte Gesamtmaterialbilanz stellt die Annahmen für das Jahr 2010 dar. Für die Folgejahre sinkt das Gewicht der Batterie infolge der höheren realisierten Energiedichte auf 198 bzw. 320 kg (2020) und 146 bzw. 237 kg (2030).

Tabelle 51: Veränderter Materialbedarf [kg] von Batterie-elektrischen Pkw der Klassen klein und mittel im Jahr 2010

Größen- klasse	Summe	Stahl, Eisen	Alu- minium	Mag- nesium	Blei	Kupf- er	Nickel	Kunst- stoffe	Glas	Man- gan	Andere
<b>Referenzfahrzeug</b>											
<b>klein</b>	989	593	129	0	10	10	0	208	40	0	0
<b>mittel</b>	1.297	778	169	0	13	13	0	272	52	0	0
<b>Materialänderung Batterie</b>											
<b>klein</b>	+268	+27	+88	0	-10	+40	0	+28	0	+34	+62
<b>mittel</b>	+431	+43	+140	0	-13	+64	0	+45	0	+54	+99
<b>Materialänderung Motorisierung</b>											
<b>klein</b>	-60	-47	-28	0	0	15	0	0	0	0	0
<b>mittel</b>	-50	-45	-35	0	0	30	0	0	0	0	0
<b>Elektrofahrzeug</b>											
<b>klein</b>	1.197	573	198	0	0	65	0	236	40	34	62
<b>mittel</b>	1.678	776	274	0	0	107	0	317	52	54	99

Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut nach IPTS (2005), MIT (2000), CARB (2007)

### 3.2.5 H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-Pkw

In der Technologiedatenbasis werden Brennstoffzellen(BZ)-Fahrzeuge als weitere alternative Antriebsoption berücksichtigt. Die Grundlage zur Bestimmung des Energieeffizienzpotenzials, der Zusatzkosten und des veränderten Materialeinsatzes von Brennstoffzellenfahrzeugen in Bezug auf ein Otto-Referenzfahrzeug bildet die Auswertung der hierzu verfügbaren Literatur, wie u.a. (CARB 2007, IEA 2005, MIT 2000, CONCAWE 2007).

Analog zum Vorgehen bei Batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEV), bilden die in der Technologiedatenbasis hinterlegten BZ-Fahrzeuge lediglich eine mögliche Entwicklung der BZ-Fahrzeugentwicklung ab, wenngleich diese mit dem Ziel konzipiert wurden sich möglichst nahe an der prognostizierten Technologieentwicklung zu bewegen. Angesichts der großen Spannweite der von Experten prognostizierten Technologie- und Kostenentwicklung sind diese Annahmen jedoch mit entsprechend großen Unsicherheiten behaftet und tragen der Tatsache Rechnung, dass bisher nur wenige BZ-Fahrzeuge in Betrieb sind und deren breite Markteinführung frühestens für das nächste Jahrzehnt erwartet wird.

#### Vorbemerkungen

In der Technologiedatenbasis werden BZ-Fahrzeuge für alle drei Größenklassen berücksichtigt. Dabei werden in einer Basisvariante ein reiner Brennstoffzellenantrieb betrachtet, in Variante 1 eine zusätzliche Hybridisierung und in Variante 2 ein Brennstoffzellenhybrid-Antrieb kombiniert mit weiteren nicht-motorische Effizienzsteigerungstechnologien berücksichtigt.

Schwerpunkte der BZ-Fahrzeugdiskussion bilden die Energieeffizienz des Antriebs sowie die Brennstoffzelle und das Tanksystem als Hauptkomponenten. Auf die Betrachtung der Wasserstoffherstellung und -verteilung wird an dieser Stelle, trotz ihrer Bedeutung im Gesamtkontext, verzichtet, da diese Aspekte entsprechend in der Technologiedatenbasis der Kraftstoffvorketten berücksichtigt werden. Die Mindestleistungsanforderungen an ein marktfähiges BZ-Fahrzeug orientieren sich an den konventionellen Referenzfahrzeugen und werden aus den Angaben in der genannten Literatur abgeleitet.

#### Energieeffizienz und Verbrauch

In der Literatur werden unterschiedliche Energieeffizienzzraten (Tabelle 52) und Energiebedarfe (Tank-to-Wheel) für BZ-Fahrzeuge ausgewiesen. Die Gesamteffizienz von BZ-Fahrzeugen bilanziert den Wirkungsgrad ab der Wasserstoffbetankung, der Energiebedarf für die Wasserstoffverdichtung wird hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 52: Energieeffizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen und ihren Komponenten (Literatúrauswertung)

Quelle	H <sub>2</sub> -Verdichtung	Brennstoffzelle	Elektrischer Antrieb	Gesamteffizienz (Tank-to-Wheel ohne H <sub>2</sub> -Verdichtung)
Toyota-Studie in ZSW (2007)	–	–	–	50 %
IEA 2005	76 %	54 %	89 %	48 % (60 % bis 2030 möglich)
CARB 2007	80-95 % (gasförmig) 70 % (flüssig)	–	–	52,5-58,1 %
FreedomCAR-Programm in CARB (2007)	–	–	–	60 % (Zielwert für 2015)
MIT 2000	–	–	–	36,2 % (io)* / 35,8 % (ao)*

\* für konventionell betriebene Pkw werden in dieser Studie ebenfalls tendenziell sehr geringe Wirkungsgrade von 16,2% (io) & 18.1% (ao) angenommen.

In Tabelle 53 wird eine Übersicht der verfügbaren Informationen zum Energiebedarf von BZ-Fahrzeugen gegeben. Die Verbrauchsangaben des „National Renewable Energy Laboratory“ (NREL) in CARB (2007) beruhen auf Testmessungen von 63 BZ-Fahrzeugen im Jahr 2006. Zusätzlich sind in CARB (2007) für weitere 12 BZ-Konzeptfahrzeuge die Verbrauchsangaben dokumentiert. Deren beträchtliche Spannbreite erklärt sich mit der unterschiedlichen Ausgestaltung der Fahrzeuge, so dass diese nur bedingt zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Die Verbrauchsangaben in CONCAWE (2007) beruhen auf Annahmen für ein BZ-Fahrzeug im Jahr 2010, MIT (2000) trifft diese für ein hypothetisches BZ-Fahrzeug des Jahres 2020.

Tabelle 53: Mittlerer Energieverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen (Literatúrauswertung)

	NREL (in CARB 2007)	CARB 2007 (Testfahrzeuge)	CONCAWE 2007	MIT 2000 (2020 Fahrzeug)
<b>Energieverbrauch [kWh/100km]</b>	30-41*	33-60**	37	22,5
<b>Verbrauchsminderung bzgl. Otto-Referenzfahrzeug</b>	-	-	51 %	54 %

\* höhere Werte für Kurzstrecken (45-67 kWh/100km)

\*\* große Spannbreite an Testfahrzeugen erzeugt stark variablen Energieverbrauch

CONCAWE (2007) und MIT (2000) geben als einzige Studien eine relative Verbrauchsminderung bezogen auf ein Referenzfahrzeug an. Der absolute Verbrauch liegt für CONCAWE (2007) im Bereich der anderen Studien. Entsprechend wird die relative Minderung aus CONCAWE (2007), MIT (2000) als Grundlage für die Verbrauchsabschätzung von BZ-Fahrzeugen in Renewability herangezogen. Unter der Annahme einer höheren Effizienz des BZ-Antriebs im niederen

Geschwindigkeitsbereich, wird näherungsweise eine Energiebedarfsminderung in Bezug zu einem Otto-Pkw von 60% innerorts (io), 50 % außerorts (ao) und 40 % auf Bundesautobahnen (BAB) angenommen. Tabelle 54 stellt die für die Renewbility-Technologiedatenbasis ermittelten Energiebedarfe von BZ-Fahrzeugen der drei Größenklassen und nach Fahrsituation differenziert dar.

Tabelle 54: Energieverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen in der Technologiedatenbasis

Fahrzeugklasse	Energieverbrauch [kWh/100km]		
	innerorts	außerorts	Autobahn
klein	30	23	37
mittel	41	28	42
groß	51	39	59

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Fahrzeugkomponenten – Anforderungen, Kosten und Materialbedarfe

BZ-Fahrzeuge unterscheiden sich von konventionellen Fahrzeugen insbesondere durch den Einsatz einer Brennstoffzelle in Kopplung mit einem Elektromotor anstelle des Verbrennungsmotors als Fahrzeugantrieb und einem Wasserstoffspeichersystem, das den konventionellen Kraftstofftank ersetzt. Im Folgenden werden die diskutierten technischen Anforderungen, Kosten und Materialbedarfe der genannten Komponenten im Detail diskutiert und deren Ausgestaltung für die betrachteten Fahrzeuggrößenklassen vorgestellt.

#### *Brennstoffzelle-Antriebseinheit*

Die Brennstoffzellen-Forschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt, dennoch verbleiben einige Herausforderungen bis zu einer möglichen kommerziellen Markteinführung von BZ-Fahrzeugen. Als Hauptschwierigkeiten stellen sich momentan die eingeschränkte Leistungsdichte, die geringe Lebensdauer sowie die sehr hohen Kosten der entwickelten Brennstoffzellen dar. Während die Leistungsziele als erreichbar eingeschätzt werden, hält CARB (2007) insbesondere die erforderliche Nutzungsdauer von Brennstoffzellen von etwa 15 Jahren für mittelfristig nur schwer realisierbar.

Die Kostenentwicklung von Brennstoffzellen ist angesichts der andauernden Technologieentwicklung und der noch nicht erfolgten breiten Markteinführung – und der erst dann zu erwartenden deutlichen Kostendegression durch Skaleneffekte – nur schwer zu prognostizieren. Als Grundlage für die in der Technologiedatenbasis angenommene Kostenentwicklung dienen die Kostenprognosen bzw. definierte Zielwerte einschlägiger Studien zur Brennstoffzellentechnologie, die zumeist auf umfangreichen Hersteller- und Expertenbefragungen beruhen.

IEA (2005) gibt aktuelle Kosten von \$2.000/kW unter Verweis auf Informationen des U.S. Department of Energy (US-DOE) an und zitiert weiter die langfristigen US DOE-Kostenziele von \$100/kW bei Massenproduktion und eine weitere Kostendegression auf bis zu \$35-75/kW bis 2030. Nach der Schätzung von TIAx in CARB (2007) werden Kosten von \$50/kW bis 2015 bei Massenproduktion für realisierbar erachtet. Das US DOE FreedomCAR-Programm nennt Spannbreiten von \$75-600/kW (2005), \$30-75/kW (2015) und \$20-75/kW (2020).

In IEA (2005) werden für ein 80kW-BZ-Fahrzeug für 2005 Kosten von \$1.800/kW, für 2010 \$500/kW und für 2030 in drei Szenarien Kosten zwischen \$35 und \$75/kW für die Brennstoffzelle unterstellt. CONCAWE (2007) rechnet für ein Fahrzeug der Mittelklasse (77kW) mit Kosten für Brennstoffzelle und Getriebe von etwa €143/kW in 2010. MIT (2000) konzipiert ein Fahrzeug für 2020 und nennt BZ-Kosten von \$53/kW.

Tabelle 55 gibt eine Übersicht der Kostenprognosen aus den genannten Studien.

Tabelle 55: Kostenprognosen für den Brennstoffzellenantrieb (Literaturauswertung)

Quelle	aktuell (bzw. 2005)	2010	2015	2020	2030
US DOE in (IEA 2005)	\$2.000/kW	–	–	–	\$35-75/kW
TIAx in (CARB 2007)	–	–	\$50/kW	–	–
US DOE FreedomCAR-Programm	\$75-600/kW	–	\$30-75/kW	\$20-75/kW	–
IEA 2005	\$1.800/kW	–	\$500/kW	–	\$35-75/kW
CONCAWE 2007	–	€143/kW	–	–	–
MIT 2000	–	–	–	\$53/kW	–

Das durch den Brennstoffzellenantrieb verursachte Zusatzgewicht wird in MIT (2000) mit 193 kg (2020) veranschlagt. Auf Basis der in CARB (2007) genannten Zielwerte der Leistungsdichte von BZ-Systemen von 300-500W/kg (aktuell), 700-1100W/kg (2015 – optimistisches Szenario) bzw. 325W/kg (FreedomCAR-Zielwerte für 2010/2015) ergibt sich für ein 80kW-BZ-Fahrzeug ein durch die Brennstoffzelle verursachtes Zusatzgewicht von 72 bis 267 kg. Das Zusatzgewicht wird, da dieses in CONCAWE (2007) bei dem Energieverbrauch bereits berücksichtigt ist, nicht zusätzlich in einer Minderung des Wirkungsgrades umgesetzt. Entsprechend werden auch gewichtsmindernde Effekte, die unter anderem durch den Wegfall des Verbrennungsmotors bedingt sind, nicht zusätzlich berücksichtigt.

#### Wasserstoff-Speichersystem

Die fahrzeugseitige Speicherung von Wasserstoff stellt insbesondere aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff eine besondere technische Herausforderung dar. Momentan befinden sich sowohl Gas- als auch Flüssigspeicher in der Entwicklung und Erprobung. Für eine Reichweite von über 300 km eines BZ-Mittelklassefahrzeugs wird



als Richtwert meist ein Wasserstofftankinhalt von etwa 5 kg zu Grunde gelegt. In zahlreichen Studien werden insbesondere das hohe Gewicht und Volumen der Druckspeichersysteme sowie deren hohen Kosten als Haupthindernis für die Markteinführung von BZ-Fahrzeugen genannt. CARB (2007) nennt aktuelle Tanksystemkosten von etwa \$10.000, IEA (2005) weist Kosten von circa \$4.000 aus. Bei einem Tankinhalt von 5 kg Wasserstoff ist ein Tankvolumen von 225 Liter bei gasförmiger und von 125 Liter bei flüssiger Speicherung erforderlich (CARB 2007), was dem 5 bis 6-fachen Volumen eines konventionellen Benzintanks entspricht.

Tabelle 56 gibt eine Übersicht der aktuellen und prognostizierten Kosten für Wasserstoffspeichersysteme. Die Speicherung von 5 kg Wasserstoff entspricht einem Energiegehalt von etwa 167 kWh. Soweit differenziert aufgeführt, werden die Kosten für entsprechende Gas- und Flüssigtanks angegeben. Tabelle 57 fasst die in den ausgewerteten Studien genannten Angaben zum Gewicht aktueller Tanksysteme und zur möglichen zukünftigen Gewichtsminderung von Wasserstoffspeichern zusammen.

Tabelle 56: Kostenprognosen für Wasserstoff-Speichersysteme (Literaturauswertung)

Quelle	aktuell (bzw. 2005)	2010	2015	2020
CARB 2007	\$59/kWh	–	–	–
TIAX in (CARB 2007)	–	–	\$10-12/kWh (gasförmig)* \$13-15/kWh (flüssig)*	–
US DOE in (CARB 2007)	–	\$4/kWh	\$2/kWh	–
IEA 2005	\$90-120/kWh	–	–	–
CONCAWE 2007	–	€16/kWh	–	–
MIT 2000	–	–	–	\$4/kWh

\* bei Massenproduktion

Tabelle 57: Prognostizierter Anteil des Speicherinhalts am Gesamtgewicht des Wasserstofftanks (Tankgewicht bei 5 kg Wasserstoffspeicherung; gasförmig – g / flüssig – f) (Literaturauswertung)

Quelle	aktuell (bzw. 2005)	2010	2015
CARB 2007	3,5-4,6 % (110-140 kg)	–	–
TIAX in (CARB 2007)	–	6-6,7 % (74-83 kg) [g] 6-6,3 % (79-83 kg) [f]	–
US DOE in (CARB 2007)	–	6 % (83 kg)	9 % (56 kg)
IEA 2005	4-6% (83-125 kg) [g] 4-5% (83-100 kg) [f]	–	–
CONCAWE 2007	–	7 % (69 kg) [g] 9 % (57 kg) [f]	–

### Weitere Fahrzeugkomponenten

Der erforderliche Elektromotor zum Antrieb des BZ-Fahrzeugs basiert auf einer weitestgehend ausgereiften Technologie, die bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und der erzielten Kostenfortschritte ebenso wie die erforderliche Elektronik und die Nebenaggregate bereits mit konventioneller Fahrzeugtechnik konkurrenzfähig ist (CARB 2007).

Die in der Literatur (CONCAWE 2007) hierzu ausgewiesenen Zusatzkosten entsprechen näherungsweise den erzielten Kosteneinsparungen durch den Verzicht auf den Verbrennungsmotor und den konventionellen Kraftstofftank im entsprechenden Otto-Referenzfahrzeug. Basierend auf dieser Feststellung, werden für diese weiteren Fahrzeugkomponenten keine zusätzlichen Kosten veranschlagt.

### Zusatzkosten von Brennstoffzellenfahrzeugen

CONCAWE (2007) beziffert die Gesamtzusatzkosten eines Brennstoffzellenfahrzeugs der Mittelklasse gegenüber einem entsprechenden konventionellen Referenzfahrzeug im Jahr 2010 mit €11.633. Dies bedeutet eine Kostensteigerung um 59,5 % gegenüber den Herstellernkosten des konventionellen Vergleichsfahrzeugs der Studie. In MIT (2000) werden die Zusatzkosten für ein BZ-Fahrzeug mit \$4.100 und damit 22,7 % über den Kosten für ein konventionelles Vergleichsfahrzeug veranschlagt. Unter der Bedingung, dass die in IEA (2005) formulierten Kostenziele bis 2030 erreicht werden, erwarten die Autoren dieser Studie Zusatzkosten von \$2.200 bis \$7.600 für BZ-Fahrzeuge im Jahr 2030 im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen.

Tabelle 58 fasst die für die Renewability-Technologiedatenbasis auf Basis der diskutierten Literatur abgeleiteten Kostenannahmen für die betrachteten Zeitscheiben (2010, 2020, 2030) zusammen. Die Grundlage der Betrachtung in Renewability bilden die Referenzfahrzeuge auf Basis der POLK-Neuzulassungsdaten der Größenklassen klein, mittel und groß mit einer durchschnittlichen Motorleistung von 54 kW, 90 kW bzw. 165 kW (Tabelle 59). Die erforderliche Wasserstoffspeichergröße wurde auf Basis der Angaben in der Literatur (5 kg H<sub>2</sub> für ein Mittelklassefahrzeug mit 80 kW Leistung) für die definierten Größenklassen angepasst. In Tabelle 60 sind die auf Basis der Fahrzeugcharakteristika und der komponentenspezifischen Kostenannahmen ermittelten Gesamtzusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge der Größenklassen klein, mittel und groß, wie sie in der Renewability-Technologiedatenbasis letztlich definiert sind, dargestellt.

Tabelle 58: Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge auf Basis von in CARB (2007), CONCAWE (2007), IEA (2005), MIT (2000) formulierten Zielwerten

Komponente	Brennstoffzelle [€/kW]			Tanksystem [€/kWh]			Elektromotor [€/kW]		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
<b>Zusatzkosten</b>	250	60	40	20	15	5	25	20	15

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 59: Renewability-Referenzfahrzeug – durchschnittliche Leistung und erforderlicher Energieinhalt des Wasserstoffspeichersystems

Fahrzeugklasse	Leistung	Tanksystem-Energieinhalt
klein	54 kW	3,4 kg H <sub>2</sub> bzw. 113 kWh
mittel	90 kW	5,6 kg H <sub>2</sub> bzw. 188 kWh
groß	165 kW	10,3 kg H <sub>2</sub> bzw. 344 kWh

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 60: Zusatzkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge der Größenklassen klein, mittel und groß in der Technologiedatenbasis

	Brennstoffzelle [€]			Tanksystem [€]			Elektromotor [€]			Gesamt [€]		
Jahr	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
klein	13.500	3.240	2.160	2.260	1.695	565	1.350	1.080	810	17.110	6.015	3.535
mittel	22.500	5.400	3.600	3.760	2.820	940	2.250	1.800	1.350	28.510	10.020	5.890
groß	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: Annahmen Öko-Institut

## Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug

Die Hybridisierung des Brennstoffzellenantriebs wird in der Renewability-Technologiedatenbasis als zusätzliche Fahrzeugvariante berücksichtigt und soll in ihrer Ausgestaltung hier kurz vorgestellt werden. Basierend auf der diskutierten Brennstoffzellentechnologie umfasst der Hybridantrieb einen zusätzlichen Batteriespeicher, der zum einen die Rekuperation von Bremsenergie erlaubt und zum anderen eine weitere Effizienzsteigerung im hohen Geschwindigkeitsbereich (Leistungsspitzen) ermöglicht sowie die Lebensdauer der Brennstoffzelle erhöht (CARB 2007).

Für die betrachteten BZ-Fahrzeuge wird in der Technologiedatenbasis für die Hybridtechnologie eine weitere Effizienzsteigerung des Antriebs von 11,5 % gegenüber der reinen BZ-Variante gemäß CONCAWE (2007) angenommen. Tabelle 61 fasst die daraus resultierenden Energieverbräuche der betrachteten Fahrzeugklassen zusammen.

Tabelle 61: Energieverbrauch von Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugen in der Technologiedatenbasis

Fahrzeugklasse	Energieverbrauch [kWh/100km]		
	innerorts	außerorts	Autobahn
klein	27	21	32
mittel	36	25	37
groß	45	35	53

Quelle: Annahmen Öko-Institut nach CONCAWE (2007)

In Anlehnung an CONCAWE (2007) kann durch die erzielte Effizienzsteigerung das Wasserstofftanksystem entsprechend kleiner dimensioniert werden und dessen Kosten somit reduziert werden. Gleichzeitig verursacht der erforderliche Batteriespeicher (Lithium-Ionen-Batterie) zusätzliche Kosten. Dessen Auslegung orientiert sich an den Angaben in CONCAWE (2007) und wird für die betrachteten Fahrzeugklassen leistungsbezogen angepasst. Die zugrunde gelegte Batteriekostenentwicklung orientiert sich an den Kostenprognosen in CARB (2007). Die Dimensionierung und Kosten der Brennstoffzelle werden unverändert von den Brennstoffzellenfahrzeugen, entsprechend dem Vorgehen in CONCAWE (2007), übernommen.

Tabelle 62: Annahmen zu Batteriekosten (Lithium-Ionen-Batterie) für den Einsatz in Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugen

		2010	2020	2030
Batteriekostenprognose [€/kWh]		600	300	200
		Batteriekosten [€]		
Fahrzeugklasse	Batteriegröße	2010	2020	2030
klein	4 kWh	2.430	1.215	810
mittel	6,7 kWh	4.050	2.025	1.350
groß	12 kWh	7.200	3.600	2.400

Quelle: Annahmen Öko-Institut nach CONCAWE (2007)

Tabelle 63 veranschaulicht die ermittelten Gesamtzusatzkosten eines Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugs in Bezug auf ein konventionelles Vergleichsfahrzeug. Ausgehend von den in Tabelle 60 ermittelten Zusatzkosten für BZ-Fahrzeuge werden die Kosteneinsparungen beim Tanksystem und die Zusatzkosten des Batteriespeichers bilanziert und die Gesamtkosten für die betrachteten Fahrzeugklassen und Zeitscheiben ermittelt.

Tabelle 63: Veränderung der Zusatzkosten für die Brennstoffzellen-Hybridvarianten der Größenklassen klein, mittel und groß in der Technologiedatenbasis

	BZ-Fahrzeug [€]			Tanksystem [€]			Batterie [€]			Gesamt [€]		
Jahr	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
klein	17.110	6.015	3.535	-260	-195	-65	+2.430	+1.215	+810	19.280	7.035	4.280
mittel	28.510	10.020	5.890	-432	-324	-108	+4.050	+2.025	+1.350	32.128	11.721	7.132
groß	52.255	18.360	10.795	-791	-593	-198	+7.425	+3.713	+2.475	58.889	21.479	13.072

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Veränderung des Materialbedarfs bei Brennstoffzellenfahrzeugen

Grundlage für die Materialabschätzung der BZ-Fahrzeuge bilden die Angaben zu den Referenzfahrzeugen Otto-klein, Otto-mittel und Otto-groß.

Eine wesentliche Materialänderung bei BZ-Fahrzeugen wird durch das Wasserstoffspeichersystem verursacht. Grundlage der Bilanzierung des Tankgewichts bilden die in Tabelle 57 genannten Angaben zum Tankgewicht und der in Tabelle 59 aufgeführte erforderliche Energieinhalt des Tanks. Für das Jahr 2010 wird das Zusatzgewicht des Tanks mit 52 kg, 86 kg bzw. 158 kg für die betrachteten Fahrzeuggrößenklassen bilanziert. Durch die höhere Energieeffizienz des Hybridantriebs, fällt das Zusatzgewicht des Tanks in der Hybridvariante um 11,5 % geringer aus. Als Werkstoffe werden Stahl (97 %) und geringe Anteile von Aluminium (2 %) und Kunststoff (1 %) angenommen.

Die durch die Brennstoffzelle und den Elektromotor sowie den elektrifizierten Antriebsstrang bedingte Änderung der Materialanteile wird hier nicht explizit bilanziert. Analog zum Vorgehen bei Batterie-elektrischen Fahrzeugen wird nach MIT (2000) die Annahme getroffen, dass deren Einsatz näherungsweise gewichts- und materialneutral erfolgt, unter anderem, da das höhere Gewicht des Verbrennungsmotors, des Getriebes und der zusätzlichen Fahrzeugelektronik des konventionellen Fahrzeugs durch das schwerere Antriebssystem und ein verstärktes Fahrgestell des Brennstoffzellenfahrzeugs kompensiert wird.

In der Hybridvariante wird das Zusatzgewicht der eingesetzten Batterie auf Basis der in Tabelle 62 definierten Batteriegröße für die jeweilige Fahrzeugklasse und unter der Annahme einer Energiedichte des Speichermediums von 0,15 kWh/kg (CARB 2007) bilanziert. Die Werkstoffzusammensetzung der eingesetzten Batterie wird analog zum Vorgehen für Batterie-elektrische Fahrzeuge auf Basis von IPTS (2005) abgeschätzt. Tabelle 64 fasst die Materialänderungen der Brennstoffzellen-Variante und der Brennstoffzellen-Hybrid-Variante in Bezug zum jeweiligen Otto-Referenzfahrzeug für die betrachteten Fahrzeugklassen zusammen.

Tabelle 64: Veränderter Materialbedarf [kg] von BZ- und BZ-Hybrid-Fahrzeugen der Größenklassen klein, mittel und groß

Größen- klasse	Summe	Stahl, Eisen	Alumi- nium	Magne- sium	Blei	Kupfer	Nickel	Kunst- stoffe	Glas	Mangan	Ander e
<b>Referenzfahrzeug</b>											
<b>klein</b>	989	593	129	0	10	10	0	208	40	0	0
<b>mittel</b>	1.297	778	169	0	13	13	0	272	52	0	0
<b>groß</b>	1.549	929	201	0	15	15	0	325	62	0	0
<b>Materialänderung – Brennstoffzellen-Variante</b>											
<b>klein</b>	+42	+51	+1	0	-10	0	0	+1	0	0	0
<b>mittel</b>	+73	+84	+2	0	-13	0	0	+1	0	0	0
<b>groß</b>	+143	+154	+3	0	-15	0	0	+2	0	0	0
<b>Materialänderung – Brennstoffzellen-Hybrid-Variante</b>											
<b>klein</b>	+271	+249	+13	0	-10	+4	0	+5	0	+3	+6
<b>mittel</b>	+286	+251	+19	0	-13	+6	0	+7	0	+5	+10
<b>groß</b>	+319	+254	+30	0	-15	+12	0	+11	0	+10	+18
<b>Materialzusammensetzung – Brennstoffzellen-Variante</b>											
<b>klein</b>	1.032	644	130	0	0	10	0	209	40	0	0
<b>mittel</b>	1.370	862	171	0	0	13	0	273	52	0	0
<b>groß</b>	1.692	1.083	205	0	0	15	0	327	62	0	0
<b>Materialzusammensetzung – Brennstoffzellen-Hybrid-Variante</b>											
<b>klein</b>	1.261	842	142	0	0	14	0	213	40	3	6
<b>mittel</b>	1.583	1.029	188	0	0	19	0	279	52	5	10
<b>groß</b>	1.868	1.183	232	0	0	27	0	336	62	10	18

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

### Weitere nicht-motorische Minderungstechnologien

Neben der Basisausgestaltung von Brennstoffzellenfahrzeugen und deren hybridisierten Varianten für die Jahre 2010, 2020 und 2030, die auf den oben gemachten Ausführungen beruhen, wird je Fahrzeugklasse eine weitere Fahrzeugvariante in der Renewbility-Technologiedatenbasis berücksichtigt, die ergänzende (nicht-motorische) Maßnahmen zur Verbrauchsminderung einbezieht. Die Maßnahmenausgestaltung in Bezug auf die Minderungspotenziale, den Materialbedarf und die Zusatzkosten erfolgt analog zu den Elektrofahrzeugen und basiert auf den Annahmen in TNO (2006). Als weitere Minderungstechnologien werden die rollwiderstandsoptimierte Fahrzeugbereifung, die verbesserte Aerodynamik und der verstärkte Fahrzeugaufbau berücksichtigt. Für diese Technologien wird für die Jahre 2020 und 2030 eine entsprechende Degression der Kosten von 19 % bzw. 34 % angenommen, die sich mit zu erwartenden Lernkurveneffekten begründet.

### Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen

Für die in Renewbility betrachteten Fahrzeugkonzepte werden die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bilanziert. Beim Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen werden keine Treibhausgase und Luftschadstoffe freigesetzt und daher in der Technologiedatenbasis mit null bilanziert. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen entscheidet die Erzeugungsweise des eingesetzten Wasserstoffs über die CO<sub>2</sub>-Bilanz – die THG-Bilanz von Wasserstoff wird daher in Renewbility bei der Analyse der Kraftstoffvorketten berücksichtigt; nur beim Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff kann näherungsweise von einem CO<sub>2</sub>-neutralen Fahrzeugbetrieb ausgegangen werden.

## 3.3 Leichte Nutzfahrzeuge

Als Leichte Nutzfahrzeuge werden Lkw < 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht betrachtet. Das Vorgehen zur Datengenerierung bezüglich der Leichten Nutzfahrzeuge wurde analog zu den Pkw gewählt, da diese im Rahmen der Folgestudie TNO (TNO 2007) betrachtet wurden und für Effizienzsteigerungen vergleichbar zu den Pkw Kostenkurven existieren. Zusätzlich zu dem konventionellen Antrieb wurden Leichte Nutzfahrzeuge mit Ergasantrieb, sowie Fahrzeuge mit teil- bzw. voll-elektrischem Antrieb in die Datenbank aufgenommen.

### 3.3.1 Kraftstoffverbrauch und Kosten

Für das Basisjahr und die Entwicklung bis 2030 im Basisszenario werden die Kraftstoffverbräuche von TREMOD übernommen. Grundsätzlich können bei Leichten Nutzfahrzeugen die gleichen Technologien zur Effizienzsteigerung eingesetzt werden wie für Pkw. Entsprechend den Pkw werden daher zusätzlich 4 Varianten abgeleitet, die im Jahr 2010 um 10 %, 20 %, 25 % und 30 % effizienter sind als die Basisvariante. Die entsprechenden Zusatzkosten wurden TNO (2007) entnommen, wobei als Basis



die Kostenkurven für die Klasse III übernommen wurden. Die Lernkurveneffekte wurden nach der Methodenbeschreibung in Kapitel 3.2.2 auf die Jahre 2020 und 2030 angewendet. Die Differenzierung der Effizienzsteigerung nach Fahrsituation wird ebenfalls in Anlehnung an die Pkw abgeleitet und entspricht der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen.

Der energetische Mehrverbrauch von Erdgas-LNF wird auf Basis der In Kapitel 3.4.2 dargestellten Literaturrecherche mit 15 % gegenüber Diesel-LNF abgeleitet. Aus dieser Analyse resultieren auch die Mehrkosten, die in der Datenbank mit 4.000 € veranschlagt werden.

### 3.3.2 Emissionen

Als nicht direkt verbrauchsabhängige Schadstoffe werden auch hier  $\text{NO}_x$ , Partikel,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ , CO, NMVOC, Methan und  $\text{N}_2\text{O}$  berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren werden für die jeweils relevante Antriebsart und für alternative Motorkonzepte und Kraftstoffe auf TREMOD-Faktoren basierend abgeleitet (IFEU 2006a). Die Emissionsfaktoren spiegeln die gültige Rechtslage bezogen auf die bereits verabschiedeten Grenzwertstufen wieder.

Für die Schadstoffemissionen von Erdgas-LNF werden die entsprechenden Otto-LNF-Faktoren mit Anpassungsfaktoren nach IFEU (2005) skaliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Summe der NMHC- und  $\text{CH}_4$ -Emissionen gleich derer des LNF-Otto ist, aber zu 95 % aus  $\text{CH}_4$ -Emissionen bestehen; die Emissionswerte der anderen Schadstoffe wurden denen des Otto-LNF gleichgesetzt.

### 3.3.3 Materialbedarf

Leichte Nutzfahrzeuge (LNF) weisen aufgrund ihrer stark variablen Ausgestaltung eine sehr unterschiedliche Materialzusammensetzung auf. In der Literatur sind nur wenige Angaben zur Materialzusammensetzungen von leichten Nutzfahrzeugen verfügbar. Daher wurde für die neu zugelassenen LNF zunächst auf der Basis der KBA Statistik und Herstellerangaben ein durchschnittliches Fahrzeuggewicht (1.859 kg) ermittelt und dieses in Bezug zur Materialzusammensetzung der Klasse „große Diesel-Pkw“ gesetzt. Auf dieser Basis wurde die Materialzusammensetzung der LNF abgeleitet. Materialänderungen, die durch die Einführung neuer Technologien zur Effizienzsteigerung hervorgerufen werden, sind ebenfalls in Anlehnung an die großen Diesel-Pkw abgeschätzt worden.

Die Erdgas-LNF unterscheiden sich von den konventionellen in der Materialzusammensetzung hauptsächlich durch den benötigten Erdgastank. Dieser beläuft sich entsprechend DVZ (2007) auf rund 200 kg Stahl.

Die Materialänderungen, die durch die Elektrifizierung des Antriebs von leichten Nutzfahrzeugen hervorgerufen werden, werden im folgenden Abschnitt 3.3.4 diskutiert und sind entsprechend in der Technologiedatenbasis dokumentiert.

### 3.3.4 Leichte Nutzfahrzeuge mit elektrischem Antrieb

Analog zur Betrachtung von Pkw mit elektrischem Antrieb werden in der Technologiedatenbasis ergänzend leichte Nutzfahrzeuge (LNF) mit rein elektrischem und Plug-in-Hybridantrieb berücksichtigt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass in der Güterfeinverteilung in urbanen Räumen zunehmend alternative Antriebsoptionen für Zustellfahrzeuge diskutiert und erste Kleinserien produziert werden (MOD 2009, ECOC 2009, DAIM 2008, SAUB 2008a, SONN 2008). Die besondere Attraktivität von elektrisch betriebenen Zustellfahrzeugen ergibt sich aus den zunehmend strikteren Auflagen bezüglich fahrzeugseitiger Emissionen in Agglomerationsräumen sowie einem meist klar definierten Einsatzprofil, das einen besonders effizienten Fahrzeugbetrieb im elektrischen Modus und eine optimierte Nutzung und Ladung der Traktionsbatterie ermöglicht.

Bisher werden Plug-In-Hybrid und rein elektrische Nutzfahrzeuge in mehreren Flottentests eingesetzt (SAUB 2009, GREEN 2008). Wie auch für Pkw befindet sich jedoch die technische Ausgestaltung von leichten Nutzfahrzeugen mit elektrischem Antrieb noch in der Entwicklung, so dass lediglich mögliche Fahrzeugkonfigurationen aufgezeigt werden können.

#### LNF mit elektrischem Antrieb in der Renewability-Technologiedatenbasis

##### Plug-in-Hybridfahrzeuge

Leichte Nutzfahrzeuge mit Plug-in-Hybridantrieb werden in der Technologiedatenbasis auf Grundlage der Erkenntnisse für Plug-In-Hybrid-Pkw (siehe Tabelle 42) näherungsweise abgebildet, allerdings – entsprechend der zu erwartenden fahrzeugtechnischen Umsetzung – nur für die Antriebsoption mit Dieselmotorisierung abgebildet. Als Referenzfahrzeug dient das mittlere leichte Nutzfahrzeug mit Dieselmotorisierung. Abweichend von der Pkw-Betrachtung wird für leichte Nutzfahrzeuge lediglich eine Konfiguration mit einer elektrischen Reichweite von etwa 60 Kilometern abgebildet und eine erforderliche Batteriekapazität von 25 kWh angenommen. Die weitere Fahrzeugausgestaltung – bezüglich Hybridisierungsgrad, Art und Nutzung der Batterie (insbesondere Entladungstiefe) – orientiert sich an der Ausgestaltung für Pkw, da grundsätzlich von einer vergleichbaren Umsetzung der Antriebstechnologie ausgegangen wird.

Tabelle 65: Fahrzeugcharakteristika von LNF mit Plug-in-Hybridantrieb in der Renewability-Technologiedatenbasis

Leistung				Batterie			
Elektrische Reichweite [km]	Motor [kW]	E-Motor [kW]	Hybridisierung (DOH)	Kapazität [kWh]	Leistung [kW]	kW-kWh-Verhältnis	Max. Entladungstiefe
60	50	40	44 %	25	45	2	70 %

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Energiebedarf

Der Energiebedarf von Plug-in-Hybridfahrzeugen wird für die beiden Fahrmodi rein-elektrischer und Hybridbetrieb separat und nach Fahrsituation differenziert bestimmt (siehe Tabelle 66). Die für Plug-in-Hybrid-Pkw bestimmten relativen Minderungspotenziale werden dabei auf leichte Nutzfahrzeuge übertragen. Als Referenz dient das entsprechende dieselmotorisierte Fahrzeug.

Tabelle 66: Verbrauchsminderung, Energiebedarf und elektrische Reichweite eines PHEV-LNF in verschiedenen Fahrmodi und -situationen

Energiebedarf im rein-elektrischen Fahrzeugbetrieb [kWh/100km]			Energiebedarf im Hybridbetrieb [kWh/100km]			Elektrische Reichweite [km]		
io	ao	BAB	io	ao	BAB	io	ao	BAB
17	23	45	39	53	96	101	77	39

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Der geringste Energiebedarf wird im rein-elektrischen Fahrzeugbetrieb und innerorts erzielt. Der höhere Verbrauch im Hybridbetrieb weist jedoch gegenüber dem konventionellen Antrieb dennoch einen verbleibenden Effizienzvorteil auf.

### Zusatzkosten

Die Zusatzkosten (Herstellerekosten, s.o.) von Plug-in-Hybrid-LNF werden im Wesentlichen von der Traktionsbatterie bestimmt. Dennoch werden für leichte Nutzfahrzeuge mit Plug-in-Hybridantrieb auch weitere Zusatzkosten, die durch den elektrischen Antriebsstrang verursacht werden, mit bilanziert. Die Zusatzkosten des Energiespeichers werden auf Grundlage der Batteriekostenprognose aus Tabelle 44 für PHEV-75 (Pkw), welches über ein vergleichbares Batteriesystem verfügt, und der erforderlichen Batteriekapazität von 25 kWh abgeleitet. Die weiteren Zusatzkosten des elektrischen Antriebs werden ebenfalls analog zum PHEV-75 (Pkw) bestimmt.

Tabelle 67: Zusatzkosten des PHEV-Antriebs für leichte Nutzfahrzeuge [€]

Zusatzkosten Batterie			Zusatzkosten Elektromotor, Motorsteuerung & Motor-Downsizing			Gesamtzusatzkosten		
2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
19.250	6.250	4.500	1.399	1.121	842	20.649	7.371	5.342

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Materialbedarf

Der veränderte Materialbedarf von leichten Nutzfahrzeugen mit Plug-in-Hybridantrieb gegenüber Fahrzeugen mit konventioneller Motorisierung wird in Anlehnung an Plug-in-Hybrid-Pkw bilanziert. Der durch die Traktionsbatterie verursachte Materialbedarf wird auf Basis der erforderlichen Kapazität (25 kWh) und der angenommenen

Entwicklung der Batterietechnologie (siehe Tabelle 46) abgeschätzt. Zur Bestimmung des Anteils einzelner Werkstoffe, wird das berechnete Batteriegewicht mit den in Tabelle 33 gegebenen Daten zur Batteriezusammensetzung verknüpft. Der zusätzliche, durch weitere Fahrzeugkomponenten des elektrischen Antriebs verursachte, Materialeinsatz wird auf Basis der zu Grunde gelegten elektrischen Motorenleistung bestimmt. Tabelle 68 gibt einen Überblick des ermittelten Zusatzgewichts der Fahrzeugkomponenten sowie des gesamten Fahrzeugs mit Plug-in-Hybridantrieb. Auf die Darstellung der in der Datenbasis dokumentierten Differenzierung nach einzelnen Werkstoffen wurde an dieser Stelle zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Tabelle 68: Zusatzgewicht des PHEV-Antriebs [kg]

Zusatzgewicht Batterie			Zusatzgewicht Elektromotor, Motorsteuerung & Motor-Downsizing			Gesamtzusatzgewicht		
2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
278	208	156	33	33	33	311	241	189

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### **Batterie-elektrische Fahrzeuge**

Die in der Technologiedatenbasis getroffenen Annahmen zu Batterie-elektrischen leichten Nutzfahrzeugen orientieren sich zum Einen an den Konfigurationen bereits entwickelter Prototypen und Kleinserien und zum Anderen an den grundsätzlichen Annahmen zur Batterietechnologie und Antriebsausgestaltung für Pkw. Die Ausgestaltung der LNF mit elektrischem Antrieb nimmt Bezug auf das konventionelle verbrennungsmotorische Fahrzeugpendant, weist aber hinsichtlich Reichweite und Leistungsfähigkeit ähnliche Restriktionen, wie für Batterie-elektrische Pkw auf und kommt daher nur für ausgewählte Einsatzbereiche in Frage.

Die Konfiguration von Batterie-elektrischen LNF (siehe Tabelle 69) ist im Wesentlichen von der verfügbaren Energiespeichertechnologie bestimmt. Die Grundlage der Abbildung eines Batterie-elektrischen LNF in der Technologiedatenbasis bildet die Annahme eines Fahrzeugs mit einer elektrischen Reichweite von etwa 120 km und reduzierter Leistungsfähigkeit.

Die bisher entwickelten LNF mit elektrischem Antrieb basieren auf unterschiedlichen Batterietechnologien, entsprechend der langfristigen Annahmen der Hersteller, wird in der Technologiedatenbasis jedoch für LNF ebenfalls lediglich der Einsatz der Lithium-Ionen-Technologie berücksichtigt.

Tabelle 69: Fahrzeugcharakteristika von Batterie-elektrischen LNF in der Renewability-Technologiedatenbasis

Fahrzeugtyp	Leistung [kW]	Batteriekapazität [kWh]	Max. Entladungstiefe [%]	Elektrische Reichweite [km]
LNF	100	50	80	120

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Energiebedarf

Grundsätzlich gelten auch für LNF mit elektrischem Antrieb dieselben Annahmen zur Energieeffizienz in Bezug auf ein konventionelles Fahrzeugpendant, wie für Batterie-elektrische Pkw (siehe Tabelle 36). Da bisher kein standardisiertes Messverfahren für BEV angewendet wird und somit keine vergleichbaren Verbrauchsangaben für Batterie-elektrische LNF vorliegen, wird der Energiebedarf in der Technologiedatenbasis entsprechend dem Verhältnis von konventionellem zu Batterie-elektrischem Pkw abgeschätzt (siehe Tabelle 70).

Tabelle 70: Verbrauchsminderung des elektrischen gegenüber dem konventionellen Antrieb und daraus resultierender Energiebedarf für Batterie-elektrische LNF nach Fahrsituationen differenziert

	innerorts	außerorts	Autobahn
Verbrauchsminderung (Diesel → BEV)	76 %	64 %	55 %
Energiebedarf [kWh/100km]	21	27	51

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### Zusatzkosten

Analog zu Pkw werden die Zusatzkosten von Batterie-elektrischen LNF näherungsweise über die Kosten der Traktionsbatterie bilanziert. Mögliche weitere Kosten, die von anderen Fahrzeugkomponenten verursacht werden, werden im Rahmen der Unschärfe vernachlässigt. Unter der Annahme einer maximalen Batterieentladetiefe von 80 % ergibt sich für ein Batterie-elektrisches LNF mit den oben genannten Charakteristika eine erforderliche Energiespeicherkapazität der Traktionsbatterie von 50 kWh. Die Grundlage der Kostenbetrachtung bilden die Annahmen und Mindestanforderungen zur Batterieentwicklung für die BEV-Anwendung bei Pkw, die ähnliche Kapazitätsanforderungen an die Batterie stellt (siehe Tabelle 50). Daraus ergeben sich Zusatzkosten von 33.000 € im Jahr 2010, die sich mit zunehmendem Produktionsvolumen und entsprechender Kostendegression bis 2030 bis auf 7.500 € reduzieren können (siehe Tabelle 71).

Tabelle 71: Batteriekostenprognosen nach CARB (2007), VW (2008) und Batteriesystemkosten für leichte Nutzfahrzeuge mit Batterie-elektrischem Antrieb

	Batteriekosten [€/kWh]			Batteriesystemkosten [€]		
Jahr	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Jährliches Produktionsvolumen	aktuell	20.000	100.000	aktuell	20.000	100.000
Leichtes Nutzfahrzeug	660	215	150	33.000	10.750	7.500

Quelle: Annahmen Öko-Institut und CARB (2007), VW (2008)

### Materialbedarf

Die Bilanzierung des veränderten Materialbedarfs durch die Elektrifizierung des Antriebs berücksichtigt in Anlehnung an Batterie-elektrische Pkw lediglich den Einfluss der Traktionsbatterie auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie sowie den Ersatz des Verbrennungs- (150 kg) durch einen Elektromotor (70 kg). Unter der Annahme einer Energiedichte der Batterie von 90 Wh/kg im Jahr 2010 (vergleiche Tabelle 46) ergibt sich ein Batteriegewicht von 537 kg. Auf Basis der prognostizierten Steigerung der Energiedichte bis 2030 auf 160 Wh/kg würde sich eine Minderung des Batteriegewichts auf 294 kg ergeben

Entsprechend der Angaben zur Materialzusammensetzung von Lithium-Ionen-Batterien für die fünf wichtigsten Werkstoffe ergibt sich für Batterie-elektrische leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2010 die in Tabelle 72 illustrierte Veränderung der Materialzusammensetzung gegenüber einem konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugpendant.

Tabelle 72: Veränderter Materialbedarf [kg] von Batterie-elektrischen LNF im Jahr 2010

Summe	Stahl, Eisen	Aluminium	Magnesium	Blei	Kupfer	Nickel	Kunststoffe	Glas	Mangan	Andere
<b>Referenzfahrzeug</b>										
1859	1115	242	0	19	19	0	390	74	0	0
<b>Materialänderung Batterie</b>										
+537	+53	+175	0	-19	+81	0	+56	0	+67	+123
<b>Materialänderung Motorisierung</b>										
-80	-63	-38	0	0	21	0	0	0	0	0
<b>Batterie-elektrisches Fahrzeug</b>										
2.316	1.105	379	0	0	121	0	446	74	67	123

Quelle: Annahmen Öko-Institut nach IPTS (2005), MIT (2000), CARB (2007)

### 3.4 Lkw und Busse

Die Ausgangsdaten für Lkw und Busse zu Kraftstoffverbrauch (Energiebedarf) und Emissionen (NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NMHC, CH<sub>4</sub>, CO, PM) im Basisjahr 2005 beruhen ebenfalls auf den Angaben von TREMOD. Für die darüber hinaus betrachteten Zeitscheiben 2010, 2020 und 2030 wurden technologiespezifische Minderungspotenziale, der dadurch erforderliche Materialeinsatz und die entstehenden Zusatzkosten anhand von Literaturrecherchen abgeleitet (siehe Kap. 4.15).

Eine besondere Rolle spielt die Fahrzeugdefinition, da Energieverbrauch und Emissionen maßgeblich von deren spezifischen Charakteristika abhängen.

Die Fahrzeuge werden in der Technologiedatenbasis nach:

- Fahrzeugtyp (Solo-Lkw, Sattel- & Lastzug, Reise- und Linienbus),
- Gewichtsklasse (zulässiges Gesamtgewicht)

definiert.

Die betrachteten Fahrzeugklassen, die sich typischerweise durch Nutzungsweisen und eingesetzte Technologien unterscheiden, werden in Anlehnung an TREMOD in die folgenden 4 Lkw- und 2 Omnibusklassen unterteilt:

- Solo-Lkw (3,5 - 7,5 t zGG),
- Solo-Lkw (7,5 - 12 t zGG),
- Solo-Lkw (> 12 t zGG),
- Last- und Sattelzug (> 12 t zGG),
- Linienbus (18 t zGG),
- Reisebus (18 t zGG).

Für die spezifizierten 4 Lkw- und 2 Omnibusklassen wurden ausgehend von den in TREMOD ausgewiesenen durchschnittlichen Kapazitäten (maximale Nutzlast), weitere mittlere Charakteristika der jeweiligen Klassen abgeleitet (Tabelle 73 & Tabelle 74). Dabei handelt es sich lediglich um konstruierte Fahrzeugtypen, die keinen realen Fahrzeugen entsprechen, sondern gemittelte Eigenschaften eines Fahrzeugs dieser Klasse widerspiegeln. Diese dienen als Grundlage für die Abschätzung der Emissionsfaktoren, Zusatzkosten und Materialbedarfe einer jeden Fahrzeugklasse.

Die letztlich auf Grundlage der Technologiedatenbasis ausgestalteten Varianten der betrachteten Fahrzeugklassen werden in 3.4.3 ausführlich diskutiert.



### 3.4.1 Bemerkungen zur Datengenerierung

#### Kraftstoffverbrauch & Emissionen

Die Ermittlung der Emissionen und Kraftstoffverbräuche von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen erfolgt auf Basis der unterstellten Fahranteile und Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeugklassen wie sie in TREMOD verwendet werden für das Basisjahr 2005. Die ermittelten Kraftstoffverbräuche bilden den Ausgangspunkt für die Ausgestaltung verschiedener Fahrzeugvarianten. Die Kraftstoffverbräuche der Fahrzeugklassen in Renewbility beziehen sich auf die in TREMOD auf Basis des „Handbuchs für Emissionsfaktoren“ gemachten Annahmen und unterscheiden zwischen den Straßenkategorien „innerorts“, „außerorts“ und „Autobahn“. Die Unterscheidung verschiedener Straßenkategorien ermöglicht eine realitätsnähere Betrachtung des tatsächlichen Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von Fahrzeugen. Außerdem wird somit eine differenzierte Betrachtung der Wirksamkeit von verbrauchsmindernden Maßnahmen nach Straßenkategorie ermöglicht. So weist beispielsweise die Start-Stopp-Automatik im innerorts-Verkehr eine höhere Wirksamkeit als außerorts auf und birgt die Minderung des Fahrzeug-Luftwiderstands insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (Autobahn) besonders große Kraftstoffminderungspotenziale.

Die aus TREMOD ermittelten durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen (Tabelle 73) aller Fahrzeugklassen im Basisjahr 2005 beziehen sich auf deren Gewicht bei mittlerem Auslastungsgrad und beruhen auf den TREMOD-Annahmen bezüglich straßenkategorie-spezifischer Fahrleistung.

Tabelle 73: Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Lkw- und Omnibusklassen auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeugauslastung nach TREMOD im Basisjahr 2005.

	Solo-Lkw (3,5-7,5 t)	Solo-Lkw (7,5-12 t)	Solo-Lkw (>12 t)	Sattel- & Lastzug (>12 t)	Linien- bus	Reise- bus
<b>Auslastungsgrad %</b>	30	30	34	42	21	60
<b>Maximale Nutzlast [t bzw. Pers. ]</b>	3,0	5,0	9,6	22,8	60	44
<b>CO<sub>2</sub> [g/km]</b>	296	431	688	784	920	851
<b>Kraftstoffverbrauch [l/100km]</b>	11,2	16,3	26,0	29,7	34,8	32,2

Quellen: TREMOD, IFEU 2007

Als nicht direkt verbrauchsabhängige Schadstoffe werden im Rahmen von Renewbility, wie bereits bei Pkw und LNF genannt, NO<sub>x</sub>, Partikel, PM-10, PM-2,5, CO, NMVOC, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren werden für die jeweils relevante Antriebsart und für alternative Motorkonzepte und Kraftstoffe auf TREMOD-Faktoren basierend abgeleitet (IFEU 2006). Die Emissionsfaktoren spiegeln die gültige Rechtslage bezogen auf die bereits verabschiedeten Grenzwertstufen wieder. Aus TREMOD direkt werden die Emissionsfaktoren von NO<sub>x</sub>, Partikel, CO, NMVOC, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O für Diesel-Nutzfahrzeuge entnommen.

In der Technologiedatenbasis werden bei der Lkw-Antriebstechnik der Einsatz von Dieselmotoren sowie deren Hybridisierung berücksichtigt. Für Omnibusse berücksichtigt die Technologiedatenbasis neben der am weitest verbreiteten Dieselmotorisierung auch den Otto-Verbrennungsmotor, da dieser bei Erdgasfahrzeugen zum Einsatz kommt. Weiterhin werden bei Bussen der Hybrid- sowie der Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb betrachtet.

### **Fahrzeugtechnologien & Effizienzsteigerungspotenziale**

Die Betrachtung von Fahrzeugtechnologien zur Effizienzsteigerung erlaubt die technologiespezifische Ausgestaltung und Quantifizierung der Minderungspotenziale der definierten Fahrzeugvarianten. Technische Möglichkeiten zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs teilen sich auf in die Verbesserung des Systemwirkungsgrades von Motor, elektrischem Verbraucher und Antriebstrang und eine Reduktion der Fahrwiderstände durch Modifikationen am Fahrzeug selbst. Die in 3.4.2 diskutierten Minderungstechnologien und Effizienzsteigerungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen beruhen auf IFEU (2007) und einer darauf aufbauende Literatúrauswertung.

Die in der Technologiedatenbasis fahrzeug- und straßenkategoriespezifisch dokumentierten Minderungspotenziale beziehen sich jeweils auf das Basisjahr 2005. Generell ist die Datenlage für Nutzfahrzeuge und Busse im Vergleich zu Pkw von wesentlich geringerem Umfang; so fehlen umfassende Studien und es musste zum Teil auf Informationen einzelner Hersteller bzw. auf Informationen zur technologischen Entwicklung in anderen Fahrzeugkategorien zurückgegriffen und diese möglichst adäquat für Nutzfahrzeuge über die Bezugsgrößen Motorenleistung und Leergewicht angepasst werden.

### **Materialeinsatz**

Wie bei den Pkw sind auch bei den Schweren Nutzfahrzeugen die betrachteten Fahrzeugtechnologien zur Effizienzsteigerung teilweise mit einem veränderten Werkstoffeinsatz verbunden. Dieser wird ausgehend von einem Referenzfahrzeug der jeweiligen Fahrzeugklasse im Basisjahr 2005 technologiespezifisch erfasst.

Für Lastkraftwagen werden die Materialanteile des Referenzfahrzeugs aus (IFEU 2007, VOLVO 2001) übernommen und an das jeweilige durchschnittliche Leergewicht der betrachteten Fahrzeugklasse (Tabelle 74) angepasst. Analog wird für Linien- und Reisebusse, basierend auf einer entsprechenden Studie zur Materialzusammensetzung (VOLVO 2003) verfahren und ein Referenzfahrzeug generiert.

Technologiebedingte Veränderungen im Materialeinsatz werden in der Technologiedatenbank jedoch nur berücksichtigt, wenn diese als wesentlich beurteilt werden und in der Literatur durch ausreichend detaillierte Angaben gestützt sind. Hierzu zählt der Fahrzeugaufbau, die Luftwiderstandsoptimierung, der Hybrid-, Erdgas- und Brennstoffzellenantrieb.

Tabelle 74: Spezifikationen der Lkw- und Omnibusklassen auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeugkapazitäten nach TREMOD.

	Solo-Lkw (3,5-7,5 t)	Solo-Lkw (7,5-12 t)	Solo-Lkw (>12 t)	Sattel- & Lastzug (>12 t)	Linien- bus	Reise- bus
<b>Zulässiges Gesamtgewicht [t]</b>	7,0	10,0	15,8	32,6	18,0	18,0
<b>Leergewicht [t]</b>	4,0	5,0	6,2	9,8	11,0	14,0
<b>Maximale Nutzlast [t]</b>	3,0	5,0	9,6	22,8	7,0	4,0

Quellen: KBA 2007, LAST 2007, IFEU 2007, TREMOD

## Zusatzkosten

Neben dem Effizienzsteigerungspotenzial und dem erforderlichen Materialbedarf beim Einsatz verbrauchsmindernder Fahrzeugtechnologien, werden auch die dabei entstehenden Zusatzkosten in der Technologiedatenbasis hinterlegt, um eine ökonomische Beurteilung der Technologiemaßnahmen zu erlauben.

Die Abschätzung zukünftiger Kosten von Technologien zur Verbrauchsreduktion ist mit nicht zu vernachlässigenden Unsicherheiten behaftet. Neben der grundsätzlich spärlichen Datenlage für schwere Nutzfahrzeuge und Busse werden in der Datenbasis teilweise Technologien berücksichtigt, die noch keine Serienreife erreicht haben oder bisher nur in geringer Stückzahl produziert wurden. Deren Kosten lassen sich dementsprechend nur näherungsweise abschätzen.

Basis der Kostenabschätzungen bilden im Wesentlichen die Auswertungen von IFEU (2007), die in Einzelfällen durch aktuelle Veröffentlichungen zu Technologiekosten ergänzt wurden. Ausgewiesen werden die Zusatzkosten für den Hersteller im Jahr 2010. Sofern die verwendeten Literaturquellen die Endverbraucherpreise angeben und entsprechende Faktoren ausweisen, werden diese zur Konversion „Preis für den Endverbraucher“ – „Kosten für den Hersteller“ verwendet. Ist dies nicht der Fall wird der Divisor 1,44 zur Umrechnung der Endkundenpreise und Herstellerkosten verwendet (TNO 2006). Die Technologiekosten werden fahrzeugspezifisch angepasst. In Abhängigkeit von der Technologiemaßnahme wird der Bezug entweder über die Motorleistung (Verbrauch), das Fahrzeugleergewicht oder den Fahrzeug-Neupreis (Tabelle 75) hergestellt und die Zusatzkosten entsprechend skaliert.

Tabelle 75: Spezifikationen der einzelnen Lkw- und Omnibusklasse zur Ableitung der Technologiekosten

	Solo-Lkw (3,5-7,5 t)	Solo-Lkw (7,5-12 t)	Solo-Lkw (>12 t)	Sattel- & Lastzug (>12 t)	Linien- bus	Reise- bus
<b>Leergewicht [kg]</b>	4.000	5.000	6.197	9.771	11.000	14.000
<b>Kraftstoffverbrauch [l/100km]</b>	11,2*	16,3*	26,0	29,7	34,8*	32,2
<b>Neupreis ohne MwSt. [€]</b>	40.000	50.000	80.000	120.000	230.000	260.000

\*Kraftstoffverbrauch CNG-Fahrzeuge [kg/100km]: Solo-Lkw (3,5-7,5 t): 10,2; Solo-Lkw (7,5-12 t): 14,9; Linienbus: 36,5

Quellen: KBA 2007, LAST 2007, IFEU 2007, KFZ-ANZEIGER 2006, TREMOD 2006

Ausgehend von den ermittelten technologiespezifischen Investitionskosten im Jahr 2010 ist zu erwarten, dass sich mit zunehmender Marktdurchdringung einzelner Technologien Skaleneffekte auf die Kosten mindernd auswirken. Daher wird in Anlehnung an das Vorgehen für Pkw auch für schwere Nutzfahrzeuge eine Kostendegression technologiespezifisch für die Jahre 2020 und 2030 auf Basis von unterstellten Marktanteilen und mittels der Lernkurvenmethodik bestimmt. Der Degressionsfaktor wird analog zu Pkw auf 0,86 festgesetzt. Dies bedeutet bei einer Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge einer Fahrzeugtechnologie eine Minderung der Kosten um 14 %. Die kumulierte Produktionsmenge wird über die in Tabelle 76 aufgeführten angenommenen relativen Anteile einer Einzeltechnologie an den Neuzulassungen für die Jahre 2010, 2020 und 2030 bestimmt und entsprechende relative Kostenminderungen ermittelt. Zu berücksichtigen ist, dass wie bei den Pkw die Varianten erst in den Szenarien relevant werden, so dass im Voraus noch nicht eindeutig auf deren potenziellen Marktanteil geschlossen werden kann. Werden in den Szenarien Maßnahmen abgebildet, die die Nachfrage nach effizienteren Lkw verstärken, dann steigt die Produktionsmenge der Technologien, die den Varianten hinterlegt sind, und damit sinken die Kosten der Varianten. Dies sollte optimaler Weise in einer Rückkopplung mit dem Käufermodell abgebildet werden, was jedoch eines sehr großen Rechenaufwandes bedarf. Daher werden wie bei den Pkw zunächst den Produktionsmengen in den Varianten hypothetische Annahmen einer erfolgten Marktdurchdringung hinterlegt. Auf Basis der durch das Käufermodell für die verschiedenen Szenarien modellierten Nachfrage nach den einzelnen Lkw- und Bus-Varianten wird dann jedoch die Plausibilität der Produktionsmenge (also dem Marktanteil der einzelnen Varianten an den Neuzulassungen) überprüft und die zunächst hypothetisch angenommenen Marktanteile gegebenenfalls angepasst.

Tabelle 76: Markteinführungsszenarien für die in Abschnitt 3.4.2 diskutierten Einzeltechnologien bei Lkw und Omnibussen

Einzeltechnologien	Relative Anteile an Neuzulassungen		
	2010	2020	2030
Luftwiderstandsoptimierung (-10 %)	70-80 %	80-90 %	90-100 %
Getriebeoptimierung, Rollwiderstandsoptimierte Bereifung	40-50 %	60-70 %	80-100 %
Leichtbau (-10 %)	5-10 %	15-25 %	35-45 %
Luftwiderstandsoptimierung (-15 %), Start-Stopp-Automatik	1-5 %	5-10 %	10-20 %
Hybridantrieb, Erdgasantrieb, verstärkter Leichtbau (-15 %)	1-3 %	2-5 %	5-10 %

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Für die Fahrzeugeffizienzsteigerung durch den Einsatz von Leichtlaufölen und durch die allgemeine Motorenentwicklung wird in der Technologiedatenbasis, angesichts der bereits bestehenden hohen Marktdurchdringung, keine weitere Kostendegression durch Lernkurveneffekte nach 2010 angenommen. Für die Maßnahmen

Luftwiderstandsoptimierung (-10 %), Getriebeoptimierung und rollwiderstands-optimierte Bereifung wird auf Basis des Markteinführungsszenarios (Tabelle 76) zunächst eine Minderung der Technologiekosten von 15 % (2020) bzw. 25 % (2030) berücksichtigt. Eine zunehmende Verbreitung einer moderaten Leichtbauweise (-10 % Gewicht) bei schweren Nutzfahrzeugen, gemäß den Angaben in Tabelle 76, wird mit einer Kostenminderung von etwa 25 % (2020) bzw. 40 % (2030) verknüpft. Das Markteinführungsszenario für verstärkte Luftwiderstandsoptimierung (-15 %) und den Einsatz der Start-Stopp-Automatik bzw. einer milden Hybridisierung ist mit einer Kostendegression von 25 % in 2020 und 35 % in 2030 verbunden. Für die unterstellte Nachfrage nach Erdgas- und Hybridfahrzeuge sowie eine verstärkte Leichtbauweise (-15 % Gew.) werden um 20 % (2020) bzw. 35 % (2030) geringere Herstellkosten ermittelt. Da mit dem Einsatz der Brennstoffzellentechnik erst ab 2010 zu rechnen ist und damit die Phase der größten Kostendegression in den Zeitraum von 2020 bis 2030 fällt, wird für die Jahre 2020 und 2030 eine Minderung der Produktionskosten von 40 % bzw. 60 % in der Technologiedatenbasis hinterlegt.

### 3.4.2 Technologien zur Kraftstoffverbrauchsminderung

Im Folgenden werden die in der Datenbasis berücksichtigten Fahrzeugtechnologien zur Kraftstoffverbrauchsminderung für die Fahrzeugklassen der Kategorie Lastkraftwagen und Omnibus differenziert nach Fahrzeugtyp, Größenklasse und Straßenkategorie diskutiert.

Dabei werden, ausgehend von den Auswertungen der Literaturrecherche, die in der Fahrzeugdatenbank für die einzelnen Fahrzeugtechnologien hinterlegten:

- Minderungspotenziale,
- Materialbedarfe,
- Zusatzkosten

vorgestellt.

### Lastkraftwagen (Solo-Lkw, Last- & Sattelzug > 3,5 t zGG)

#### **EURO-Norm**

Für Maßnahmen zur Einhaltung rechtsverbindlicher Emissionsvorschriften sind motorische Maßnahmen oder aber eine Abgasnachbehandlung erforderlich. Die für die Typzulassung ab 2005 rechtsverbindliche EURO 4 und die seit 2008 gültige EURO 5-Norm für Nutzfahrzeuge erfordert eine weitere Senkung der Schadstoff- und Partikelemissionen. Die Einhaltung der Grenzwerte kann damit nicht mehr alleine durch innermotorische Maßnahmen an den Dieselmotoren gewährleistet werden, sondern bedarf zusätzlicher Abgasnachbehandlungssysteme (AUTO 2003). Technisch steht neben der innermotorischen Umsetzung durch optimierte Einspritzung in

Kombination mit Abgasrückführung (AGR), die nachmotorische Lösung, wie das SCR- (Selective Catalytic Reduction)-Verfahren in Kombination mit einem Partikelfilter, zur Alternative (ADM 2007). Die meisten europäischen Lkw-Hersteller haben sich mittlerweile für das SCR-Verfahren mit Harnstoff-Einspritzung entschieden (LOGISTIK 2007a, ADM 2007). Dem Nachteil der Mitführung von Harnstoff (Zusatzgewicht von 150 kg) steht eine Kraftstoffverbrauchsminderung von 6-7 % entgegen (ADM 2007, ITR 2005). IVECO (2003) rechnet mit einer Verbrauchsminderung durch eine effizientere Verbrennung in Kopplung mit der SCR-Technologie von 3-4 %.

In der Lkw-Technologiedatenbank wird für EURO 5 lediglich eine durchschnittliche Verbrauchsminderung von 5 % unabhängig von der Straßenkategorie angesetzt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass zurzeit zwei verschiedene Systeme mit unterschiedlichen Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch bei Lkw eingesetzt werden.

Für die Umsetzung der EURO 5-Norm wird mit Mehrkosten von 7.000 bis 8.000 € für die Motorenoptimierung und die Ausstattung mit entsprechenden Abgasnachbehandlungssystemen gerechnet (ADM 2007). DES (2007) beziffert die Kosten für die Nachrüstung von Fahrzeugen mit der SCR-Technologie und Partikelfilter auf zwischen 8.000 und 23.500 € je nach Fahrzeug und Stückzahl.

Da es sich bei der Erfüllung der EURO 5-Norm jedoch nicht um eine fakultative Option, sondern eine rechtsverbindliche Vorschrift zur Verringerung der Luftschadstoffemissionen handelt, die nicht primär zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingeführt wird, werden in der Lkw-Datenbasis hierfür keine Zusatzkosten ausgewiesen.

Für die Umsetzung der EURO 5-Norm wird mit keiner wesentlichen Änderung des Werkstoffeinsatzes bei Lkw gerechnet (IFEU 2007) und dementsprechend keine Veränderung des Materialbedarfs unterlegt. Die Mitführung von Harnstoff (SCR-Verfahren) wird jedoch nach (AUTO 2003, ADM 2007, VTT 2007) in Anlehnung an den Kraftstoffverbrauch der jeweiligen Lkw-Fahrzeugklasse berücksichtigt (Bedarf entspricht 4-6 % des Kraftstoffverbrauchs).

### **Motorenoptimierung**

Hierunter fallen Verbesserungen an allen Komponenten des Motors, die nicht mit der Einführung neuer Fahrzeugtechnologien verbunden sind, wie beispielsweise geringere bewegte Massen im Motor, reduzierte Reibung, optimierte Einspritzpumpen und Ventile und eine effizientere Verbrennung durch schrittweise Verbesserungen an Ladern bei Dieselmotoren.

IVECO (2003) prognostiziert „für die nahe Zukunft“, dass durch eine verbesserte Motoreffizienz mittelfristig weitere 8 % Kraftstoff eingespart werden können (exklusive der SCR-Technologie: 4 %). Als wesentliche Ansatzpunkte zur Optimierung werden die motorische Reibungsreduktion (3 bis 4 %), die 2-stufige Motorenaufladung (2 %), eine variable Ventilsteuerung (bis 4 %) und eine Optimierung der Nebenaggregate (2 %) genannt. Tretow (2004) identifiziert ein



Effizienzsteigerungspotenzial von 5 % bei der Optimierung konventioneller Dieselmotoren.

In der Technologiedatenbasis wird für Dieselmotoren ein weiteres Optimierungspotenzial von 3 % (2010), 5 % (2020) und 8 % (2030) angenommen. Für Erdgasfahrzeuge werden geringere Motorenentwicklungspotenziale von 2 %, 4 % und 6 % für die entsprechenden Zeitscheiben unterstellt.

Für die Motorenoptimierung bei schweren Nutzfahrzeugen werden in der Technologiedatenbasis die Zusatzkosten mit maximal 375 € bis 992 € (Solo-Lkw <7,5 t bis Last-/Sattelzug) beziffert.

Bei der zukünftigen Motorenentwicklung werden nur unwesentlichen Veränderungen des Materialeinsatzes angenommen und deswegen in der Datenbasis näherungsweise eine gewichtsneutrale Umsetzung ohne Veränderung des Werkstoffeinsatzes unterstellt.

### **Leichtlauföle**

Die im Zuge der EURO 5-Norm entwickelten Leichtlauföle bieten nach Herstellerangaben Einsparpotenziale von bis zu 2 % (u.a. TEC 2007, VerkehrsRundschau 2007). IVECO konnte im Rahmen des „Transport Concept“ eine um 2,3 % verbesserte Motor- und Getriebeleistung eines Sattelzugs erreichen (IVECO 2007). VTT (2006) hält Kraftstoffeinsparungen von bis zu 3 % durch Leichtlauföle für realistisch. Experten des Umweltbundesamtes (UBA) und des UC Berkley Center for Future Urban Transport (UCB) geben Einsparpotenziale von allein 3 % durch den Einsatz von Leichtlaufölen in Motor und Antriebsstrang an (DVZ 2007).

Pauschal wird die Verbrauchsminderung von Lkw durch den Einsatz von Leichtlaufölen in der Lkw-Technologiedatenbasis auf 3 % gesetzt.

Die entstehenden Zusatzkosten beim Einsatz von Leichtlaufölen werden als Differenzbetrag zu konventionellen Motorenölen berücksichtigt. Basierend auf den Angaben zum Motorölbedarf von schweren Nutzfahrzeugen in INFRAS (2002) und unterstellten Mehrkosten (Verkaufspreis) von 4 €/l wurden Anschaffungskosten von 17 bis 78 € ermittelt. Weiter werden diese betriebskostenseitig unter Berücksichtigung der Wechselintervalle entsprechend über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs bilanziert.

Der Einsatz von Leichtlaufölen führt zu keiner Veränderung der Materialanteile und wird in der Technologiedatenbasis als gewichtsneutrale Maßnahme ausgewiesen.

### **Minderung des Fahrzeuggewichts**

Das Fahrzeuggewicht ist einer der wichtigsten Einflussfaktoren für den Kraftstoffverbrauch (VTT 2006). Eine Minderung des Fahrzeuggewichts bewirkt folglich eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen.

TEC (2007) hält Verbrauchsminderungspotenziale von bis zu 30 % bei optimierter Gewichts- und Luftwiderstandsreduzierung für realistisch, weist aber für Leichtbau



keine Potenziale separat aus. VTT identifiziert eine Minderung des Fahrwiderstands um 25 % durch Gewichts- und Luftwiderstandsreduzierung, die eine bis zu 30 %-ige Verbrauchsminderung bewirken. Ein Zusatzgewicht von 1.000kg führt laut VTT (2006) für einen Sattelzug zu einer Verbrauchssteigerung von 0,7 auf der Autobahn bzw. 2,0 l/100km innerorts. Nach IFEU (2006a) können durch Leichtbaumaßnahmen bei Sattelzügen durchschnittliche Verbrauchsminderungen von 0,06 l/100km und je 100 kg reduzierten Fahrzeuggewichts erreicht werden.

In der Technologiedatenbasis für Lastkraftwagen wird gemäß VTT (2006) bei mäßigem Leichtbau (-10 % Gewichtsminderung) ein Effizienzsteigerungspotenzial von 2,5 % auf der Autobahn, 3,5 % außerorts und 4,5 % innerorts und bei verstärktem Leichtbau (-15 %) Potenziale von 3,5 %, 5 % bzw. 7 % angenommen.

Die Kostenabschätzung für Leichtbau bei schweren Nutzfahrzeugen beruht auf den Auswertungen von IFEU (2007). Dort werden für mäßigen Leichtbau (-10 %) Zusatzkosten von 3,3 € pro gemindertem Kilogramm Fahrzeuggewicht und für verstärkten Leichtbau (-15 %) zusätzliche Kosten von 3,6 €/kg angenommen. Die unterstellte Kostensteigerung wird mit einem zunehmenden konstruktiven Aufwand und dem Einsatz teurerer Materialien begründet (IFEU 2007).

Im Vergleich zu einem Referenzfahrzeug bedeutet dies für die Fahrzeugklassen der Technologiedatenbasis eine Kostensteigerung von 1.200 bis 3.000 € (Solo-Lkw <7,5 t bis Last-/Sattelzug) bei mäßigem Leichtbau und Mehrkosten von 2.200 bis 5.300 € bei der Umsetzung des verstärkten Leichtbaus.

Die Reduktion des Fahrzeuggewichts durch Leichtbau führt nach Abschätzungen von IFEU (2007) zu einem verstärkten Einsatz von Aluminium und Kunststoff anstelle von Stahl. Diese Verschiebung der Anteile der eingesetzten Werkstoffe wächst mit zunehmendem Leichtbau. Für alle Fahrzeugklassen werden dabei dieselben relativen Veränderungen angenommen.

### ***Minderung des Rollwiderstands***

Mit Experimentalreifen werden Reduktionen von mehr als 50 % vom durchschnittlichen Rollwiderstand erreicht. Diese Reifen können für zukünftige Bezugsjahre jedoch nicht als typisch betrachtet werden. Realistischer sind Reduktionen des Rollwiderstandes um 20 bis 30 %. Die Verbrauchsminderung fällt tendenziell innerorts stärker aus. Friedrich (2002) weist bei einer Verminderung des Rollwiderstands um 30 % eine Verbrauchsminderung von 4-6 % innerorts und 2-3 % auf der Autobahn aus. VTT (2006) gibt Rollwiderstandsvariationen von 5 bis 15 % und Verbrauchsminderungspotenziale von über 5 % an. In SRU (2005) werden Minderungspotenziale für Lkw durch rollwiderstandsoptimierte Bereifung von 3 bis 9 % ausgewiesen. Das „Iveco Transport Concept“ (VerkehrsRundschau 2007, IVECO 2007) rechnet mit einer Verbrauchsminderung um 7 % durch optimierte Bereifung, wobei insbesondere bei hoher Last hohe Minderungsraten erreicht werden. Bisher konnten in Testmessungen beim „Iveco Transport Concept“ 2,6 % erreicht werden. Laut einer Studie des Umweltbundesamts können Reifen mit optimiertem

Rollwiderstand im Lkw-Güterverkehr den Kraftstoffverbrauch je nach Streckenprofil, Geschwindigkeitsniveau sowie Windverhältnissen zwischen 4 und 12 % vermindern (UBA 2002). Für Nutzfahrzeuge werden generell höhere Minderungspotenziale als für Pkw erwartet (Kolke 2003).

In der Nutzfahrzeug-Technologiedatenbasis werden entsprechend für 2010 Minderungspotenziale von 6 % innerorts, 4 % außerorts bzw. 3 % auf der Autobahn angenommen. Eine weitere Optimierung der Rollwiderstände wird für die Zeitscheiben 2020 und 2030 durch eine darüber hinausgehende Minderung des Verbrauchs berücksichtigt (2020: 7 %, 5 %, 3,5 % und 2030: 9 %, 6,5 %, 4 %). Dies entspricht einer, über die Straßenkategorien aggregierten, mittleren Verbrauchsminderung von 3,5 bis 4,5 % (je nach Fahrzeugklasse) in 2010, 4 bis 5 % in 2020 und 5 bis 6,5 % in 2030.

Die Zusatzkosten für rollwiderstandsoptimierte Lkw-Bereifung werden auf Basis der Abschätzung des Ifeu ermittelt. Die Mehrkosten liegen laut IFEU (2007) zwischen 80 € für Solo-Lkw (bis 7,5t) und 190 € für Last- und Sattelzüge und werden betriebskostenseitig für Wechselintervalle von 80.000 km weiter berücksichtigt.

Der Einsatz von rollwiderstandsoptimierter Bereifung führt zu keiner generellen Veränderung des Materialeinsatzes, jedoch kann der Einsatz von Super-Single-Reifen eine Gewichtsminderung von über 100 kg ermöglichen. In der Technologiedatenbasis wird keine Veränderung des Werkstoffeinsatzes unterstellt.

### ***Minderung des Luftwiderstands***

„Im Nahverkehr und insbesondere im Überland- und Fernverkehr, wo höhere Geschwindigkeiten gefahren werden, ist die Bedeutung der Aerodynamik unumstritten. Die hier am häufigsten auftretenden Lastkraftwagen und Lastzüge mit hohen Aufbauten [...] sind deshalb die Zielgruppe für aerodynamische Maßnahmen zur Verminderung des Kraftstoffverbrauchs“ (HUCHO 2005).

Das Anbringen von Luftleitkörpern, Bugschürzen und Seitenverkleidungen kann den Energiebedarf laut HUCHO (2005) bei Solo-Lkw um bis zu 27 % reduzieren. Aerodynamisch ausgelegte Sattelzugkonzepte, wie der FEV 2000 bzw. der EXT-92 konnten ebenfalls einen um mehr als 30 % geringeren Luftwiderstand erreichen. Im Rahmen des IVECO Transport Concept (IVECO 2007) und VerkehrsRundschau (2007) konnte der Luftwiderstand eines Sattelzugs um 20 % gemindert werden, die damit verbundene Verbrauchsminderung wird jedoch nicht technologiescharf ausgewiesen. Die erforderlichen Veränderungen an Zugmaschine und Auflieger sind ausgesprochen kosten- und materialintensiv. In VerkehrsRundschau (2007) wird darauf verwiesen, dass 50 % der möglichen Verbrauchsminderungsmaßnahmen bei Lkw auf eine optimierte Aerodynamik zurückgehen, wobei optimierte Spoiler bereits 6 % Kraftstoffeinsparung bewirken können. VTT (2006) beziffert die Verbrauchsminderung durch das Anbringen von Luftleitblechen an Zugmaschinen auf 5 %. Laut TEC (2007), VTT (2006) sind bei einer Kombination von optimiertem Luftwiderstand und maximaler Gewichtsminderung bei Lkw bis zu 30 % Verbrauchsminderung zu erreichen. In DVZ

(2007) verweisen Experten des UBA und des UCB auf Minderungspotenziale durch aerodynamische Maßnahmen an der Zugmaschine (3,7 %) und dem Sattelanhänger (3,5 %). HUCHO (2005) weist für Transporter bei einer Verringerung des Luftwiderstands um 10 % bzw. 20 % eine durchschnittliche Kraftstoffersparnis von 3 bzw. 6 % aus. Für einen Sattelzug beziffert WOOD (2003) bei einer Reduzierung des Luftwiderstands um 30 % und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 76 km/h, die Kraftstoffeinsparung auf etwa 10 %. In USDE (2004) werden für Sattelzüge bei Autobahngeschwindigkeit relative Kraftstoffeinsparungen angegeben, die in etwa der Hälfte der erreichten relativen Minderung des Luftwiderstands entsprechen. Eine Minderung des Luftwiderstands von Sattelzügen um bis zu 50 % wird als vorstellbar bezeichnet.

In der Technologiedatenbasis wird die Reduktion des Luftwiderstands von schweren Nutzfahrzeugen für 10 % und 20 % betrachtet. Bei einer 10 %-igen Verbesserung des Luftwiderstandswertes werden in Bezug auf HUCHO (2005) Verbrauchsminderungen von 1 % (innerorts) bzw. 3 % (außerorts) und 4 % (Autobahn) angenommen. Eine Optimierung des Luftwiderstands um 20 % wird mit einem Minderungspotenzial von 2 % im Stadtverkehr, 5 % außerorts und 8 % auf der Autobahn verknüpft.

Die erforderlichen Maßnahmen zur Reduktion des Luftwiderstands bei Lkw sind mit Zusatzkosten verbunden. Für eine 10 %-ige Luftwiderstandsminderung werden Zusatzkosten gemäß dem Vorgehen von IFEU (2007) ermittelt. Die Kostenabschätzung für Maßnahmen zur Minderung des Luftwiderstandes um 20 % erfolgt auf Basis der Angaben des „IVECO Transport Concept“ (IVECO 2007, VerkehrsRundschau 2007) und wird entsprechend gewichtsbasiert auf alle Fahrzeugklassen angewendet. Es ergeben sich somit Zusatzkosten zur 10 %-igen Luftwiderstandsminderung in einer Spannweite von 330 € (Solo-Lkw, <7,5 t) bis zu 800 € (Last- und Sattelzug). Die Minderung des Luftwiderstands um 20 % wird mit Zusatzkosten von 2.840 € bis zu 6.940 € beziffert.

Der Einsatz von beispielsweise Luftleitblechen, Spoilern und Unterbodenverkleidungen zur Optimierung der Aerodynamik von Lkw, führt zu einem zusätzlichen Werkstoffeinsatz. In der Lkw-Datenbank wird dieser durch einen erhöhten Einsatz von Kunststoff und Aluminium widerspiegelt, der sich entsprechend der Gewichtsrelationen der betrachteten Fahrzeugklassen verhält (IFEU 2007).

### **Getriebe (ASG, CVT)**

Weitere Minderungspotenziale liegen im Einsatz automatisierter Schaltgetriebe (ASG) und stufenloser Getriebe (CVT), zwischen denen hier nicht unterschieden wird. „Automatisierte Getriebe zeichnen sich durch vergleichsweise geringe Kosten, einen hervorragenden Wirkungsgrad und ein günstiges Leistungsgewicht aus. [...] Durch ein professionelles Kupplungsmanagement und eine intelligente Fahrstrategie werden die Schaltabläufe und Schaltpunkte derart optimiert, dass es zu einer Steigerung des Fahrkomforts und der Fahrleistung kommt, während gleichzeitig der Kraftstoffverbrauch gesenkt wird“ (IAV 2001). Automatisierte Getriebe kommen

mittlerweile von der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz. Der Kraftstoffverbrauch konnte dadurch bei Kleintransportern um 5 % gesenkt werden (VDI-N 2002, LOGISTIK 2007a). Ellinger (2001) gibt für eine optimale Kopplung von CVT und Motor Minderungspotenziale von 2 bis 8 % an. IVECO (2007) verweist auf durch optimierte Motor- und Getriebeleistung erreichte Verbrauchsminderungen in Höhe von 2,3 %.

In der Lkw-Technologiedatenbasis werden in Anlehnung an das Vorgehen in IFEU (2007) für alle Fahrzeugklassen Minderungspotenziale durch Getriebeoptimierungen von 1 % auf der Autobahn, 3 % außerorts und 6 % innerorts angenommen.

In VDI-N (2002) werden die Zusatzkosten (Verkaufspreis) von automatisierten Schaltsystemen für Fernverkehrslastwagen mit 3.000 bis 4.000 € beziffert (Stand: 2002).

Für die Lkw-Technologiedatenbasis wurden auf Basis von IFEU (2007) Zusatzkosten für die Getriebeoptimierung ermittelt, die sich auf 600 € (Solo-Lkw, bis 7,5 t) bis 1.500 € (Last-/Sattelzug) belaufen.

Die Optimierung des Getriebes bei Lkw wird als gewichtsneutrale Maßnahme, die keine wesentliche Veränderung der Materialzusammensetzung bewirkt, eingeschätzt. Dementsprechend wird keine Veränderung des Werkstoffeinsatzes in der Lkw-Datenbasis unterstellt.

### **Start-Stopp-Automatik**

Im Segment der leichten Nutzfahrzeuge (<3,5 t zGG) sind erste Fahrzeuge mit Start-Stopp-Automatik verfügbar, die laut Herstellerangaben einen bis zu 20 % und durchschnittlich 5-8 % geringeren Kraftstoffverbrauch aufweisen (DAIMLER 2007, AutoMotor 2007).

In der Lkw-Technologiedatenbasis werden für Solo-Lkw Minderungsraten von 8,5 % innerorts, 4 % außerorts und 0 % auf der Autobahn angenommen. Für schwere Nutzfahrzeuge, die hauptsächlich im Fernverkehr eingesetzt werden (z.B. Last- und Sattelzüge) wird angesichts des geringen innerorts-Fahranteils nicht mit dem Einsatz der Start-Stopp-Technologie gerechnet (LOGISTIK 2007).

Die Start-Stopp-Automatik wird mittlerweile im Segment der leichten Nutzfahrzeuge in ersten Serienfahrzeugen als Sonderausstattung zu einem Verkaufspreis von 242 € angeboten (DAIMLER 2007b). Bezogen auf die zugrunde gelegte Umrechnung (Faktor 1,44), ergeben sich somit geschätzter Herstellkosten von 168 €. Die motorleistungsbezogene Umrechnung der Kosten für die Start-Stopp-Technologie ergibt entsprechend Zusatzkosten von 310 € für kleine Lkw (3,5-7,5 t) bis 730 € für große Solo-Lkw (>12 t).

Die Ermittlung des Materialbedarfs lehnt sich an die Annahmen in IFEU (2007) an und passt diese an die fahrzeugspezifische Motorenleistung der betrachteten Lkw-Klassen an. Mit der Einführung der Start-Stopp-Automatik wird aufgrund einer größer

dimensionierten Batterie insbesondere ein höherer Materialanteil des Speichermediums angenommen.

### **Hybridantrieb**

Entsprechend der hohen Effizienzsteigerungspotenziale der Hybridtechnik im Stadtverkehr werden von mehreren Herstellern mittlerweile insbesondere leichte bis mittelschwere Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieben entwickelt. Die meisten Hybridnutzfahrzeuge befinden sich noch in der Erprobungsphase. Nach LOGISTIK (2007a) liegt die Kraftstoffersparnis im Fernverkehr bei rund 8 %, im City-Verteilerverkehr bei bis zu 35 %. In der Erprobungsphase des „Hybrid-TGL“ von ZF-MAN (MAN 2006) konnte im Stadtverteilterverkehr eine Minderung von 20 bis 25 % erreicht werden. Die MAN Nutzfahrzeuge AG (LOGISTIK 2007) rechnet bei optimalen Einsatzbedingungen mit 25 bis 30 % Energieeinsparung im Stadtverteilterverkehr. Der von VOLVO entwickelte Parallel-Hybridantrieb für schwere Nutzfahrzeuge spart bis zu 35 % Kraftstoff im Stadtverkehr ein (VOLVO 2006, Handelsblatt 2006). Der von Mitsubishi Fuso entwickelte „Canter Eco Hybrid“ erreicht mit dem kombinierten diesel-elektrischen Hybridantrieb eine Kraftstoffersparnis von über 20 % (DAIMLER 2006). Im Fernverkehr werden aufgrund der Rückgewinnung der Bremsenergie auf Mittelgebirgstrassen 4 bis 6 % Kraftstoffeinsparung für möglich gehalten. Außerdem könnten mit einem Hybridanteil Nebenantriebe und Verbraucher (wie Standklimaanlage und Kühlaggregate) effizienter betrieben werden. Beim Fernverkehr-Lkw könnte das Downsizing-Prinzip durch die elektromotorische Unterstützung des Dieselantriebs weitere Verbrauchsvorteile erzielen (DVZ 2008).

In der Lkw-Technologiedatenbasis wird unter der Annahme des Einsatzes eines Voll-Parallel-Hybrids ein maximales Minderungspotenzial in 2030 von 30 % innerorts angenommen. In den übrigen Straßenkategorien sinkt der Einspareffekt mit zunehmender Geschwindigkeit und abnehmender Fahrdynamik deutlich ab und es werden entsprechend geringere Einspareffekte (10 % bzw. 3 %) unterstellt. In der Technologiedatenbasis wird der Einsatz von Hybridtechnologien auf die Solo-Lkw-Klassen bis zu 12 t zGG beschränkt.

Laut Herstellerangaben ist zur Markteinführung von hybridisierten schweren Nutzfahrzeugen mit einem um etwa 35 % höheren Verkaufspreis im Vergleich zu konventionellen Dieselfahrzeugen zu rechnen (Handelsblatt 2006). Für die betrachteten Fahrzeugklassen Solo-Lkw (bis 7,5 t) und Solo-Lkw (bis 12 t) ergeben sich somit auf Basis der Fahrzeugneupreise (Tabelle 3), sowie nach der Umrechnung auf die Herstellerpreise, Zusatzkosten für den Hybridantrieb von 9.700 € bzw. 12.200 €.

Der veränderte Einsatz von Werkstoffen bei der Hybridisierung von Nutzfahrzeugen, welcher vor allem auf den Batterieeinsatz zurückzuführen ist, beruht auf den Abschätzungen von IFEU (2007). Die Anpassung erfolgt motorleistungsbezogen.



### **Erdgasantrieb**

Bisher sind lediglich leichte Nutzfahrzeuge im Stadtverteilterverkehr mit Erdgasantrieb auf Basis von Otto-Verbrennungsmotoren in nennenswerter Anzahl in Betrieb. Der Erdgasantrieb weist geringere Schadstoff- und bis zu 25 % geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung im Vergleich zu konventionell betriebenen Otto-Motoren auf (IVECO 2007a). Demgegenüber stehen jedoch ein erhebliches Mehrgewicht des Druckbehälters, ein geringerer Wirkungsgrad, eine beschränkte Reichweite sowie eine eingeschränkte Versorgungsinfrastruktur (SCANIA 2006). Insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen konnten sich Erdgasmotoren bislang aufgrund der geringeren Motoreffizienz und dem Mehrgewicht nicht durchsetzen. In jüngster Zeit wurden jedoch effizientere Erdgasantriebe auf Diesel-Motorbasis für Nutzfahrzeuge bis 6,5 t zGG entwickelt, die bis zu 25 % geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu Dieselmotoren aufweisen und deren Schadstoffemissionen deutlich unter den EURO 5-Grenzwerten liegen. Ihre Reichweite liegt bei bis zu 360 km. Anfang 2008 sollen Lastkraftwagen bis 12 t zGG mit einer entsprechenden Motorisierung laut Herstellerangaben verfügbar sein (TRANSPORTER 2007, DVZ 2007a).

In der Technologiedatenbasis wird der Erdgasantrieb für schwere Nutzfahrzeuge bis 12 t zGG berücksichtigt, da deren verstärkter Einsatz im Verteilerverkehr zu erwarten ist. Grundsätzlich können die oben diskutierten weiteren technologischen Minderungsmaßnahmen auch auf Erdgasfahrzeuge übertragen werden. Lediglich die Maßnahmen zur Erreichung der Euro-Norm sind in dieser Form auf den Erdgasbus nicht anwendbar, da sich diese explizit auf konventionelle Dieselmotoren beziehen.

Grundlage für die Verbrauchs- und Zusatzkostenabschätzung bildet der IVECO Daily CNG (IVECO 2007a). Der durchschnittliche Verbrauch eines auf Erdgasbetrieb umgerüsteten Dreiliter-Vierzylinder-Dieselmotors beläuft sich laut Herstellerangaben auf etwa 10 kg CNG pro 100 km. Die Zusatzkosten (Verkaufspreis) betragen 4.000 € (TRANSPORTER 2007). Ein zusätzlicher Materialbedarf wird durch das erforderliche Erdgastanksystem verursacht. Diese Angaben werden entsprechend für die betrachteten Fahrzeugklassen angepasst. Für Solo-Lkw bis 7,5 t bedeutet dies Zusatzkosten von 3.890 €, für Solo-Lkw (3,5-7 t) 5.556 € und einen zusätzlichen Stahlbedarf von 280 bzw. 400 kg.

### **Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb**

Mit dem serienmäßigen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie im Bereich der Nutzfahrzeuge ist angesichts der hohen Kosten und der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur erst längerfristig zu rechnen. Sie wird aber als Fortsetzung der Hybridtechnologie auf dem Weg zu einem emissionsfreien Fahrzeugantrieb von Nutzfahrzeugherstellern bewertet und weiterhin verfolgt (DAIMLER 2007a). Für den Betrachtungszeitraum des Projekts bis 2030 wird jedoch nicht mit deren serienreifen Marktfähigkeit gerechnet; entsprechend wird die Brennstofftechnologie in der Lkw-Technologiedatenbasis nicht als relevante Option berücksichtigt.

## **Linien- und Reisebus (18t zGG)**

### ***EURO-Norm***

Zur Erfüllung der Euro 4 und 5 Norm kommt auch bei Omnibussen die SCR- und AGR-Technologie mit Partikelfilter zum Einsatz. Einzelne Hersteller konnten auf Basis dieser Technologie auch den ambitionierteren EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle)-Standard mit konventioneller Dieselmotorisierung bereits erfüllen (BMUinfo 2004). Perspektivisch hält VTT (2007) eine Kopplung der genannten Technologien zur Einhaltung der europäischen Emissionsvorgaben für erforderlich. Die große Mehrheit der Omnibushersteller setzt zur Erfüllung der EURO-Schadstoffnormen auf die SCR-Technologie. Praxistest mit SCR-ausgerüsteten Linienbussen haben eine Kraftstoffersparnis von etwa 6 % ergeben (LAST 2006). Der Mehrverbrauch beim Einsatz der AGR-Technologie wird von Experten (LAST 2005) auf 3 % bis 5 % geschätzt. Die Zusatzkosten für die SCR- bzw. AGR-Technologie werden mit 7.000 € bzw. 5.000 € beziffert.

In der Technologiedatenbasis wird, analog zu den Annahmen für Lkw, auch für Omnibusse im Zuge der Einführung neuer Technologien zur Schadstoffreduktion eine durchschnittliche Minderung des Kraftstoffverbrauchs um 5 % angenommen.

Da auch für Busse die Euro 4 und 5-Norm rechtsverbindlichen Charakter hat, werden keine Zusatzkosten veranschlagt.

Die Berücksichtigung eines veränderten Materialeinsatzes wird als vernachlässigbar eingestuft, jedoch wird der Harnstoffbedarf analog zu den Annahmen für schwere Nutzfahrzeuge (6 % des Kraftstoffverbrauchs) berücksichtigt.

### ***Motorenoptimierung***

Da auch bei Bussen zum überwiegenden Teil Dieselmotoren zum Einsatz kommen, treffen auch für diese die für Lkw gemachten Annahmen zur allgemeinen Motorenentwicklung zu. Dementsprechend werden in der Omnibus-Datenbasis Effizienzsteigerungen durch die allgemeine Motorenentwicklung von 3 % (2010), 6 % (2020) und 8 % (2030) angesetzt. Für Erdgas-Busse auf Ottomotorenbasis werden geringere Motorenentwicklungspotenziale von 2 %, 4 % und 6 % für die entsprechenden Zeitscheiben unterstellt.

Die Zusatzkosten werden in Anlehnung an Lkw abgeschätzt und belaufen sich für Ottomotoren auf maximal 418 € und für Dieselmotoren auf maximal 1.179 € für Linien- und 1.072 € für Reisebusse. Veränderungen des Materialeinsatzes werden im Zuge der Motorenentwicklung als vernachlässigbar eingeschätzt und daher in der Datenbasis nicht berücksichtigt werden.

### ***Leichtlauföle***

Die Annahmen zum Einsatz von Leichtlaufölen orientieren sich an der Ausgestaltung für Lkw. Es werden entsprechend Minderungspotenziale von 3 % erwartet. Die Zusatzkosten werden analog zum Vorgehen für Lkw sowohl für die Erstinvestition als auch



über die Betriebskosten berücksichtigt. Für Linien- und Reisebusse ergeben sich Mehrkosten von 47 bzw. 44 € je Wechselintervall.

### ***Minderung des Fahrzeuggewichts***

Grundsätzlich gelten auch für Omnibusse die zum Leichtbau bei Lkw getroffenen Aussagen bezüglich des Zusammenhangs von Gewichtsreduzierung und Kraftstoffverbrauchsreduktion.

Laut Expertenmeinung in OMNIBUS (2006) „braucht ein um 1.000 Kilogramm leichter Bus rund 6 % weniger Treibstoff.“ VTT (2007) ermittelte in Testreihen mit verschiedenen Bussen einen zusätzlichen Kraftstoffbedarf von 2 l/100km bzw. 5 % bei einer Gewichtserhöhung von 1000 kg.

Im Rahmen eines Pilotprojektes (USDE 2005, SAE 2001) konnte durch den Einsatz von hochfestem Edelstahl und den Einsatz eines elektrifizierten Antriebstrangs, sowie einer Anpassung der Motorisierung eine 50 %-ige Gewichtsminderung beim Omnibusbau erreicht werden. Dies ging einher mit Kostenminderungen im Vergleich zu einem Standardaufbau von 15-20 %, einem Gewinn an Innenraum (5 Passagiere) und einer Kraftstoffminderung von über 50 %.

In der Technologiedatenbasis werden analog zu schweren Nutzfahrzeugen Leichtbauvarianten mit einer 10 %-igen (mäßiger) bzw. 15 %-igen (verstärkter Leichtbau) Gewichtsreduzierung betrachtet. Für erstere werden entsprechend VTT (2007) Effizienzsteigerungspotenziale von 6 % innerorts, 4,5 % außerorts und 3 % auf der Autobahn für Reise- und Linienbusse ausgewiesen. Für letztere werden Kraftstoffminderungen von 8,5 % (innerorts), 6 % (außerorts) und 4 % (Autobahn) angesetzt.

Die Zusatzkosten für Leichtbaumaßnahmen werden gemäß IFEU (2007) abgeleitet und ergeben für mäßigen Leichtbau 3.410 € für Linienbusse und 4.340 € für Reisebusse. Bei verstärktem Leichtbau werden Zusatzkosten von 5.940 € bzw. 7.560 € veranschlagt.

Der veränderte Materialbedarf stellt sich näherungsweise wie für schwere Nutzfahrzeuge diskutiert dar und wird an das fahrzeugspezifische Leergewicht angepasst.

### ***Minderung des Rollwiderstands***

Analog zum Einsatz rollwiderstandsoptimierter Bereifung bei schweren Nutzfahrzeugen, ist auch deren Einsatz bei Bussen möglich und es sind ähnliche Effekte zu erwarten.

In UBA (2003) werden die zu erwartenden Kraftstoffeinsparungen mit 5-8 % für Omnibusse beziffert. VTT (2006) konnte in Testreihen reifenbedingte Kraftstoffvariationen von 5-15 % nachweisen.

Gemäß den Annahmen für schwere Nutzfahrzeuge, werden in der Omnibus-Technologiedatenbasis Minderungspotenziale von zunächst 6 % innerorts und 4 %

außerorts bzw. 3 % auf der Autobahn angenommen, die für die Zeitscheiben 2020 und 2030 sich entsprechend der Erläuterungen für Lkw weiter erhöhen.

Die Zusatzkosten für rollwiderstandsoptimierte Bereifung werden nach IFEU (2007) für die betrachteten Omnibus-Klassen berechnet. Die ermittelten Mehrkosten belaufen sich somit für Linienbusse auf 210 € und für Reisebusse auf 270 €. Diese werden betriebskostenseitig weiter für Wechselintervalle von 80.000km über die Fahrzeugbetriebsdauer abgebildet.

Durch den Einsatz von rollwiderstandsoptimierten Reifen wird keine wesentliche Materialänderung erwartet und entsprechend in der Technologiedatenbasis ein unveränderter Werkstoffeinsatz unterstellt.

### ***Minderung des Luftwiderstands***

Grundsätzlich gilt auch für Omnibusse der für schwere Nutzfahrzeuge dargelegte Zusammenhang zwischen Minderung des Luftwiderstands und Verbrauchsminderung. Allerdings werden die realisierbaren Potenziale zur Optimierung des Luftwiderstands als geringer eingeschätzt, da zahlreiche Maßnahmen den Nutzwert des Fahrzeugs erheblich herabsetzen würden. HUCHO (2005) bemerkt hierzu, dass Maßnahmen am Omnibus, die – wie die strömungsgünstige Optimierung des Heckbereichs – auf eine Verengung des Innenraums hinauslaufen, kaum Chancen auf Verwirklichung haben. „Realistisch erscheinen jedoch Heckkantenradien, eine leichte Absenkung am Dachende und geringfügige Verjüngungen in der Seitenwand.“ Verbesserungen des  $c_w$ -Werts bei nur mäßiger Verringerung des Transportvolumens können laut HUCHO (2005) durch Radien an den Heckkanten (4 % bis 8 %) und durch Seitenwand- und Dacheinzüge (6 % bis 20 %) erreicht werden. Weiterhin ist die Größe der Stirnkantenradien von wesentlichem Einfluss auf den Luftwiderstand eines Omnibusses.

Angesichts der nutzungsbedingten Restriktionen und bereits erfolgter aerodynamischer Optimierung bei Omnibussen, wird für Linien- und Reisebusse in der Technologiedatenbasis lediglich eine Reduktion des Luftwiderstands um 10 % betrachtet und analog zu schweren Nutzfahrzeugen Verbrauchsminderungen von 1 % (innerorts) bzw. 3 % (außerorts) und 4 % (Autobahn) angenommen.

Die entstehenden Zusatzkosten zur Reduktion des Luftwiderstands bei Bussen werden gemäß IFEU (2007) bestimmt. In der Technologiedatenbasis ergeben sich somit Zusatzkosten für Linienbusse von 900 € und für Reisebusse von 1.150 €.

Der veränderte Materialbedarf orientiert sich an den Annahmen für schwere Nutzfahrzeuge und wird an das fahrzeugspezifische Leergewicht von Linien- und Reisebussen angepasst.

### ***Getriebe (ASG, CVT)***

Für die Entwicklung der Getriebetechnik bei Omnibussen werden keine gesonderten Annahmen getroffen, sondern die für schwere Nutzfahrzeuge unterstellten Effizienzsteigerungspotenziale übernommen.

Entsprechend werden für Linien- und Reisebusse in der Technologiedatenbasis Minderungspotenziale von 1 % auf der Autobahn, 3 % außerorts und 6 % innerorts durch Getriebeoptimierung unterstellt.

Basierend auf den Kostenabschätzungen nach IFEU (2007) ergeben sich somit Zusatzkosten von 1.800 € für Linien- und 1.600 € für Reisebusse.

Da für die Getriebeoptimierung näherungsweise von gewichtsneutralen Maßnahmen ausgegangen wird, werden in der Technologiedatenbasis entsprechend keine veränderten Materialbedarfe erfasst.

### **Start-Stopp-Automatik**

Die Start-Stopp-Automatik wird in der Omnibus-Datenbasis für Linienbusse entsprechend der Ausgestaltung für Lkw berücksichtigt; für Reisebusse wird diese Technologie nicht betrachtet.

Es werden entsprechend Minderungsraten von 8,5 % innerorts, 4 % außerorts und 0 % auf der Autobahn angenommen. Die Ermittlung der Zusatzkosten (1.324 €) und Materialbedarfe beruht auf IFEU (2007).

### **Hybridantrieb**

Omnibusse mit hybridisierten Antrieben werden insbesondere für den Linienverkehr inzwischen von zahlreichen Herstellern entwickelt; einige Fahrzeuge befinden sich noch in der Erprobungsphase. Der Einsatz von Hybridbussen in zahlreichen Metropolen der USA, aber auch in Japan und Deutschland, liefert bereits erste Erkenntnisse über die möglichen Minderungspotenziale und die Alltagstauglichkeit der Hybridtechnologie. MAN (2006) hält die breite Markteinführung des Hybridantriebs jedoch erst mittelfristig für denkbar. Die eingesetzte Hybridtechnologie unterscheidet sich teilweise zwischen den Nutzfahrzeugherstellern und kann hier nur überblicksartig diskutiert werden.

Nach EESI (2007) weisen Parallelhybride bei konstant hoher Fahrgeschwindigkeit und serielle Hybridantriebe im Stadtverkehr die höchsten Verbrauchsminderungen auf. Hybridbusse im Linienverkehr verfügen in der Regel über einen seriellen Antrieb, d.h. ein direkt an den Dieselmotor angeflanschter Generator liefert die Energie für die elektrischen Antriebsmotoren. Durch den Einsatz von Radnabenmotoren ist der Antrieb vollständig elektrifiziert und der Einsatz eines mechanischen Getriebes nicht mehr erforderlich (DAIMLER 2007a, SFMTA 2008). Der Energiespeicher ermöglicht die Rückgewinnung der Bremsenergie und das zeitweise Abschalten des Dieselgenerators, sowie das rein elektrische Anfahren und Beschleunigen. Da auf ein herkömmliches Automatikgetriebe verzichtet werden kann, steigt der Wirkungsgrad und verringert sich gleichzeitig das Gewicht. Durch das Downsizing des Dieselgenerators können über 50 % des ursprünglichen Motorengewichts (1.000 kg) eingespart werden. Das Gesamtgewicht eines Hybrid-Linienbusses liegt nach Herstellerangaben etwa 1.000 kg über dem eines Vergleichsfahrzeuges mit Dieselmotorisierung (DAIMLER 2007c). Als Energiespeichermedien befinden sich

zurzeit neben Lithium-Ionen-Batterien auch Hochleistungskondensatoren in der Erprobung (MAN 2006, DAIMLER 2007c).

In MAN (2006) werden die erreichten Kraftstoffeinsparungen im Vergleich zum Dieselantrieb auf 20 % bis 25 %, je nach Linienprofil, beziffert. DAIMLER (2007c) verweist auf bereits über 1.000 Fahrzeuge im Linienbetrieb und erste Serienfahrzeuge in Japan; in Deutschland soll ab frühestens Mitte 2010 mit der Serienproduktion begonnen werden. In Tests wurden Verbrauchsminderungen von etwa 25 % erreicht. In (HYBRID 2007) wird auf Testergebnisse in den USA verwiesen, die zwischen 10 % und 35 % Kraftstoffersparnis ausweisen. Vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) durchgeführte Test mit Hybridbussen ergaben eine durchschnittliche Kraftstoffverbrauchsreduzierung von 37 % im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb (EESI 2007).

In der Technologiedatenbasis werden für Omnibusse – analog zu Lkw - Minderungsraten von maximal 30 % innerorts, und 10 % außerorts bzw. 3 % auf der Autobahn für das Jahr 2030 unterstellt.

Laut Herstellerangaben liegen die Mehrkosten für einen Hybridbus im Vergleich zu einem konventionell betriebenen Fahrzeug zurzeit noch bei etwa 35 % (DAIMLER 2007a, DAIMLER 2007b, SFMTA 2008). Dementsprechend werden die Zusatzkosten für den Hybridantrieb in der Technologiedatenbasis über eine 35 %-ige Steigerung des Herstellerpreises dargestellt. Grundlage hierfür bilden die abgeschätzten Neupreise (Tabelle 75) sowie der Konversionsdivisor 1,44, um vom Verkaufspreis auf den Herstellerpreis näherungsweise zu schließen. Dies bedeutet für Linienbusse eine ermittelte Kostensteigerung um 55.903 €.

Die Veränderung des Werkstoffeinsatzes wird analog zu Lkw auf Basis des Verfahrens nach IFEU (2007) ermittelt.

### **Erdgasantrieb**

Erdgasbetriebene Omnibusse auf Basis von Otto-Motoren werden bereits in mehreren Städten im Linienverkehr eingesetzt (BMUinfo 2004). Sie zeichnen sich insbesondere durch geringe Schadstoffemissionen aus. Der CO<sub>2</sub>-Vorteil bei der Verbrennung von Erdgas von circa 25 % wird jedoch nach VTT (2005) durch eine, im Vergleich zum Dieselantrieb, um 25-30 % geringere Motoreffizienz kompensiert. Nach Expertenmeinung (Ebner 2007) wird Erdgas als Alternativkraftstoff in Zukunft lediglich eine Nischenlösung von vor allem lokal/regionalem Interesse bleiben.

Laut HYBRID (2007) verursacht der Erdgasantrieb bei Omnibussen Zusatzkosten von 5 % bis 15 % des Fahrzeugpreises im Vergleich zum konventionellen Antrieb. LAST (2003) gibt Mehrkosten von 24.000 € für Solobusse und bis zu 48.000 € für Gelenkbusse an.

Der Kraftstoffverbrauch eines CNG-Linienbusses für das Basisjahr 2005 wird in TREMOD nicht betrachtet, daher wird dieser über Daten aus Vergleichsmessungen (Diesel – CNG), die im Rahmen von Pilotprojekten (BMU 2004, LAST 2001) erfasst wurden, bestimmt.

In der Technologiedatenbasis wird der Erdgasantrieb auf Basis einer Otto-Motorisierung für Linienbusse berücksichtigt. Analog zu Erdgas-Lkw können zusätzlich die oben diskutierten nicht-motorischen technologischen Minderungsmaßnahmen auch auf Erdgasfahrzeuge übertragen werden. Lediglich die Maßnahmen zur Erreichung der Euro-Norm sind in dieser Form auf den Erdgasbus nicht anwendbar, da sich diese explizit auf Dieselmotoren beziehen.

Die Zusatzkosten für erdgasbetriebenen Linienbusse werden in der Technologiedatenbasis mit 24.000 € ausgewiesen.

Veränderungen des Materialbedarfs werden hauptsächlich durch das erforderliche Erdgas-Tanksystem verursacht und in der Datenbasis, gemäß MCS (2007), durch einen erhöhten Stahlbedarf abgebildet.

### **Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb**

Bei Omnibussen wird der Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen von Experten (Prof. Pischinger in BMUinfo (2004), (Tretow 2004, Ebner 2007)) im Serienbetrieb aufgrund ungelöster Probleme bei der Herstellung, Speicherung und Verteilung von Wasserstoff sowie einer eingeschränkten Lebensdauer der Brennstoffzellen und hoher Kosten (DAIMLER 2007a) für die nächsten Jahre nicht erwartet. MAN (2004) rechnet mit der Serienreife von Brennstoffzellenbussen in etwa 10 Jahren und erwartet einen verstärkten Einsatz im öffentlichen Personennahverkehr. DAIMLER (2007c) verweist, ausgehend von der vorhandenen Hybridtechnologie mit einer vollständigen Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs, auf die Möglichkeit, den Dieselmotor langfristig durch eine Brennstoffzelle zu ersetzen. In den USA und Europa wurden bereits mehrere Pilotprojekte mit Wasserstoffbussen verschiedener Hersteller im Linienverkehr erprobt (u.a. CUTE-Projekt).

In der Technologiedatenbasis wird der Brennstoffzellenantrieb für Linienbusse auf Basis von CONCAWE (2006) und der Abschätzungen in IFEU (2007) für die Zeitscheiben 2020 und 2030 berücksichtigt. Der Einsatz der Brennstoffzellentechnik in Linienbussen wird mit einer Energieverbrauchsreduzierung von durchschnittlich etwa 50 % gegenüber einem Vergleichsfahrzeug mit Ottomotorisierung dargestellt (Tank-to-Wheel). Analog zum Vorgehen bei Erdgasfahrzeugen, kann der Brennstoffzellenantrieb mit den oben diskutierten weiteren nichtmotorischen Effizienzsteigerungsmaßnahmen kombiniert werden.

Die Zusatzkosten für die Brennstoffzellentechnik werden für Linienbusse mit 44.000 € veranschlagt. Der veränderte Materialbedarf wird in Anlehnung an CONCAWE (2006) und IFEU (2007) ermittelt.

### **3.4.3 Fahrzeugvarianten**

Im Rahmen von Renewbility werden 3 bis 5 unterschiedliche Ausgestaltungsvarianten der betrachteten Lkw- und Omnibus-Fahrzeugklassen untersucht, die im Folgenden in ihrer individuellen Ausprägung detaillierter diskutiert werden.

Grundsätzlich werden für jede Variante Einzeltechnologien, deren fahrsituationsspezifische Minderungspotenziale, die damit verbundenen Zusatzkosten und Materialbedarfe, für jede Fahrzeugklasse und die relevanten Zeitscheiben 2010, 2020 und 2030 betrachtet. Die Zusammensetzung der Technologien einer Variante kann über den Betrachtungszeitraum variieren und in unterschiedlichem Maße bei den neuzugelassenen Fahrzeugen zur Anwendung kommen. Letztlich werden die Emissionsfaktoren, die Zusatzkosten und Materialbedarfe aller Variante für jede Fahrzeugklasse über einen entsprechenden Mix der in Abschnitt 3.4.2 diskutierten Einzeltechnologien dargestellt.

### Basisvariante

Das Fahrzeug in der Basisvariante stellt die Technologieausgestaltung eines durchschnittlichen Lkws oder Omnibus einer bestimmten Klasse dar, der sich an der Technologieentwicklung der letzten Jahre orientiert und eine Fortschreibung der erfolgten Emissions- und Verbrauchsminderungen gewährleistet. Die durchschnittliche jährliche Minderungsrate für Lkw beträgt für den Zeitraum 1970-2005 nach TREMOD – und damit entsprechend dem Handbuch für Emissionsfaktoren – gemittelt über die Jahre 0,75 % p.a. Diese wird für die Basisentwicklung der mittleren Kraftstoffverbräuche der neu zugelassenen Fahrzeuge nach Lkw- und Omnibus-Klassen differenziert bis 2030 fortgeschrieben. Bezogen auf das Basisjahr von Renewability (2005) ergeben sich für die Basisfahrzeuge und die betrachteten Jahre 2010, 2020 und 2030 die in Tabelle 77 aufgeführten prozentualen Kraftstoffverbrauchsminderungen und die, nach Fahrzeugklassen differenzierte, Entwicklung der absoluten Kraftstoffverbräuche.

Tabelle 77: Entwicklung des mittleren Kraftstoffverbrauchs der betrachteten Lkw- und Omnibusklassen bis 2030 für Basisfahrzeuge

Jahr	Prozentuale Minderung	Kraftstoffverbrauch [l/100km]					
	Lkw & Omnibus	Solo-Lkw (3,5-7,5t)	Solo-Lkw (7,5-12t)	Solo-Lkw (>12t)	Last-/Sattel-Zug (>12t)	Diesel-Linienbus	Diesel-Reisebus
2005	0 %	11,1	16,2	25,8	29,3	34,8	32,2
2010	-2 %	10,9	15,8	25,2	28,6	34,1	31,5
2020	-9 %	10,1	14,6	23,4	26,5	31,7	29,3
2030	-16 %	9,3	13,6	21,7	24,6	33,1	29,2

Quelle: Annahmen Öko-Institut in Anlehnung an TREMOD (2006)

Die Ausgestaltung der Basis-Fahrzeuge für die Zeitscheiben 2010, 2020, 2030 stützt sich vorzugsweise auf Technologiemaßnahmen, die einerseits rechtsverbindlich sind (EURO 5) und sich durch eine besonders hohe Kosteneffizienz auszeichnen. Es ist zu beachten, dass für Dieselfahrzeuge in der Basisvariante für 2010 ein über die Standardentwicklung hinausgehendes Minderungspotenzial erzielt wird, welches durch



die obligatorische Einführung von Technologien zur Minderung der Luftschadstoffe bedingt ist.

### Weitere Varianten

Neben der Ausgestaltung der Basisvariante, die sich an der Fortschreibung der Effizienzsteigerung zwischen 1970 und 2005 orientiert und prospektive durchschnittliche neuzugelassene Lkw und Omnibusse einer Klasse generiert, werden zwei bis vier weitere Varianten je Fahrzeugklasse für die Datenbasis erzeugt. Als szenariounabhängige Varianten zu den Basis-Fahrzeugen werden Realfahrzeuge angenommen, d.h. Fahrzeuge, die mit bestimmten Technologien ausgestattet sind, ohne jedoch bereits ihre mögliche Verbreitung zu berücksichtigen (diese wird in den Szenarien definiert). Diese Fahrzeug-Varianten sind notwendig, um das über den Trend hinaus Machbare und die damit verbundenen Kosten bei der Minderung verkehrsbedingter Stoffströme unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. rechtliche Regelungen, veränderte Energiepreise) zu bestimmen. In diesen Varianten werden Technologien zur spezifischen Kraftstoffverbrauchsreduktion hinterlegt, die es gleichzeitig ermöglichen, die Spezifikationen wie Leistung, Zuladung etc. je Größenklassen beizubehalten – also die keine Veränderung des Fahrzeugnutzens hervorrufen. Es werden hierbei bis zu vier Varianten unterschieden:

- Im Fokus der Variante 1 steht der Einsatz der kostengünstigsten Technologien mit moderater Verbrauchsminderung.
- Variante 2 orientiert sich am Ziel einer möglichst hohen Verbrauchsminderung bei Lkw bzw. Omnibussen und schließt dabei auch kostenintensive Technologien ein. Variante 1 & 2 gemein ist, dass sie den Einsatz der Hybridtechnik nicht berücksichtigen.
- Für die betrachteten Fahrzeugklassen der Solo-Lkw und Linienbusse wird auf Basis der Variante 1 eine ergänzende Variante 3 betrachtet, die zusätzlich den Einsatz der Start-Stopp-Technologie berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass gerade für diese Fahrzeuggrößenklassen entsprechende Modelle entwickelt werden, da diese überwiegend so genutzt werden (z.B. innerstädtisch bei der Zustellung von Gütern bzw. im Linienverkehr) dass der Nutzen der Start-Stopp-Automatik voll zum Tragen kommt.
- Weiter werden in einer Variante 4 für Solo-Lkw bis 12 t zGG und Linienbusse analog zu Variante 3 die Potenziale des Einsatzes von hybridisierten Antrieben auf Basis der Ausgestaltung von Variante 1 betrachtet. Es wird – wie bereits ausgeführt – angenommen, dass für Sattel- und Lastzüge sowie Reisebusse keine Hybrid-Modelle entwickelt werden, da deren Fahrprofil nicht ausreichend das Effizienzsteigerungspotenzial der Technologie ausschöpft.

Grundsätzlich wird für die alternativen Antriebe Erdgas und Brennstoffzelle bei der Variantenausgestaltung ebenfalls wie oben erläutert verfahren. Jedoch bildet der



jeweilige Fahrzeugantrieb (Erdgas oder Brennstoffzelle) als Technologie trotz hoher Kostenintensität (vergleiche Variante 1) die Grundlage aller betrachteten Fahrzeugvarianten. Variante 4 (Hybridantrieb) wird für den Brennstoffzellen-Linienbus technologiebedingt nicht betrachtet.

### Effizienzsteigerungspotenziale und Zusatzkosten der Fahrzeugvarianten für Lkw und Omnibusse

Tabelle 78 und Tabelle 80 stellen die auf Basis der Lkw- bzw. Omnibus-Technologiedatenbasis ermittelten relativen Kraftstoffverbrauchsminderungen, die absoluten Kraftstoffverbräuche, sowie die erforderlichen Zusatzkosten bezogen auf das Referenzjahr 2005 für die betrachteten Varianten, Fahrzeugklassen und Zeitscheiben (2010, 2020, 2030) im Überblick dar. Tabelle 79 illustriert die Ausgestaltungsvariante der alternativen Antriebsformen Erdgas-Lkw und -Omnibusse. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Kraftstoffe (flüssig – gasförmig), bezieht sich der Effizienzvergleich zum Referenzfahrzeug dort auf den Energiebedarf in [MJ/100 km].

Die Auswertung der Technologien, die für eine Steigerung der fahrzeugspezifischen Effizienz zur Verfügung stehen, hat schlussendlich zu den in den folgenden Tabellen angegebenen Effizienzsteigerungsraten bei gleichbleibender Leistung und Nutzen für die oben erläuterten Fahrzeugvarianten geführt. Die ausgewiesenen Zusatzkosten für Effizienzsteigerungstechnologien berücksichtigen bereits die oben diskutierten Lernkurveneffekte.

Tabelle 78: Prozentuale Verbrauchsminderung, Kraftstoffverbrauch und Zusatzkosten der Lkw-Varianten; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005

<b>Solo-Lkw (3,5-7,5 t)</b>		<b>Basis</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>Variante 4</b>
2010	Minderung	5 %	15 %	26 %	19 %	23 %
	Verbrauch [l/100km]	10,6	9,5	8,3	9,1	8,6
	Zusatzkosten [ €]	0	340	5.880	650	10.040
2020	Minderung	9 %	20 %	28 %	25 %	30 %
	Verbrauch [l/100km]	10,2	8,9	8,0	8,5	7,8
	Zusatzkosten [ €]	200	660	4.780	1.150	8.670
2030	Minderung	16 %	25 %	31 %	29 %	36 %
	Verbrauch [l/100km]	9,4	8,4	7,7	8,0	7,2
	Zusatzkosten [ €]	410	1.260	4.200	1.620	7.720
<b>Solo-Lkw (7,5-12 t)</b>						
2010	Minderung	5 %	15 %	26 %	19 %	23 %
	Verbrauch [l/100km]	15,5	13,8	12,1	13,2	12,5
	Zusatzkosten [ €]	0	460	7.390	900	12.660

2020	Minderung	9 %	20 %	28 %	23 %	30 %
	Verbrauch [l/100km]	14,8	13,0	11,7	12,5	11,5
	Zusatzkosten [ €]	280	890	6.040	1.220	10.650
2030	Minderung	16 %	25 %	31 %	28 %	36 %
	Verbrauch [l/100km]	13,6	12,2	11,2	11,7	10,4
	Zusatzkosten [ €]	590	1.700	5.330	1.980	9.630
<b>Solo-Lkw (&gt;12 t)</b>						
2010	Minderung	5 %	15 %	26 %	19 %	-
	Verbrauch [l/100km]	24,7	22,0	19,3	21,0	-
	Zusatzkosten [ €]	0	660	9.510	1.390	-
2020	Minderung	9 %	20 %	28 %	23 %	-
	Verbrauch [l/100km]	23,8	20,9	18,6	19,9	-
	Zusatzkosten [ €]	460	1.270	7.880	1.820	-
2030	Minderung	16 %	25 %	31 %	29 %	-
	Verbrauch [l/100km]	21,9	19,5	18,0	18,6	-
	Zusatzkosten [ €]	960	2.400	7.040	2.880	-
<b>Last-/Sattelzug (&gt;12 t)</b>						
2010	Minderung	5 %	15 %	25 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	28,2	25,3	22,4	-	-
	Zusatzkosten [ €]	0	880	14.380	-	-
2020	Minderung	9 %	20 %	27 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	26,9	23,7	21,5	-	-
	Zusatzkosten [ €]	520	1.690	11.730	-	-
2030	Minderung	16 %	25 %	30 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	24,8	22,3	20,9	-	-
	Zusatzkosten [ €]	1.110	3.790	10.340	-	-

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 79: Prozentuale Verbrauchsminderung, Energieverbrauch und Zusatzkosten der Solo-Lkw-Varianten mit alternativem Erdgasantrieb; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005

<b>CNG-Solo-Lkw (3,5-7,5t)</b>		<b>Basis</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>Variante 4</b>
2010	Minderung	3%	10%	21%	13%	18%
	Verbrauch [MJ/100km]	446	415	364	399	377
	Zusatzkosten [€]	4.020	4.390	7.730	4.700	14.090
2020	Minderung	9%	14%	23%	19%	25%
	Verbrauch [MJ/100km]	420	395	354	374	345
	Zusatzkosten [€]	3.440	3.940	6.290	4.420	11.950
2030	Minderung	16%	20%	26%	24%	31%
	Verbrauch [MJ/100km]	388	370	342	352	317
	Zusatzkosten [€]	2.900	3.530	5.040	3.890	9.990
<b>CNG-Solo-Lkw (7,5-12t)</b>		<b>Basis</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>Variante 4</b>
2010	Minderung	3%	10%	21%	14%	19%
	Verbrauch [MJ/100km]	649	603	529	578	545
	Zusatzkosten [€]	5.740	6.240	10.470	6.680	18.440
2020	Minderung	9%	14%	23%	19%	26%
	Verbrauch [MJ/100km]	611	576	515	542	499
	Zusatzkosten [€]	4.910	5.560	9.900	6.230	15.660
2030	Minderung	16%	20%	26%	24%	32%
	Verbrauch [MJ/100km]	564	539	497	510	456
	Zusatzkosten [€]	4.110	4.930	6.810	5.420	13.070

Quelle: Annahmen Öko-Institut

Tabelle 80: Prozentuale Verbrauchsminderung, Kraftstoffverbrauch und Zusatzkosten der Diesel-Omnibus-Varianten; differenziert nach Fahrzeugklassen bezogen auf das Jahr 2005

<b>Linienbus</b>		<b>Basis</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>Variante 4</b>
2010	Minderung	5 %	15 %	27 %	21 %	28 %
	Verbrauch [l/100km]	33,1	29,5	25,5	27,5	25,1
	Zusatzkosten [ €]	0	700	9.300	2.000	56.600
2020	Minderung	9 %	20 %	30 %	25 %	35 %
	Verbrauch [l/100km]	31,7	27,9	24,5	26,0	22,7
	Zusatzkosten [ €]	600	1.800	8.200	2.800	46.500
2030	Minderung	16 %	25 %	33 %	30 %	42 %
	Verbrauch [l/100km]	29,3	26,1	23,5	24,3	20,3
	Zusatzkosten [ €]	1.100	3.000	7.300	3.800	39.300

Reisebus						
2010	Minderung	5 %	15 %	24 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	30,6	27,4	24,5	-	-
	Zusatzkosten [ €]	0	1.100	11.000	-	-
2020	Minderung	9 %	20 %	27 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	29,3	25,8	23,5	-	-
	Zusatzkosten [ €]	600	2.800	9.500	-	-
2030	Minderung	16 %	25 %	29 %	-	-
	Verbrauch [l/100km]	27,0	24,2	22,7	-	-
	Zusatzkosten [ €]	1.100	4.400	8.400	-	-

Quelle: Annahmen Öko-Institut

### 3.5 Übrige Verkehrsträger

Die Kategorie der übrigen Verkehrsträger umfasst Schienenfahrzeuge, Binnenschiffe und Flugzeuge. Diese sind ebenfalls in der Renewbility-Technologiedatenbasis entsprechend der anderen Fahrzeugkategorien dokumentiert und bilden die Basis der Renewbility-Szenarienrechnungen für die sonstigen Verkehrsmittel (Bahn, Binnenschiff, Flugzeug).

Im Folgenden werden für Schienenfahrzeuge, Binnenschiffe und Flugzeuge Technologien zur Verbrauchsreduktion einschließlich alternativer Antriebssysteme dargestellt, diskutiert und dokumentiert.

Die hier behandelten Verkehrsmittel unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihrer Anteile an der Verkehrsleistung und den damit verbundenen Umwelteffekten wie der Verfügbarkeit und Qualität der für die Datengenerierung erforderlichen Informationen. In Abschnitt 3.5.1 werden Vorgehen und Datenqualität im Vergleich zu anderen Ansätzen und wichtigen Quellen eingeordnet. In den Abschnitten 3.5.2 bis 3.5.4 werden wesentliche Festlegungen zu Technik der Verkehrsmittel und Modellbildung beschrieben. In den folgenden Abschnitten wird die Quantifizierung von Verbrauch, Emissionen, Materialaufwand und Kosten der Verkehrsmittel Bahn, Binnenschiff und Flugzeug beschrieben; den Schwerpunkt bilden die Verbrauchsdaten.

#### 3.5.1 Quantifizierungsmethode und Datenqualität

Die vorliegenden Studien und Berichte zu Effizienzsteigernden Technologien und alternativen Antrieben bei Bahn, Binnenschiff und Flugzeug liefern nur wenig differenzierte Daten zu Verbrauchsdaten, THG, toxischen Emissionen, Materialeinsatz oder Kosten. Zusätzlich sind Zeitangaben zu Markteinführung oder -durchdringung kaum vorhanden. Daher werden für die genannten Fahrzeugkategorien alle Daten durch Schätzungen auf der Basis von Literaturwerten abgeleitet. Die Belastbarkeit der Daten im Sinne einer konsistenten Begründbarkeit ist damit sicher geringer als bei "ideal" generierten Daten. Die Unsicherheiten bei z.B. der detaillierten Definition von

Motorkennfeldern, Wirkungsgraden einzelner Aggregate usw. ist aber keineswegs geringer als die Fehlermöglichkeiten bei Abschätzungen auf der Basis komplex modellierter und gemessener Primärdaten. (Anschaulich wird dies darin, dass CAD, thermodynamische und Verbrennungsmodelle usw. keine Prüfstände und diese wiederum keine Praxistests ersetzen.)

Wegen ihrer relativ geringen Anteile an der Fahrleistung können die Daten für Eisenbahn, Flugzeug und Binnenschiff trotz der gegenüber den Straßenverkehrsmitteln höheren Unsicherheiten als für die Bearbeitung der Projektfragestellungen geeignet betrachtet werden. Zudem wird die Datenqualität durch Einbindung von Experten gesteigert. Ergänzende Angaben zur Datenqualität befinden sich in den Kapiteln bzw. Abschnitten zur Quantifizierung von Verbrauch, Emissionen usw. der einzelnen Verkehrsmittel.

### 3.5.2 Fahrzeugdefinition und -varianten

Eine besondere Rolle spielt die Fahrzeugdefinition<sup>22</sup> (d.h. die Definition und Spezifikation der Gesamtheit aller zu modellierenden Fahrzeuge), da hiervon die konkreten Daten für alle betrachteten In- und Output-Gruppen direkt abhängen. Die Definition muss hinsichtlich Art, Umfang und Differenzierungstiefe einerseits zur Beantwortung der Fragestellungen des Projektes geeignet und andererseits im Projektrahmen mit Daten hinterlegbar sein.

Beiden Anforderungen gerecht wird ein Ansatz mit drei bzw. vier Auswahl- bzw. Definitionsebenen und die damit erhaltene Liste von Fahrzeugen. Bei den Ebenen handelt es sich um

- die Definition nach Beförderungszweck (außer bei Binnenschifffahrt)
- die Auswahl von Antriebsarten
- und/oder die Auswahl des Einsatzbereichs,
- die Bündelung von Verbrauchsminderungstechnologien in Varianten.

Sie werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Beförderungszweck

Werden die Verkehrsmittel nach ihrem Beförderungszweck klassifiziert, so ergeben sich für die Eisenbahn die Kategorien Personen- und Güterzug und für das Flugzeug Passagier- und Frachtflugzeug. Bei der Binnenschifffahrt wird kein Personenverkehr betrachtet, so dass für dieses Verkehrsmittel nur eine Kategorie nach Beförderungszweck zur Verfügung steht. Die Unterscheidungen erfolgten gemäß TREMOD, dem vom IFEU entwickelten offiziellen Instrument des UBA zur Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen des Verkehrs in Deutschland (IFEU 2006a).

---

<sup>22</sup> In dieser Dokumentation wird Fahrzeug gleichbedeutend für Schienenfahrzeug, Flugzeug und Binnenschiff benutzt.

## Antriebsarten

Die Antriebsart ist hier definiert durch die Konversionstechnik und durch den Kraftstoff, soweit dadurch Fahrzeug- bzw. Flugzeugtechnik, Verbrauch oder Emissionen beeinflusst werden. Für Eisenbahnen kommt Elektro- oder Diesel-Traktion in Frage, während beim Flugzeug mit Kerosin und bei der Binnenschifffahrt mit Diesel jeweils nur eine Option zur Verfügung steht.

## Einsatzbereich

Ebenfalls auf Basis von TREMOD werden die Verkehrsmittel nach dem Einsatzbereich definiert. Für Schienenfahrzeuge erfolgt eine Dreiteilung in Stadtbahn (Straßen-, Stadt- und U-Bahnen), Nahverkehr und Fernverkehr, für Flugzeuge wird zwischen Inlands- und grenzüberschreitenden Flügen (GrÜb) unterschieden, während bei der Binnenschifffahrt keine Klassifizierung stattfindet.

## Fahrzeugvarianten

Der Kernpunkt des Renewbility-Projektes liegt in der Berechnung zukünftiger verkehrsbedingter Stoffströme in verschiedenen Szenarien sowie der Integration verkehrlicher Energiebedarfe in das gesamte Energiesystem. Diese Szenarien sind nur sinnvoll, wenn neben anderen Größen für relevante Fahrzeug- bzw. Antriebsarten zeitliche Entwicklungen ihrer "typischen" Spezifikationen und insbesondere darüber hinaus bestimmte Varianten abgebildet werden. Nachvollziehbar und konsistent sind diese Entwicklungen und Varianten vor allem, wenn sie über die Implementierung bestimmter Technologien und Technologiekombinationen abgeleitet werden. Dem Projektgegenstand entsprechend handelt es sich dabei einerseits um Technologien mit dem Zweck der Energieverbrauchsreduktion, andererseits um solche zum Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehrssektor. Die Möglichkeiten für diese technologiebezogene Datengenerierung sind für die einzelnen Verkehrsträger sehr unterschiedlich. Am günstigsten sind sie für Straßenverkehrsmittel. Für die übrigen Verkehrsmittel wird neben dem Basis-Szenario lediglich eine weitere Variante festgelegt:

**Basis-Szenario:** Diese Kategorie stellt das durchschnittliche, in einem bestimmten Jahr neu zugelassene Fahrzeug einer bestimmten Fahrzeugart dar. Außer für das Basisjahr 2005 werden die Fahrzeuge im Basis-Szenario durch die angenommenen Spezifikationen und *Marktdurchdringungen* (= Anteile an den Neuzulassungen) der angewendeten Technologien definiert. Ein Fahrzeug im Basis-Szenario ist also z.B. zu x % ein Fahrzeug mit reduziertem Rollwiderstand bzw. besserem Auftrieb, zu y % mit gemindertem Luftwiderstand (Rest Normalbauweise) sowie zu z % mit innovativer oder alternativer Antriebstechnik ausgestattet (Rest konventioneller Antrieb). Diese Fahrzeuge haben damit keine realen Pendants, sondern entsprechen dem (erwarteten) Durchschnitt. Sie bilden damit eine wesentliche Grundlage für das Basis-Szenario. Das Modell TREMOD liefert Werte zu Energieverbrauch und Schadstoffemissionen für den Flottendurchschnitt eines bestimmten Jahres. Da im Rahmen des Renewbility-

Projektes jedoch Fahrzeug-Neuzulassungen betrachtet werden, müssen die TREMOD-Werte angepasst werden, worauf in den einzelnen Unterkapiteln eingegangen wird.

**Variante 1:** Die Variante stellt ein prospektives Realfahrzeug dar, d.h. es ist mit bestimmten Technologien ausgestattet ohne Berücksichtigung ihrer möglichen Verbreitung (die in den Szenarien definiert wird). Die Variante ist notwendig, um das über den Trend hinaus Machbare und die damit verbundenen Kosten bei der Minimierung verkehrsbedingter Stoffströme unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. rechtliche Regelungen, Energiepreise) zu bestimmen. Variante 1 beinhaltet die Kombination aller möglichen Verbrauchsminderungstechnologien und wurde für alle Definitions- bzw. Auswahlebenen, wie auch alle Bezugsjahre gebildet. In der folgenden Tabelle sind alle Definitions- und Auswahlebenen für die übrigen Verkehrsmittel dargestellt:

Tabelle 81: Betrachtete Fahrzeugkategorien und -varianten

Fahrzeugkategorie	Antrieb	2005	2010		2020		2030	
		Basis	Basis-Szenario	Var. 1	Basis-Szenario	Var. 1	Basis-Szenario	Var. 1
SSU	Elektro	-	1	1	1	1	1	1
Personenzug_Nahverkehr	Diesel	-	1	1	1	1	1	1
Personenzug_Nahverkehr	Elektro	-	1	1	1	1	1	1
Personenzug_Fernverkehr	Diesel	-	1	1	1	1	1	1
Personenzug_Fernverkehr	Elektro	-	1	1	1	1	1	1
Güterzug	Diesel	-	1	1	1	1	1	1
Güterzug	Elektro	-	1	1	1	1	1	1
Passagierflugzeug_Inland	Kerosin	-	1	1	1	1	1	1
Passagierflugzeug_GrÜb	Kerosin	-	1	1	1	1	1	1
Frachtflugzeug_Inland	Kerosin	-	1	1	1	1	1	1
Frachtflugzeug_GrÜb	Kerosin	-	1	1	1	1	1	1
Binnenschiff	Diesel	-	1	1	1	1	1	1

Für die definierten Fahrzeugkategorien im Basisjahr 2005 müssen zusätzlich Leistungsmerkmale, wie Plätze bzw. maximale Nutzlast, Leergewicht, Auslastungsgrad, Lebensdauer und jährliche Fahrleistung angegeben werden (siehe Tabelle 82, S. 173). Mit Hilfe dieser Angaben kann unter anderem der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen je Fahrzeugkilometer angegeben werden, welche nur bezüglich der Verkehrsleistung in TREMOD vorliegen. Die Leistungsmerkmale basieren größtenteils auf Ecoinvent (2004) und eigenen Annahmen. Sie spiegeln in etwa die Fahrzeugkategorien in TREMOD wieder.



Tabelle 82: Leistungsmerkmale von Neufahrzeugen der jeweiligen Fahrzeugkategorie in 2005

Fahrzeugkategorie	Antrieb	Leergewicht [t]	Kapazität [t bzw. Pers. ]	Auslastung [t bzw. Pers. ]	Fahrleistung [km/a]	Lebensdauer [a]
<b>SSU</b>	Elektro	55	249	45	50.000	30
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	Diesel	200	250	53	170.000	40
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	Elektro	200	250	53	170.000	40
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	Diesel	600	700	308	250.000	40
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	Elektro	400	500	220	500.000	40
<b>Güterzug</b>	Diesel	524	1160	434	50.000	25
<b>Güterzug</b>	Elektro	524	1160	434	50.000	25
<b>Passagierflugzeug_Inland</b>	Kerosin	61	150	104	2.235.000	25
<b>Passagierflugzeug_GrÜb</b>	Kerosin	240	380	281	2.235.000	25
<b>Frachtflugzeug_Inland</b>	Kerosin	61	20	12	2.235.000	25
<b>Frachtflugzeug_GrÜb</b>	Kerosin	240	80	54	2.235.000	25
<b>Binnenschiff</b>	Diesel	330	1350	675	30.000	47
Quelle: siehe Literaturverzeichnis, eigene Abschätzungen und Berechnungen						(IFEU 2009)

Außer dem Leergewicht und dem Auslastungsgrad werden alle Angaben für die verschiedenen Zeiträume und Fahrzeugvarianten als konstant angenommen. Die Annahmen zur Gewichtsentwicklung sind im Kapitel zum Materialeinsatz beschrieben. Der Auslastungsgrad ist größtenteils TREMOD entnommen. Für Frachtflugzeuge wird ein Auslastungsgrad von 65 % für alle Jahre und Fahrzeugvarianten basierend auf Zahlen aus Lufthansa (2007) angenommen. Die Annahmen zum Auslastungsgrad sind in der folgenden Tabelle abgebildet:

Tabelle 83: Auslastungsgrade der Fahrzeugkategorien und -varianten

Fahrzeugkategorie	Antrieb	2005	2010	2020	2030
<b>SSU</b>	Elektro	18%	20%	20%	20%
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	Diesel	21%	22%	24%	24%
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	Elektro	21%	22%	24%	24%
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	Diesel	44%	46%	50%	50%
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	Elektro	44%	46%	50%	50%
<b>Güterzug</b>	Diesel	37%	37%	37%	37%
<b>Güterzug</b>	Elektro	37%	37%	37%	37%
<b>Passagierflugzeug_Inland</b>	Kerosin	69%	69%	69%	69%
<b>Passagierflugzeug_GrÜb</b>	Kerosin	74%	74%	74%	74%
<b>Frachtflugzeug_Inland</b>	Kerosin	62%	62%	62%	62%
<b>Frachtflugzeug_GrÜb</b>	Kerosin	67%	67%	67%	67%
<b>Binnenschiff</b>	Diesel	50%	50%	50%	50%
Quelle: siehe Literaturverzeichnis, eigene Abschätzungen und Berechnungen					(IFEU 2009)

### 3.5.3 Verbrauchsminderungstechnologien

Zentraler Bestandteil des Renewbility-Projektes ist die Abbildung des Kraftstoffverbrauches. Basis der Abschätzungen zu zukünftigen Energieeinsparpotenzialen bildet die Analyse von möglichen Technologien in diesem Bereich. Die Fahrzeugvariante 1 setzt sich aus diesen Verbrauchsminderungstechnologien zusammen. Anschließend werden diese technischen Maßnahmen beschrieben. Es erfolgt dabei eine Einteilung in:

- Maßnahmen zur Reduktion des Luftwiderstandes
- Maßnahmen zur Reduktion des Rollwiderstandes bzw. zur Verbesserung des Auftriebes
- Maßnahmen zur Verbesserung der Antriebstechnik
- Alternative Antriebstechnik

#### Reduktion des Luftwiderstandes

Hierunter fallen Verbesserungen bei der Aerodynamik. Bei den *Eisenbahnen* betrifft das im Allgemeinen Dach, Seitenverkleidung, Unterflurbereich und Wagenanordnung. Laut UIC (2005) können dadurch in Zukunft etwa 5 % Energie bei Personenzügen eingespart werden. Bei Güterzügen hingegen werden Einsparungen von 10 % allein durch optimierte Wagenanordnung angegeben.

Bei *Flugzeugen* kann durch Furchen (Riblets) in der Außenhaut der Flugzeuge oder verlängerte Anbauten an den Flügeln (Winglets) nach Stratus (2002) und CE (2002) jeweils 2-4 % Treibstoff in Abhängigkeit von der Reiseweite eingespart werden. Die Anbauten wirken sich allerdings negativ auf das Flugzeuggewicht aus. Zudem existieren keine Informationen in wie weit diese Maßnahmen bereits umgesetzt wurden. Eine weitere viel versprechende Maßnahme zur Reduktion des Energieverbrauchs ist die Ausstattung des Flugzeugs mit einer Laminarhaltung (turbulenzfreie Umströmung), was langfristig bis zu 20 % Minderung möglichen machen soll (DLR 2007). Andere Quellen geben Gesamtpotentiale für Maßnahmen zur Reduktion des Luftwiderstandes an. Demzufolge können durch Aerodynamik-Verbesserungen bis zu 20 % Energie eingespart werden (Arthur 2000; MTU 2007a).

### **Reduktion des Rollwiderstands und Verbesserung des Auftriebes**

Die Hauptmaßnahme zur Reduktion des Rollwiderstandes und Verbesserung des Auftriebes ist die Gewichtsreduktion. Im Bereich der *Eisenbahnen* können nach UIC (2005) und IFEU (2006b) Leichtbaumaßnahmen bei Personenzügen eine Reduktion des Energieverbrauchs von bis zu 10 % bewirken. Auch zukünftig werden Maßnahmen in diesem Bereich weiter forciert (DB 2007), was auf weitere Reduktionen bis 2030 schließen lässt.

Bei *Flugzeugen* können laut (GBD 2005; Arthur 2000; DLR 2007; IFEU 2006b) durch verschiedene Leichtbaumaßnahmen bis zu 25 % Verbrauchsminderung auf Basis von 2000 erreicht werden. Das Einsparpotential in der *Binnenschifffahrt* begründet sich nur auf wenige Technologien. So kann in Zukunft mittels Luftschmierung (Luftblasen unterhalb des Schiffes) eine Widerstandsreduktion erreicht werden, welche wiederum zu 20%-iger Verringerung des Treibstoffbedarfs führt (New Logistics 2007).

### **Verbesserung der Antriebstechnik**

Bei Innovationen in diesem Bereich muss nach Antriebsart unterschieden werden. Für *Schienenfahrzeuge* mit Elektro-Traktion werden Verbesserungen bei Transformatoren, Motoren und Kondensatoren, sowie Energiespeichertechnik erwartet (UIC 2005), wodurch Einsparungen von 5-10 % zukünftig erreicht werden können. Für Züge mit Dieseltraktion kann hingegen eine Remotorisierung mit modernen Dieselmotoren 10 % Verbrauchsminderung bewirken (UIC 2005). Zusätzlich können Fahrassistenzsysteme bei beiden Traktionsarten Einsparungen von bis zu 10 % bringen (Bombardier 2007; TMG 2007). Neben punktuellen Maßnahmen können auch gänzlich neue Gesamtpakete im Bereich der Antriebs- und Fahrwerktechnik die Effizienz erhöhen. Beispielsweise gibt Siemens (2007) an, mit solch einem Paket (Syntegra) in Zukunft bis zu 20 % Verbrauchsminderung erreichen zu können.

In der *Luftfahrttechnik* werden Potentiale für einzelne Entwicklungen, wie auch für die Gesamtheit aller Maßnahmen angegeben. Die konkreten technischen Maßnahmen umfassen das Installieren eines Wärmetauschers im Abgasstrahl von Flugzeugen /MTU 2002/, welcher zwischen 20 und 40 % Energie einsparen kann, den Einsatz von

Ultrahochbypass-Triebwerken (DLR 2007) mit bis zu 16 % Verbrauchsminderung, wie auch die Ausstattung der vorhandenen Flugzeuge mit modernen Triebwerken (Re-engining), was allerdings mit dem geringsten Einsparpotential veranschlagt wird.

*Binnenschiffe* besitzen auch in diesem Technologiefeld nur wenig Entwicklungspotential. Zu nennen sind der Ersatz von Propellern durch Propellerdüsen (VBD 2004) und der Einsatz neuer Schiffsformen (New Logistics 2007).

### **Alternative Kraftstoffe und Antriebe**

Für *Eisenbahnstrecken* mit Elektrotraktion konzentriert sich die Forschung auf Brennstoffzelle und Hybrid-Antrieb (UIC 2006). Auf Nichtelektrifizierten Strecken sollen hingegen zukünftig Fahrzeuge mit Biodiesel oder Gasmotoren verkehren. In Dänemark wurde bereits ein wasserstoffbetriebener Zug getestet (HIRC 2006). Detaillierte Informationen bezüglich Verbrauch, Material und Kosten konnten nicht ausfindig gemacht werden. Zudem wird der Wasserstoff-Brennstoffzelle als Alternative vor allem zur Elektro-Traktion wenig Potenzial zugeschrieben (Kemp 2005). Die Deutsche Bahn AG testet zur Zeit eine gasbetriebene Lokomotive, weitere Informationen dazu und zu weiteren alternativen Antrieben liegen allerdings nicht vor, so dass diese Technologien nur qualitativ in die Abschätzung einfließen können.

Als alternativen Kraftstoff im *Flugzeugbau* wird die so genannte „Cryoplane-Technik“, ein Wasserstoff-Betriebenes Flugzeug angeführt. Wann diese Flugzeuge Marktreife erlangen, ist jedoch sehr unsicher. Zudem sind der spezifische Energieverbrauch und das Fluggewicht bei dieser Technologie höher, als bei konventionellen Antrieben mit Kerosin als Treibstoff (Airbus 2003). Das Einsparvolumen beim Verbrauch durch die Gesamtheit aller Maßnahmen im Bereich Antriebstechnik (inklusive alternativer Kraftstoffe und Antriebe) wird in verschiedenen Studien mit 25-30 % bis 2030 angegeben (MTU 2007a; MTU 2007b; Arthur 2000).

### **3.5.4 Reduktionspotenzial der Fahrzeugvarianten**

Die Minderungsraten für den Kraftstoffverbrauch des Basis-Szenario spiegeln das Basis-Szenario in TREMOD wider (Tabelle 84). Die Minderungsraten für Fahrzeuge der Variante 1 werden durch Auswahl der Technologien bzw. Maßnahmen zur Verbrauchsminderung und deren Kombination gebildet. Bei der Auswahl und Kombination von Minderungstechnologien sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Marktreife spätestens bis etwa 2027/28 (andernfalls bis 2030 zahlenmäßig irrelevant)
- Abgrenzbarkeit gegenüber anderen Maßnahmen (Vermeidung von Doppelzählungen und Auslassungen)
- Datenverfügbarkeit (ausreichend für zumindest näherungsweise Abschätzungen)

In der Praxis erweist sich dies als problematisch, da die Datenlage durch große Inhomogenitäten und Lücken charakterisiert ist. Der Zeitpunkt der Marktreife und vor allem die anschließende Geschwindigkeit der Marktdurchdringung sind schwer abzuschätzen. Die Abgrenzung gegen andere Maßnahmen ist für bestimmte Fahrzeugkomponenten möglich, ebenfalls für physikalische Kategorien wie Roll- und Luftwiderstand. Es stellt sich allerdings die Frage, welche Maßnahmenbündel auf der Skala von "inkompatibel" über "möglich, aber nur bedingt sinnvoll" bis "nur zusammen sinnvoll" wo angesiedelt sind. Die vorliegende Literatur lässt darauf u. E. kaum eindeutige Antworten zu. Selbst wenn dies zu klären wäre, könnten die einzelnen Anteile einer größeren Anzahl von motorischen Maßnahmen kaum realistisch abgeschätzt werden. Deshalb wird aus den einzelnen Maßnahmen das Reduktionspotenzial der oben diskutierten Fahrzeugvariante 1 grob abgeschätzt. Für Züge und Flugzeuge wird eine zusätzliche Minderung um 20 % (Binnenschiff 5 %) gegenüber dem Basis-Szenario bis 2030 angenommen. Die angenommenen Minderungsraten sind im Folgenden abgebildet:

Tabelle 84: Minderungsraten bei Energieverbrauch (bzgl. Neuzulassungen 2005)

Fahrzeugkategorie	Antrieb	2005	2010		2020		2030	
		Basis	Basisszenario	Var. 1	Basisszenario	Var. 1	Basisszenario	Var. 1
SSU	Elektro	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Personenzug_Nahverkehr	Diesel	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Personenzug_Nahverkehr	Elektro	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Personenzug_Fernverkehr	Diesel	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Personenzug_Fernverkehr	Elektro	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Güterzug	Diesel	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Güterzug	Elektro	-	-2%	-4%	-10%	-18%	-20%	-36%
Passagierflugzeug_Inland	Kerosin	-	-5%	-8%	-14%	-24%	-22%	-38%
Passagierflugzeug_GrÜb	Kerosin	-	-3%	-7%	-9%	-18%	-16%	-33%
Frachtflugzeug_Inland	Kerosin	-	-7%	-12%	-17%	-27%	-25%	-40%
Frachtflugzeug_GrÜb	Kerosin	-	-3%	-7%	-9%	-18%	-16%	-33%
Binnenschiff	Diesel	-	-4%	-4%	-4%	-5%	-4%	-9%
Quelle: siehe Literaturverzeichnis, eigene Abschätzungen und Berechnungen							(IFEU 2009)	

### 3.5.5 Kraftstoffverbrauch

Da sich die Angaben zum Kraftstoffverbrauch in TREMOD auf den Flottendurchschnitt beziehen, müssen die Werte für das Basisjahr 2005 angepasst werden, um den Technologiestand der Neuzulassungen dieses Jahres abbilden zu können. Da uns

keine differenzierten Bestandsdaten für die übrigen Verkehrsträger vorliegen, wird vereinfacht angenommen, dass Neufahrzeuge in 2005 keinen geringeren Verbrauch als der Flottendurchschnitt aufweisen, so dass die Zahlen aus TREMOD übernommen werden.

Der Kraftstoffverbrauch ist durch die unmittelbar verknüpften Betriebskosten, Ressourceninanspruchnahme und verbrauchsabhängigen Emissionen eine Schlüsselgröße der Bewertung von Verkehrssystemen. Daraus resultiert auch eine bessere Datenlage als für andere In- und Outputs. Aus beiden Gründen bildet die Quantifizierung des Verbrauchs auch den Schwerpunkt dieses Berichts. Die Quantifizierung des Verbrauchs der im Renewability-Projekt angenommenen Eisenbahnen, Flugzeuge und Binnenschiffe umfasst einschließlich der bereits oben diskutierten bzw. andernorts erfolgten Festlegungen folgende Schritte:

- Definition von Beförderungszweck, Antriebsart und Einsatzbereich.
- Bestimmung des mittleren Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge im Basisjahr 2005, differenziert nach den oben beschriebenen Merkmalen. Die Daten werden dem vom IFEU entwickelten UBA-offiziellen Datenbanksystem zur Berechnung verkehrsbedingter Energieverbrauchswerte und Emissionen TREMOD entnommen (IFEU 2006a) und angepasst (für Neufahrzeuge). Definition der Fahrzeuge mit Maximaler Platzanzahl und Auslastungsgrad und anschließende Berechnung des Energieverbrauchs (Tabelle 82).
- Ableitung der Verbrauchswerte für die Fahrzeugvarianten auf Basis der festgelegten Minderungsraten (siehe vorheriges Kapitel)

Die Zahlen zum Kraftstoffverbrauch sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 85: Kraftstoffverbrauch nach Fahrzeugkategorie und Fahrzeugvariante [MJ/km]

Fahrzeugkategorie	Einheit	Antrieb	2005	2010		2020		2030	
			Basis	Basis-szenario	Var. 1	Basis-szenario	Var. 1	Basis-szenario	Var. 1
<b>SSU</b>	[MJ/km]	Elektro	20,62	20,20	19,87	18,56	16,91	16,49	13,20
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	[MJ/km]	Diesel	58,08	56,92	55,99	52,27	47,62	46,46	37,17
<b>Personenzug_Nahverkehr</b>	[MJ/km]	Elektro	28,14	27,58	27,13	25,33	23,08	22,51	18,01
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	[MJ/km]	Diesel	301,65	295,62	290,79	271,48	247,35	241,32	193,06
<b>Personenzug_Fernverkehr</b>	[MJ/km]	Elektro	62,18	60,94	59,94	55,96	50,99	49,75	39,80
<b>Güterzug</b>	[MJ/km]	Diesel	175,04	171,54	168,74	157,53	143,53	140,03	112,02
<b>Güterzug</b>	[MJ/km]	Elektro	59,47	58,28	57,33	53,52	48,76	47,57	38,06
<b>Passagierflugzeug_Inland</b>	[MJ/km]	Kerosin	239,57	228,17	220,26	205,91	182,56	185,97	148,77
<b>Passagierflugzeug_GrÜb</b>	[MJ/km]	Kerosin	448,35	432,72	416,50	408,74	367,63	375,91	300,73
<b>Frachtflugzeug_Inland</b>	[MJ/km]	Kerosin	215,63	200,17	190,83	179,78	158,14	161,98	129,58
<b>Frachtflugzeug_GrÜb</b>	[MJ/km]	Kerosin	519,85	501,76	482,79	474,63	427,20	436,61	349,29
<b>Binnenschiff</b>	[MJ/km]	Diesel	287,08	275,48	275,60	275,48	273,30	275,48	261,71
Quelle: siehe Literaturverzeichnis, eigene Abschätzungen und Berechnungen								(IFEU 2009)	

### 3.5.6 Emissionen

Als nicht direkt verbrauchsabhängige Schadstoffe werden NO<sub>x</sub>, Partikel, CO, NMVOC und Methan erfasst. Die Emissionsfaktoren werden wie TREMOD (IFEU 2006a) entnommen bzw. auf TREMOD-Faktoren basierend abgeleitet (die verbrauchsabhängigen werden aus dem Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch berechnet). Die Emissionsfaktoren spiegeln die gültige Rechtslage. Die Angaben zur Auslastung (Tabelle 82) bilden die Basis für die Ermittlung der spezifischen Emissionen (bzgl. Fahrleistung) aus den TREMOD-Faktoren. Im Gegensatz zum Kraftstoffverbrauch erfolgt für die Emissionen eine Anpassung der TREMOD-Werte für das Basisjahr, um Neuzulassungen abbilden zu können. Für Schienenfahrzeug-Neuzulassungen werden 10% geringere NO<sub>x</sub>- und 30% geringe PM-Emissionen im Jahr 2005 gegenüber dem Flottendurchschnitt angenommen. Bei Binnenschiffen und Flugzeugen erfolgt keine Anpassung.

Die Minderungsraten für Schadstoffemissionen im Basis-Szenario sind TREMOD entnommen. In Tabelle 86 sind die Emissionsfaktoren verschiedener Schadstoffe für das Basis-Szenario im Jahr 2030 den Referenz-Werten von 2005 gegenübergestellt.



Tabelle 86: Emissionsfaktoren ausgewählter Fahrzeugvarianten (Vorläufige Werte) [g/km]

Schadstoff:	Antrieb	NOx		Partikel		NMHC		CH4	
Bezugsjahr:		2005	2030	2005	2030	2005	2030	2005	2030
Fahrzeugvariante:		Basis	Basis-szenario	Basis	Basis-szenario	Basis	Basis-szenario	Basis	Basis-szenario
SSU	Elektro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Personenzug_Nahverkehr	Diesel	58,12	26,99	0,63	0,34	2,79	1,81	0,07	0,04
Personenzug_Nahverkehr	Elektro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Personenzug_Fernverkehr	Diesel	301,86	211,76	3,30	2,24	14,47	9,45	0,36	0,23
Personenzug_Fernverkehr	Elektro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Güterzug	Diesel	197,82	118,06	4,66	1,03	22,03	6,67	0,54	0,16
Güterzug	Elektro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Passagierflugzeug_Inland	Kerosin	78,00	51,90	0,22	0,09	8,97	6,05	0,22	0,13
Passagierflugzeug_GrÜb	Kerosin	145,97	104,91	0,42	0,17	16,79	12,24	0,42	0,26
Frachtflugzeug_Inland	Kerosin	70,21	45,20	0,20	0,08	8,07	5,27	0,20	0,11
Frachtflugzeug_GrÜb	Kerosin	169,25	121,84	0,48	0,20	19,46	14,22	0,48	0,30
Binnenschiff	Diesel	400,95	269,32	12,29	10,61	27,72	26,60	0,68	0,65

Quelle: siehe Literaturverzeichnis, eigene Abschätzungen und Berechnungen

(IFEU 2009)

### 3.5.7 Materialeinsatz

Der Materialeinsatz kann bedingt durch die Projektlimitierungen und die Datenlage nur näherungsweise abgeschätzt werden. Ecoinvent (2004) enthält die nötigen Daten zum Materialeinsatz für verschiedene Verkehrsmittel. Aus der Zusammenstellung der vorliegenden Daten werden Materialanteile für das Zulassungsjahr 2005 abgeschätzt und mit den angesetzten Fahrzeugmassen (Tabelle 82) verknüpft. Die Zuordnung zwischen den Fahrzeugkategorien in Ecoinvent (2004) und den Renewbility-Fahrzeugkategorien ist in Tabelle 87 abgebildet.

Tabelle 87: Zuordnung der Fahrzeugkategorien für die Bestimmung des Materialeinsatzes

Ecoinvent		Renewbility
Straßenbahn	->	SSU
Regionalzug	->	Personenzug-Nahverkehr
Fernzug	->	Personenzug-Fernverkehr
Lokomotive (RE 460) + 20 Güterwagen	->	Güterzug
Flugzeug-Kurz/Mittelstrecke	->	Passagierflugzeug-Inland, Frachtflugzeug-GrÜb
Flugzeug-Langstrecke	->	Passagierflugzeug-GrÜb, Frachtflugzeug-GrÜb

Für die einzelnen Technologien zur Verbrauchsreduktion sowie alternative Antriebstechniken werden ebenfalls Massen und Zusammensetzungen abgeschätzt und zu den Basismassen addiert. Angesichts der Unsicherheiten des Verfahrens werden nicht alle Technologien mit Massenänderungen verbunden. Ferner wird in der Regel nicht zwingend nach Antriebsarten unterschieden. Aus den vorliegenden Informationen zu Verbrauchsminderungstechnologien wird für das Basis-Szenario eine Abnahme des Fahrzeuggewichts um 10 % im Jahr 2030 gegenüber 2005 angesetzt, während in der Fahrzeugvariante 1 20 % Gewichtsreduktion angenommen wird. Aus diesen Annahmen und den Ecoinvent-Daten ergeben sich die in Tabelle 88 dargestellten Materialmengen.

Tabelle 88: Materialeinsatz ausgewählter Fahrzeugvarianten [kg] (Quelle: siehe Literaturverzeichnis, Abschätzungen und Berechnungen IFEU 2009)

Fahrzeugvariante	Insgesamt	Stahl, Eisen	Aluminium	Blei	Kupfer	Kunst- stoffe	Glas, Mineralf., Keram., Zement	Holz
SSU_Elektrisch_Zug_2005_Basis	55.000	45.416	1.599	174	3.971	1.773	2.067	0
SSU_Elektrisch_Zug_2030_Basisszenario	49.500	40.875	1.439	157	3.573	1.596	1.860	0
Personenzug_Nahverkehr_Elektrisch_Zug_2005_Basis	200.000	146.869	12.883	1.868	9.018	18.397	9.315	1.649
Personenzug_Nahverkehr_Elektrisch_Zug_2030_Basisszenario	180.000	132.182	11.595	1.681	8.116	16.558	8.383	1.484
Personenzug_Nahverkehr_Diesel_Zug_2005_Basis	200.000	146.869	12.883	1.868	9.018	18.397	9.315	1.649
Personenzug_Nahverkehr_Diesel_Zug_2030_Basisszenario	180.000	132.182	11.595	1.681	8.116	16.558	8.383	1.484
Personenzug_Fernverkehr_Elektrisch_Zug_2005_Basis	400.000	194.224	54.152	0	20.698	100.842	30.084	0
Personenzug_Fernverkehr_Elektrisch_Zug_2030_Basisszenario	360.000	174.801	48.736	0	18.628	90.758	27.076	0
Personenzug_Fernverkehr_Diesel_Zug_2005_Basis	600.000	291.336	81.227	0	31.047	151.264	45.126	0
Personenzug_Fernverkehr_Diesel_Zug_2030_Basisszenario	540.000	262.202	73.105	0	27.942	136.137	40.614	0
Güterzug_Diesel_Zug_2005_Basis	524.000	455.525	26.383	287	7.435	13.812	863	19.695
Güterzug_Diesel_Zug_2030_Basisszenario	471.600	409.973	23.744	258	6.692	12.431	777	17.725
Güterzug_Elektrisch_Zug_2005_Basis	524.000	455.525	26.383	287	7.435	13.812	863	19.695
Güterzug_Elektrisch_Zug_2030_Basisszenario	471.600	409.973	23.744	258	6.692	12.431	777	17.725
Passagierflugzeug_Inland_Kerosin_2005_Basis	61.000	0	54.900	0	0	6.100	0	0
Passagierflugzeug_Inland_Kerosin_2030_Basisszenario	54.900	0	49.410	0	0	5.490	0	0
Passagierflugzeug_GrÜb_Kerosin_2005_Basis	240.000	0	216.000	0	0	24.000	0	0
Passagierflugzeug_GrÜb_Kerosin_2030_Basisszenario	216.000	0	194.400	0	0	21.600	0	0
Frachtflugzeug_Inland_Kerosin_2005_Basis	61.000	0	54.900	0	0	6.100	0	0
Frachtflugzeug_Inland_Kerosin_2030_Basisszenario	54.900	0	49.410	0	0	5.490	0	0
Frachtflugzeug_GrÜb_Kerosin_2005_Basis	240.000	0	216.000	0	0	24.000	0	0
Frachtflugzeug_GrÜb_Kerosin_2030_Basisszenario	216.000	0	194.400	0	0	21.600	0	0
Binnenschiff_Diesel_2005_Basis	330.000	314.281	173	0	2.420	4.834	5.180	3.113
Binnenschiff_Diesel_2030_Basisszenario	297.000	282.853	155	0	2.178	4.350	4.662	2.801

### 3.5.8 Zusatzkosten

Die Abschätzung zukünftiger Kosten von Technologien zur Verbrauchsreduktion ist mit Unsicherheiten belastet, die deutlich größer sind als die der Abschätzung der übrigen Größen. Vereinfacht ist dies darin begründet, dass Kosten stärker von nur sehr grob abschätzbaren Einflüssen abhängen und wenig bekannt sind. In Renewbility werden für die verschiedenen Bezugsjahre direkte Abschätzungen der zusätzlichen Kosten ohne Rückgriff auf Lernkurven vorgenommen. Ausgewiesen werden die Kosten, die dem Fahrzeugbesteller entstehen (Neuwert). Basis der Abschätzung bildet die Literatur, aus der auch die Verbrauchsminderungspotenziale abgeleitet werden und eigene Annahmen. In Tabelle 89 sind die angenommenen Anteile der Kosten am Neuwert der Fahrzeuge dargestellt.

Tabelle 89: Anteil der Zusatzkosten am Neuwert des Fahrzeugs

	2010	2020	2030
Basisszenario	2,5%	5,0%	10,0%
Variante 1	5,0%	10,0%	20,0%
Quelle: eigene Abschätzungen			(IFEU 2009)

Die Angaben zu den Zusatzkosten sind nur als Schätzung anzusehen und werden noch mit Experten besprochen. Der Neuwert der Fahrzeuge wird für alle Bezugsjahre gleich gesetzt. Aus diesen Annahmen ergeben sich die in Tabelle 90 dargestellten Zusatzkosten für Neuzulassungen der jeweiligen Bezugsjahre.

Tabelle 90: Fahrzeugbezogene Zusatzkosten [€] (Schätzung) der Varianten

Fahrzeugkategorie	Antrieb	2010		2020		2030	
		Basis-szenario	Var. 1	Basis-szenario	Var. 1	Basis-szenario	Var. 1
SSU	Elektro	75.000	150.000	150.000	300.000	300.000	600.000
Personenzug_Nahverkehr	Diesel	75.000	150.000	150.000	300.000	300.000	600.000
Personenzug_Nahverkehr	Elektro	125.000	250.000	250.000	500.000	500.000	1.000.000
Personenzug_Fernverkehr	Diesel	375.000	750.000	750.000	1.500.000	1.500.000	3.000.000
Personenzug_Fernverkehr	Elektro	450.000	900.000	900.000	1.800.000	1.800.000	3.600.000
Güterzug	Diesel	137.500	275.000	275.000	550.000	550.000	1.100.000
Güterzug	Elektro	137.500	275.000	275.000	550.000	550.000	1.100.000
Passagierflugzeug_Inland	Kerosin	2.500.000	5.000.000	5.000.000	10.000.000	10.000.000	20.000.000
Passagierflugzeug_GrÜb	Kerosin	5.000.000	10.000.000	10.000.000	20.000.000	20.000.000	40.000.000
Frachtflugzeug_Inland	Kerosin	1.250.000	2.500.000	2.500.000	5.000.000	5.000.000	10.000.000
Frachtflugzeug_GrÜb	Kerosin	2.500.000	5.000.000	5.000.000	10.000.000	10.000.000	20.000.000
Binnenschiff	Diesel	50.000	100.000	100.000	200.000	200.000	400.000
Quelle: (VBD 2004, Bahnplan 2008, Initiative Bahn NRW 2007), eigene Annahmen							(IFEU 2009)

### 3.6 Datenbasis und Methodik für Energieträger- und Kraftstoff-Vorketten

Für die in Renewbility erfolgenden Stoffstromanalysen (vgl. Kapitel 4) ist neben den Daten zu Fahrzeugen und anderen Verkehrsträgern die Verfügbarkeit konsistenter Basisdaten zur **Bereitstellung** von Energieträgern (Brennstoffe, Strom, Wärme) und Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Erdgas, Biodiesel usw.) eine notwendige Voraussetzung.

Diese Daten werden unter dem Begriff **Vorketten** zusammengefasst, d.h. sie betreffen die der eigentlichen Energieträgernutzung **vorgelagerten** Aktivitäten von der Förderung über Transporte sowie die weitere Verarbeitung bis zur Endenergiestufe frei Verbraucher, jedoch nicht deren Nutzung.

Die Vorketten in Renewbility umfassen Energievorketten und Materialvorleistungen sowie zugehöriger Gütertransporte.

Die Vorketten sind nur eine – bei fossilen Energien vergleichsweise geringe – Quelle von Umwelteffekten, jedoch ist für die Bioenergie die Vorkette oft entscheidend.

Mit den Vorketten werden in Renewbility aber auch Kostenaspekte verknüpft bzw. je nach Betrachtung auch Preise<sup>23</sup>.

Bevor die späteren Abschnitte auf die Ergebnisse der Vorketten-Bilanzen für THG-Emissionen und Kosten eingehen, gibt der folgende Abschnitt zunächst eine knappe Darstellung der wesentlichen methodischen Grundlagen der Bilanzierung.

#### 3.6.1 Systemgrenzen der Vorketten

Bei den fossilen und nuklearen Energieträgern - letztere nur zur Stromerzeugung – umfasst die Systemgrenze die Exploration von Lagerstätten, deren Betrieb zur Förderung (z.B. Bohrtürme, Bergbau), die Transporte der Primärenergieträger (Bahn, Pipelines, Schiffe/Tanker) und deren anschließende Konversion (z.B. Erdgasaufbereitung, Raffinerien, Urananreicherung und Brennelementherstellung) sowie die Transporte der Sekundärenergieträger (Bahn, Lkw, Pipelines, Schiffe/Tanker) bis zur Verbrauchsstelle der Endenergieumwandlung. Der materielle Herstellungsaufwand für die wichtigsten Vorkettenprozesse ist dabei ebenfalls einbezogen.

Bei den regenerativen Energieträgern wird – mit Ausnahme der Biomasse – die Vorkette allein durch den stofflich-energetischen Herstellungsaufwand der Energiewandler abgebildet (Bau von z.B. Windkraftwerken, Herstellung von Solarzellen).

Bei der Bioenergie wird im Falle von biogenen Rest- und Abfallstoffen nur deren energienutungsbedingter „Sammelaufwand“ (z.B. Stroh- oder Waldrestholzbergung, Transport getrennt gesammelter biogener Hausmüllanteile) sowie die nachfolgende Konversion (z.B. Biogasanlage, Pellet-, Hackschnitzel- oder BtL-Herstellung) und

---

<sup>23</sup> Vgl. zur Unterscheidung näher Abschnitt 3.6.3

Transporte der Sekundärenergieträger – soweit erforderlich – einbezogen, d.h. das **Entstehen** der Rest- und Abfallstoffe liegt **außerhalb** der Systemgrenze.

Bei **Bioenergie** aus ein- und mehrjährigen Energiepflanzen wird dagegen der Anbau und die Ernte von Biomasse und auch Hilfsenergien (z.B. Diesel) und Einsatzstoffe (z.B. Dünger) berücksichtigt. Die Transporte der Rohstoffe sowie deren nachfolgende Konversion (z.B. Biogasanlage, Hackschnitzel- oder BtL-Herstellung) und Transporte der Sekundärenergieträger sind – soweit erforderlich – ebenfalls einbezogen.

Ebenfalls relevant für die Bioenergie-Vorketten von Anbaubiomasse sind Landnutzungsänderungen (land use changes = LUC), die sowohl direkt (dLUC) wie auch indirekt (iLUC) auftreten und erhebliche – positive wie negative – Auswirkungen auf die THG-Bilanzen haben können (vgl. ÖKO 2008b).

### 3.6.2 Allokation von Koppelprodukten in Vorketten

Der Umgang mit Koppel- und Nebenprodukten z.B. bei Kraft-Wärme-Kopplung, Raffinerien, Ölmühlen usw. ist eine wichtige Determinante bei der Lebenswegbilanzierung.

Während in den letzten Jahren vorwiegend Koppelprodukte über Gutschriften durch Äquivalenzprozesse oder ökonomische Allokation abgebildet wurden, geben die EU-Richtlinien zu Kraft-Wärme-Kopplung und Biokraftstoffen nun definitive Bilanzierungsregeln vor<sup>24</sup>: die **energiebezogene** Allokation auf Basis von Heizwertäquivalenten.

Alle Vorketten in GEMIS sind für Renewability auf Basis dieser Methodik bestimmt.

### 3.6.3 Kostenbilanzierung und Energieträgerpreise für Vorketten

In GEMIS gibt es zwei Ebenen für die Energieträgerpreise und die Kostenbilanzierung.

- Im ersten Fall sind die ökonomischen Kenndaten der Einsatzstoffe als **Produktpreise** in der GEMIS-Datenbank hinterlegt. Dies gilt für fossile Energieträger sowie für ausgewählte biogene **Rohstoffe**. Die Daten werden einheitlich auf €<sub>2005</sub> bezogen unabhängig davon, ob sie für das Basisjahr 2005 oder für spätere Szenario-Zeitpunkte gelten. Die Daten zu den künftigen Energieträgerpreisen wurden für das Basisszenario aus der Literatur abgeleitet.
- Die zweite Ebene betrifft die Energieträger oder Stoffe, für die keine (Markt)Preise zur Verfügung stehen. In diesem Fall **berechnet** GEMIS die **Kosten** der Energieträgerbereitstellung über Investitions-, fixe Jahres-, variable und Einsatzstoffkosten berechnet. Dabei wird ein einheitlicher Kapitalzinssatz verwendet.

Bei der Energiebereitstellung wird differenziert in Haushaltspreise und Industriepreise, letztere ohne Mehrwertsteuer. Die Energieträgerpreise für Haushalte sowie für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sind inklusive Mehrwertsteuer und

24 Zur KWK-Bilanzierung siehe ÖKO (2008a). Die EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien (EU 2009) legt entsprechende Regeln für die THG-Bilanzen von flüssigen Bioenergieträgern fest.



Ökosteuer. Kraftstoffpreise werden ebenfalls mit Mehrwertsteuer und Öko- bzw. Mineralölsteuer angesetzt.

### 3.7 Datenbasis zu den Vorketten für fossile Energieträger und Kraftstoffe

Die Datenbasis für die fossilen Energieträgervorketten beruht auf einer Studie des Öko-Instituts (ÖKO 2007) zu THG-Emissionen von Erdgas, Erdöl sowie Braun- und Steinkohle durch Förderung, Aufbereitung und Transport von

- Erdgas für Kraftwerke/Industrie sowie für Haushalte/Kleinverbraucher und in komprimierter Form (CNG) als Kraftstoff
- Flüssiggas für Haushalte/Kleinverbraucher
- leichtes Heizöl für Haushalte/Kleinverbraucher sowie Dieselmotorkraftstoff
- schweres Heizöl für Kraftwerke/Industrie
- Rohbraunkohle für Kraftwerke und Braunkohlestaub für Industrie sowie Brikett für Industrie und Haushalte
- Steinkohle (heimisch und importiert) für Kraftwerke/Industrie sowie inländische Brikett für Haushalte/Kleinverbrauch

Die THG-Emissionsfaktoren betreffen CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O sowie die daraus ermittelten CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Sie umfassen die **gesamten Vorketten** zur Bereitstellung der Energieträger. Für alle aus dem Ausland bezogenen Energieträger wurden repräsentative Liefermische (Anteil der Förderregionen) für das Jahr 2005 in Deutschland angesetzt, die auf Daten der IEA beruhen.

Für die inländische Bereitstellung wurden Daten der AGEB, des BMWi und des UBA verwendet, die Methodik und Datengrundlagen hierzu finden sich in ÖKO/IZES (2007) und ÖKO (2008) sowie ÖKO/DIW (2008).

Aus diesen Quellen wurden typische Bereitstellungsmixe für die inländische Verwendung der Energieträger im Jahr 2005 ermittelt und in das Computermodell GEMIS (Version 4.4) implementiert. Parallel wurden auf Basis von IEA-Daten sowie den Annahmen der EU zur Entwicklung des Energieangebots in den EU-27-Staaten nach dem PRIMES-Modell auch Vorausberechnungen bis 2030 für den Referenzfall durchgeführt, die entsprechenden Daten finden sich in einer Studie für die Europäische Umwelt-Agentur (EEA), die vom Öko-Institut parallel zum Renewability-Vorhaben erstellt wurde (ÖKO 2009).

Im Rahmen von Renewability wurden diese Datensätze mit **neueren Informationen** aus IEA-Statistiken und den National Inventory Reports nach der UNFCCC für die europäischen Länder sowie die USA und Kanada und den THG-Emissionsberichten verschiedener anderer Länder (u.a. RU) aktualisiert und in der GEMIS **Version 4.5**

(ÖKO 2008b) zusammengefasst. Dabei wurden auch die Ergebnisse der o.g. EEA-Studie zu den Energievorketten in der EU 27 (vgl. ÖKO 2009) einbezogen.

Als weitere Ergänzung wurden neuere Daten für LNG und H<sub>2</sub> sowie erstmals Datensätze für **unkonventionelles Rohöl** aus Ölsänden („syncrude“) mit in die GEMIS-Datenbank aufgenommen, die auf einer speziellen Datenrecherche für renewbility beruhen (vgl. Anhang 5.2)

Alle Daten für die fossilen Vorketten wurden im Laufe des ersten Halbjahres 2009 nochmals geprüft und mit den projektspezifischen Daten für die Stromerzeugung nach der BMU-Leitstudie (vgl. Nitsch/DLR 2008) sowie den aktualisierten und ergänzten Fahrzeugdaten (vgl. Kapitel 3) in der **GEMIS Version 4.6** zusammengefasst (ÖKO 2009b). Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der wichtigsten Energievorketten.

Tabelle 91: THG-Emissionen der Energievorketten (inkl. fossilen Kraftstoffen) in GEMIS 4.6 für Renewbility

in kg/GJ <sub>end</sub>	CO <sub>2</sub> -Äq.	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Benzin-2005	16,2	15,5	0,03	0,0005
Benzin-2010	16,4	15,7	0,02	0,0005
Benzin-2020	15,7	15,1	0,02	0,0005
Benzin-2030	15,6	15,1	0,01	0,0005
Diesel-2005	12,1	11,4	0,02	0,0003
Diesel-2010	12,3	11,7	0,02	0,0003
Diesel-2020	11,5	11,0	0,02	0,0003
Diesel-2030	11,5	11,1	0,01	0,0003
Diesel-2030 (syncrude)	48,8	47,9	0,02	0,0013
Erdgas-2005	14,6	7,7	0,30	0,0003
Erdgas-2010	13,4	7,2	0,26	0,0003
Erdgas-2020	11,8	6,8	0,21	0,0003
Erdgas-2030	11,7	7,1	0,20	0,0003
Kerosin-2005	12,0	11,3	0,02	0,0003
Kerosin-2010	12,3	11,7	0,02	0,0003
Kerosin-2020	11,5	11,0	0,02	0,0003
Kerosin-2030	11,5	11,1	0,01	0,0003
Stromnetz-Bahn-2005	147,8	137,6	0,40	0,0055
Stromnetz-Bahn-2010*	135,5	126,6	0,35	0,0052
Stromnetz-Bahn-2020*	144,0	137,3	0,23	0,0065
Stromnetz-Bahn-2030*	138,0	131,2	0,21	0,0080
Stromnetz-lokal-2005 (SSU)	184,1	177,2	0,23	0,0065
Stromnetz-lokal-2010 (SSU)**	165,5	159,3	0,19	0,0069
Stromnetz-lokal-2020 (SSU)**	151,7	145,7	0,16	0,0086
Stromnetz-lokal-2030 (SSU)**	107,9	102,4	0,12	0,0092
Stromnetz-E-mobil-2010***	15,8	15,1	0,03	0,0005

in kg/GJ <sub>end</sub>	CO <sub>2</sub> -Äq.	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Stromnetz-E-mobil-2020***	18,7	17,9	0,03	0,0005
Stromnetz-E-mobil-2030***	23,2	22,1	0,04	0,0007
GH2-2020****	54,5	51,7	0,08	0,0020
GH2-2030****	51,0	48,6	0,06	0,0018

SSU= Straßen-, S- und U-Bahnen; \*= Fortschreibung Bahnstrom-Mix; \*\*= Werte für BASIS-Szenario, basierend auf BMU-Leitszenario (Nitsch/DLR 2008); \*\*\*= Werte für Regenerativ-Mix; \*\*\*\*= Werte für Importmix aus Kanada (Wasserkraft) und Nordafrika (Solarstrom)

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6

### 3.8 Spezifische Vorketten für regenerative Energien im Bereich Mobilität

Die Vorketten-Daten für Renewbility umfassen, bezogen auf das Basisjahr 2005, rund 40 verschiedene Kraftstoffpfade, die über die Szenariozeitpunkte 2010, 2020 und 2030 auf über 200 Varianten ansteigen<sup>25</sup>.

Die Renewbility -spezifische Datenbasis in GEMIS umfasst das Angebot an folgenden regenerativen Energieträgern, die für Mobilitätsanwendungen eingesetzt werden können:

- Biodiesel aus Raps (Deutschland), Jatropha (Indien), Soja (Argentinien/Brasilien) und Palmöl (Indonesien), jeweils als Pflanzenöl, Methylester und hydrogenierter Biodiesel
- Bioethanol aus Mais und Weizen (Deutschland, Osteuropa) sowie Zuckerrohr (Brasilien)
- Lignozellulotisches Ethanol (Stroh und Mais-Ganzpflanzen aus Deutschland)
- synthetischer Biodiesel (BtL) aus Waldrest- und Schwachholz, Reststroh sowie aus Kurzumtriebsplantagen (KUP), jeweils aus Deutschland und Osteuropa
- Bio-CNG als aufbereitetes Biogas (aus organischen Abfällen, Gülle, Mais, Rutenhirse und Zweikulturanbau) sowie als Synthesegas (aus Waldrest- und KUP-Holz sowie Rutenhirse), jeweils aus Deutschland und Osteuropa
- H<sub>2</sub> aus Wasserkraft (Kanada) und solarthermischen Kraftwerken (Nordafrika)<sup>26</sup>

25 Diese Varianten betreffen vor allem Biokraftstoffe (Herkunft, einbezogene Landnutzungsänderungen). Nicht in die Datenbasis integriert sind mögliche „C-reduzierte“ Kraftstoffvarianten, die aus fossilen Energieträgern gewonnen, deren THG-Emissionen aus Vorketten durch Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (carbon capture and storage = CCS) im Zuge der Umwandlung reduziert wurden. Dazu gehört auch C-armierter fossiler Strom aus Kohle- bzw. Erdgaskraftwerken mit CCS. Die Daten für diese Systeme sind derzeit noch nicht ausreichend gesichert, um in Renewbility einbezogen zu werden.

26 Fahrzeuge mit Bio-H<sub>2</sub> werden in den Renewbility-Szenarien nicht verwendet. Jedoch wurden entsprechende Vorketten recherchiert, vgl. Anhang 3.

- regenerativer Strom für Elektromobilität, insb. aus off- und onshore-Windkraft mit anteiligem Erdgas-GuD-Strom sowie optional Bioenergiestrom (aus verschiedenen biogenen Stoffströmen und Konversionsrouten unterschiedlicher Herkunft).

### 3.8.1 Datengrundlagen zu den biogenen Kraftstoffvorketten

Da Datengrundlage für die biogenen Kraftstoffvorketten bilden die über 1500 Datensätze, die im BMU-geförderten Verbundprojekt „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ von 2000 bis 2004 erstellt wurden (vgl. ÖKO 2004).

Diese Daten wurden durch eine eigene Recherche des DBFZ für das Renewbility-Projekt ergänzt und aktualisiert, wobei hierzu auch Daten aus anderen Studien (DBFZ 2009; EEA 2006-2008; Fritsche/Wiegmann 2008; ÖKO 2009) herangezogen wurden.

Eine Dokumentation der DBFZ-Recherche gibt Anhang 5.3.

### 3.8.2 THG-Emissionen und Kosten der biogenen Kraftstoffvorketten

Mit den in GEMIS 4.6 implementierten Vorketten wurden die THG-Emissionen der biogenen Kraftstoffvorketten bestimmt. Die Ergebnisse der Arbeiten zeigt die folgende Tabelle und nachfolgende Grafik.

Tabelle 92: THG-Emissionen für Bereitstellung und Nutzung sowie Bereitstellungskosten von Kraftstoffvorketten in Renewbility

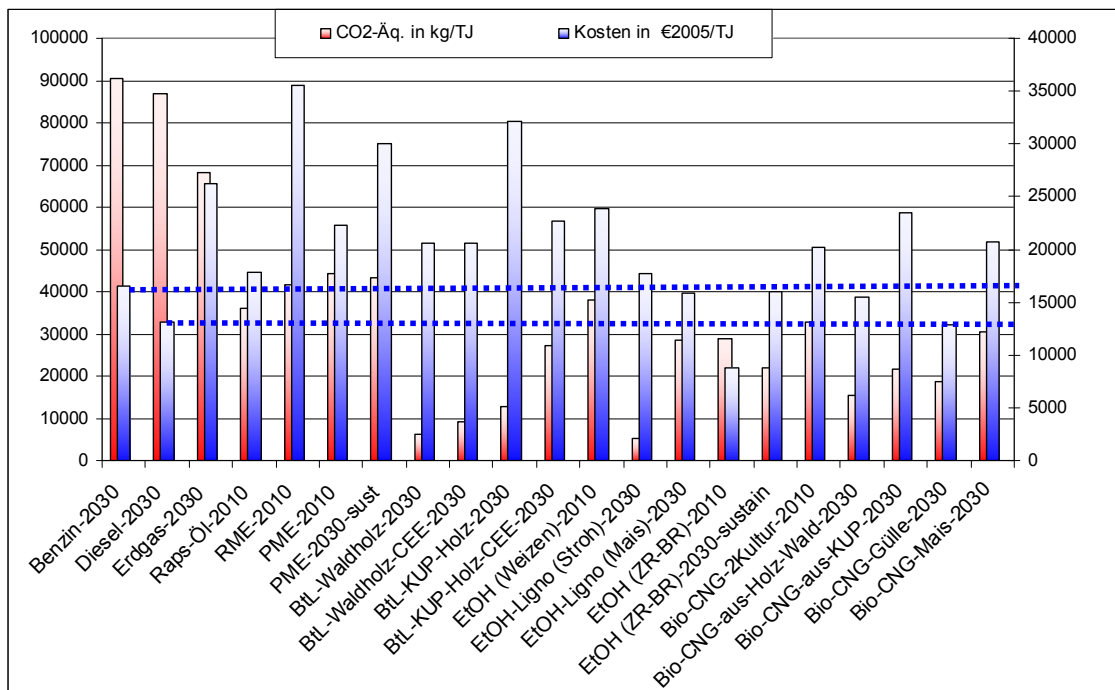
	CO <sub>2</sub> -Äq. in kg/TJ	Kosten in € <sub>2005</sub> /TJ
Benzin-2030	90.430	16.461
Diesel-2030	86.829	13.066
Erdgas-2030	68.348	26.250
Raps-Öl-2010	35.929	17.850
RME-2010	41.483	35.519
PME-2010	44.297	22.273
PME-2030-sust	43.411	29.977
BtL-Waldholz-2030	6.359	20.563
BtL-Waldholz-CEE-2030	9.201	20.565
BtL-KUP-Holz-2030	12.845	32.088
BtL-KUP-Holz-CEE-2030	27.104	22.709
EtOH (Weizen)-2010	37.888	23.843
EtOH-Ligno (Stroh)-2030	5.148	17.720
EtOH-Ligno (Mais)-2030	28.479	15.893
EtOH (ZR-BR)-2010	28.921	8.779
EtOH (ZR-BR)-2030-sustain	21.961	16.032

	CO <sub>2</sub> -Äq. in kg/TJ	Kosten in € <sub>2005</sub> /TJ
Bio-CNG-2Kultur-2010	32.760	20.182
Bio-CNG-aus-Holz-Wald-2030	15.485	15.428
Bio-CNG-aus-KUP-2030	21.692	23.460
Bio-CNG-Gülle-2030	18.639	12.798
Bio-CNG-Mais-2030	30.521	20.772

Quelle: GEMIS 4.6 und Annahmen aus renewbility (BASIS-Szenario); RME= Rapsöl-Methylester; PME= Palmöl-Methylester; BtL = biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch-Diesel); CEE= Central/Eastern Europe; KUP= Kurzumtriebsplantage; ZR= Zuckerrohr; BR= Brasilien; Bio-CNG = compressed natural gas aus Biomethan

Bei den THG-Emissionen ist zu beachten, dass hier jeweils Effekte von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen vernachlässigt wurden. Dies liegt daran, dass der innereuropäische Anbau auf „freigesetzten“ Ackerflächen nach EEA 2006+2007 angenommen wurde, bei denen einjährige Energiepflanzen keine direkten Landnutzungsunterschiede in Bezug auf Kohlenstoff bewirken, und mehrjährige Kulturen sogar zur Erhöhung des Kohlenstoffs im Boden führen. Letzteres wurde im Hinblick auf eine konservative Methodik vernachlässigt. Da der Anbau auf „freigesetzten“ Flächen erfolgt, stehen diese nicht in Konkurrenz zu Futter- und Nahrungsmittelproduktion und ihre Nutzung bewirkt keine indirekten Effekte durch die Verdrängung der Vornutzung (siehe ÖKO 2008b).

Die „**sustain**“-Optionen für Palmöl-Methylester (PME) aus Indonesien und Ethanol (EtOH) aus Brasilien bilden Fälle ab, in denen der Anbau gezielt auf **degradierten Flächen** erfolgt und durch damit bedingte geringere Erträge und höhere Ausgaben für die Beschäftigung lokaler Bevölkerung sowie entsprechender Sozialleistungen insgesamt höhere Gestehungskosten, aber auch geringere THG-Emissionen, entstehen. Die **Kosten** der fossilen und der Biokraftstoffe sind **ohne Steuer** aufgeführt.



Quelle: GEMIS 4.5 und Annahmen aus renewbility (BASIS-Szenario); RME= Rapsöl-Methylester; PME= Palmöl-Methylester; BtL = biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch-Diesel); CEE= Central/Eastern Europe; KUP= Kurzumtriebsplantage; ZR= Zuckerrohr; BR= Brasilien; Bio-CNG = compressed natural gas aus Biomethan

Abbildung 27: THG-Emissionen und Bereitstellungskosten von Kraftstoffvorketten in Renewbility

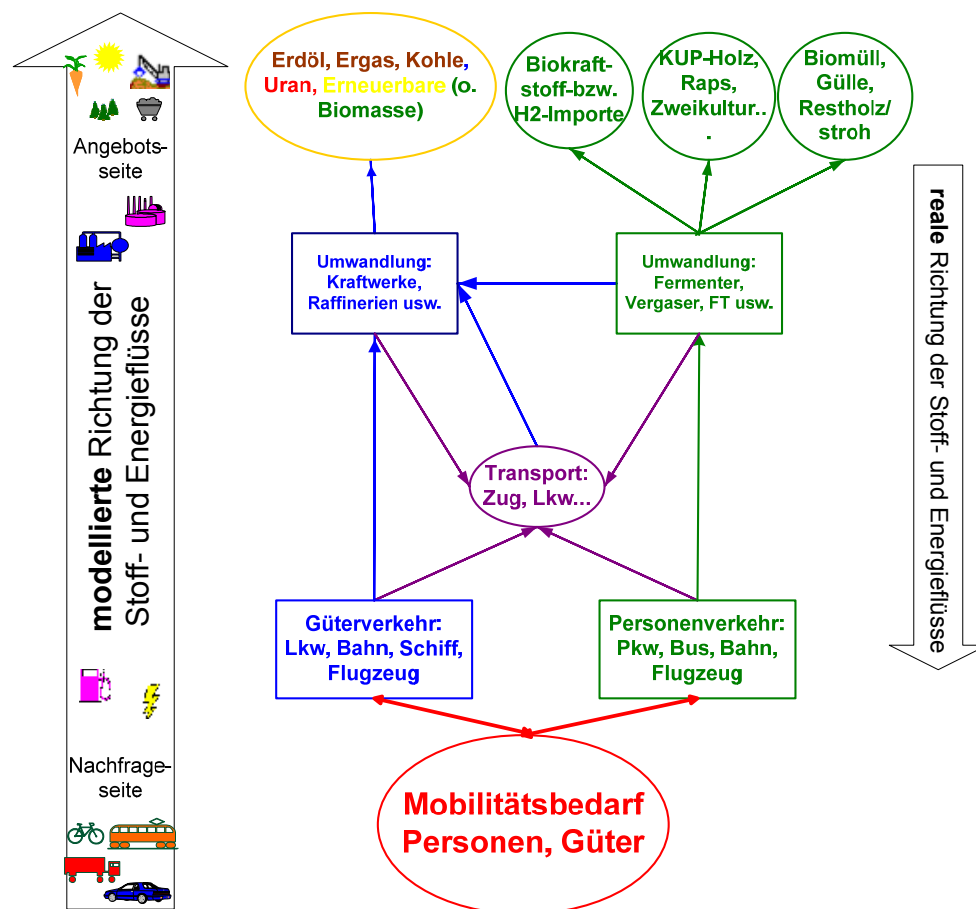
In der obigen Grafik markieren die gepunkteten blauen Linien das Kostenniveau von Benzin bzw. Diesel auf fossiler Basis.

Die Mehrzahl der Biokraftstoffe weist auch 2030 noch (leicht) höhere Kosten als die der fossilen Konkurrenten auf, jedoch sind die THG-Einsparungen unter den angesetzten Bedingungen (Einhaltung EU-Nachhaltigkeitsstandards) durchaus beachtlich.

## 4 Stoffstrommodellierung

Die Stoffstromanalyse im Bereich der nachhaltigen Mobilität konzentriert sich auf die Verknüpfung von Mobilitätsnachfrage und Ressourcenbedarf sowie den zugehörigen Energie- und Stoffflüssen, wobei allerdings die Stoffstromdaten zu Energiesystemen (z.B. Strombereitstellung) und Materialien (z.B. Stahl für Fahrzeuge) mit einbezogen werden.

Das folgende Bild zeigt schematisch die Verknüpfung der Nachfrage- mit der Angebotsseite und die Richtung der modellierten und realen Energie- und Stoffströme.



Quelle: Öko-Institut

Abbildung 28: Grundstruktur der Stoffstromanalyse in Renewbility



Die Datengrundlagen der Stoffstrommodellierung in Renewbility wurde bereits in Kapitel 3 dargestellt. Die modellseitige Realisierung aller Bilanzierungen wird in diesem Kapitel erläutert.

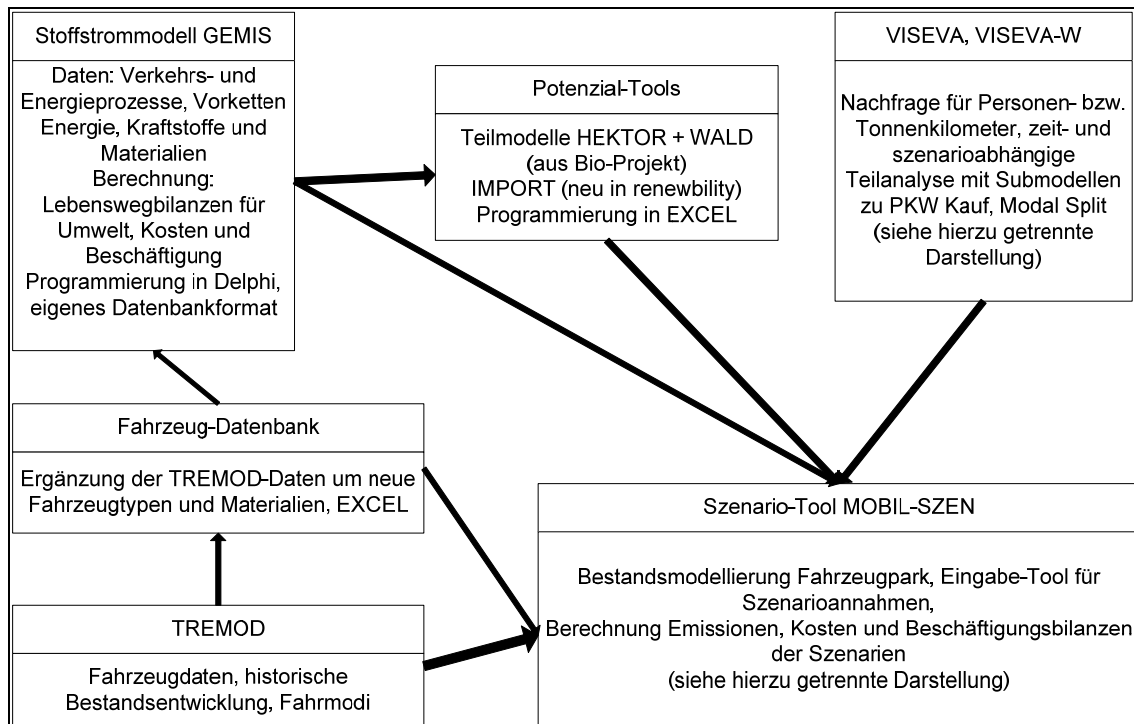
#### 4.1 Die Teilmodelle der Stoffstromanalyse

Im Einzelnen besteht das Stoffstrommodell aus folgenden EDV-Werkzeugen:

- Das *Datenbank- und Stoffstrommodell* **GEMIS** enthält zum einen alle stoffstromrelevanten Informationen sowie Kosten- und Metadaten (Datenbasis), zum anderen ermöglicht es die Stoffstrom- und Kostenbilanzierungen (gesamter Lebenszyklus). Im Rahmen von Renewbility wurde GEMIS dahingehend erweitert, dass die Datenformate für Fahrzeuge nunmehr alle wichtigen Fahrzustände abbilden können und dass auch Fahrzeuge mit mehr als einem Kraftstoff / Energieträger betrieben werden können. Die Daten in GEMIS werden durch ein Excel-Tool aktualisiert.
- Das **Bestandsentwicklungstool** ms\_be.exe errechnet aus den Parametertabellen die Entwicklung des Bestandes einzelner Pkw- und Lkw-Typen
- Das *Szenario-Tool* **MOBIL-SZEN** berechnet die Szenarien, in denen die künftigen Entwicklungen zur Angebots- und Nachfrageseite der Mobilität enthalten sind. Dabei werden alle Maßnahmen einer nachhaltigen Mobilität abgebildet. Innerhalb von MOBIL-SZEN gibt es zahlreiche Tabellen, in denen die Szenarienrechnungen parametrisiert werden.
- Die *Potenzial-Tools* ermitteln Potenziale alternativer Kraftstoffe im Zeitverlauf<sup>27</sup>.
- Die Ergebnisse der Stoffstrom- und Kostenbilanzierung je Output aller relevanten Prozesse aus GEMIS sowie Resultate zu den Potenzialen werden an MOBILSZEN übergeben und von ihm bei der Bilanzierung der Gesamteffekte der Szenarien genutzt. MOBILSZEN stellt Ergebnisse auch tabellarisch und grafisch dar.

---

27 Die Infrastruktur zur Distribution dieser Kraftstoffe ist in GEMIS abgebildet.



Quelle: Öko-Institut

Abbildung 29: Die Interaktion der EDV-Werkzeuge zur Stoffstromanalyse „Nachhaltige Mobilität“

Die EDV-seitigen Schnittstellen für die Modellinteraktion, d.h. für die Datenflüsse und Übergabe von Zwischenergebnissen, wurden zwischen den Bearbeitern abgestimmt.

Alle Modellteile liegen auf der Projekt-CD-ROM vor. Die Excel-Dateien enthalten alle Makros und Funktionen in lesbarem Quelltext. Im Folgenden wird übersichtsartig die Funktion der wesentlichen Excel-Dateien erläutert<sup>28</sup>

## 4.2 Parametertabellen und Zwischenergebnisse

Der Bestand der Fahrzeuge, die vor dem Szenariozeitraum in Betrieb genommen wurden, und deren Entwicklung über die Zeit sind in den Tabellen ms\_altbestand\_p.xls (Pkw) und ms\_altbestand\_l.xls (Lkw) abgelegt. Die Daten stammen aus TREMOD und werden als konstant über alle Szenarien angenommen. Maßnahmentypen wie die Abwrackprämie lassen sich damit nicht modellieren.

Die abgelegten Werte zu den Stützzeitpunkten 2005, 2010, 2020 und 2030 werden mittels einer Spline-Funktion für die anderen Jahre interpoliert.

<sup>28</sup> Von einer formalen Beschreibung im UML-Format wird aus Aufwandsgründen abgesehen

Die Bevölkerungsentwicklung und der Motorisierungsgrad sind in ms\_bev.xls hinterlegt. Obwohl hier Variationen über die Szenarien möglich wären, werden nur gleiche Entwicklungen für alle Szenarien unterstellt.

Maßnahmen, die sich auf den Verbrauch der Fahrzeuge auswirken, können in den Dateien ms\_massnahmen\_l.xls (Lkw) und ms\_massnahmen\_p.xls (Pkw) abgelegt werden. Eine Zuordnung der Maßnahmen zu einzelnen Szenaretten ist möglich.

Werden hier Einstellungen geändert, so ändern sich die Kosten für den Betrieb der Fahrzeuge. Eine Neuberechnung der Jahresfahrleistung muss durchgeführt werden.

In den Parameter-Tabellen ms\_parameter\_l.xls und ms\_parameter\_p.xls sind die Sterbekurven und die Änderung der jährlichen Fahrleistung in Abhängigkeit des Alters für die Fahrzeugtypen hinterlegt. Es ist eine Unterscheidung dieser Werte für bestimmte Zulassungsjahre denkbar, mangels eigener Szenarioannahmen wird jedoch mit gleichen Werten über den Betrachtungszeitraum gerechnet.

In der Exceldatei ms\_preise\_steuern.xls sind die Kosten für die eingesetzten Kraftstoffe und Energieträger, sowie die Steuern für die Fahrzeuge und die Wegesteuern hinterlegt.

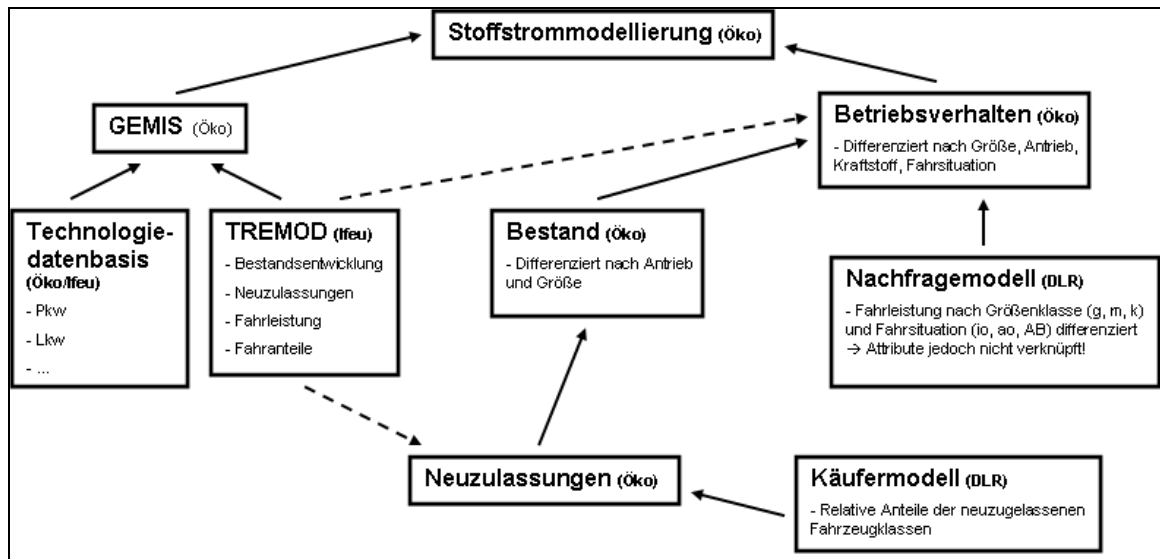
In der Datei ms\_scendescription.xls werden die Szenarien und Szenaretten definiert. Einzelne Szenaretten können von der Berechnung ausgenommen werden.

Eine Übersicht aller Tabellen findet sich in Tabelle 93.

#### **4.3 Die Interaktion der EDV-Werkzeuge**

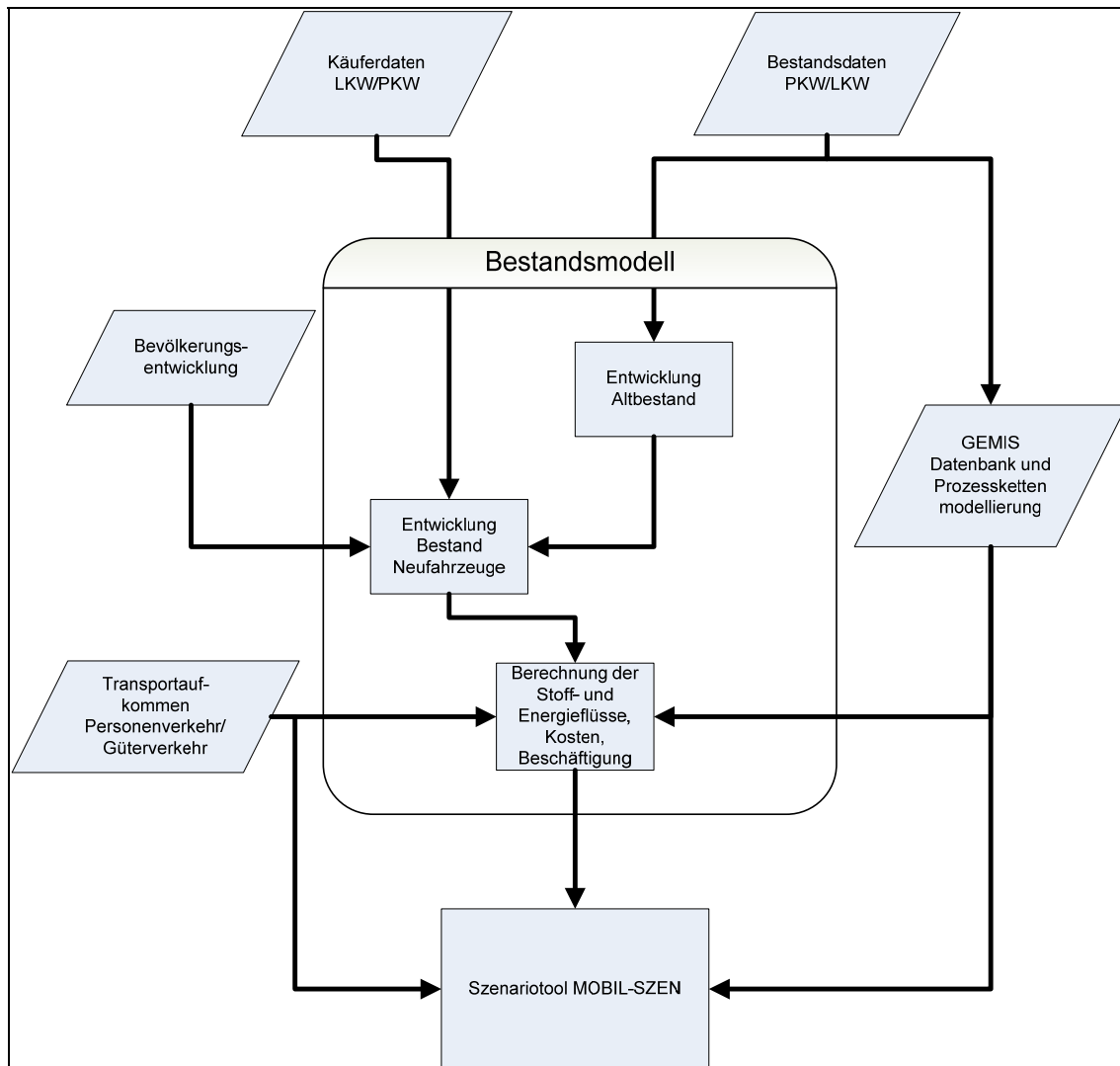
Die von den Teilmodellen jeweils spezifischen Datenverarbeitungen – von der Technologiedatenbank über die Käufermodelle und der Stoffstrommodellierung – werden über die o.g. Schnittstellen an das jeweils nachfolgende Modell als Tabellen oder direkt über VBA-Makros und OLE-Automation-Schnittstellen weitergegeben.

Die generellen Datenflüsse zwischen den Teilmodellen und die jeweilige Verarbeitungslogik zeigen die folgenden Abbildungen für Fahrzeuge und deren Emission.



Quelle: Öko-Institut; (Öko) = Öko-Institut; (DLR) = DLR-IVF

Abbildung 30: Datenflüsse zwischen den EDV-Werkzeugen von Renewability



Quelle: Öko-Institut

Abbildung 31: Verarbeitungslogik der Daten in den EDV-Werkzeugen von Renewability

#### 4.4 Modellierung von Energieträger- und Kraftstoff-Vorketten: Allokation

Als eine wichtige Fortentwicklung der Stoffstrom-Datenbank wurde im Renewbility-Projekt eine Anpassung der Abbildung von Koppel- und Nebenprodukten (z.B. bei Kraft-Wärme-Kopplung, Raffinerien, Ölmühlen) in GEMIS vorgenommen, die nun eine *modellseitige Wahlfreiheit* für deren quantitative Behandlung bei der Bilanzierung erlaubt<sup>29</sup>.

Wie in früheren Modellversionen können auch weiterhin Koppelprodukte über Systemraumerweiterung bzw. Gutschriften durch Äquivalenzprozesse abgebildet werden, was jedoch nicht mehr den aktuellen Bilanzierungsregeln für (Bio-)Kraftstoffe und Kraft-Wärme-Kopplung<sup>30</sup> entspricht (vgl. auch Kapitel 3.6.2).

Die default-Einstellung der Stoffstrombilanzierung verwendet eine *Allokation auf Basis von Heizwertäquivalenten*, wie sie in den EU-Richtlinien für Kraftstoffqualität und Erneuerbare-Energien sowie der deutschen Nachhaltigkeitsverordnung zum Biokraftstoffquotengesetz enthalten sind.

#### 4.5 Monetäre Flüsse und Beschäftigung: Hybride Modellierung

Als innovatives Konzept werden in Renewbility entlang der Energie- und Stoffströme nicht nur die Umweltaspekte (Rohstoffbedarf, Flächen, Emissionen, Reststoffe) ermittelt, sondern auch parallel die monetären Flüsse sowie die Beschäftigung, um weitere Nachhaltigkeitsdimensionen zu quantifizieren.

Für die Beschäftigungseffekte wird ein hybrider Modellierungsansatz genutzt, der entlang der Prozessketten jeweils die direkten Beschäftigungseffekte bilanziert, aber parallel auch die *indirekte* Beschäftigung durch die monetären Flüsse über Input-Output-Tabellen erfasst.

Im Rahmen von Renewbility wurde diese besondere Eigenschaft der Modellierung erweitert: während bislang im Datenbanktool GEMIS nur die indirekte Beschäftigung über die Investitionskosten einbezogen waren, wurde für Renewbility die Systemgrenze deutlich erweitert und nun auch die über Fixkosten und variable Ausgaben entstehenden monetären Flüsse mit der/den – entsprechend differenzierteren – Input-Output-Tabelle/n verknüpft.

#### 4.6 Weitere Sub-Modelle

Die im Teilmodell ALTER enthaltenen Submodelle HEKTOR und WALD wurden bereits entwickelt (vgl. ÖKO 2004). In Renewbility wurde darin das Submodell IMPORT implementiert, das auf Grundlage verschiedener Potenzialstudien unter Beachtung der

29 Die Allokationsoptionen in GEMIS sind neben der default-Vorgabe „Heizwertäquivalent“ auch über die Masse, den reinen Heizwert sowie über monetäre Größen (Preis) möglich. Zudem kann die Allokation „abgeschaltet“ werden („brutto“-Bilanz).

30 Für eine nähere Darstellung siehe ÖKO (2008).

EU-Regelungen zu Biokraftstoff-Importen die entsprechend verfügbaren Mengen je Weltregion ermittelt<sup>31</sup>.

Das Teilmodell INFRA wurde aufgrund der durchgeführten Analysen zur Relevanz der verkehrlichen Infrastrukturen als eigenständiges Teilmodell aufgegeben und wird nun durch Datensätze in GEMIS abgebildet.

#### 4.7 Modellbeschreibung MOBIL-SZEN

Das Tool MOBIL-SZEN besteht aus insgesamt vier Submodellen:

Die Submodelle für Strom und Wärme wurden aus dem schon bestehenden BIO-SZEN übernommen<sup>32</sup>.

Die Submodelle des Szenariotools für den Personen- und Güterverkehr wurden neu entwickelt, da nachfrageseitig auf die Ergebnisse der Teilmodelle für den Personen- (vgl. Abschnitt 2.1) und Güterverkehr (vgl. Abschnitt 2.2) zurückgegriffen wird und auch – bei den Pkw – Ergebnisse des Pkw-Käufermodells einbezogen werden. Die Dateninputs zu den szenariobezogenen Nachfragen für Personen- und Güterverkehr entstammen den Teilmodellen der Nachfragemodellierung.

Nunmehr enthält MOBIL-SZEN eine **eigene Flotten- und Bestandmodellierung** (Abgang, Zugang, jeweils getrennt für Pkw und Lkw). Im Folgenden werden die entwickelten Teilmodelle von MOBIL-SZEN beschrieben. Die berechneten Daten werden in Excel-Tabellen gehalten, der Zugriff auf sie erfolgt mittels VBA-Programmierung<sup>33</sup> und über OLE-Automation<sup>34</sup>. Ein gemeinsames Rahmenprogramm, das alle Aktivitäten zusammenfasst, ist realisiert. Die folgende Übersicht zeigt die Dateistruktur der Teilmodelle und ihrer jeweiligen Datentabellen.

31 Die auf EU-Ebene Ende 2008 festgelegte Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (EU 2009a) und die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (EU 2009b), in denen u.a. Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe sowie Bilanzierungsregeln für Treibhausgasemissionen geregelt wurden, ist mittlerweile in die deutsche Gesetzgebung zur Biokraftstoffquote übersetzt.

32 BIO-SZEN ist ein Ergebnis des Stoffstromprojekts „Nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse“ (ÖKO 2004). Für die Energienachfrage und Bereitstellungsmixe wurden aktualisierte Daten aus der Leitstudie 2008 des BMU einbezogen (Nitsch/DLR 2008).

33 Visual Basic for Applications ist eine in Microsoft-Office enthaltene Programmiersprache.

34 OLE-Automation ist eine von einer Programmiersprache unabhängige Schnittstelle zwischen Windows-Programmen



Tabelle 93 Übersicht zu den Teilmodellen und Datendateien von MOBIL-SZEN

Datenübergabe/Parameter	Exceltabelle	Arbeitsblätter
Verkehrsmodellierung Pkw Zuordnung der Rechenläufe der Nachfrage auf die jeweiligen Szenarien / Szenaretten	Schnittstelle Personenverkehr.xls	MIV, ÖV, Pkw Neuzulassung, Zuordnung Personenverkehr
Verkehrsmodellierung Lkw Zuordnung der Rechenläufe der Nachfrage auf die jeweiligen Szenarien / Szenaretten	Schnittstelle Gueterverkehr.xls	Güterverkehr Dtl. WIVSIM, Lkw Neuzulassung, Zuordnung Güterverkehr
Auswahl von Standardrechenläufen DLR	ms_calc_dlr.xls	Nachfragen PV, Zulassungen Pkw, Nachfragen GV, Zulassungen LKW
Entwicklung Altbestand Pkw	ms_altbestand_p.xls	Bestand Pkw
Entwicklung Altbestand Lkw	ms_altbestand_l.xls	Bestand Lkw
Bevölkerungsentwicklung und Motorisierungsgrad	ms_bev.xls	Basis
Verhältnis der Fahrleistungen und Lebensdauern verschiedener Pkw-Typen	ms_parameter_p.xls	Fahrleistung, Sterbekurve
Verhältnis der Fahrleistungen und Lebensdauern verschiedener Lkw-Typen	ms_parameter_l.xls	Fahrleistung, Sterbekurve
Szenariobeschreibungen	ms_scendescription.xls	Beschreibungen
Maßnahmen Pkw	ms_massnahmen_pkw.xls verlinkt auf Blatt Maßnahmen Personenverkehr in ms_scen_description	Beschreibungen (inklusive Zuordnung zu den Szenarien), Maßnahmen
Maßnahmen Lkw	ms_massnahmen_lkw.xls verlinkt auf Blatt Maßnahmen Güterverkehr in ms_scen_description	Beschreibungen (inklusive Zuordnung zu den Szenarien), Maßnahmen
Annahmen Kraftstoffpreise	Blatt Karstoffpreise in ms_scen_description.xls	Annahmen zur Entwicklung der Kraftstoffpreise in den Szenarien/Szenaretten
Zusammenfassung der Ergeb- nisse der Bestandsentwicklung	Renewability- results_car_truck_alle	Übernahme der Daten aus der CSV- Daten der Bestandsentwicklung
MOBIL-SZEN Version 1.30	Siehe eigene Übersicht	

Quelle: Öko-Institut

#### 4.7.1 Übersicht der Szenarien und Szenaretten

Es sind vier „Haupt“-Szenarien und 40 Szenaretten vorgesehen. Die 4 Szenarien und 30 Szenaretten greifen auf einzeln zu rechnende Zulassungsentwicklungen und den zugehörigen Verkehrsmengen zu. Für die ‚schnelle‘ Durchführung von Sensitivitätsanalysen ohne die vergleichsweise aufwändigen Rechenläufe der Nachfragemodellierung durchführen zu müssen, sind 10 Szenaretten vorgesehen, die in Abhängigkeit der Maßnahmen und Kraftstoffpreisentwicklungen auf vorab gerechnete Daten zugreifen.

Für zwei dieser 10 Szenaretten gibt es eine spezielle Eingabefunktion, die eine besonders schnelle und einfache Bedienung ermöglichen. Die Bedienung dieses Quick-Modus wird auf der CD gesondert beschrieben.

Die beschreibenden Informationen sind in der Datei ms\_scendescription.xls abgelegt.

#### 4.7.2 Datenübergabe Verkehrsmodellierung und Käufermodelle

Eine unmittelbare Verknüpfung der Modellteile der Nachfragemodellierung zu den Modellteilen der Bestandsentwicklung und Stoffstromanalyse ist nicht umsetzbar. Die Ergebnisse der Verkehrsmodellierung und der Käufermodelle werden in Exceltabellen vorgenommen. Es stehen Auswahlfunktionen zur Verfügung, mittels derer die vorab gerechneten Läufe aus den Nachfrage-Modellen eingelesen werden. Stehen für bestimmte Szenarienannahmen keine Rechenläufe zur Verfügung, so wird ein Warnhinweis ausgegeben und die Szenarette nicht gerechnet.

#### Übergabe Neuzulassungen Pkw

Vom Käufermodell für Pkw werden die prozentualen Anteile aller Neuzulassungen von Pkw aufgeteilt nach den Typen klein/mittel/groß und Diesel/Otto geliefert. Jeder dieser Typen ist in einer „Basis“-Ausführung und bis zu 4 verschiedenen Varianten abgebildet. Für nicht-konventionelle Pkw-Typen wie H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen, Elektro-Pkw und Hybrid-Fahrzeuge werden entsprechend den Annahmen in den Szenaretten die Prozentwerte in die jeweilige Fahrzeugflotte und neuen Klassen umgerechnet.

Die Zuordnung dieser Type zu den jeweiligen Pkw in der Datenbank erfolgt durch Eintrag der GUID<sup>35</sup> aus den Einträgen in der Technologiedatenbank. Eine Validierungsroutine ermöglicht den Check, ob alle Zuordnungen richtig gesetzt wurden, indem die Namen der Pkw aus der Datenbank ausgelesen werden.

#### Übergabe Fahrzeugkilometer Pkw

Die Übergabe der Jahres-Fahrzeugkilometer erfolgt getrennt nach den Größenklassen klein/mittel/groß sowie nach den Einsatzbereichen innerorts/außerorts/Autobahn. Durch eine Anpassungsrechnung erfolgt eine Zuordnung der Größenklassen zu den Einsatzbereichen.

35 Global Unique Identifier = alphanumerischer Code, der für jeden Datensatz genau einmal erzeugt wird und diesen eindeutig bezeichnet.

### **Übergabe Neuzulassungen Lkw**

Vom Käufermodell für Lkw werden die absoluten Neuzulassungen aufgeteilt nach den Typen <3,5 t, 3,5-7,5 t, 7,5-12t, >12 t und Sattelzug jeweils für Diesel, Benzin und ggf. Erdgas geliefert. Einige dieser Typen (z.B. Sattelzug Benzin) sind zwar im Modell vorgesehen, aber nicht mit Daten hinterlegt, weil sie in der Realität nicht im Einsatz sind. Jeder der Fahrzeug-Typen ist in einer „Basis“-Ausführung und bis zu 4 verschiedenen Varianten abgebildet.

Wie bei den Pkw erfolgt die Zuordnung dieser Typen zu den jeweiligen Einträgen in der Technologiedatenbank über die GUID.

Anhand der in den Szenaretten gewählten Maßnahmen und auf Basis der angenommenen Entwicklung der Kraftstoffpreise erfolgt hierbei eine Auswahl auf den vorab gerechneten Modellläufen der Nachfrage.

### **Übergabe Fahrzeugkilometer Lkw**

Die Übergabe der Jahres-Fahrzeugkilometer erfolgt getrennt nach den Größenklassen <3,5 t, 3,5-7,5 t, 7,5-12 t, >12 t, Sattelzug sowie nach den Einsatzbereichen innerorts/außerorts/Autobahn. Daneben werden der Anteil der Leerfahrten und die durchschnittliche Auslastung übergeben. Da diese Angaben szenariovariant sind, werden für die weitere Rechnung die in der GEMIS-Datenbank hinterlegten Daten entsprechend angepasst.

### **Übergabe andere Personenverkehre**

Die anderen Personenverkehre (Bahn Fern- und Nahverkehr elektrisch/Diesel, Straßen-/S- und U-Bahn, Linienbusse Diesel/CNG/H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle, Reisebusse, Flugverkehr In- und Ausland) werden in Form der jährlich zurückgelegten Fahrzeugkilometer übergeben. Einzelne Varianten dieser Typen sind im Modell vorgesehen.

### **Übergabe andere Güterverkehre**

Die anderen Güterverkehre werden über jährliche Fahrzeugkilometer für die Typen Bahn elektrisch/Diesel, Binnenschiff und Transitverkehr übergeben. Sonstiger (übriger) Verkehr ist ebenfalls vorgesehen.

### **Übergabe von Ergebnissen aus Standardrechenläufen**

In den 4 Szenarien und den Szenaretten 1-30 werden die Ergebnisse aus den Rechenläufen der DLR händisch übertragen. Die Szenaretten 31-40 greifen auf vorab gerechnete Ergebnisse der Nachfrage-Modelle zu. Die Daten sind in der Excel-Tabelle ms\_calc\_dlr.xls abgelegt. Die Auswahl der Daten erfolgt über multiple-choice Abfrage zu einzelnen verkehrspolitischen Maßnahmen und Annahmen zur Kraftstoffpreisentwicklung.

Für die Szenaretten 31 und 32 existiert eine eigene Eingabemaske, die eine besonders schnelle Maßnahmenauswahl ermöglicht.

#### 4.7.3 Datenübergabe Fahrzeugdaten

Die Fahrzeugdaten zur Übernahme in GEMIS werden von IFEU in Form einer Exceltabelle geliefert. Alle Zeilen dieser Tabelle entsprechen Fahrzeugen in GEMIS. Um einen Reimport von Daten zu ermöglichen, wird beim ersten Import die in GEMIS generierte GUID in die Tabelle zurück geschrieben. Nach einer Fortschreibung der TREMOD-Daten kann diese Tabelle upgedatet werden.

Da für GEMIS und das Renewability-Projekt mehr Informationen über Fahrzeuge verarbeitet werden, als in der TREMOD-Datenbank vorhanden sind, erfolgt auf der Ebene dieser Fahrzeugübergabetabellen eine Datenergänzung mittels Hilfsrechnungen über eigenständige Excel-Tabellen.

#### 4.7.4 Teilmodellierung zur Bestandsentwicklung

##### Altbestand

Für die Pkw und Lkw wurde ein eigenes Modell zur Bestandsberechnung entwickelt. Im ersten Schritt erfolgt die Übergabe des Altbestandes (vor 2005) in das Modell. Anhand der aus TREMOD abgeleiteten Parameter für Nutzungsverlauf (Sterbekurve) und durchschnittlich jährlich gefahrenen Kilometern entsprechend des Alters des Fahrzeuges wird der Altbestand modelliert. Die Altbestandsentwicklung ist szenario-invariant. Es werden keine Maßnahmen zur Variation der Altbestandsentwicklung unterstellt. Die Abwrackprämie oder ähnlich wirkende Instrumente wurden nicht modelliert.

Altbestand Pkw (Jahr, Typ) = Altbestand Pkw (2005, Typ) \* Sterbekurve (Typ)

##### Pkw

Die Entwicklung des Bedarfs an Pkw wird durch die Bevölkerungsentwicklung und eine steigende Quote des Motorisierungsgrades für alle Szenarien (gleich) festgelegt.

Durch den altersbedingten Abgang an Bestandsfahrzeugen errechnet sich ein Bedarf an Neuzulassungen. Dieser Bedarf wird entsprechend der Prozentanteile der Neuzulassungen gedeckt. Vereinfachend erfolgt dieser Zugang am Jahresanfang.

Gesamtbestand Pkw (Jahr) = Bevölkerung (Jahr) \* Motorisierungsgrad (Jahr)

In allen Szenarien steigt der Motorisierungsgrad von 679 Pkw/1000Ew auf 745 Pkw/1000 Ew.

##### Lkw

Die Entwicklung des Bestandes an Lkw ergibt sich durch die altersbedingten Abgänge und den absolut angegebenen Werten für die Neuzulassungen.

##### Andere Verkehre

Für die anderen Verkehre wird keine Bestandsentwicklung modelliert.

#### 4.7.5 Fahrleistung

Für den im Teilmodell gerechneten Bestand ist je Pkw-Typ in der Datenbank eine Standardfahrleistung pro Jahr hinterlegt. Diese ist über eine Funktionalität von dem Alter des Fahrzeuges abhängig. Addiert man nun in einem Jahr alle Fahrzeugzeugtypen mal Anzahl mal Fahrleistung, so ergibt sich ein Rechenwert, der an die von den Nachfragemodellen gelieferten Fahrleistungen angeglichen wird. Aus dem Teilmodell ergibt sich dann ein Verhältnis der Fahrzeugtypen untereinander.

Die Berechnung der Fahrleistung der Lkw ergibt sich analog zu den Rechnungen der Pkw.

#### 4.7.6 Durchführung der Berechnungen

Die Berechnungen werden mit einem in Delphi geschriebenen Teilmodell „ms\_be.exe“ durchgeführt. Dieses Tool liest zunächst alle Übergabeblätter aus den entsprechenden Excel-Dateien aus.

Danach werden die Fahrzeugdaten aus GEMIS eingelesen. Der Speicherort des GEMIS-Datensatzes im Dateisystem wird im Tool eingestellt und für weitere Rechnungen in den Systemeinstellungen von Windows hinterlegt.

Das Verzeichnis, in dem GEMIS installiert wurde, ist durch den Installationsvorgang von anderen Programmen durch einen Eintrag in der Windows-Systemdatenbank bekannt

Die Bestandsbilanzierungen mit allen Einzelrechnungen dauern bei einem aktuellen PC etwa 30-60 Minuten. Danach sind im Verzeichnis „results“ alle Zwischenergebnisse in Form von CSV-Dateien abgelegt.

Soweit mit den Standard-Daten aus GEMIS gerechnet wird, kann das Modell die GEMIS-Ergebnisse in einem Zwischenformat abspeichern. Die Rechenzeit verkürzt sich dann auf etwa 2-3 Minuten.

#### 4.7.7 Auswertung

##### Zusammentragen der Zwischenergebnisse

Für die Auswertungen werden zunächst die relevanten Ergebnisse, die im CSV-Format vorliegen, in eine weitere Excel-Datei verlinkt. Die CSV-Dateien sind zwar von Excel lesbar. Sie bieten jedoch nicht den Vorteil, dass man sie ohne Probleme direkt mit anderen Excel-Dateien verlinken kann. In einem ersten Schritt werden die CSV-Dateien in xls-Dateien gewandelt. Die einzelnen xls-Dateien sind in einer Gesamtdatei `renewbility-results_car_truck_alle.xls` zusammengefasst.

#### 4.7.8 Auswertefunktionen MOBIL-SZEN

Die Auswertung der Ergebnisse und deren Visualisierung erfolgt in einer Excel-Datei. Diese ist mit VBA-Code für Teilberechnungen und Änderungen des Erscheinungsbildes angereichert. Zur Nutzung dieser Excel-Datei muss die Makrofunktionalität in Excel frei gegeben werden.

Auf mehr als 70 Blättern der Excel-Datei werden alle Teilauswertungen und die zusammenfassenden Übersichten erzeugt.

Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten wurde auf dem Blatt ‚Options‘ eine Gruppierungsfunktion hinterlegt. Jedes Optionsfeld auf diesem Blatt blendet eine Gruppe von Blättern ein, wenn das entsprechende Häkchen gesetzt ist.

☐ CO<sub>2</sub> Berechnung durch Materialvorleistungen

Die Berechnungsschritte für die CO<sub>2</sub>-Äquivalente werden angezeigt. Die Menge der Materialvorleistungen sind in den Ergebnissen des Stockmodells hinterlegt. Diese werden mit den Emissionsfaktoren multipliziert, die durch Einlesen der GEMIS-Daten auf dem Blatt EF\_mat abgelegt sind.

☐ GEMIS Prozess-und Produktlisten

Die GEMIS Daten für die Materialvorleistungen und die Energiebereitstellung werden hier angezeigt

☐ Biokraftstoffbeimischungen

Die Quoten der Biokraftstoffbeimischung aufgeteilt nach diversen Lieferanten werden auf den Blättern Mix\_FAME, Mix\_EtOH und Mix\_BioCNG eingestellt. Diese Daten sind ohne weiteres vom Nutzer veränderbar. Die neuen Ergebnisse stehen sofort zur Verfügung. Werden einzelne, maximale Import-, Anbau- oder Reststoffmengen überschritten, so erhält der Nutzer eine Fehlermeldung.

☐ Emissionsfaktoren

Die direkten Emissionsfaktoren für den Einsatz der Treibstoffe in den Fahrzeugen sind hier hinterlegt.

☐ Zeige CO<sub>2</sub> Ergebnisse

Alle Zwischenergebnisse bei der Berechnung werden angezeigt.

☐ Zeige Ergebnisse Luftschadstoffe

Alle Zwischenergebnisse bei der Berechnung werden angezeigt.

☐ Zeige Ergebnisse Kosten

Die schon im Stockmodell berechneten Kosten werden angezeigt.

☐ Zeige Endenergie

Der Endenergieeinsatz für die Verkehre, aber auch für die Strom- und Wärmeseite des Modells werden angezeigt.

☐ Szenarienbeschreibung

Hier wird die Szenarienbeschreibung angezeigt. Die eigentliche Datei, in der die Daten hinterlegt sind, heißt ms\_scendescription.xls.

☐ Zeige Vorketten Transport

Die Daten für die Bereitstellung von verschiedenen Treibstoffen werden hier angezeigt.

☐ Zeige GEMIS Vorketten

Die genutzten GEMIS-Daten werden hier angezeigt.

☐ Ressourcen- und Flächennutzung

Die Bilanzierung der Ressourcen, die Flächennutzung, sowie die Ausnutzung vorhandener Potenziale werden dargestellt.

☐ Beschäftigungseffekte

Die Beschäftigungseffekte werden aufgeteilt nach direkten und indirekten dargestellt.

☐ Stromerzeugung

Die Stromerzeugungsvarianten aus Biomasse und die KWK-Systeme werden dargestellt.

☐ Leitszenario

Nachrichtlich und um die Daten als Hilfslinie in den Ergebnissen zu nutzen, werden die Annahmen aus dem Leitszenario der Bundesregierung abgebildet.



## 4.8 Die Teilmodelle der Stoffstromanalyse

### 4.8.1 Berechnung des Energieverbrauchs

Die Berechnung des Energieverbrauchs aller Pkw ergibt sich aus der Addition der Produkte aus Fahrleistung eines Pkw-Typs mal des Verbrauches dieses Typs reduziert um die in den Maßnahmen gewählten zusätzlichen Einsparungen:

Ein Pkw, der in einem bestimmten Jahr Z zugelassen wurde, befindet sich im Rechenjahr Y im Betriebsjahr  $B = Y - Z$  und hat eine Jahresfahrleistung F, die sich aus der korrigierten<sup>36</sup> Jahresfahrleistung aus der Tabelle ms\_parameter\_p.xls ergibt.

Die Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die Fahrsegmente innerorts/außerorts/Autobahn erfolgt anhand der Größenklasse des Fahrzeugs und der Aufteilung der Fahrleistung, die sich aus der Verkehrsmodellierung ergibt.

Die PKW gibt es in verschiedenen Größenklassen, Antriebsarten und (Spar-)Varianten. Es wird deutlich, dass bei dieser Rechnung nicht nur die Stützjahre berechnet werden, sondern auch Pkw aus den Zulassungsjahren zwischen den Stützjahren in die Rechnung eingehen. Modellintern werden diese Pkw als eigene Typen generiert.

Die Merkmale ergeben sich aus der Interpolation der Merkmale der Pkw in Stützjahren. Die Zulassungsanteile dieser Pkw werden gleichsam zwischen den Stützjahren interpoliert.

Das führt zu der gewünschten Besonderheit, dass bestimmte Modelleigenschaften, wie die Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen, schon vor den in den Tabellen ausgewiesenen Jahren langsam ins Modell einfließen.

Neben der Berechnung des Energieverbrauchs für die Neufahrzeuge werden auch die Typen des Altbestandes berücksichtigt.

Die Berechnung der Lkw erfolgt entsprechend. Eine Besonderheit ergibt sich nur dadurch, dass Lkw auch auslastungsabhängig über die Jahre betrieben werden.

Die anderen Personen- und Güterverkehre werden nur als Durchschnittsfahrzeuge betrachtet. Die Berechnung des Energieverbrauchs ist daher vergleichsweise trivial.

### 4.8.2 Berechnung des Materialbedarfs

Die Berechnung des Materialaufwandes für die Herstellung der Fahrzeuge wird über deren Betriebszeit und die jährlichen Fahrleistungen auf die in der Lebensdauer bereitstellte Verkehrsdienstleistung verteilt.

So werden z.B. die 400 kg Stahl für den Bau eines Pkw aufgrund der hohen Fahrleistungen am Anfang der Lebensdauer eines Fahrzeuges schon zu etwa 50 % der Aufwendungen innerhalb von 5 Jahren in die Bilanz eingerechnet.

Diese Art der Bilanzierung wird bei allen Verkehrsträgern verwendet, da sie rechnerische Sprünge in den Kurvenverläufen einzelner Materialien ausgleicht.

---

<sup>36</sup> Zur Berechnung des Korrekturfaktors siehe Kapitel 4.7.5

#### **4.8.3 Berechnung der Vorketten**

Die Berechnung der Vorketten wird mit GEMIS durchgeführt (vgl. Kapitel 3.6).

#### **4.9 Installation und Bedienung der EDV-Instrumente**

Die Teilmodelle liegen komplett auf der Projekt-CD-ROM vor. Für die Betrachtung der Modellstruktur und der Zwischenergebnisse können alle Excel-Tabellen und alle gerechneten Szenarien-Zwischenergebnisse direkt eingesehen werden.

Sollen die Teilmodelle lauffähig auf einem Rechner installiert werden, folgt man den Handlungsanweisungen in der Datei index.htm im Hauptverzeichnis der CD-ROM.

Die Excel-Dateien sind im Format 2003 abgespeichert. Für die Installation von GEMIS sind administrative Rechte notwendig. GEMIS selbst und das ausführbare Programm zur Berechnung der Bestandsentwicklung laufen ohne besondere Nutzerrechte.

Da im Regelfall keine Neuberechnung (z.B. aufgrund von Datenerweiterungen oder Aktualisierungen) erforderlich ist, können die bereits mit ausgelieferten GEMIS-Zwischenergebnisse direkt verwendet und auf eine Installation von GEMIS verzichtet werden.

## Literatur

### 4.10 Modellierung der Verkehrsnachfrage (Kapitel 2)

- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC): ADAC special, Auto-Test; Der aktuelle Neuwagen-Katalog, verschiedene Jahrgänge, München.
- Arentze, T., Hofmann, F., Kalfs, N., Timmermans, H. (1997): Data Needs, Data Collection and Data Quality Requirements of Activity-Based Transport Models. Präsentiert auf der International Conference on Transport Survey Quality and Innovation, 24. - 30. Mai 1997, Grainau, Deutschland. [http://gulliver.trb.org/publications/circulars/ec008/workshop\\_j.pdf](http://gulliver.trb.org/publications/circulars/ec008/workshop_j.pdf) (letzter Zugriff 07/2009)
- Berry, S. (1994): Estimating Discrete-Choice Models of Product Differentiation. In: Rand Journal of Economics, 25, S. 242 - 262.
- Beuthe, M. et al. (2001): Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis, in: Transportation Research Part E 37 (2001), S. 263 - 266.
- Böhnke, B. (2005): Modellierung von Parkraumnachfrage und Parkraummanagement-Maßnahmen in einem makroskopischen Verkehrsmodell. Universität Stuttgart. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2357/> (letzter Zugriff 07/2009)
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung:  
[http://www.bbr.bund.de/cln\\_005/nn\\_21360/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html](http://www.bbr.bund.de/cln_005/nn_21360/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html) (letzter Zugriff 06/2009).
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)(2005): Siedlungsstrukturelle Regions- und Kreistypen: Instrumente zum inter- und intraregionalen Vergleich. Veröffentlicht auf CD-ROM: INKAR – Indikatoren und Karten zur Raumentwicklung, Ausgabe 2005, BBR, Bonn.
- BVT (2003): PeTra – Unverbindliche Preisempfehlung Transport. Bundesverband der Transportunternehmen e.V. (Hrsg.)
- BVU & Intraplan Consult (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. München, Freiburg. Gutachten im Auftrag des BMVBS.
- Choo, S.; Mokhtarian, P. (2004): What type of vehicle do people drive? The role of attitude and lifestyle in influencing vehicle type choice. In: Transportation Research Part A, S. 201 - 222.
- Consulting Engineers and Planners (COWI) (2003): Fiscal Measures to Reduce CO2 Emissions from Private Passenger Cars Env.C.1/SER/2002/0029r – Final Report for the European Commission. Directorate General for Environment: Country Calculations; Down to Target; Diesel Sensitivity.
- de Haan, P., Peters, A. (2005): Charakteristika und Beweggründe von Käufern des Toyota Prius 2, Forschungsbericht, Zürich.
- DB AG (2005): Daten & Fakten zum Geschäftsbericht 2005, Deutsche Bahn AG, [http://www.rail.dbschenker.de/site/railion/de/unternehmen/portrait/berichte\\_\\_broschueren/berichte\\_\\_broschueren.html](http://www.rail.dbschenker.de/site/railion/de/unternehmen/portrait/berichte__broschueren/berichte__broschueren.html) (letzter Zugriff 05/2009).
- Deutsche Verkehrszeitung: Nfz-Markt. Der aktuelle Nutzfahrzeuge-Markt der DVZ, div. Jg.

- European Commission (2002): Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Taxation of Passenger Cars in the European Union – options for action at national and Community levels. COM (02) 431 FINAL.
- Hautzinger, H. et al. (2005): Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung. Bericht zum Forschungsprojekt 82.201/2001, Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung – IVT, Heilbronn/Mannheim, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 120, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch-Gladbach.
- Hensher, D. A. (1992): Dimensions of automobile demand. A longitudinal study of household automobile ownership and use. North-Holland, Amsterdam.
- Hertkorn, G. (2004): Mikroskopische Modellierung von zeitabhängiger Verkehrsnachfrage und von Verkehrsflußmustern. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht 2004-29. Köln. [http://elib.dlr.de/21014/01/fb\\_2004-29\\_v2.pdf](http://elib.dlr.de/21014/01/fb_2004-29_v2.pdf) (letzter Zugriff 07/2009)
- IWW, infas (2004): External Costs of Transport – updated study. Karlsruhe/Zürich.
- infas, DIW (2003): Mobilität in Deutschland 2002 – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten. Projekt-Nr. 70.0681/2001, Forschungsprogramm Stadtverkehr des Bundesministeriums Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Endbericht.
- infas, DIW (2004): Mobilität in Deutschland: Ergebnisbericht. Projekt-Nr. 70.0736/2003, Bundesministerium Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- Kraftfahrt-Bundesamt (a): Statistische Mitteilungen. Reihe 1: Fahrzeugneuzulassungen. Neuzulassungen – Besitzumschreibungen – Löschungen – Bestand, div. Jg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (b): Statistische Mitteilungen. Reihe 2: Fahrzeugbestand. Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2005 div. Jg.
- Kraftfahrt-Bundesamt, Bundesamt für Güterverkehr: Statistische Mitteilungen. Reihe 8: Kraftverkehr. Güterkraftverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, div. Jg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2005a): Statistische Mitteilungen, Reihe 8: Kraftverkehr, Güterkraftverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, Stand Dezember 2005.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2005b): Statistische Mitteilungen, Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE), Grenzüberschreitender Verkehr im Jahr 2005, VE 2.
- Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (2002): Fahrzeugdatensatz, Fahrtendatensatz. Daten bezogen bei der Clearingstelle Verkehr unter [www.dlr.de/cs/desktopdefault.aspx/tabid-669/1177\\_read-2160/](http://www.dlr.de/cs/desktopdefault.aspx/tabid-669/1177_read-2160/)
- Kremper, K. (2001): Mehr Verkehr auf die Schiene – MORA C ist eine entscheidende Voraussetzung, Deine Bahn 4/2001.
- lastauto und omnibus: Katalog, div. Jg.
- Lohse, D. (1998): Beschreibung des EVA-Modells. Dresden.
- Lohse, D. et al. (1997): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Heft 5.

- Lohse, D., Schiller, C., Teichert, H., Vrtic, M., Fröhlich, P., Schüssler, N., Axhausen, K. W. (2006a): Ein zweiseitig gekoppeltes Modell zur simultanen Berechnung der Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung: theoretischer Hintergrund und praktische Anwendung für ein nationales Modell der Schweiz. In: Verkehrsforschung-online, Ausgabe 3.
- Lohse, D., Schiller, C., Teichert, H. (2006b): Das Verkehrsnachfragemodell EVA – Simultane Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 4, 2006.
- McKinsey & COMPANY (2004): Hands on the Wheel - What Customers Really Want From the Automotive Industry. Oslo, Berlin.
- Mehlin, M., Nobis, C., Gühnemann, A., Lambrecht, U., Knörr, W., Schade, B. (2003): Flottenverbrauch 2010 – Aktivierung des Reduktionspotenzials und Beitrag zum Klimaschutz. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Forschungsbericht 2003-17, Köln.
- Mehlin, M., Vance, C., Gühnemann, A., Buchheim, S. (2004): Preparation of the 2003 review of the commitment of the car manufacturers to reduce CO<sub>2</sub> emissions from M1 vehicles: Identifying and assessing the reasons for the CO<sub>2</sub> reductions achieved between 1995 and 2003, Study on behalf of the European Commission, DG Environment, Berlin.
- Nachtigall, K. (2006): Netzbasierte Exkurse im Projekt Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Arbeitspapier, TU Dresden.
- Nachtigall, K. (2007): Linienplanung mit LINOP. TU Dresden. [http://www.tu-dresden.de/vkivb/p-vst/offerten/offerte\\_linop.pdf](http://www.tu-dresden.de/vkivb/p-vst/offerten/offerte_linop.pdf) (Letzter Zugriff 8/2009)
- Nevo, A. (2000): A Practitioner's Guide to Estimation of Random-Coefficients Logit Models of Demand. In: Journal of Economics and Management Strategy, Cambridge, Number 4, S. 513 - 548.
- ProgTrans (2007): Schlussbericht Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Projekt-Nr.: 26.0185/2006, Basel.
- PTV AG (2009): VISUM 11.0 Grundlagen. Karlsruhe.
- Öko-Institut, DLR-IVF (2007): „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ (Renewability, FZK 0327546). 1. Zwischenbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin, Darmstadt.
- Öko-Institut, DLR-IVF (2009): „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“ (Renewability, FZK 0327546). Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) – Teil 2: Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse. Berlin, Darmstadt.
- Ortúzar, J. de Dios, Willumsen, L. G. (2006): Modelling Transport. John Wiley & Sons, LTD, 3. Auflage.
- Schürt, A., Spangenberg, M., Pütz, T. (2005): Raumstrukturtypen: Konzept – Ergebnisse - Anwendungsmöglichkeiten – Perspektiven. BBR-Arbeitspapier, Bonn.
- Shell (2009): Shell Pkw-Szenarien bis 2030. Shell (Hrsg.)
- Statistisches Bundesamt (2003): Klassifikation der Wirtschaftszweige (Ausgabe 2003). Wiesbaden.
- TML (2008): FINAL REPORT Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC. Studie im Auftrag der DG TREN/G3/318/2007, Brüssel.

Van Garderen, K. J. (2001): Optimal prediction in loglinear models. In: Journal of Econometrics 104/2001, S. 119 - 140.

VDA (2008): Tatsachen und Zahlen.Broschüre, Frankfurt am Main.

Verkehrsrundschau: Test + Technik, div. Jg.

#### **4.11 Technologiedatenbasis Pkw und LNF (Kapitel 3.2 - 3.3)**

Abernathy/Wayne (1974): Abernathy, W.J., K. Wayne: Limits of Learning Curves, Harvard Business Review September-October 1974

ADAC (2007) Auto-Test Neuwagen, Sommer 2007; Herausgeber: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). München 2007

AEA (2001) AEA Technology Environment; Bates J. et al.: Economic Evaluation of Emissions Reductions in the Transport Sector of the EU – Bottom-up analysis. Abingdon 2001

Argonne (2002) Center for Transportation Research Argonne National Laboratory; Plotkin, S.: Examining the Potential for Voluntary Fuel Economy Standards in the United States and Canada. Argonne 2002

AVL (2004) AVL: Proceedings 16. International AVL Conference Engine & Environment –Downsizing with variable compression ratio – alternative or supplement for hybrid powertrains?. Graz 2004

Bay. LfU (2003) Bayerisches Landesamt für Umweltschutz; Rabl, P.: Informationen über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs. Augsburg 2003

CARB (2004) CARB (California Air Resources Board) Staff Report: Initial Statement of Reasons for proposed rulemaking, public hearing to consider adoption of regulations to control greenhouse gas emissions from motor vehicles. 2004

CONCAWE (2003) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2003

CONCAWE (2006) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2006

CONCAWE (2007) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-wheels report Version 2c, 2007

DLR (2003) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Mehlin, M. et al.: Flottenverbrauch 2010 – Aktivierung des Reduktionspotentials und Beitrag zum Klimaschutz; Berlin, Heidelberg. Karlsruhe 2002

DLR (2006) DLR, WI, IAT, IFEU: Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Im Auftrag des Umweltbundesamtes; Abschluss bevorstehend

Eberle (2000) Eberle, R.: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau (Dissertation). Berlin 2000

- Friedrich (2002) Friedrich, A.: Fuel savings potential from low rolling resistance tires. Workshop on fuel efficient tires. Sacramento 2002
- Ghemawat (1985) Ghemawat, G.: Building Strategy on the Experience Curve. Harvard Business Review March-April 1985
- GM (2002) General Motors, LBST et al.; GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study. 2002
- GM (2005) General Motors, Argonne National Laboratory; Brinkmann, N., Wang, M. et al.: Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions. 2005
- IEA (2004) International Energy Agency; Fulton, L. et al.: SMP Model Documentation and Reference Case Projection. 2004
- IEA (2007) International Energy Agency; C. Tam. D. Gielen: ETP 2008: Demand Side Energy Technology Deployment, Paris 2007
- IFEU (2003a) Institut für Energie- und Umweltforschung; Helms, H. et al.: Energy savings by light-weighting. Heidelberg 2003
- IFEU (2006) Knoerr, W. et al.: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 – 2030. TREMOD (Transport Emission Modell). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Heidelberg 2006
- IFEU (2007) Knoerr, W. et al.: Neuberechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Mail vom 22.03.2007, Daten vom 20.03.2007
- INFRAS (2004) Keller, M.; Zbinden, R. (INFRAS): Luftschadstoff-Emissionen des Straßenverkehrs. Im Auftrag des BUWAL, Bern 2004
- KBA (2006): Kraftfahrt-Bundesamt. Statistische Mitteilungen, Reihe 1: Fahrzeugzulassungen, Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Löschungen, Bestand. Oktober 2006.
- Kolke (2004) Kolke, R.: Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr (Dissertation). Magdeburg 2004
- Koßmehl (1995) Koßmehl, S.-O.: Beurteilung der technischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Berlin 1995
- MIT (2000) Massachusetts Institute of Technology; Malcolm A., et al.: On the road in 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. Boston 2000
- MIT (2003a) Massachusetts Institute of Technology; Weiss, A. et al.: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars. Boston 2003
- MIT (2003b) Massachusetts Institute of Technology; Heywood, J. et al.: The performance of future ICE and fuel cell powered vehicles and their potential fleet impact. Boston 2003
- MIT (2004) Massachusetts Institute of Technology; Bandivadekar, A. Heywood, J.: Coordinated Policy Measures for Reducing the Fuel Consumption of the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Boston 2004
- NRC (2002) National Research Council; Brown, D.: Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards. Washington D.C. 2002



- NRW (2004) Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen; 2. Klimaschutzkongress NRW: Nachhaltige Mobilität – Technische Innovationen für den Klimaschutz im Verkehr. Düsseldorf 2004
- OECD (2005) OECD (Organisation of Economic Cooperation and Development), IEA (International Energy Agency); Making cars more fuel efficient. 2005
- RAND (2003) RAND Europe, Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen Aachen (FKA) et al.; Lu, C. et al.: Preparation of measures to reduce CO<sub>2</sub> emissions from N1 vehicles. Leiden 2003
- Ricardo (2003) Ricardo Consulting Engineers; Owen, N.; Gordon, R.: "Carbon to Hydrogen" Roadmaps for passenger cars: Update of the study for the Department for Transport and the Department of Trade and Industry. Shoreham 2003
- RMI (2004) Rocky Mountain Institute; Lovins, A. et al.: Winning the oil end game. Snowmass Colorado 2004
- SAM & WRI Sustainable Asset Management, World Resources Institute; Austin, D. et al.: The Impact of Climate Change on Competitiveness and Value Creation in the Automotive Industry.
- Samaras (2005) Samaras, Z. et al.: Use of vehicle modelling tools for predicting CO<sub>2</sub> emissions to support policy and decision making – A case study of the EU N1 vehicle legislation framework. In: VKM-THD Mitteilungen 85/I. Graz 2005
- Schubert (2002) Schubert, P.F. et al.: Impact of Ultra-Clean Fischer-Tropsch Diesel Fuel on Emissions in a Light Duty Passenger Car Diesel Engine. SAE technical paper 2002-01-2725, 2002
- SRU (2005) Sachverständigen Rat für Umweltfragen: Umwelt und Straßenverkehr; Hohe Mobilität – Umweltverträglicher Verkehr, Sondergutachten. Berlin 2005
- Stan (2005) Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile, Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York 2005
- TNO (2005) ten Brink, P. (IEEP - Institute for European Environmental Policy) und acht weitere Autoren (IEEP, TNO, CAIR): Endbericht zu "Service contract to carry out economic analysis and business impact assessment of CO<sub>2</sub> emissions reduction measures in the automotive sector". Brüssel 2005
- TNO (2006) Smokers, R. et al. (IEEP - Institute for European Environmental Policy, TNO- Institute for European Environmental Policy, LAT- Laboratory of Applied Thermodynamics): final report "Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars". Brüssel 2006
- UBA (2007) Friedrich, A.: Vortrag im Europäischen Parlament am 31.01.2007 „How to make a clean cars“, Brüssel 2007
- UBA (2007): Telefonat mit H. Jahn, Umweltbundesamt Mai 2007
- Umierski (2004) Umierski, M.: Pkw-Erdgasantriebe für hohe Leistungsdichte und niedrigste Abgasemissionen. Vortrag auf dem Symposium "Gasfahrzeuge - die passende Antwort auf die CO<sub>2</sub>-Herausforderung der Zukunft?". Berlin 2004
- VDI-N (2005) VDI Nachrichten: Hybridauto bietet den Dieseln Paroli. Ausgabe 30 / 2005
- VDI-N (2006) VDI Nachrichten: Dampf lässt Benziner sparsamer laufen. Ausgabe 33 / 2006

Volvo (2001) Volvo Truck Corporation: Environmental product declaration Volvo FH 12 and Volvo FM 12, Euro 3. Göteborg/S 2001

Wallentowitz (1996) Wallentowitz, H. et al.: Kraftstoff-Einsparpotential durch Gewichtsreduzierung und durch Nebenaggregat-Beeinflussung. Simulationsrechnungen und Prüfstandsversuche. In: VDI Bericht 1307. Düsseldorf 1996

## 4.12 Literatur Materialien Pkw (Kapitel 3.2.2)

ADAC (2007) ADAC e.V.: ADAC Special – Auto Kosten 2007 (CD-Rom). München 2007

Auto (2008) Kimberley, W. (Automotive – design & production): Innovations for CO<sub>2</sub>-reduction. London 2008

Auto (2008a) Whitfield, K. (Automotive – design & production) : Can carbon fiber compete ? London 2008.  
<http://www.autofieldguide.com/articles/080407.html>

Baker (1999) Baker, J.A.: Mobile Air Conditioning : HFC-134a Emissions and Emission Reduction Strategies. UNEP TEAP HFC/PFC Task Force, Delphi Automotive Systems, Inc. Lockport, NY (USA). 1999

Beau (2008) Beauchamp, W.: Passenger car aerodynamics [www.recumbents.com/car\\_aerodynamics](http://www.recumbents.com/car_aerodynamics)

Blaw (2004) Blawert, C.: Automotive applications of magnesium and its alloys. 2004

CARB (2007) California Air Resources Board; Kalhammer, F.R. et al.: Status and prospects for zero emissions vehicle technology – Report of the ARB independent expert panel 2007. Sacramento 2007

CAST (2008) Castrol Deutschland: Das richtige Öl für mein Fahrzeug.  
<http://www.castrol.com/castrol/castrolhomepage.do?categoryId=3210> . 2008

Cheah (2007) Cheah, L. et al.: Factor of two: Halving the fuel consumption of new U.S. automobiles by 2035; Massachusetts Institute of Technology – Laboratory for Energy and Environment. 2007

Clark (1999) Clark, J.P.: Fleet-based LCA: Comparative CO<sub>2</sub>-emission burden of aluminium and steel fleets. 1999

CONCAWE (2007) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context; Version 2b & 2c. 2006/07

Daim (2005) Daimler AG: Environmental Certificate Mercedes-Benz S-Class . 2005

Daim (2007) Daimler AG: Environmental Certificate Mercedes-Benz C-Class. 2007

Daim (2008) Daimler AG: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz A-Klasse. 2008

Das (2001) Das, J. et al.: Evaluation of the benefits attributable to automotive lightweight materials – Program research and development projects. 2001

Das (2003) Das, J.: Magnesium for automotive applications: primary production cost assessment. 2003

DTI (2000) U.K. Department of Trade and Industry (2000): The environmental impact of motor manufacturing and disposal of end of life vehicles. London 2000

DeCic (2005) DeCicco, J.M.: Steel and iron technologies for automotive lightweighting. 2005

- DGEnv (2003) Schwarz, W.; Harnisch, J.: Final Report on Establishing the Leakage Rates of Mobile Air Conditioners. Prepared for the European Commission (DG Environment). Frankfurt 2003
- Dhing (2001) Dhinga, R. et al.: Environmental evaluation of materials in new generation vehicles. 2001
- DOE (2002) Warren, C.D.: Low cost carbon fiber production – Lightweight materials. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory. 2002
- Elli (2006) Elliott-Sink, S.: Improving aerodynamics to boost fuel economy. [www.edmunds.com/advice/fueleconomy](http://www.edmunds.com/advice/fueleconomy)
- Gaines (1996) Gaines, L. et al. (1996): Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys
- GHK (2006) GHK international: A study to examine the benefits of the End of Life Vehicles Directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under the ELV Directive. Final Report to DG Environment. Birmingham 2006
- Goede (2005) Goede, M.; Siddappa, P.: Sustainable production technologies of emission reduced light weight car concepts; Public presentation. 2005
- Greencar (2008) Green Car Congress: Ford packaging turbocharging, gasoline direct injection and downsizing as “Eco Boost” engine technology; targeting deployment on 500.000 vehicles annually. 2008
- Heav (2006) Heavenrich, R.M. et al.: Light-duty automotive technology and fuel economy trends: 1957 through 2006; U.S. Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. 2006
- Helms (2006) Helms, H.; Lambrecht, U.: The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption. LCA Case Studies. 2006
- IFEU (2006) Patyk, A. (Institut für Energie und Umwelt GmbH): Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Straßenfahrzeugen. Heidelberg 2006 (unpublished)
- INFRA (2002) INFRAS: Development of a database system for the calculation of indicators of environmental pressure caused by transport – Transport and environment database system (TRENDS); Detailed report 5: waste from road transport. Bern 2002
- IPTS (2005) Christidis, P. et al. (Institute for Prospective Technological Studies): Hybrids for road transport – Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles. Spain 2005
- IPTS (2007) Institute for Prospective Technological Studies: Environmental Improvement of Cars (IMPRO-car) – Reference Report. Seville 2007
- Jean (2000) Jeanneau, M. et al.: The trends of steel products in the European automotive industry. 2000
- JEMA (2005) Weatherhead, T. & Hulse, D. (Jema Associates Ltd.): A study to determine the metallic fraction recovered from end of life vehicles in the UK. Report to the Department of Trade and Industry. 2005
- Katz (2002) Katz, J.: Race car aerodynamics. Robert Bentley, Inc. 2002
- Kelk (2001) Kelkar, A. et al.: Automobile bodies: can aluminium be an economical alternative to steel? 2001

- Kurani (2008) Kurani, K, Burke, A, Axsen, J, Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008; University of California Davis - Institute of Transportation Studies. 2008
- Lucintel (2006) Lucintel: Growth opportunities in carbon fiber market 2006-2011. Lucintel Research Report. 2006
- Motor (2008) van Basshuysen, R. & Schäfer, F.: Motorlexikon. <http://www.motorlexikon.de>. 2008
- Nona (2003) Nonaka, T. et al.: Development of ultra-high-strength cold-rolled steel sheets for automotive use. 2003
- Oeko (2008) Zimmer, W. & Hacker, F. (Öko-Institut e.V.): Lightweighting of passenger cars – weight and fuel reduction potential, material composition and additional costs. Berlin 2008 (unpublished)
- Opel (2002) Opel AG: Nachhaltigkeitsbericht; Teil 3: Öko-Effizienz & Klimaschutz. 2002
- ORNL (2008) Oak Ridge National Laboratory Review: Carbon-Fiber Composites for Cars. [http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v33\\_3\\_00/carbon.htm](http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v33_3_00/carbon.htm). 2008
- ORNL (2006) Oak Ridge National Laboratory: Carbon fiber cars could put U.S. on highway to efficiency. News release. [http://www.ornl.gov/info/press\\_releases/get\\_press\\_release.cfm?releasenummer=mr20060306-00](http://www.ornl.gov/info/press_releases/get_press_release.cfm?releasenummer=mr20060306-00). 2006
- Pehnt (2001) Pehnt, M.: Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. STB-Bericht 24; DLR, Stuttgart 2001
- Perlo (2008) Perlo, P. (Centro Ricerche Fiat): 12<sup>th</sup> International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications. Smart Systems for Automotive Applications (presentation). Berlin 2008
- Schade (2008) Schade, W.: Impact on resource use and emissions of transport by using renewable energy and hydrogen as transport fuel. In: Hartard, S. et al. (Hrsg.): Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte. 2008
- Schwarz (2001) Schwarz, W.: Emission of Refrigerant R-134a from Mobile Air-Conditioning Systems. Öko-Recherche GmbH, Frankfurt. 2001
- Seki (2004) Sekita, T. et al.: Materials and technologies for automotive use. 2004
- Stau (2006) Stauber, R.: Werkstoffe im Automobilbau - Anforderungen und Trends. 2006
- Stodol (1995) Stodolsky, F. et al.: Life-cycle energy savings potential from aluminium-intensive vehicles; Argonne National Laboratory – Transportation Technology R&D Center. 1995
- TNO (2006) Smokers, R. et al. (IEEP - Institute for European Environmental Policy, TNO- Institute for European Environmental Policy, LAT – Laboratory of Applied Thermodynamics): Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars – Final Report. Brüssel 2006
- TNO (2007) Fergusson, M. et al. (IEEP - Institute for European Environmental Policy, TNO- Institute for European Environmental Policy): possible regulatory approaches to reducing CO<sub>2</sub>-emissions from cars. Brüssel 2007
- UBA (2007) Friedrich, A. (Umweltbundesamt): How to reduce car emissions. “Transport and Climate Change” (presentation), Greens/EFA Conference. Brussels 2007

- Umicore (2008) Müller, F. (Umicore AG): PGM-Beladung nach Motorisierung und Fahrzeugschadstoffklassen. Hanau 2008 (personal communication)
- VW (2006) Volkswagen AG: Verwertungsanalysen von Neufahrzeugen. 2006
- VW (2008) Volkswagen AG: Der Golf: Umweltprädikat – Hintergrundbericht. 2008
- VW (2008a) Volkswagen AG: Der Passat: Umweltprädikat – Hintergrundbericht. 2008
- Wall (2006) Wallentowitz, H. et al.: Communication module – mass reduction. Final report; Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Body Department. 2006
- Wall (2007) Wallentowitz, H. et al.: Determination of weight elasticity of fuel economy for conventional ICE vehicles, hybrid vehicles and fuel cell vehicles. Final report; Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Body Department. 2007
- Wata (2006) Watari, H.: Trend of research and development for magnesium alloys – reducing the weight of structural materials in motor vehicles. 2006
- Weiss (2000) Weiss, M.A. et al.: On the road in 2020 – a life-cycle analysis of new automobile technologies; Massachusetts Institute of Technology – Energy Laboratory. 2000

#### **4.13 Technologiedatenbasis Pkw mit elektrischem Antrieb (Kapitel 3.2.4)**

- ABERN (2006) Alliance Bernstein; Raskin, A. et al.: The emergence of hybrid vehicles. New York 2006
- ACPRO (2005) AC Propulsion, Inc.; Cocconi, A. et al.: Connected cars – Battery electrics & plug-in hybrids (Presentation). Seattle 2005
- ARG (1997) Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory; Vyas, A. et al.: Batteries for electric vehicles: Evaluation of future characteristics and costs through a Delphi study. Argonne 1997
- ARG (2000) Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory; Vyas, A. et al.: Comparison of indirect cost multipliers for vehicle manufacturing. Argonne 2000
- ARG (2000a) Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory; Gaines, L. et al.: Costs of lithium-ion batteries for vehicles. Argonne 2000
- ARG (2006) Argonne National Laboratory; Sharer, P. et al.: Vehicle simulation results for plug-in HEV battery requirements. Argonne 2006
- ARG (2008) Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory; Vyas, A. et al.: Plug-in electric vehicles: How does one determine their potential for reducing U.S. oil dependence? Argonne 2008
- BMW (2007) BMW: Expertenworkshop Lithiumbasierte Stromspeichertechnologien für den stationären Einsatz (Präsentation). Bonn 2007
- BURK (2002) Burke, A. et al.: The future of hybrid-electric ICE vehicles and fuels implications. Institute of Transportation Studies, UC Davis. 2002
- CARB (2007) California Air Resources Board; Kalhammer, F.R. et al.: Status and prospects for zero emissions vehicle technology – Report of the ARB independent expert panel 2007. Sacramento 2007

- CONCAWE (2007) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2007
- CONTI (2008) Continental AG; Blome, F.: Präsentation. BMU/BMVBS-Expertenworkshop Elektromobilität – Batterietechnologie. Berlin 2008
- DAIM (2008) Daimler AG: Shaping future transportation. CleanDrive technologies. Auf dem Weg zum emissionsfreien Nutzfahrzeug (Broschüre). 2008.  
[http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/1601420\\_daimler\\_inno\\_2008\\_booklets\\_cleandrivetechnologies\\_en.pdf](http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/1601420_daimler_inno_2008_booklets_cleandrivetechnologies_en.pdf)
- DECI (2001) DeCicco, J. et al.: Technical Options for Improving the Fuel Economy of US Cars and Light Trucks by 2010-2015. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington D.C. 2001
- DHIN (2001) Dhinga, R. et al.: Environmental evaluation of materials in new generation vehicles. Oak Ridge National Laboratory. 2001
- DUV (2002) Electric Power Research Institute (EPRI); Duvall, M.: Plug-in HEV – Benefits and costs (Presentation). 2002
- DUV (2005) Electric Power Research Institute (EPRI); Duvall, M.: Batteries for plug-in hybrid electric vehicles (Presentation). 2005
- ECO (2006) Ecolane Transport Consultancy; Lane, B.: Life cycle assessment of vehicle fuels and technologies. London 2006
- ECOC (2009) EcoCraft Automotive: EcoCarrier. Die Fakten im Überblick (Broschüre). Wunstorf 2009.  
<http://www.ecocraft-automotive.de/16.html>
- EDIS (1999) Southern California Edison; Argueta, J.C.: 1999 Nissan Altra-EV with lithium-ion battery – Performance characterization. 1999
- EEA (2002) Energy and Environmental Analysis, Inc. (EEA): Analysis and Forecast of the Performance and Cost of Conventional and Electric-Hybrid Vehicles. Prepared for the California Energy Commission. 2002
- ENG (2007) Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.; Engel, T.: Plug-in Hybrids – Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Pkw-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen. (Vorabversion) 2007
- EPRI (2001) Electric Power Research Institute (EPRI); Graham, R. et al.: Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options – Final Report. Palo Alto 2001
- EPRI (2007) Electric Power Research Institute (EPRI); Duvall, M.: Environmental Assessment of plug-in hybrid electric vehicles – Volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions. Palo Alto 2006
- FLOTT (2008) Flottenmanagement: Special Nutzfahrzeuge – Für alle unterwegs. Flottenmanagement-Verlag GmbH. Niederkassel 04/2008. [http://www.flotte.de/files/newspapers/2008/4/pdf/073-75\\_Spritspark\\_fm408.pdf](http://www.flotte.de/files/newspapers/2008/4/pdf/073-75_Spritspark_fm408.pdf)
- GAIA (2008) GAIA GmbH; Brandt, K.: Präsentation. BMU/BMVBS-Expertenworkshop Elektromobilität – Batterietechnologie. Berlin 2008

- GEMIS (2007) Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme: THG-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2005 nach GEMIS 4.4 (Juni 2007). <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>
- GREEN (2007) Green Car Congress: DaimlerChrysler includes new 2007 Sprinter in plug-in hybrid program. 2007. <http://www.greencarcongress.com/2007/03/daimlerchrysler.html>
- GREEN (2008) Green Car Congress: FedEx express orders 10 Modec electric vans for use in the UK. 2008. <http://www.greencarcongress.com/2008/12/fedex-express-o.html>
- IEA (2005) International Energy Agency (IEA); Gielen, D. et al.: Prospects for hydrogen and fuel cells. Paris 2005
- IEA (2007) International Energy Agency (IEA); Passier, G. et al.: Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle technology. Final report Phase III, Annex VII. 2007
- IEEE (2007) IEEE Spectrum magazine; Voelcker, J.: Climate change and sustainability – lithium batteries for hybrid cars. 2007
- IEFU (2007) Institut für Energie- und Umweltforschung & Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie; Pehnt, M. et al.: Elektromobilität und erneuerbare Energien. Arbeitspapier Nr. 5 im Rahmen des Projekts „Energiebalance – Optimale Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“. Wuppertal, 2007
- ILEA (2005) Institute for Lifecycle Environmental Assessment; Mazza, P. et al.: Wind-to-wheel energy assessment. Seattle 2005
- IPTS (2005) Christidis, P. et al. (Institute for Prospective Technological Studies): Hybrids for road transport – Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles. Spain 2005
- ITS (2006) Institute of Transportation Studies, University of California; Turrentine, T. et al.: Quantifying the benefits of hybrid vehicles. Davis 2006
- MIT (2000) Massachusetts Institute of Technology; Weiss, M.A. et al.: On the road in 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. Boston 2000
- MIT (2007) Massachusetts Institute of Technology – Laboratory for Energy and the Environment; Kromer, M.A. & Heywood, J.B.: Electric Powertrains -- Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Cambridge 2007
- MOD (2009) MODEC limited: Zero emission vehicles (Broschüre). Coventry 2009. [http://www.modeczech.com/files/Modec\\_Prod\\_Brochure\\_A4\\_UK.pdf](http://www.modeczech.com/files/Modec_Prod_Brochure_A4_UK.pdf)
- MUNT (2007) Engineering Office Muntwyler; Kleindienst-Muntwyler, S.: Deployment of hybrid & electric vehicles (Presentation). 2007
- NREL (2006) National Renewable Energy Laboratory; Gonder, J. et al.: Measuring and reporting fuel economy of plug-in hybrid electric vehicles (Conference paper). Yokohama 2006
- NREL (2006a) National Renewable Energy Laboratory; Simpson, A.: Cost-benefit analysis of plug-in hybrid vehicle technology (Conference paper). Yokohama 2006
- NREL (2007) National Renewable Energy Laboratory; Pesaran, A. et al.: Battery requirements for plug-in HEV – Analysis and rationale. (Presentation) Anaheim, USA 2007



- OPEL (2007) Adam Opel AG; Helmolt, R. v.: E-Flex-Technologie. BMU/BMVBS-Expertenworkshop Elektromobilität – Antriebstechnologie (Präsentation). Berlin 2007
- PLOT (2001) Plotkin, S. et al.: Hybrid Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results. Argonne National Laboratory Report. Argonne 2001
- SANNA (2005) EPRI Journal; Sanna, L.: Driving the solution – the plug-in hybrid vehicle. 2005
- SAUB (2008) Saubere Autos: Mercedes-Benz Sprinter Plug-In Hybrid. Wien 2008. [http://www.saubereautos.at/transport/hybrid/mercedesbenz\\_sprinter\\_plugin\\_hybrid/](http://www.saubereautos.at/transport/hybrid/mercedesbenz_sprinter_plugin_hybrid/)
- SAUB (2008a) Saubere Autos: Fiat Fiorino Electric: Emissionsfrei und alltagstauglich. Wien 2008. [http://www.saubereautos.at/transport/strom/fiat\\_fiorino\\_electric\\_emissionsfrei\\_und\\_alltagstau/](http://www.saubereautos.at/transport/strom/fiat_fiorino_electric_emissionsfrei_und_alltagstau/)
- SAUB (2009) Saubere Autos: Modec: Elektrotransporter aus England. Wien 2008. [http://www.saubereautos.at/transport/strom/modec\\_elektrotransporter\\_aus\\_england/](http://www.saubereautos.at/transport/strom/modec_elektrotransporter_aus_england/)
- SFP (2005) SFP Metals Ltd.; Chavasse, R.: Developments in hybrid vehicles and their potential influence on minor metals. Lisbon 2005
- SONN (2007) Sonnenenergie (9-10/07); Engel, T.: Unter 120 Gramm? Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. München Sept.-Okt./2007
- SONN (2008) Sonnenenergie; Engel, T.: Duracar Quicc! Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.. München Nov.-Dez./2008. [http://www.dgs.de/fileadmin/sonnenenergie/SE-2008-06/SE-2008-06-s26-Duracar\\_Quicc.pdf](http://www.dgs.de/fileadmin/sonnenenergie/SE-2008-06/SE-2008-06-s26-Duracar_Quicc.pdf)
- SUB (2005) Matheys, J. et al.: Sustainable batteries (SUBAT); Work package 5: overall assessment. Final public report. Brüssel 2005
- TNO (2006) Smokers, R. et al. (IEEP - Institute for European Environmental Policy, TNO- Institute for European Environmental Policy, LAT- Laboratory of Applied Thermodynamics): final report "Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO2-emissions from passenger cars". Brüssel 2006
- TOY (2007) Toyota; Wandt, H.P.: Plug In-Hybridfahrzeuge (Präsentation). Expertenworkshop Elektromobilität von BMU und BMVBS. Berlin 2007
- VW (2008) Volkswagen AG; Lehold, J.: Elektrisch unter 40 Gramm? (Präsentation). Veranstaltungsreihe „Mobil im Dialog“. Berlin 2008
- WWF (2008) World Wide Fund for Nature (WWF); Kendall, G.: Plugged in – the end of the oil age. Brussels 2008
- ZSW (2007) Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW); Garche, J.: Antriebsentwicklungen. BMU/BMVBS-Expertenworkshop Elektromobilität – Antriebstechnologie (Präsentation). Berlin 2007

#### 4.14 Technologiedatenbasis Brennstoffzellenfahrzeuge (Kapitel 3.2.5)

- CARB (2007) California Air Resources Board; Kalhammer, F.R. et al.: Status and prospects for zero emissions vehicle technology – Report of the ARB independent expert panel 2007. Sacramento 2007

- CONCAWE (2007) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context; Version 2b & 2c. 2006/07
- IPTS (2005) Christidis, P. et al. (Institute for Prospective Technological Studies): Hybrids for road transport – Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles. Spain 2005
- IEA (2005) International Energy Agency (IEA); Gielen, D. et al.: Prospects for hydrogen and fuel cells. Paris 2005
- MIT (2000) Massachusetts Institute of Technology; Weiss, M.A. et al.: On the road in 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. Boston 2000
- WWF (2008) World Wide Fund for Nature (WWF); Kendall, G.: Plugged in – the end of the oil age. Brussels 2008
- ZSW (2007) Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW); Garche, J.: Antriebsentwicklungen. BMU/BMVBS-Expertenworkshop Elektromobilität – Antriebstechnologie (Präsentation). Berlin 2007

#### 4.15 Technologiedatenbasis Lkw und Busse (Kapitel 3.4)

- ADM (2007) ADM: Neue Abgasnormen und Biodiesel. <http://www.biodiesel.de/index.php3?hid=010136>
- AEA (2001) AEA Technology Environment; Bates J. et al.: Economic Evaluation of Emissions Reductions in the Transport Sector of the EU – Bottom-up analysis. Abingdon 2001
- Argonne (2002) Center for Transportation Research Argonne National Laboratory; Plotkin, S.: Examining the Potential for Voluntary Fuel Economy Standards in the United States and Canada. Argonne 2002
- AUTO (2003) Autosieger Online-Magazin: SCR-Technologie für Euro 4 und Euro 5. 2003. <http://www.autosieger.de/article976.html>
- AutoMotor (2007) AutoMotor: Mercedes Sprinter mit ECO-Start-Funktion erhältlich. Wien 2007. <http://www.auto-motor.at/Auto/Autos-Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/Mercedes-News/Mercedes-Sprinter-ECO-Start.html>
- AVL (2004) AVL: Proceedings 16. International AVL Conference Engine & Environment - Highly-Flexible Classic Powertrain or Hybrid Concept?. Graz 2004
- Bay. LfU (2003) Bayerisches Landesamt für Umweltschutz; Rabl, P.: Informationen über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs. Augsburg 2003
- BMU (2004) BMU: Umweltpolitik – Anspruchsvolle Umweltstandards im ÖPNV-Wettbewerb (Wirtschaftlichkeitsanalyse). Düsseldorf/Berlin 2004
- BMUinfo (2004) BMU: INFO natürlich mobil – Newsletter zum Demonstrationsprojekt “Anspruchsvolle Umweltstandards im ÖPNV-Wettbewerb”. Berlin 2004
- CARB (2004) CARB (California Air Resources Board) Staff Report: Initial Statement of Reasons for proposed rulemaking, public hearing to consider adoption of regulations to control greenhouse gas emissions from motor vehicles. 2004

- CONCAWE (2003) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2003
- CONCAWE (2006) CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. 2006
- DAIMLER (2005) DaimlerChrysler: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse. Stuttgart 2005
- DAIMLER (2006) Daimler AG: Mitsubishi Fuso stellt den saubersten Leicht-Lkw der Welt vor. Pressemitteilung. Tokio 2006. <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7153-49-623456-1-0-0-0-0-0-8-7145-0-0-0-0-0-0-1.html>
- DAIMLER (2007) Daimler AG: Mercedes-Benz Sprinter now Available with ECO-Start. Pressemitteilung. Stuttgart 08/2007. <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7153-1-938331-1-0-0-0-0-0-9293-7165-0-0-0-0-0-0-0.html>
- DAIMLER (2007a) Daimler AG: „Shaping Future Transportation“: Daimler startet weltweite Initiative für umweltfreundlichere Nutzfahrzeuge. Pressemitteilung. Stuttgart 11/2007. <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7145-49-991604-1-0-0-0-0-0-11979-0-0-0-0-0-0-0.html>
- DAIMLER (2007b) Daimler AG: Mercedes-Benz – Preise für den Sprinter. Berlin 2007
- DAIMLER (2007c) Daimler AG: DaimlerChrysler kündigt neuen Mercedes-Benz Hybridbus an. Pressemitteilung. Stuttgart / Helsinki 2007. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-7165-49-862463-1-0-0-0-0-0-8-7145-0-0-0-0-0-0-0.html>
- DLR (2003) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Mehlin, M. et al.: Flottenverbrauch 2010 – Aktivierung des Reduktionspotentials und Beitrag zum Klimaschutz; Berlin, Heidelberg. Karlsruhe 2002
- DLR (2006) DLR, WI, IAT, IFEU: Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Im Auftrag des Umweltbundesamtes; Abschluss bevorstehend
- DVZ (2007) Deutsche Verkehrs-Zeitung: „Gründen wir den Club 30 Prozent“. Nummer 142. 2007
- DVZ (2007a) Deutsche Verkehrs-Zeitung; Domina, R.: „Gas nehmen lohnt sich“. 2007
- DVZ (2008) Deutsche Verkehrs-Zeitung; Wildhage, K.-J.: „Beim Lkw noch viel sparen“. 2008
- Eberle (2000) Eberle, R.: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau (Dissertation). Berlin 2000
- Ebner (2007) Ebner, J.W.: Bericht aus dem Workshop 3: Technologie. 3. ÖPNV Innovationskongress – Mobilitätskonzepte für Bus und Bahn. Freiburg 2007
- EESI (2008) Environmental and Energy Study Institute: Hybrid buses – costs and benefits. Washington 2008. [http://www.eesi.org/publications/Fact %20Sheets/Clean %20Bus %20and %20Health %20Fact %200Sheets/Hybridbusfactsheet final.PDF](http://www.eesi.org/publications/Fact%20Sheets/Clean%20Bus%20and%20Health%20Fact%200Sheets/Hybridbusfactsheet_final.PDF)

- Ellinger (2001) Ellinger, R. et al.: Comparison of CO<sub>2</sub> emission levels for internal combustion engine and fuel cell automotive propulsion systems. Society of Automotive Engineers (SAE) Environmental Sustainability Conference. Graz 2002
- Friedrich (2002) Friedrich, A.: Fuel savings potential from low rolling resistance tires. Workshop on fuel efficient tires. Sacramento 2002
- GM (2002) General Motors, LBST et al.; GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study. 2002
- GM (2005) General Motors, Argonne National Laboratory; Brinkmann, N., Wang, M. et al.: Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions. 2005
- Handelsblatt (2006) Handelsblatt; Steuer, H.: Volvo setzt auf Hybrid-Technik für Nutzfahrzeuge. 10.09.2007.  
[http://www.handelsblatt.com/news/Auto/Nutzfahrzeuge/pv/grid\\_id/1020242/p/302168/t/ft/b/1048815/default.aspx/volvo-setzt-auf-hybrid-technik-fuer-nutzfahrzeuge.html](http://www.handelsblatt.com/news/Auto/Nutzfahrzeuge/pv/grid_id/1020242/p/302168/t/ft/b/1048815/default.aspx/volvo-setzt-auf-hybrid-technik-fuer-nutzfahrzeuge.html)
- Hucho (2005) Hucho, W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils. Vieweg Verlag 2005
- HYBRID (2008) Hybridcenter: Hybrid Watchdog: Hybrid transit buses – are they really green?  
<http://www.hybridcenter.org/hybrid-transit-buses.html>
- IAV (2001) IAV GmbH Berlin; Eggert, E. et al.: Möglichkeiten und Grenzen des automatisierten Schaltgetriebes in Serienfahrzeugen. Berlin 2001
- IEA (2004) International Energy Agency; Fulton, L. et al.: SMP Model Documentation and Reference Case Projection. 2004
- IFEU (2003) Helms, H. et al. (IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung): Energy savings by light-weighting. Heidelberg 2003
- IFEU (2005) Patyk, A. et al. (IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung): Perspektiven eines CO<sub>2</sub>- und emissionsarmen Verkehrs, Arbeitsteil: verkehrsträger und Antriebstechnologien. Im Auftrag des Deutschen Bundestages. Heidelberg 2005
- IFEU (2006) Knoerr, W. et al.: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 – 2030. TREMOD (Transport Emission Modell). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Heidelberg 2006
- IFEU (2006a) Helms, H.; Lambrecht, U. (IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung): The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. Heidelberg 2006
- IFEU (2007) Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Patyk, A.: Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Straßenfahrzeugen. Heidelberg 2007 (unveröffentlicht)
- INFRAS (2002) INFRAS: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport – Detailed Report 5: Waste from Road Transport. Bern 2002
- INFRAS (2004) Keller, M.; Zbinden, R. (INFRAS): Luftschadstoff-Emissionen des Straßenverkehrs. Im Auftrag des BUWAL, Bern 2004

- ITR (2005) Internationale Transport Revue; Melzer, R.J.: Dieselverbrauch deutlich gesenkt. Ausgabe 11/2005. [http://www.itr-online.at/upload/pdf/ITR11\\_05AdBluePraxistest.pdf](http://www.itr-online.at/upload/pdf/ITR11_05AdBluePraxistest.pdf)
- IVECO (2003) IVECO s.p.A.; Ellensohn, R.: Der Dieselantrieb der Zukunft – CO<sub>2</sub>-neutral und schadstofffrei? 1. ÖPNV-Innovationskongress. Freiburg 2003
- IVECO (2007) IVECO s.p.A.; Durelli, E.: IVECO Transport Concept. Workshop on fuel efficiency for HDVs, IEA (International Energy Agency). Paris 2007
- IVECO (2007a) IVECO s.p.A.; Imhoff, M.: Der Neue Daily CNG. Präsentation 2007
- KBA (2007) Kraftfahrt-Bundesamt: Statistische Mitteilungen – Fahrzeugzulassungen (Bestand, Gewichtsklassen, Sitzplätze). Flensburg 2007
- KFZ-ANZEIGER (2006) KFZ-Anzeiger: Preisspiegel für Lkw ab 2,5 t GG. Ausgabe 22. Krefeld 2006. [www.kfz-anzeiger.com](http://www.kfz-anzeiger.com)
- Kolke (2003) Kolke, R. et al.: CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehr. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamts, Umweltbundesamt. Berlin 2003
- Kolke (2004) Kolke, R.: Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr (Dissertation). Magdeburg 2004
- Koßmehl (1995) Koßmehl, S.-O.: Beurteilung der technischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Berlin 1995
- LAST (2001) Lastauto Omnibus; Schadewald, H.: Die Gasmobile. Stuttgart 2001
- LAST (2003) Lastauto Omnibus; Schadewald, H.: Eine Stadt gibt Gas. Stuttgart 2003
- LAST (2005) Lastauto Omnibus; Kern, M.: „Die beste Lösung“. Stuttgart 2005
- LAST (2006) Lastauto Omnibus; Unruh, R.: Blaue Stunde. Stuttgart 2006
- LAST (2007) Lastauto Omnibus-Katalog 2007. Stuttgart 2007
- LOGISTIK (2007) LOGISTIK inside; Würmsen, A.: Ziegelstein auf Rädern. Ausgabe 10/2007. München 2007
- LOGISTIK (2007a) LOGISTIK inside; Grüning, G.: Geldwerter Vorteil. Ausgabe 11/2007. München 2007
- MAN (2004) Berti, A.: Der neue MAN Brennstoffzellenbus – ein weiterer Meilenstein zur Sicherung der Mobilität von morgen. München 2004. <http://www.brennstoffzellenbus.de/bus2004/bsz04-2d.htm>
- MAN (2006) NEOMAN Bus Gruppe: MAN entwickelt Hybridantrieb für Stadtbusse und den Verteilerverkehr. Pressemitteilung. Salzgitter 2006. [http://www.man-mn.de/de/media/Pressemeldungen/show\\_press.jsp?key=86036&lang=de](http://www.man-mn.de/de/media/Pressemeldungen/show_press.jsp?key=86036&lang=de)
- MCS (2007) MCS international GmbH: CNG-Behälter – High-Tech für Speicherung, Transport und Antrieb. Dinslaken 2007. [www.mcs-international-gmbh.de/downloads/mcs\\_cng01\\_ger.pdf](http://www.mcs-international-gmbh.de/downloads/mcs_cng01_ger.pdf)
- MIT (2000) Massachusetts Institute of Technology; Malcolm A., et al.: On the road in 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. Boston 2000
- MIT (2003) Massachusetts Institute of Technology; Weiss, A. et al.: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars. Boston 2003
- MIT (2003a) Massachusetts Institute of Technology; Heywood, J. et al.: The performance of future ICE and fuel cell powered vehicles and their potential fleet impact. Boston 2003

- MIT (2004) Massachusetts Institute of Technology; Bandivadekar, A. Heywood, J.: Coordinated Policy Measures for Reducing the Fuel Consumption of the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Boston 2004
- NRC (2002) National Research Council; Brown, D.: Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards. Washington D.C. 2002
- NRW (2004) Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen; 2. Klimaschutzkongress NRW: Nachhaltige Mobilität – Technische Innovationen für den Klimaschutz im Verkehr. Düsseldorf 2004
- OECD (2005) OECD (Organisation of Economic Cooperation and Development), IEA (International Energy Agency); Making cars more fuel efficient. 2005
- OMNIBUS (2006) Omnibusrevue; Winterflood, B.: Schwere Leichtgewichte. München 2006
- Opel (2002) Opel: Nachhaltigkeitsbericht Teil 3: Öko-Effizienz & Klimaschutz. 2002
- RAND (2003) RAND Europe, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (FKA) et al.; Lu, C. et al.: Preparation of measures to reduce CO<sub>2</sub> emissions from N1 vehicles. Leiden 2003
- Ricardo (2003) Ricardo Consulting Engineers; Owen, N.; Gordon, R.: "Carbon to Hydrogen" Roadmaps for passenger cars: Update of the study for the Department for Transport and the Department of Trade and Industry. Shoreham 2003
- RMI (2004) Rocky Mountain Institute; Lovins, A. et al.: Winning the oil end game. Snowmass Colorado 2004
- SAE (2001) Society of Automotive Engineers; Emmons, J.B. et al.: Ultralight stainless steel urban bus concept. Washington, D.C. 2001
- SAM & WRI Sustainable Asset Management, World Resources Institute; Austin, D. et al.: The Impact of Climate Change on Competitiveness and Value Creation in the Automotive Industry.
- Samaras (2005) Samaras, Z. et al.: Use of vehicle modelling tools for predicting CO<sub>2</sub> emissions to support policy and decision making – A case study of the EU N1 vehicle legislation framework. In: VKM-THD Mitteilungen 85/I. Graz 2005
- SCANIA (2006) SCANIA C.R.; Nordström, P.-E.: Mit welchem Kraftstoff möchten sie fahren? Scania bietet die Technologie. Pressemitteilung 2006
- Schubert (2002) Schubert, P.F. et al.: Impact of Ultra-Clean Fischer-Tropsch Diesel Fuel on Emissions in a Light Duty Passenger Car Diesel Engine. SAE technical paper 2002-01-2725, 2002
- SFMTA (2008) San Francisco Municipal Transportation Agency: MUNI hybrid buses. San Francisco 2008. <http://www.sfmta.com/cms/mfleet/hybrids.htm>
- SRU (2005) Sachverständigen Rat für Umweltfragen: Umwelt und Straßenverkehr; Hohe Mobilität – Umweltverträglicher Verkehr, Sondergutachten. Berlin 2005
- Stan (2005) Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile, Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York 2005
- TEC (2007) TransEnergy Consulting Ltd; Nylund, N.O.: HDV fuel efficiency – Methodology, vehicle performance and potential for fuel savings. Workshop on fuel efficiency for HDVs, IEA (International Energy Agency). Paris 2007



- TNO (2005) ten Brink, P. (TNO - Institute for European Environmental Policy) und acht weitere Autoren (TNO, TNO, CAIR): Endbericht zu "Service contract to carry out economic analysis and business impact assessment of CO<sub>2</sub> emissions reduction measures in the automotive sector". Brüssel 2005
- TNO (2006) Smokers, R. et al. (TNO - Institute for European Environmental Policy, TNO- Institute for European Environmental Policy, LAT- Laboratory of Applied Thermodynamics): Final report "Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars". Brüssel 2006
- TRANSPORTER (2007) Transporter News: Iveco Daily CNG – Transporter mit Erdgasantrieb. 3.07.2007. <http://transporter-news.de/testberichte.php?newsid=18233>
- Tretow (2004) Tretow, H.-J.: Betriebserfahrungen mit Antrieben für Schienen- und Nutzfahrzeuge. Workshop „Heavy Duty Power Systems“. Nürnberg 2004
- UBA (2002) Umweltbundesamt: Lkw und Busse können leiser und kraftstoffsparender fahren. Pressemitteilung. Berlin 2002
- UBA (2003) Umweltbundesamt; Friedrich, A.: Künftige Anforderungen an die Emissionsminderung bei Bussen im internationalen Vergleich. 1. ÖPNV-Innovationskongress. Freiburg 2003
- Umierski (2004) Umierski, M.: Pkw-Erdgasantriebe für hohe Leistungsdichte und niedrigste Abgasemissionen. Vortrag auf dem Symposium "Gasfahrzeuge - die passende Antwort auf die CO<sub>2</sub>-Herausforderung der Zukunft?". Berlin 2004
- USDE (2004) U.S. Department of Energy; McCallen, R. et al.: DOE's effort to reduce truck aerodynamic drag – joint experiments and computations lead to smart design. Portland, Oregon 2004
- USDE (2005) U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy Information Center: Lightweight buses with electric drive improve fuel economy and passenger experience. 2005
- VDI-N (2002) VDI Nachrichten: Automatik schaltet nun auch mittelschwere Lkw. 2002
- VDI-N (2005) VDI Nachrichten: Hybridauto bietet den Dieseln Paroli. Ausgabe 30 / 2005
- VDI-N (2006) VDI Nachrichten: Dampf lässt Benzinler sparsamer laufen. Ausgabe 33 / 2006
- VerkehrsRundschau (2007) VerkehrsRundschau: Rauchfreie Saubermänner. München 01/2007.
- VOLVO (2001) Volvo Truck Corporation: Environmental product declaration Volvo FH 12 and Volvo FM 12, Euro 3. Göteborg/S 2001
- VOLVO (2003) Volvo Truck Corporation: Environmental product declaration Volvo 8500 Low Entry. Göteborg/S 2003
- VOLVO (2006) Volvo, Pressemitteilung: Die Hybridtechnologie steht beim umweltfreundlichen Antrieb von Volvo im Brennpunkt. 15.09.2006. <http://pnt.volvo.com/pntclient/PressRelease.aspx?pubid=2457>
- VTT (2005) VTT Technical Research Centre of Finland; Nylund, N.-O. et al.: Bus emission evaluation – 2002-2004 summary report. Espoo 2005
- VTT (2006) VTT Technical Research Centre of Finland; Nylund, N.-O.: Fuel savings for heavy-duty vehicles „HDEnergy“, Summary report 2003-2005. Espoo 2006
- VTT (2007) VTT Technical Research Centre of Finland; Nylund, N.-O. et al.: Fuel consumption and exhaust emissions of urban buses. Espoo 2007



- VW (2006) VW: Verwertungsanalysen von Neufahrzeugen (Webseite).  
<http://www.volkswagen-umwelt.de/buster/buster.asp?i=content/22684.asp>
- Wallentowitz (1996) Wallentowitz, H. et al.: Kraftstoff-Einsparpotential durch Gewichtsreduzierung und durch Nebenaggregat-Beeinflussung. Simulationsrechnungen und Prüfstandsversuche. In: VDI Bericht 1307. Düsseldorf 1996
- WOOD (2003) Wood, R.M. et al.: Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks. SAE Technical Papers. 2003

#### 4.16 Technologiedatenbasis Übrige Verkehrsträger (Kapitel 3.5)

- Airbus (2003) Westerberger, A.: Cryoplane – Hydrogen Aircraft, H2 Expo at Hamburg, 11. Oktober 2003
- Arthur (2000) Arthur D Little: Study into the Potential Impact of Changes in Technology on the Development of Air Transport in the UK, Cambridge 2000
- Bahnplan (2008) Bahnplan.de – Onlinesimulation für Bahnbetrieb, Online im Internet:  
<[www.bahnplan.de/cms/fahrzeug.php](http://www.bahnplan.de/cms/fahrzeug.php)>
- Bombardier (2007) Öhrn, P.: Eco design of rolling stock, 3<sup>rd</sup> UIC Energy Efficiency Conference, September 2007
- CE (2002) CE: External costs of aviation – Main report. CE Solution for environment, economy and technology, Delft 2002
- DB (2007) Deutsche Bahn AG: Innovationsprogramm Bahn. Interne Präsentation, Berlin 2007
- DLR (2007) DLR: Klimawirkungen des Verkehrs, Köln, September 2007
- Ecoinvent (2004) Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Life Cycle Inventories of Transport Services, ecoinvent report No. 14, ecoinvent v1.1, Dübendorf 2004
- GBD (2007) Greener by Design: Mitigating the Environmental Impact of Aviation - Opportunities and Priorities, London, Juli 2005
- HIRC (2006) Hydrogen Innovation & Research Centre Denmark: The Hydrogen Train, Ringkjøbing County 2006
- IFEU (2006a) Knoerr, W. et al.: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 – 2030. TREMOD (Transport Emission Modell). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Heidelberg 2006
- IFEU (2006b) Helms, H., Lambrecht, U.: The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. In Int J LCA 2006 (OnlineFirst)
- Initiative Bahn NRW (2007) Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Initiative Bahn NRW – Branchennews, Online im Internet:  
[www.initiativebahn.nrw.de/cms/front\\_content.php?idcat=9](http://www.initiativebahn.nrw.de/cms/front_content.php?idcat=9). 2007
- Kemp (2005) Kemp, R.: Hydrogen offers no alternative to main line electrification, Railway Gazette International, 2005, Nr. 8, S. 493-395
- Lufthansa (2007) Lufthansa: Balance – Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa, Ausgabe 2007, Online im Internet: <[konzern.lufthansa.com/de/downloads/presse/downloads/publikationen/lh\\_nachhaltigkeitsbericht\\_2007.pdf](http://konzern.lufthansa.com/de/downloads/presse/downloads/publikationen/lh_nachhaltigkeitsbericht_2007.pdf)>

- MTU (2002) Scheugenpflug, H. et al.: Erfüllung zukünftiger Umweltanforderungen durch den Einsatz eines Wärmeaustauschtriebwerkes; München 2002
- MTU (2007a) Bauhaus Luftfahrt e. V.: Beitrag zur MTU-Pressekonferenz, München, 18. Juli 2007
- MTU (2007b) Martens, R.: Das Technologieprogramm CLAIRE der MTU Aero Engines, Pressegespräche am 18. Juli 2007
- New Logistics (2007) New Logistics: Stellungnahme zum Artikel „Der FUTURA CARRIER – Flop oder Top“ im Magazin Binnenschifffahrt Ausgabe Nr. 4/2007/April von Herrn Dipl.-Ing. Volker Renner; Online im Internet: <[www.new-logistics.de/new-logistics/pdf/stellungnahme\\_futura\\_carrier.pdf](http://www.new-logistics.de/new-logistics/pdf/stellungnahme_futura_carrier.pdf)>
- Siemens (2007) Siemens InnovationNews: Revolutionärer Zugantrieb spart Energie und Platz, Reference Number: IN 2007.12.1d, München 2007
- Stratus (2002) Stratus Consulting: Controlling Carbon Dioxide Emissions from the Aviation Sector. Prepared for the Federal Environmental Agency (UBA) of Germany, prepared by Henderson, J./Ries, H., Boulder
- TMG (2007) Wardrop, A.: Freightmiser – Improving fuel efficiency on long haul freight trains with driver advice system, 3<sup>rd</sup> UIC Energy Efficiency Conference, September 2007
- UIC (2005) Internationaler Eisenbahnverband: Database for energy efficiency technologies and related projects for railways. Internet: <[www.railway-energy.org](http://www.railway-energy.org)>
- UIC (2006) Nutzung neuer Energien im Eisenbahnsektor, Bibliografie, Paris 2006
- VBD (2004) Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschifffahrt: Technische und wirtschaftliche Konzepte für Flussangepasste Binnenschiffe, Duisburg, Juli 2004

#### 4.17 Energieträger- und Kraftstoffvorketten (Kapitel 3.6 – 3.8)

- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) 2005: Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland – Stand November 2005; Berlin/Köln ([www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de))
- Dam, Jinke van (2009): Sustainability of bioenergy chains: the result is in the details; dissertation, Utrecht University <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2009-0504-200337/dam.pdf>
- DBFZ (2009) (Deutsches BiomasseForschungsZentrum): Ökonomische und ökologische Bewertung von Erdgassubstituten aus nachwachsenden Rohstoffen; Endbericht für FNR; Leipzig 2009 [http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf\\_387-3320002\\_dbfz\\_endbericht\\_biomethan\\_nawaro\\_2009.pdf](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_387-3320002_dbfz_endbericht_biomethan_nawaro_2009.pdf)
- EEA (2006) (European Environment Agency): How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA Report No 7/2006; Copenhagen 2006 [http://reports.eea.europa.eu/eea\\_report\\_2006\\_7/en/eea\\_report\\_7\\_2006.pdf](http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2006_7/en/eea_report_7_2006.pdf)
- EEA (2007) (European Environment Agency): Estimating the environmentally compatible bio-energy potential from agriculture; EEA Technical Report 12/2007, Copenhagen 2007 [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2007\\_12/en/Estimating\\_the\\_environmentally\\_compatible\\_bio-energy\\_potential\\_from\\_agriculture.pdf](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_12/en/Estimating_the_environmentally_compatible_bio-energy_potential_from_agriculture.pdf)
- EEA (2008) (European Environment Agency): Maximising the environmental benefits of Europe's bioenergy potential; EEA Report No 10/2008; Copenhagen 2008 [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2008\\_10/en/Bioenergy\\_Potential.pdf](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2008_10/en/Bioenergy_Potential.pdf)

- EU (2009) (European Council and European Parliament): Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC; Official Journal of the EU, June 5, 2009 L 140 pages 16-62, 2009 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>
- EWI (2006) (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln)/prognos (Prognos AG): Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage. Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030; im Auftrag des BMWi, Berlin; Köln/Basel 2006
- Fritsche, Uwe R./Wiegmann, Kirsten (2008): Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen; Expertise des Öko-Instituts zum WBGU-Gutachten 2008; Darmstadt/Berlin [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2008\\_ex04.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex04.pdf)
- GBEP (2009) (Global Bioenergy Partnership): Summary of the GBEP Workshop on Indirect Land Use Change: Status of and Perspectives on Science-Based Policies; held on May 15, 2009 in New York [http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user\\_upload/gbep/docs/2009\\_events/Workshop\\_ILUC\\_N\\_Y\\_15May\\_2009/GBEP\\_iLUC\\_workshop\\_-\\_Summary.pdf](http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2009_events/Workshop_ILUC_N_Y_15May_2009/GBEP_iLUC_workshop_-_Summary.pdf)
- Nitsch, Joachim/DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)(2008): Leitstudie 2008 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ - Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050; Untersuchung im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Stuttgart 2008 <http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf>
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; Verbundprojekt gefördert vom BMU; Darmstadt 2004 u.a. [www.oeko.de/service/bio](http://www.oeko.de/service/bio)
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2007): Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten; Kurzbericht i.A. des BGW; Darmstadt [http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/gemis44thg\\_emissionen\\_fossil.pdf](http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/gemis44thg_emissionen_fossil.pdf)
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2008): Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme; U.Fritsche/L.Rausch, Endbericht zum F&E-Vorhaben FKZ 360 16 008 i.A. des UBA; Darmstadt <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3476.pdf>
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2008b): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.5; Internet-release auf [www.gemis.de](http://www.gemis.de) (November)
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2009): Life Cycle Analysis of GHG and Air Pollutant Emissions from Renewable and Conventional Electricity, Heating, and Transport Fuel Options in the EU until 2030; updated Report for the European Environment Agency (EEA); U.Fritsche/L.Rausch; Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) (2009b): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.6; Internet-release auf [www.gemis.de](http://www.gemis.de) (Dezember)
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.)/DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt – Institut für Verkehrsforschung) (2008): 2. Zwischenbericht zu RENEWABILITY; Verbundprojekt gefördert vom BMU; Berlin 2008 [www.Renewability.de](http://www.Renewability.de)

- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.)/IZES (Institut für Zukunfts-EnergieSysteme) (2007): Umwelteffekte der Strom- und Wärmebereitstellung sowie Kraftstoffnutzung: Zeitreihen von 1990 bis 2004; Schlussfassung des Endberichts i.A. des ZSW für die AGEESat; Darmstadt/Saarbrücken
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.)/STE (Forschungszentrum Jülich - Institut für Energieforschung - Systemforschung und Technologische Entwicklung)/DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung)/ISI (Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung) (2008): Politikszenerarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030; Forschungsbericht 205 46 434 UBA-FB 001097, UBA-Bericht Climate Change 1/08; Berlin 2008  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3361.pdf>
- Searchinger, Timothy et al. (2008): Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change; in: Science vol. 319, p.1238-1240, 2008  
[www.sciencexpress.org;10.1126/science.1151861](http://www.sciencexpress.org;10.1126/science.1151861)
- Searchinger, Timothy (2009): Evaluating Biofuels - The Consequences of Using Land to Make Fuel; Brussels Forum Paper Series of the German Marshall Fund of the United States, Washington DC 2009 [http://www.gmfus.org/template/download.cfm?document=/doc/Biofuels\\_final.pdf](http://www.gmfus.org/template/download.cfm?document=/doc/Biofuels_final.pdf)
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen) (2008): Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung; Jahresgutachten 2008; Berlin  
[http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2008\\_vorab.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_vorab.pdf)

## 5 Anhang

### 5.1 Anhang 1: Wirtschaftsverkehrsklassen

In den Teilmodellen II und III wurden die folgenden Wirtschaftsverkehrsklassen (WVK) simuliert:

Branche	Fahrzeug- klassen	WVK
AF	Lkw 7.5	1
	Lkw 12	2
	Lkw 40	3
	SZM	4
GH	Lkw 7.5	5
	Lkw 12	6
	Lkw 40	7
	SZM	8
I	Lkw 7.5	9
	Lkw 12	10
	Lkw 40	11
	SZM	12
JQE	Lkw 7.5	13
	Lkw 40	14
	Lkw 12	15
	SZM	16

Im Teilmodell I der LNfz 3.5 wurden folgende Wirtschaftsverkehrsklassen (WVK) simuliert

Branche	Fahrzeug- klasse	WVK
A,B	LNf 3.5	1
C	LNf 3.5	2
D	LNf 3.5	3
F	LNf 3.5	4
G	LNf 3.5	5
H	LNf 3.5	6
I	LNf 3.5	7
J-Q,E	LNf 3.5	8

Bezeichnungen der Lkw-Fahrzeugklassen

leichte Nutzfahrzeuge (<3,5 t zGG),	LNf 3.5
leichte Lkw (≥3,5 - <7,5 t zGG),	Lkw 7.5
nicht mautpflichtige schwere Lkw (≥7,5 - <12 t zGG)	Lkw 12
schwere Lkw (≥ 12 t zGG)	Lkw 40
Sattelzugmaschinen	SZM/GLZ

Branchenbezeichnung gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige (Ausgabe 2003) des Statistischen Bundesamtes:

- Abschnitt A – Land- und Forstwirtschaft
- Abschnitt B – Fischerei und Fischzucht
- Abschnitt C – Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden
- Abschnitt D – Verarbeitendes Gewerbe
- Abschnitt E – Energie- und Wasserversorgung
- Abschnitt F – Baugewerbe
- Abschnitt G – Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen und Gebrauchsgütern
- Abschnitt H – Gastgewerbe
- Abschnitt I – Verkehr und Nachrichtenübermittlung
- Abschnitt J – Kredit- und Versicherungsgewerbe
- Abschnitt K – Grundstücks- und Wohnungswesen, Vermietung beweglicher Sachen, Erbringung von wirtschaftlichen Dienstleistungen, anderweitig nicht bekannt
- Abschnitt L – Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung

Abschnitt M – Erziehung und Unterricht

Abschnitt N – Gesundheit-, Veterinär- und Sozialwesen

Abschnitt O – Erbringung von sonstigen öffentlichen und privaten Dienstleistungen

Abschnitt P – Private Haushalte mit Hauspersonal

Abschnitt Q – Exterritoriale Organisationen und Körperschaften



## 5.2 Anhang 2: Vorkettendaten zu LNG, H<sub>2</sub> und synthetischem Rohöl

Dokumentation erstellt von Dr. Andreas Patyk, Heidelberg, März 2008

Die vorliegende Dokumentation wurde vom Öko-Institut e.V., beauftragt, um im Rahmen des BMU-geförderten Projekts Renewbility eine aktualisierte Zusammenstellung von Stoffstrom- und Kostendaten zu den Prozessketten LNG-Bereitstellung, Bereitstellung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff und Ölsandförderung und -aufbereitung auf der Basis von Literaturdaten abzuleiten.

Folgende Arbeiten und Rahmenbedingungen wurden vereinbart:

Datenrecherchen zu Energie- und Stoffeinsätzen, Umwandlungseffizienzen sowie direkte Verluste und Emissionen (Treibhausgase, Luftschadstoffe, fest Reststoffe), Flächenbedarfe und Materialvorleistungen (für Herstellung von Anlagen, insb. Aluminium, Glas, Kupfer, Stahl, Zement) sowie Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten) und Personaleinsatz (Personen je Anlage) für die folgenden Themenbereiche:

- LNG-Herstellung (Prozessstufen Verflüssigung, Schiffstransport, Terminal)
- H<sub>2</sub>-Herstellung (Prozessstufen Elektrolyse dezentral und zentral, Verflüssigung, Schiffstransport für LH<sub>2</sub>, Pipelinetransport für GH<sub>2</sub>),
- "Synthetisches Rohöl" (Prozessstufen Ölsand-Gewinnung und -Erstverarbeitung vor Raffinerie)

Diese Daten sind für die Zeithorizonte 2005, 2020 und 2030 unter Berücksichtigung technologischer Lerneffekte zu ermitteln.

Der Bericht enthält die Beschreibung der untersuchten Systeme und der Datengenerierung<sup>37</sup>.

Der Bericht ist in drei Kapitel gegliedert, je eines zu jeder Kette. Jedes Kapitel enthält zwei Abschnitte, die eine kurze Beschreibung der Technik und der Datengenerierung (Datenquellen, Annahmen und daraus abgeleitete Daten) enthalten.

Datenqualität: Bei allen Daten handelt es sich um Schätzungen. Die Belastbarkeit der Daten für zukünftige Bezugsjahre ist naturgemäß niedriger als die der Daten für 2005. Unabhängig vom Bezugsjahr und der Generierungsart im Einzelfall nimmt die Belastbarkeit der Daten in folgender Reihenfolge zu:

Kosten < nicht energieverbrauchsabhängige Emissionen < Materialeinsatz < energieverbrauchsabhängige Emissionen < Energieverbrauch

---

<sup>37</sup> Die Daten sind in einer Excel-Datei zusammengefasst.

### **5.2.1 LNG-Bereitstellung - Verflüssigung, Schiffstransport, Terminal**

Für Europa spielt Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas, LNG) zurzeit insofern eine Rolle als algerisches Erdgas zu großen Teilen als LNG transportiert wird.

Der für LNG spezifische Teil der Erdgaskette besteht aus den Schritten Erdgasverflüssigung, Lagerung und Umschlag (Ladeterminal), Transport, Umschlag und Verdampfung (Entladeterminal).

Ausschließlich diese Prozesse werden hier behandelt.

#### **Technik**

Die Darstellung folgt im Wesentlichen [ecoinvent 2003].

#### **Erdgasverflüssigung**

Erdgas wird unter Normaldruck bei etwa  $-161^{\circ}\text{C}$  flüssig; die Dichte beträgt etwa das 600-Fache der Dichte in gasförmigem Zustand. Die Verflüssigung erfolgt mit elektrisch betriebenen Anlagen nach dem Linde-Verfahren durch eine Folge von Kompressions/Expansionszyklen. Der Strom stammt typischerweise aus Anlagen-internen Gaskraftwerken.

#### **Lagerung und Umschlag**

Das LNG wird, meist nur wenige Tage, in Speichern mit bis zu 200.000 m<sup>3</sup> Inhalt zwischengelagert. Die Speicher bestehen aus druckfesten Innentanks aus Aluminium oder Nickelstahl, Isolierschichten aus Mineralwolle oder Styropor und Hüllen aus Stahl oder Beton. Das LNG wird mit elektrischen Pumpen in die Tanker gefördert.

#### **Transport**

Der Transport erfolgt mit Dampfturbinen-betriebenen Tankschiffen, die entweder mit selbsttragenden Kugeltanks oder mit Membrantanks ausgestattet sind, und eine Kapazität von bis zu 135.000 m<sup>3</sup> haben. Kugeltanks mit einem Durchmesser bis über 40 m und einem Volumen von etwa 34.000 m<sup>3</sup> werden aus Aluminium gefertigt; die Wanddicke beträgt 4 bis 7 cm, am "Tankäquator" bis zu 20 cm.

Membrantanks werden aus dünnen Nickelstahlblechen (etwa 0,7 mm; Invar, 36% Ni) hergestellt. Zur Wärmedämmung wird Perlit (fixiert in Sperrholzkästen) eingesetzt.

Um ein Aufwärmen der Tanks zu vermeiden wird die LNG-Ladung nicht vollständig gelöscht. Das verdampfende Erdgas wird in den Schiffsfeuerungen genutzt.

#### **Entladung und Verdampfung**

Am Entladeterminal wird das LNG mit elektrischen Pumpen gelöscht, auf Pipelinedruck gebracht und auf diesem Druck verdampft. Die notwendige Wärme wird typischerweise durch Meerwasser geliefert; für Spitzenlastverdampfer wird auch mit Erdgas geheizt.

## Datengenerierung

Die wesentlichen Quellen für diese Auswertung sind [ecoinvent 2003] und [concade 2006].

[ecoinvent 2003] ist der Erdgas-Bericht zur LCI-Datenbank ecoinvent1.2. ecoinvent ist eine umfangreiche Sammlung von In- und Outputdaten (Energie, Werkstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe, Abfälle, Emissionen in Luft und Wasser) zu einer Vielzahl von Prozessen inkl. Infrastruktur/Kapitalgüter. Von den Autoren angegebener Anwendungsschwerpunkt sollen Energiesysteme sein. Bezugszeitraum ist die erste Hälfte des gegenwärtigen Jahrzehnts.

[concade 2006] ist der Bericht eines Gemeinschaftsprojekts von Auto- und Mineralölindustrie und EU-Kommission zum Thema Verbrauch, Kosten und GHG-Emissionen zukünftiger Pkw-Antriebe und Kraftstoffe.

Als Bezugszeitraum wird 2010 bis 2020 angegeben. Anzumerken ist, dass die Terminologie in der hier zugrunde gelegten Tabelle in WTT Appendix 1 (S. 24) nicht ganz einheitlich und teilweise unklar ist.

Im Folgenden werden Literaturinformationen differenziert nach Prozessen und Datenkategorien zusammengestellt und Rechenwerte als Inputs für probas/gemis abgeleitet.

Da für wesentliche Datenkategorien die Verflüssigung deutlich wichtiger ist als Lagerung und Umschlag werden die drei Schritte zusammengefasst.

## Erdgasverflüssigung, Lagerung und Umschlag

Wichtige Literaturdaten zu den drei Prozessen und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 94 zusammengefasst. Wie erwähnt, ist die Verflüssigung der energetisch dominierende Prozess.

In [concade 2006] werden auch Angaben zum Umschlag gemacht, die allerdings nicht klar abgegrenzt sind. Tabelle 94 weist daher nur die aggregierten Werte aus.

## Erläuterungen

**Strombereitstellung:** Der Strombezug erfolgt bei [ecoinvent 2003] aus Gasmotorkraftwerken, bei [concade 2006] aus GuD-Kraftwerken.

Für die Rechenwerte wird GuD angesetzt.

**Energieverbrauch:** Der Verbrauch ist gemäß [ecoinvent 2003] etwa doppelt so hoch wie nach [concade 2006].

Die Rechenwerte orientieren sich wie folgt an den beiden Quellen: 2005: [ecoinvent 2003]; 2020: [concade 2006]; 2030: Energie leicht reduziert gegen 2020.

**Verluste / CH<sub>4</sub>- und NMHC-Emissionen:** In Umkehrung der Verhältnisse beim Energieverbrauch betragen die CH<sub>4</sub>-(bzw. HC)-Emissionen nach [ecoinvent 2003] nur etwa ein Achtel derjenigen nach [concade 2006].

Die Rechenwerte orientieren sich wie folgt an den beiden Quellen: 2005 [concauwe 2006]; 2020: Mittelwert [ecoinvent 2003] und [concauwe 2006]; 2030: [ecoinvent 2003]. Die Aufteilung auf CH<sub>4</sub> und NMHC erfolgt gemäß [ecoinvent 2003].

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** Die Emission der Stromerzeugung werden durch Verknüpfung in probas/gemis berechnet. [ecoinvent 2003] gibt ergänzend Hg-Emissionen an.

Die Hg-Emissionen werden hier aus [ecoinvent 2003] als Relationen zum insgesamt verbrauchten Erdgas abgeleitet.

Die Daten sind sehr unsicher, da keine belastbaren Hg-Gehalte vorliegen.

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** keine

**Flächenbedarf:** Der Flächenbedarf wird aus [ecoinvent 2003] abgeschätzt. Zwar ist der Verweis im LNG-Abschnitt auf Trocknungsanlagen als Orientierung für Verflüssigungsanlagen ([ecoinvent 2003]: "2 x Trocknung") nicht nachvollziehbar, da für Trocknungsanlagen keine separaten Werte ausgewiesen werden.

Für vollständige Erdgasproduktionsanlagen (ohne LNG) werden jedoch Daten aus verschiedenen Quellen angegeben (u.a. [Fritsche et al. 1989] 0,0003, [DOE 1983] 0,0001 m<sup>2</sup> a / m<sup>3</sup>).

Der Rechenwert in [ecoinvent 2003] beträgt 5E-6 m<sup>2</sup> / m<sup>3</sup>, d.h. etwa 1E-7 m<sup>2</sup> / MJ. Als grobe Schätzung wird hier für LNG-Anlagen ein Viertel dieser Fläche angesetzt. Aufgrund der wahrscheinlich geringen, in jedem Fall aber schwierig einzuschätzenden Repräsentativität der Basisdaten und der relativ willkürlichen Annahmen hier ist der Wert sehr unsicher.

Eine Anpassung an verschiedene Bezugsjahre ist damit nicht sinnvoll.

**Materialvorleistungen:** Basierend auf verschiedenen Literaturangaben wird in [ecoinvent 2003] Für vollständige Erdgasproduktionsanlagen ein Wert für Stahl von etwa 1E-3 kg / m<sup>3</sup>, d.h. etwa 3E-5 kg / MJ angegeben.

Hier wird ein Viertel des Wertes angesetzt. Zusätzlich wird ein Betoneinsatz von 10% des Stahlinputs angenommen. Bewertung und Fortschreibung siehe Flächenbedarf.

## Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten)

**Investitionskosten:** Für eine im Bau befindliche Offshore-Anlage (Förderung, Aufbereitung, Verflüssigung, Umschlag) in der Nordsee liegen Informationen zu Investitionskosten vor [enro-portal 2005]: Gesamtkosten: 2,5 Mrd. Euro, davon Verflüssigung 0,8 Mrd. Euro.

Die Abgrenzung der Verflüssigung ist allerdings nicht ganz klar (etwa mit / ohne Stromerzeugung). Die Formulierung in der Quelle ("durch die Bücher von Linde fließen") lässt allerdings eher vermuten, dass lediglich der Kälteteil erfasst ist. Mit einer Lebensdauer von 30 Jahre und einer jährlichen Förderung von 6 Mrd. m<sup>3</sup> ergeben sich Investitionskosten von etwa 0,01 Cent / MJ.

Kostenentwicklungen werden häufig mit Lernkurven abgeschätzt. Der Lernfaktor, dessen Differenz zu 1 die Kostenreduktion bei Verdopplung der kumulierten Produktion angibt (bei  $f = 0,9$  sinken die Kosten also um 10%), liegt bei zahlreichen Anlagen und Geräten (Motoren, Gasturbinen, Haushaltsgeräte, Elektronik) zwischen 0,75 (relativ frühes Stadium der Produktion) und über 0,9 (ausgereift).

Da hier zur Datengenerierung keine Szenarien erstellt werden, werden Kostenreduktionen nicht berechnet sondern abgeschätzt.

Die Gasverflüssigung ist keine neue Technologie, Lerneffekte werden daher eher klein angesetzt: bis 2020 -10%, bis 2030 -15% bezogen auf 2005.

**Betriebskosten:** Es liegen keine Daten vor. In erster Näherung können sie aus dem Energieverbrauch und dem Personaleinsatz abgeschätzt werden.

Für die Energiekosten wird der Einfuhrpreis von Erdgas nach [BMWi 2007] angesetzt, für den Personalstundensatz der Wert nach [StatBA 2007] für den Sektor Energie- und Wasserversorgung.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Hierzu liegen keine direkten Informationen vor. Eine Abschätzung kann über den Personaleinsatz in anderen Energiewandlungsanlagen erfolgen.

Werte für Förderanlagen, Kraftwerke oder Raffinerien bzw. die gesamten Branchen sind allerdings anhand von groben Schätzungen wegen der deutlich größeren Komplexität der entsprechenden Systeme im Vergleich zu LNG-Anlagen deutlich zu reduzieren.

Ein Näherungswert wird hier aus [Erdöl Erdgas 2006] abgeschätzt: Aus der Erdgas- und Erdölförderung deutscher Firmen im In- und Ausland, der Beschäftigtenzahl und Annahmen zur jährlichen Arbeitszeit kann der spezifische Personaleinsatz von Förderung und Aufbereitung ohne Unterscheidung von Erdgas und Erdöl abgeschätzt werden.

Der Personaleinsatz zur Verflüssigung wird auf 10% dieses Wertes geschätzt.

Es erfolgt keine Differenzierung nach Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).

Tabelle 94: Prozessdaten Erdgasverflüssigung, Lagerung und Umschlag

Quelle:		ecoinvent	concawe	Rechenwerte		
Bezug:		um 2005	2010/20	2005	2020	2030
<b>INPUT</b>						
<b>Infrastruktur</b>						
Stahl	kg	6,793E-06	-	6,793E-06	6,793E-06	6,793E-06
Beton	kg	6,793E-07	-	6,793E-07	6,793E-07	6,793E-07
Fläche	m2	1,359E-07	-	1,359E-07	1,359E-07	1,359E-07
<b>Energieträger</b>						
Strom (GuD)	MJ	-	0,0367	0,0825	0,0385	0,033
EG (GuD-Strom)	MJ	-	0,0667277	0,15	0,07	0,06
EG (Gasmotor)	MJ	0,1567935	-	-	-	-
EG (sonstige Zwecke)	MJ	-	0,01	-	-	-
EG (Emissionen)	MJ	0,0005155	0,0042	0,004	0,002	0,0005
EG (LNG)	MJ	1	1	1	1	1
<b>EG (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1,157309</b>	<b>1,0809277</b>	<b>1,154</b>	<b>1,072</b>	<b>1,0605</b>
Investitionen	Euro	-	-	0,0001208	0,0001087	0,0001027
Investitionskosten	Euro	-	-	0,0002095	0,0001886	0,0001781
Betriebskosten	Euro	-	-	0,0005834	0,0002854	0,0002437
Personaleinsatz	h	-	-	5,76E-07	5,76E-07	5,76E-07
<b>OUTPUT</b>						
LNG	MJ	1	1	1	1	1
Wirkungsgrad						
nur Verluste		99,9%	99,6%	99,6%	99,8%	100,0%
inkl. Hilfsenergien		86,4%	92,5%	86,7%	93,3%	94,3%
<b>Emissionen</b>						
CH4	g	0,0088859	0,0839832	0,068948	0,034474	0,0086185
NMHC	g	0,0016166	-	0,0125435	0,0062717	0,0015679
Hu (CH4 + NMHC)	MJ	0,0005155	0,0042	0,004	0,002	0,0005
Hg	g	1,4E-10	-	1,33E-10	6,219E-11	5,225E-11

## Transport

Wichtige Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 95 zusammengefasst.

## Erläuterungen

**Energieverbrauch:** In [ecoinvent 2003] und [concawe 2006] werden sehr ähnliche Verbräuche an Erdgas (aus der Verdampfung) angegeben, in [concawe 2006] wird allerdings außerdem ein etwas geringerer zusätzlicher Schwerölverbrauch ausgewiesen. Wegen der besseren Dokumentation wird mit [ecoinvent 2003] angenommen, dass nur Erdgas verfeuert wird.

Der [ecoinvent 2003]-Wert wird für alle Bezugsjahre übernommen. Der [ecoinvent 2003]-Wert bezieht sich auf einen Frachter, da die Dimensionierung dieser Schiffe zumindest für den Transport im Mittelmeer realistischer ist als die von Öltankern.

**Verluste / CH<sub>4</sub>-Emissionen:** Die Emissionen nach [ecoinvent 2003] sind etwa halb so hoch wie die nach [concawe 2006]. Der [ecoinvent 2003]-Wert wird für alle Bezugsjahre übernommen.

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** Vorschlag: Verknüpfung des Erdgasverbrauchs in probas/gemis mit Erdgasfeuerung

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** keine

**Flächenbedarf:** Abschätzung aus der Tankerkapazität und den Annahmen Dichte = 1, Länge = 5 x Höhe und Höhe = Breite.

**Materialvorleistungen:** In [ecoinvent 2003] werden Daten für Stahl, Kupfer, Farbe und LDPE angegeben, die hier für alle Bezugsjahre übernommen werden (Farbe und LDPE werden zu Kunststoff zusammengefasst).

## Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten)

**Investitionskosten:** Die Kosten werden aus [Wiki\_Tanker 2007] (Obergrenze Kapazität, typische Investitionskosten) und [ecoinvent 2003] (Lebensdauer, Auslastung) abgeschätzt. Es erfolgt keine Differenzierung nach Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).

**Betriebskosten:** Es liegen keine Daten vor. In erster Näherung können sie aus dem Energieverbrauch und dem Personaleinsatz abgeschätzt werden. Weitere Basisdaten siehe Verflüssigung.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** In [Wiki\_Tanker 2007] wird für Öltanker eine Mannschaftsgröße von 30 bis 40 Personen angegeben. Ein Rechenwert von 35 Personen wird mit der LNG-Tankerkapazität (obere Grenze) nach [Wiki\_Tanker 2007] auf einen MJkm LNG abgeschrieben. Es erfolgt keine Differenzierung nach Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).



Tabelle 95: Prozessdaten LNG-Transport

Quelle:		ecoinvent	concaawe	Rechenwerte		
Bezug:		um 2005	2010/20	2005	2020	2030
<b>INPUT</b>						
<b>Infrastruktur</b>						
Stahl	kg	4,076E-09	-	4,076E-09	4,076E-09	4,076E-09
Kupfer	kg	4,076E-12	-	4,076E-12	4,076E-12	4,076E-12
Kunststoff	kg	6,832E-12	-	6,832E-12	6,832E-12	6,832E-12
Fläche	m <sup>2</sup>	1,153E-12	-	1,153E-12	1,153E-12	1,153E-12
<b>Energieträger</b>						
EG (Schiffsantrieb)	MJ	7,48E-06	6,636E-06	7,48E-06	7,48E-06	7,48E-06
EG (Emissionen)	MJ	2,661E-09	4,492E-09	2,661E-09	2,661E-09	2,661E-09
EG (LNG)	MJ	1	1	1	1	1
<b>EG (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1,0000075</b>	<b>1,0000066</b>	<b>1,0000075</b>	<b>1,0000075</b>	<b>1,0000075</b>
Bunkeröl	MJ	-	5,618E-06	-	-	-
Investitionen	Euro	-	-	8,306E-08	8,306E-08	8,306E-08
Investitionskosten	Euro	-	-	1,222E-07	1,222E-07	1,222E-07
Betriebskosten	Euro	-	-	0,0022146	0,0022146	0,0022146
Personaleinsatz	h	-	-	5,349E-05	5,349E-05	5,349E-05
<b>OUTPUT</b>						
LNG	MJkm	1	1	1	1	1
Wirkungsgrad	nur Verluste	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	inkl. Hilfsenergien	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
<b>Emissionen</b>						
CH <sub>4</sub>	g	4,609E-08	8,982E-08	4,609E-08	4,609E-08	4,609E-08
NMHC	g	8,087E-09	-	8,087E-09	8,087E-09	8,087E-09
Hu (CH <sub>4</sub> + NMHC)	MJ	2,661E-09	4,492E-09	2,661E-09	2,661E-09	2,661E-09

## Entladung und Verdampfung

Wichtige Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte zu den beiden Prozessen sind in Tabelle 96 dokumentiert. In der Literatur und hier werden die beiden Prozesse zusammengefasst.

## Erläuterungen

**Pumpenantrieb:** In [concaawe 2006] wird für die Pumpen Netzstrom eingesetzt, während in [ecoinvent 2003] GT-Kompressoren angenommen werden. Für die Rechenwerte wird [ecoinvent 2003] übernommen.

**Energieverbrauch:** Der Stromverbrauch nach [concawe 2006] ist vernachlässigbar gering. Der Erdgasverbrauch nach [concawe 2006] ("sonstige Zwecke") ist allerdings etwa doppelt so hoch wie der Verbrauch gemäß [ecoinvent 2003]. Als Rechenwert wird der Wert aus [ecoinvent 2003] (gerundet) übernommen. Da damit der Verbrauch der Entladung / Verdampfung eine Größenordnung kleiner ist als der der Verflüssigung, ist eine zeitliche Differenzierung nicht erforderlich.

**Verluste / CH<sub>4</sub>- und NMHC-Emissionen:** In Umkehrung der Verhältnisse beim Energieverbrauch betragen die CH<sub>4</sub>-Emissionen nach [ecoinvent 2003] nur zwei Drittel derjenigen nach [concawe 2006]. Die Werte beider Quellen liegen weit unter denen der Verflüssigung. Die Rechenwerte orientieren sich wie folgt an den beiden Quellen: 2005 [concawe 2006]; 2020/30: [ecoinvent 2003].

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** Die der Kompressorturbinen werden durch Verknüpfung in probas/gemis berechnet.

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** keine

**Flächenbedarf:** siehe Investitionskosten

**Materialvorleistungen:** siehe Investitionskosten

#### **Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten)**

**Investitionskosten:** Es liegen keine Daten vor. Da die Verdampfung sehr viel weniger aufwendig als die Verflüssigung ist, wird hilfsweise ein Fünftel der Verflüssigungskosten angenommen.

**Betriebskosten:** Es liegen keine Daten vor. In erster Näherung können sie aus dem Energieverbrauch und dem Personaleinsatz abgeschätzt werden. Weitere Basisdaten siehe Verflüssigung.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Es liegen keine Daten vor. Hilfsweise wird die Hälfte des Personaleinsatzes der Verflüssigung angesetzt.

Tabelle 96: Prozessdaten LNG-Entladung und -Verdampfung

Quelle:		ecoinvent	concaawe	Rechenwerte		
Bezug:		um 2005	2010/20	2005	2020	2030
<b>INPUT</b>						
<b>Infrastruktur</b>						
Stahl	kg	-	-	1,359E-06	1,359E-06	1,359E-06
Beton	kg	-	-	1,359E-07	1,359E-07	1,359E-07
Fläche	m2	-	-	2,717E-08	2,717E-08	2,717E-08
<b>Energieträger</b>						
Strom	MJ	-	0,0007	-	-	-
EG (Wärme, sonstige Zwecke)	MJ	-	0,0294	-	-	-
EG (Kompressor)	MJ	0,015163	-	0,015	0,015	0,015
EG (Emissionen)	MJ	0,0004471	0,0005651	0,0006	0,0004	0,0004
EG (LNG)	MJ	1	1	1	1	1
<b>EG (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1,0156101</b>	<b>1,0299651</b>	<b>1,0156</b>	<b>1,0154</b>	<b>1,0154</b>
Investitionen	Euro	-	-	2,415E-05	2,174E-05	2,053E-05
Investitionskosten	Euro	-	-	4,191E-05	3,772E-05	3,562E-05
Betriebskosten	Euro	-	-	6,86E-05	6,787E-05	6,787E-05
Personaleinsatz	h	-	-	2,88E-07	2,88E-07	2,88E-07
<b>OUTPUT</b>						
LNG	MJ	1	1	1	1	1
Wirkungsgrad						
nur Verluste		100,0%	99,9%	99,9%	100,0%	100,0%
inkl. Hilfsenergien		98,5%	97,1%	98,5%	98,5%	98,5%
<b>Emissionen</b>						
CH4	g	0,0089402	0,0113	0,0119976	0,0079984	0,0079984
Hu (CH4 + NMHC)	MJ	0,0004471	0,0005651	0,0006	0,0004	0,0004

### 5.2.2 H<sub>2</sub>-Bereitstellung - Elektrolyse dezentral und zentral, Verflüssigung, Schiffstransport für LH<sub>2</sub>, Pipelinetransport für GH<sub>2</sub>

Aktuell spielt H<sub>2</sub> vor allem als Chemiegrundstoff eine Rolle. Er wird überwiegend am Ort der Nutzung hergestellt aber auch über Pipelines an dezentrale Nutzer verteilt.

Als zukünftiger Energieträger wird er vor allem für Anwendungen im Verkehr diskutiert.

Für stationäre Anwendungen über Insellösungen hinaus wird H<sub>2</sub> wahrscheinlich auch zukünftig keine Rolle spielen. Einen eigenen Aspekt stellt allerdings die Idee der Speicherung von Strom aus fluktuierenden oder weit entfernten Quellen in H<sub>2</sub> dar.

Ein Grund dafür, dass  $H_2$  überhaupt diskutiert wird, ist die Vielzahl der Herstellungsmöglichkeiten und einsetzbaren erschöpflichen und regenerativen Ressourcen. Hier sind die zentrale und dezentrale Erzeugung durch Elektrolyse, Verflüssigung und Tankertransport sowie Pipelinetransport Gegenstand. Für 2005 ist die Prozesskette nur fragmentarisch realisiert.

## Technik

Die Darstellung folgt im Wesentlichen [Bossel et al. 2005], [FhG 2004] und [LBST 2001].

## Elektrolyse

An der Gesamt- $H_2$ -Produktion hat die Elektrolyse mit weltweit etwa 5% [FhG 2004] nur einen relativ geringen Anteil. Außerdem handelt sich bei Elektrolyse- $H_2$  weitgehend um ein Nebenprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse. Die Elektrolyse zur  $H_2$ -Gewinnung wird vor allem im Zusammenhang mit der Nutzung von regenerativem Strom diskutiert.

Das gängige Verfahren ist die konventionelle alkalische Elektrolyse bei Temperaturen bis etwa  $90^\circ\text{C}$  und "leichtem" Überdruck bis etwa 10 bar. Druckelektrolyseure (ab etwa 30 bar) haben den Vorteil, den Kompressionsaufwand für den Pipelinetransport oder die Verflüssigung zu reduzieren; sie sind für 35 bis 100 bar verfügbar, aber aufwendig. Seit geraumer Zeit mit wechselnder Intensität in der Entwicklung sind Hochtemperatur(HT)elektrolyseure, bei denen der Strombedarf reduziert wird, indem die Dissoziationsenergie (Gibbs-Energie, Freie Enthalpie) des Wassers thermisch (T um  $800^\circ\text{C}$ ) reduziert wird. Bei der Membranelektrolyse schließlich soll der Verbrauch durch direkt auf der Membran angebrachte Elektroden reduziert werden.

Der Einfluss der Größe auf die Effizienz von Elektrolyseanlagen ist nach [LBST 2001] und [concawe 2006] gering. Zwischen zentralen und dezentralen Anlagen bestünde danach energetisch kein großer Unterschied.

## Verflüssigung

Die Verflüssigung erfolgt in mehreren Kompressions- und Expansionsstufen. Durch den extrem niedrigen Siedepunkt von 20,3 K, die Inversionstemperatur von 202 K und die Ortho/Para-Umwandlung ist sie allerdings technisch und energetisch extrem aufwendig. (Deshalb hat flüssiger Wasserstoff zur Zeit auch im Vergleich zu  $H_2$  an sich keine größere technische oder wirtschaftliche Bedeutung.) Die Effizienz hängt stark von der Größe der Anlage ab, wäre also auch für zentrale und dezentrale Anlagen unterschiedlich. In [Bossel et al. 2005] werden für bestehende Anlagen Kapazitäten bis etwa 2 t / h angegeben (bzw. lassen sich auf Basis des Textes annehmen); Machbarkeitsstudie betrachten danach Anlagen bis 12,5 t / h.

## Lagerung und Umschlag

Die Lagerung erfolgt in doppelwandigen Tanks mit einer Vielschichtvakuumisolation (bis 100 Schichten auf 2,5 cm) [FhG 2004]. Nach [LBST 2001] sind LH2-Großtanks

Stand der Technik (allerdings bei begrenzten, Kosten-unelastischen Anwendungen; als Beispiel führt [LBST 2001] einen Tank im Kennedy Space Center an mit einem Volumen von 3.800 m<sup>3</sup>, entsprechend etwa 270 t H<sub>2</sub>). Die Tanktechnik wird angewendet bzw. kann auch angewendet werden auf transportable Tanks wie Schwimm tanks oder Tankwechselbehälter. Je kleiner die mobilen oder stationären Tanks sind desto relevanter werden allerdings die Kosten und Abdampfverluste, was Kfz-Tanks zu einem praktisch ungelösten Problem macht.

### **LH<sub>2</sub>-Transport**

Praktisch durchgeführt wird lediglich der Straßentransport mit Lkw, die LH<sub>2</sub>-Wechselbehälter im Standardcontainermaß transportieren, bzw. als Tanksattelzüge ausgelegt sind. Bei einer zukünftigen Offshore-Erzeugung von LH<sub>2</sub> könnten entsprechende Container oder große Schwimm tanks auf Carrier-Schiffen transportiert werden oder Tankschiffe eingesetzt werden. In [LBST 2001] wird ein Konzept für Schwimm tanks (sog. Barges mit 210 t LH<sub>2</sub>) und Carrier (fünf Barges) skizziert und als realistischer als ISO-Container oder Tanker eingeschätzt.

### **LH<sub>2</sub>-Entladung (und Verdampfung)**

Der Umschlag von LH<sub>2</sub> erfolgt mit Pumpen mit dann vernachlässigbarem Energieaufwand oder unter Nutzung des Überdrucks von in Konditionierungstanks kontrolliert verdampftem LH<sub>2</sub>. (Zu einer wahrscheinlich kaum sinnvoll anwendbaren aber möglichen Verdampfung mit anschließender Einspeisung in eine Pipeline liegen keine Informationen vor. Sie würde wahrscheinlich analog zu der von LNG erfolgen.)

### **CGH<sub>2</sub>-Transport**

Der Wasserstoff wird mit dem Druck der Erzeugung oder komprimiert auf Druckniveaus zwischen 1 und 300 bar in die Pipeline eingespeist. H<sub>2</sub>-Pipelines sind eine etablierte Technik. Die Gesamtlänge auf der Welt ist mit etwa 1.000 bis 2.000 km [LBST 2001] trotzdem relativ gering, da Wasserstoff üblicherweise zentral nahe der erzeugenden Anlage eingesetzt wird. Die Pipelines verbinden deshalb auch meist nicht Regionen, sondern Standorte innerhalb einer Region (Beispiel: H<sub>2</sub>-Pipeline im Ruhrgebiet mit etwa 225 km Länge, also einem Achtel bis Viertel des Weltnetzes). Um Versprödung zu vermeiden sollte der CGH<sub>2</sub> einen Rest Sauerstoff enthalten. [LBST 2001] gibt 150 ppm O<sub>2</sub>-Gehalt im H<sub>2</sub> als ausreichend an.

### **Datengenerierung**

Die wesentlichen Quellen für diese Auswertung sind [Bossel et al. 2005], [concawe 2006] und [LBST 2001].

[Bossel et al. 2005] ist eine kritische Bewertung der Wasserstoffwirtschaft, die zur Unterlegung zahlreiche Literaturdaten zum Energieverbrauch wichtiger Prozesse verschiedener H<sub>2</sub>-Ketten und daraus abgeleitete Rechenwerte enthält. Bezugszeitraum

ist im Wesentlichen die erste Hälfte des gegenwärtigen Jahrzehnts mit Ausblicken auf die nächsten Jahre.

[concawe 2006] s.o.

[LBST 2001] ist eine Machbarkeitsstudie zur Offshore-H<sub>2</sub>-Erzeugung und Logistik, die Daten zu Kosten, Energieverbrauch und Flächenbelegung und weitere qualitative Informationen enthält.

Im Folgenden werden Literaturinformationen differenziert nach Prozessen und Datenkategorien zusammengestellt und Rechenwerte als Inputs für probas/gemis abgeleitet.

Bei LH<sub>2</sub> ist für wesentliche Datenkategorien die Verflüssigung mit Sicherheit deutlich wichtiger ist als Lagerung und Umschlag. Ferner findet die Lagerung in der hier betrachteten Kette im Transportmittel statt. Schließlich liegen für den Umschlag keine Daten vorliegen. Dementsprechend werden nur Elektrolyse, Verflüssigung und Transport betrachtet.

## Elektrolyse

Die Datengenerierung orientiert sich am Konzept der Druckelektrolyse ([LBST 2001] folgend Ausgangsdruck 30 bar), die bereits relativ ausgereift und effizient ist. Die drucklose Elektrolyse hat dagegen eine geringere Effizienz, die Hochtemperaturelektrolyse bedarf noch erheblicher Entwicklungsarbeit. Wichtige Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 97 zusammengefasst.

## Erläuterungen

**Energieverbrauch:** [Bossel et al. 2005] und [LBST 2001] dokumentieren und verwenden sehr ähnliche Werte. Die Rechenwerte orientieren sich wie folgt an den Quellen:

zentral

2005: Maximum der Bandbreite

2020: Minimum der Bandbreite

2030: 2020 reduziert um die Hälfte der Reduktion 05/20

dezentral: Abschätzung: 97,5% des Wirkungsgrades von zentral

**Verluste:** über den Energieverbrauch erfasst

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** keine

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** Es werden wahrscheinlich zur Wasseraufbereitung geringe Menge verschiedener Chemikalien und bei der Elektrolyse selbst geringe Mengen KOH eingesetzt. Mengenangaben dazu bzw. zu den Reststoffen liegen nicht vor. Hilfsweise wird der Einsatz an NaOH pro kg Cl<sub>2</sub> bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse gemäß [ecoinvent 2004] angesetzt. Es erfolgt keine Differenzierung nach

Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).

**Flächenbedarf:** [LBST 2001] enthält Flächenangaben, die hier für zentrale und dezentrale Anlagen und für alle Bezugsjahre identisch übernommen werden.

**Materialvorleistungen:** [LBST 2001] gibt Massenangaben zu verfügbaren und in Entwicklung befindlichen Elektrolysemodulen (25 bzw. 11 t / 68 kg H<sub>2</sub> / h) sowie für einen Puffer-Druckspeicher. Für die Bezugsjahre werden nur die Elektrolyseurmassen variiert (20, 15, 12,5 t). Mit Lebensdauer und Volllaststunden wird der Einsatz pro MJ berechnet. Die Materialanteile werden gemäß [ecoinvent 2004] für generische Chemieanlagen angesetzt.

### Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten)

**Investitionskosten:** In [Nitsch 2003] werden für alkalische Elektrolyseanlagen für "heute" (2003, hier = 2005) und 2020 Investitionskosten angegeben, die hier übernommen werden (Umrechnung Bezug Kapazität in Menge mit 25 Jahren Lebensdauer und 90% Verfügbarkeit). 2030 wird aus 2020 mit der Hälfte der Reduktion 2005/20 abgeschätzt.

**Betriebskosten:** Es liegen keine Daten vor. In erster Näherung können sie aus dem Energieverbrauch und dem Personaleinsatz abgeschätzt werden. Für die Stromkosten werden für 2005 und 2020 die Mittelwerte Windkraft offshore küstennah und küstenfern jeweils für mittlere Windverhältnisse aus [DLR et al. 2004] angesetzt, 2030 wird gleich 2020 gesetzt. Für den Personalstundensatz wird der Wert nach [StatBA 2007] für den Sektor Energie- und Wasserversorgung angesetzt.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Hierzu liegen keine direkten Informationen vor. Eine grobe Abschätzung erfolgt über den Personaleinsatz in der Stromerzeugung in Deutschland 2005 [BMW 2007]: Arbeitszeit / MJ Brutto-Strom = Arbeitszeit / MJ H<sub>2</sub>.

Es erfolgt keine Differenzierung nach Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).



Tabelle 97: Prozessdaten Elektrolyse

Prozess		Elektrolyse, zentral			Elektrolyse, dezentral		
Bezug:		2005	2020	2030	2005	2020	2030
<b>INPUT</b>							
<b>Infrastruktur</b>							
Stahl	kg	2,951E-05	2,459E-05	2,213E-05	2,951E-05	2,459E-05	2,213E-05
Kupfer	kg	9,44E-07	7,866E-07	7,079E-07	9,44E-07	7,866E-07	7,079E-07
Beton	kg	1,255E-05	1,045E-05	9,408E-06	1,255E-05	1,045E-05	9,408E-06
Kunststoff	kg	9,44E-07	7,866E-07	7,079E-07	9,44E-07	7,866E-07	7,079E-07
Fläche	m2	6,74E-08	6,74E-08	6,74E-08	6,74E-08	6,74E-08	6,74E-08
<b>Betriebsstoffe</b>							
Wasser	kg	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
NaOH	kg	0,001775	0,001775	0,001775	0,001775	0,001775	0,001775
<b>Energieträger</b>							
Strom	MJ	1,6	1,4760148	1,4209591	1,6410256	1,5138613	1,457394
H2 (Verlust)	MJ	-	-	-	-	-	-
H2 (LH2, CGH2)	MJ	1	1	1	1	1	1
<b>H2 (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Investitionen	Euro	0,0016236	0,0011467	0,0009082	0,0032472	0,0022933	0,0018164
Investitionskosten	Euro	0,0025982	0,001835	0,0014534	0,0051964	0,00367	0,0029068
Betriebskosten	Euro	0,0511623	0,0226391	0,0220121	0,0523247	0,0230702	0,0224271
Personaleinsatz	h	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408
<b>OUTPUT</b>							
H2	MJ	1	1	1	1	1	1
Wirkungsgrad							
nur Verluste		62,5%	67,8%	70,4%	60,9%	66,1%	68,6%
inkl. Hilfsenergien		62,5%	67,75%	70,4%	60,9%	66,1%	68,6%

Strom: zentral: 05: C Obergrenze; 20: C Untergrenze; 30: s.Text; dezentral: 05/20/30: eta 97,5% von zentral; C = [concawe 2006]

## Verflüssigung

Betrachtet wird eine generische Verflüssigungsanlage ohne evtl. mögliche Technologiedifferenzierung, aber unterschieden in zentral (groß; etwa 10.000 kg H<sub>2</sub> / h) und dezentral (klein; etwa 100 kg H<sub>2</sub> / h). Wichtige Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 98 zusammengefasst.

## Erläuterungen

**Energieverbrauch:** In [Bossel et al. 2005] wird eine Kurve Energieverbrauch / Kapazität dargestellt. Für die oben angegebenen Kapazitäten resultieren Größen die 20% bis 25% über den Extrema nach [LBST 2001] liegen. Die Rechenwerte orientieren sich wie folgt an den Quellen:

zentral

2005: Maximum nach [LBST 2001]

2020: Mittel 2005/30

2030: Wert nach [Bossel et al. 2005]

dezentral: 2 x zentral

**Verluste:** über den Energieverbrauch der Vorstufe (Elektrolyse) erfasst

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** keine

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** keine

**Flächenbedarf:** [LBST 2001] enthält Flächenangaben, die hier für die zentrale Anlagen und für alle Bezugsjahre identisch übernommen werden. Für die dezentrale Anlagen wird der 4-fache Wert angesetzt (Abschätzung auf Basis von Berechnungen in [LBST 2001] für verschiedene Größen).

**Materialvorleistungen:** Es liegen keine Informationen mit direktem Bezug vor. Hilfsweise werden die Aufwendungen für die Erdgasverflüssigung mit der Relation des Stromverbrauchs  $H_2$ - / Erdgasverflüssigung skaliert. Begründen lässt sich der Ansatz damit, dass dem höheren Stromverbrauch bei  $LH_2$  mehr Prozessstufen usw. gegenüber stehen.

## Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten):

**Investitionskosten:** [LBST 2001] gibt Kosten für 1- bis 4-strängige Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 156 t / d an. Mit Lebensdauer und Volllaststunden werden die Kosten pro MJ berechnet. Die Kosten für die 4-strängige Anlagen werden für 2005, die der 1-strängigen für 2030 angesetzt (ohne die in [LBST 2001] angesetzte Spezifikation damit notwendig zu verbinden, die 1-strängige Anlagen würde allerdings die Kapazität aller bis jetzt gebauten übertreffen); für 2020 wird der Mittelwert angesetzt.

**Betriebskosten:** siehe Elektrolyse

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Es liegen keine Informationen vor. Hilfsweise wird der Wert für die Elektrolyse übernommen.

Tabelle 98: Prozessdaten H<sub>2</sub>-Verflüssigung

Prozess		Verflüssigung, zentral			Verflüssigung, dezentral		
Bezug:		2005	2020	2030	2005	2020	2030
<b>INPUT</b>							
<b>Infrastruktur</b>							
Stahl	kg	3,211E-05	5,647E-05	5,147E-05	6,423E-05	0,0001129	0,0001029
Kupfer	kg	-	-	-	-	-	-
Beton	kg	3,211E-06	5,647E-06	5,147E-06	6,423E-06	1,129E-05	1,029E-05
Kunststoff	kg	-	-	-	-	-	-
Fläche	m <sup>2</sup>	2,564E-07	2,564E-07	2,564E-07	1,026E-06	1,026E-06	1,026E-06
<b>Energieträger</b>							
Strom	MJ	0,39	0,32	0,25	0,78	0,64	0,5
H <sub>2</sub> (Verlust)	MJ	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> (LH <sub>2</sub> , CGH <sub>2</sub> )	MJ	1	1	1	1	1	1
<b>H<sub>2</sub> (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Investitionen	Euro	0,0032908	0,002674	0,0020571	0,0131634	0,010696	0,0082286
Investitionskosten	Euro	0,0052663	0,0042792	0,003292	0,0210653	0,0171168	0,0131682
Betriebskosten	Euro	0,016879	0,0094734	0,0086762	0,027929	0,0131179	0,0115234
Personaleinsatz	h	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408	0,0001408
<b>OUTPUT</b>							
LH <sub>2</sub>	MJ	1	1	1	1	1	1
Wirkungsgrad							
nur Verluste		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
inkl. Hilfsenergien		71,9%	75,8%	80,0%	56,2%	61,0%	66,7%

Strom: zentral: 05: C Obergrenze; 20: MW 05/30; 30: B 10 t / h; dezentral: 05: 2 x zent.; 20: MW 05/30; 30: B 0,1 t / h; B = [Bossel et al. 2005]; C = [concawe 2006]

## LH<sub>2</sub>-Schiffstransport

Wichtige Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 99 zusammengefasst.

## Erläuterungen

**Energieverbrauch:** Der Rechenwert aus [concawe 2006] wird hier für alle Bezugsjahre übernommen (die angegebene Bandbreite ist relativ gering und die Unsicherheit, mangels Praxiserfahrung groß). Brennstoff zum Schiffsantrieb ist der Wasserstoff, der während des Transports verdampft.

**Verluste:** In [LBST 2001] werden für große Tanks Verluste von weniger 0,1% / d angegeben. Mit diesem Wert, einer angenommenen Transportentfernung von 100 km und einer geschätzten Geschwindigkeit von 25 km/h werden die Transportverluste berechnet. Die Verluste für die gesamte Lagerung in Versende- und Empfangshafen werden mit Annahmen zu deren Dauer abgeschätzt; 10 d ergeben z.B. Verluste von 1% (nicht in der Tabelle aufgeführt). Es erfolgt keine Differenzierung nach Bezugsjahren (hohe Unsicherheiten des Basiswertes bei absehbar geringen Änderungen).

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** Der Schiffsantrieb ist nicht spezifiziert; Möglichkeiten: Verbrennungsmotor, Gasturbine, Kesselfeuerung und Dampfturbine. Annahme: Verbrennungsmotor; NOX 2005 wie Schiffsdiesel nach [Borken et al. 1999], 2020 -25%, 2030 -50%; alle übrigen Emissionen gleich Null.

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** keine

**Flächenbedarf:** das 2-Fache des LNG-Tankers (Carrier + Stellplatz für zweiten Barge-Satz)

**Materialvorleistungen:** Zur Abschätzung wird angenommen, dass der Transport mit Barges und Carrier erfolgt. Für die Barges wird das Gewicht nach [LBST 2001], für den Carrier das Gewicht und die Zusammensetzung eines Frachters nach [ecoinvent 2004] angesetzt. Für die Barges werden Materialanteile von 10% Aluminium und Kunststoff, übrige Stahl angesetzt. Die Daten werden für das noch nicht realisierte System für alle Bezugsjahre gleich angesetzt (2005 nicht real).

#### **Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten):**

**Investitionskosten:** [LBST 2001] gibt Kosten für Barges und Carriern an (Konzept-Studie mit Preisen von 1990, in [LBST 2001] auf 2001 skaliert).

Mit der Lebensfahrleistung von Seefrachtern nach [ecoinvent 2004] werden die Kosten pro MJkm berechnet (Inflationskorrektur: 1990 bis 2005 je 2,5%). Eine Differenzierung nach Bezugsjahren ist für das noch nicht realisierte System nicht sinnvoll.

**Betriebskosten:** basierend auf [LBST 2001] wie für Investitionskosten beschrieben.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Hilfsweise wird der Personaleinsatz des LNG-Transports übernommen.

Tabelle 99: Prozessdaten LH<sub>2</sub>-Transport

Bezug:		2005	2020	2030
<b>INPUT</b>				
<b>Infrastruktur</b>				
Stahl	kg	5,039E-08	5,039E-08	5,039E-08
Kupfer	kg	3,3E-09	3,3E-09	3,3E-09
Aluminium	kg	5,71E-11	5,71E-11	5,71E-11
Kunststoff	kg	3,348E-09	3,348E-09	3,348E-09
Fläche	m <sup>2</sup>	1,784E-11	1,784E-11	1,784E-11
<b>Energieträger</b>				
H <sub>2</sub> (Schiffsantrieb)	MJ	4,189E-05	4,189E-05	4,189E-05
H <sub>2</sub> (Verlust)	MJ	0,0001667	0,0001667	0,0001667
H <sub>2</sub> (LH <sub>2</sub> , CGH <sub>2</sub> )	MJ	1	1	1
<b>H<sub>2</sub> (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1,0001667</b>	<b>1,0001667</b>	<b>1,0001667</b>
Investitionen	Euro	4,847E-07	4,847E-07	4,847E-07
Investitionskosten	Euro	7,133E-07	7,133E-07	7,133E-07
Betriebskosten	Euro	2,792E-07	2,792E-07	2,792E-07
Personaleinsatz	h	8,997E-09	8,997E-09	8,997E-09
<b>OUTPUT</b>				
LH <sub>2</sub>	MJkm	1	1	1
Wirkungsgrad				
nur Verluste		100,0%	100,0%	100,0%
inkl. Hilfsenergien		100,0%	100,0%	100,0%
<b>Emissionen</b>				
NOX	g	8,378E-05	5,236E-05	2,095E-05

### CGH<sub>2</sub>-Pipelinetransport

Wesentliche Literaturdaten und die hier abgeschätzten Rechenwerte sind in Tabelle 100 zusammengefasst. Bezugsgröße ist 1 MJkm.

### Erläuterungen

**Energieverbrauch:** Der Wert aus [LBST 2001] für die Kompression von 30 auf 80 bar wird hier für alle Bezugsjahre übernommen.

**Verluste:** Die prozentualen Verluste werden gleich denen des Erdgasferntransportes nach [ecoinvent 2003] gesetzt. Mit 0,026% / 1.000 km ist dieser Wert sehr niedrig. Falls korrekt abgeschätzt sind die Verluste, da anders als bei Erdgas ohne signifikante Umweltwirkungen, vernachlässigbar.

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** keine

**Betriebsstoffe, feste Reststoffe:** Hierzu liegen keine Informationen vor. Die Stoffströme werden aufgrund ihrer absehbar geringen Quantität und ökologischen Relevanz vernachlässigt.

**Flächenbedarf:** siehe Materialvorleistungen

**Materialvorleistungen:** Die Werte nach [ecoinvent 2003] für Erdgaspipelines werden mit der Annahme eines Drucks von etwa 80 bar für Erdgas und 40 bar für Wasserstoff [LBST 2001] auf Wasserstoff hochgerechnet.

#### **Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten):**

**Investitionskosten:** [LBST 2001] enthält Kostenschätzungen von 370 Euro / m basierend auf mehreren in ihren Bezügen nicht ganz eindeutige Literaturangaben (Erdgas oder H<sub>2</sub>, on- oder offshore, Durchmesser). In der Bandbreite nach [LBST 2001] liegen die Angaben aus [ngo-online 2006] für eine Ethylenpipeline (450 Euro / m). Mit Angaben aus [ecoinvent 2003] (Volumen-bezogene Kapazität und Lebensdauer von Erdgaspipelines) und der Skalierung über typische Druckniveaus für Erdgas und Wasserstoff (s.o.) werden aus [ngo-online 2006] Kosten pro MJkm abgeschätzt.

**Betriebskosten:** [LBST 2001] gibt die Betriebskosten mit jährlich 2% der Investitionskosten an. Der Wert passt relativ gut zu den Relationen Betriebs-/Investitionskosten für eine geplante Erdölpipeline [BFAI 2007]. Hier wird der Wert nach [LBST 2001] angesetzt.

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** Der Personalaufwand ist vernachlässigbar und wird gleich 0 gesetzt.

Tabelle 100: Prozessdaten CGH<sub>2</sub>-Pipeline

Bezug:		2005	2020	2030
<b>INPUT</b>				
<b>Infrastruktur</b>				
Stahl	kg	1,662E-07	1,662E-07	1,662E-07
Kupfer	kg	-	-	-
Beton	kg	2,184E-07	2,184E-07	2,184E-07
Kunststoff	kg	0	0	0
Fläche	m <sup>2</sup>	8,699E-09	8,699E-09	8,699E-09
<b>Energieträger</b>				
Strom	MJ	4,053E-05	4,053E-05	4,053E-05
H <sub>2</sub> (Verlust)	MJ	2,5E-07	2,5E-07	2,5E-07
H <sub>2</sub> (LH <sub>2</sub> , CGH <sub>2</sub> )	MJ	1	1	1
<b>H<sub>2</sub> (Summe)</b>	<b>MJ</b>	<b>1,0000003</b>	<b>1,0000003</b>	<b>1,0000003</b>
Investitionen	Euro	2,518E-07	2,518E-07	2,518E-07
Investitionskosten	Euro	3,706E-07	3,706E-07	3,706E-07
Betriebskosten	Euro	5,036E-09	5,036E-09	5,036E-09
Personaleinsatz	h	0	0	0
<b>OUTPUT</b>				
H <sub>2</sub>	MJ	1	1	1
Wirkungsgrad				
nur Verluste		100,0%	100,0%	100,0%
inkl. Hilfsenergien		100,0%	100,0%	100,0%

Strom: [LBST 2001]

### 5.2.3 Syncrude - Ölsandgewinnung und -erstverarbeitung vor Raffinerie

Als synthetisches Rohöl (synthetic crude oil, kurz Syncrude) bezeichnet man das raffinierbare Aufbereitungsprodukt von Ölsanden. Syncrude kann im Prinzip zu jedem Mineralölprodukt verarbeitet werden. Aktuell spielt Syncrude bzw. die Gewinnung und Verarbeitung von Ölsanden vor allem in Kanada und damit für den nordamerikanischen Mineralölmarkt eine Rolle. Kanada ist durch seine Ölsandvorkommen das Land mit den zweitgrößten Ölreserven (direkt hinter Saudi-Arabien)).

Ölsande sind durch den hohen Ölpreis aber auch durch Kostensenkungen bei Förderung und Aufbereitung zu einer konkurrenzfähigen Ölressource geworden.



## Technik

Die Ölsand-spezifische Prozesskette umfasst drei Schritte. Der erste, die Förderung, kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten erfolgen. Davon abhängig erfolgt auch der erste Aufbereitungsschritt auf verschiedene Weisen:

Ölsandförderung im Tagebau - Bitumenextraktion - Upgrading

Thermische In-situ-Extraktion - Wasserabscheidung - Upgrading

Die In-situ-Extraktion ist aufwendiger als der Tagebau, der gegenwärtig überwiegt. Von den Reserven dürften allerdings etwa 80% nur durch Extraktion förderbar sein [Gothé 2006].

Anzumerken ist, dass Syncrude "leichter" und "sauberer" als (zumindest die meisten) konventionelle Rohöle ist. Der aufwendigen Förderung, Separierung und Upgrading folgt daher ein tendenziell weniger aufwendiger Raffinerieprozess als bei konventionellen Rohölen.

### Tagebau - Extraktion - Upgrading

**Förderung:** Oberflächennahe Ölsande werden mit Baggern und Ladern abgebaut, mit warmem Wasser zu einem Slurry gemischt und zu Extraktionsanlagen gepumpt [Syncrude 2006].

**Extraktion:** Die Slurry wird durch Flotation aufgespalten. Das aufschwimmenden Bitumen wird abgetrennt, mit Naphtha (Rohbenzin) verdünnt, und in Zentrifugen weiter aufgespalten. Abschließend wird das Naphtha abgetrennt und rückgeführt.

**Upgrading:** Das Bitumen wird in einem Coker oder Hydrocraker thermisch in eine Gasfraktion, Naphtha und Gasöl (Mitteldestillat; Vorprodukt für Diesel, Kerosin, leichtes Heizöl) gespalten. Die Gase werden als Raffineriebrennstoff genutzt, Naphtha und Gasöl zu einem leichten Syncrude gemischt, das in Raffinerien vor Ort oder nach einem Pipelinetransport zu im Prinzip jedem Mineralölprodukt verarbeitet werden kann.

### In-Situ-Extraktion - Wasserabscheidung - Upgrading

**Förderung:** Die In-Situ-Extraktion ist für größere Tiefen geeignet als der Tagebau und mit einem geringeren Flächenverbrauch verbunden. Das Grundprinzip der verschiedenen Verfahren ist das gleiche und ähnelt den tertiären Verfahren der Ölförderung: Durch Einpressen von heißem Wasser, Dampf oder auch Lösemitteln wird das Bitumen thermisch und durch Emulsions- oder Lösungsbildung fließfähig und an die Oberfläche gepumpt. Varianten:

- **Cyclic steam stimulation (CSS):** Mehrere Wochen wird etwa 300°C heißer Dampf eingepumpt. Nach einigen Tagen Einwirkzeit wird über mehrere Wochen das Bitumen hochgepumpt. Die Ausbeute bei mehrmaliger Wiederholung liegt bei etwa 25%. Das Verfahren ist kostenintensiv.
- **Steam assisted gravity drainage (SAGD):** Eine Horizontalbohrung wird bis auf den Grund der Ölsandschicht vorgebracht, eine zweite bis etwa fünf Meter darüber.

Durch die obere wird Dampf eingebracht. Das dadurch verflüssigte Bitumen fließt nach unten und wird über die untere Bohrung hochgepumpt. Die Ausbeute beträgt bis zu 60%. Das Verfahren ist kostengünstiger als CSS.

- **Vapor extraction process:** Im Prinzip ähnlich der SAGD werden organische Lösemittel eingebracht. Ein teilweises Upgrading soll bereits in der Lagerstätte stattfinden, so dass das eigentliche Upgrading weniger aufwendig sein könnte. Das Verfahren soll deutlich energieeffizienter als Dampfverfahren sein, aber auch kostspieliger und ist noch in der Erprobung.
- **Toe to heal air injection (THAI):** Bei diesem noch experimentellen Verfahren wird eine vertikale Injektionsbohrung mit einer horizontalen Förderbohrung kombiniert. Durch die Injektionsbohrung wird Luft in die Lagerstätte eingepresst, die das Bitumen entzündet. Es entsteht eine Feuerwand, in der die schweren Komponenten verbrennen, während die leichteren vom "Zeh" der horizontalen Produktionsbohrung zur "Ferse" vorangetrieben werden. Dabei soll wie beim VAPEX ein teilweises Upgrading stattfinden.

**Wasserabscheidung:** analog konventionellem Erdöl

**Upgrading:** siehe oben

### Datengenerierung

Die wesentlichen Quellen für diese Auswertung sind die Umweltbericht zwei großer kanadischer Ölsandförderer [Suncor 2005, Syncrude 2006].

Ein Unternehmen betreibt nur Tagebau, das andere Tagebau und In-Situ-Extraktion. Die an sich umfangreichen Daten beziehen sich allerdings für beide Unternehmen nur auf die gesamten Prozessketten ohne Differenzierung Förderung - Bitumenextraktion/abtrennung - Upgrading und ohne Differenzierung Tagebauch / In-Situ-Extraktion. Damit ist auch hier eine entsprechende Differenzierung der Rechenwert nicht möglich. Es werden daher Rechenwerte für eine generische Bereitstellung von SynCrude abgeleitet.

Beide Quellen enthalten Jahreswerte (bzw. entsprechend umrechenbare Tageswerte) zu Produktionsmenge, Emissionen, Wasserverbrauch, Flächenbelegungen, Reststoffmengen, Kosten und Personaleinsatz, jeweils für mehrere Jahre. Als Rechenwerte für 2005 werden die Mittelwerte beider Unternehmen und über alle dokumentierten Jahre ausgewiesen. Die Mittelung über eine - begrenzte - Anzahl von Jahren ist sinnvoll, da fast alle Zeitreihen Sprünge aufweisen. Einige dieser Sprünge sind in den gut dokumentierten Berichten erläutert. Hintergründe sind Ereignisse die sinnvollerweise auf mehrere Jahre abgeschrieben werden sollten. Auch für nicht erläuterte Sprünge kann von einer Wiederholung ausgegangen werden, was ebenfalls eine Mittelung sinnvoll macht.

In der vorliegenden Fassung werden die Daten auch für 2020/30 unverändert angesetzt. Der Grund dafür ist, neben der grundsätzlichen Unsicherheit, dass

insbesondere Verbesserungen - geringerer Energieverbrauch, Emissionen, Kosten usw. - zumindest zweifelhaft sind, da mit zunehmender Ausbeutung der gut zugänglichen Lagerstätten und mit steigendem Ölpreis schwierigere Lagerstätten abgebaut werden. Technische Verbesserungen und komplexere Technik würden sich dann zumindest teilweise kompensieren.

Tabelle 101 fasst die Literaturdaten und Rechenwerte zusammen. Im Folgenden werden lediglich Erläuterungen zu den Datenkategorien gegeben, die nicht aus den Umweltberichten abgeleitet werden.

### **Erläuterungen**

**Energieverbrauch:** konstant

**Verluste:** konstant

**Weitere Luftschadstoffemissionen:** SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC wie übrige Flüsse; Methan und NMHC: Abschätzung; weitere Emissionen bzw. alternativ alle Emissionen: Primärenergieverbrauch Förderung bis Upgrading als Schweröl in Kesselfeuerung nach probas/gemis.

**Betriebsstoffe:** Wasser, konstant

**Feste Reststoffe:** konstant

**Flächenbedarf:** konstant

**Materialvorleistungen:** [ecoinvent 2004] für Ölförderung

### **Kosteninformationen (Investitions- und Betriebskosten)**

Investitionskosten: konstant

Betriebskosten: konstant

**Personaleinsatz (Personen je Anlage bzw. Durchsatz):** konstant

Tabelle 101: Prozessdaten Synthetisches Rohöl

Quelle:		SynCrude 2006		SunCor 2005		Mittelwert	Rechenwerte		
Prozess		Gesamt		Gesamt		Gesamt	Gesamt		
Bezug:		2005	2001- 05	2004	2000 - 04	2000-5	2005	2020	2030
Bezug:		MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
<b>INPUT</b>									
<b>Infrastruktur</b>									
Stahl	kg	-	-	-	-	-	3,59E-05	3,59E-05	3,59E-05
Beton	kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Fläche	m2	1,106E-05	1,034E-05	3,335E-05	1,314E-05	1,174E-05	1,174E-05	1,174E-05	1,174E-05
<b>Betriebsstoffe</b>									
Wasser	dm3	0,0617886	0,0717796	0,1159083	0,1486001	0,1101898	0,1101898	0,1101898	0,1101898
<b>Energieressourcen</b>									
Bitumen (SynCrude)	MJ	1	1	1	1	1	1	1	1
Bitumen (Brennstoffe)	MJ	0,3383283	0,3280297	0,2165547	0,2239548	0,2759923	0,2759923	0,2759923	0,2759923
Verluste	MJ	0,0038	0,00442	0,0019443	0,0017251	0,0030726	0,0030726	0,0030726	0,0030726
<b>Summe</b>	<b>MJ</b>	<b>1,3421283</b>	<b>1,3324497</b>	<b>1,218499</b>	<b>1,2256799</b>	<b>1,2790648</b>	<b>1,2790648</b>	<b>1,2790648</b>	<b>1,2790648</b>
Investitionskosten	Euro	0,0055279	0,0044684	0,0023058	0,0031481	0,0038082	0,0038082	0,0038082	0,0038082
Betriebskosten	Euro	0,0045321	0,0034431	0	0	0,0034431	0,0034431	0,0034431	0,0034431
<b>Summe</b>	<b>Euro</b>	<b>0,01006</b>	<b>0,0079115</b>	<b>0,0023058</b>	<b>0,0031481</b>	<b>0,0072514</b>	<b>0,0072514</b>	<b>0,0072514</b>	<b>0,0072514</b>
Personaleinsatz	h	1,889E-05	1,706E-05	1,528E-05	1,668E-05	1,687E-05	1,687E-05	1,687E-05	1,687E-05
<b>OUTPUT</b>									
SSB	MJ	1	1	1	1	1	1	1	1

<b>Wirkungsgrad</b>									
nur Verluste		99,6%	99,6%	99,8%	99,8%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%
<b>inkl. Hilfsenergien</b>									
<b>Gesamt</b>		<b>76,0%</b>	<b>75,5%</b>	0,8206819	0,8158737	78,2%	78,2%	78,2%	78,2%
<b>Emissionen</b>									
THG	g	21,305244	20,195575	17,027385	18,056125	19,12585	19,12585	19,12585	19,12585
SO <sub>2</sub>	g	0,1789641	0,173911	0,0508883	0,0562408	0,1150759	0,1150759	0,1150759	0,1150759
NO <sub>X</sub>	g	0,0426105	0,042715	0,032445	0,0410546	0,0418848	0,0418848	0,0418848	0,0418848
VOC	g	0,0772358	0,0898374	0,0441885	0,0392069	0,0645221	0,0645221	0,0645221	0,0645221
<b>Abfall</b>									
Verwertet	g	0,0414429	0,0390997	0,0550853	0,0294284	0,034264	0,034264	0,034264	0,034264
Beseitigt	g	0,0689166	0,0864817	0,1819307	0,1671052	0,1267935	0,1267935	0,1267935	0,1267935
<b>Abwasser</b>									
Einleitung (Fluss)	dm <sup>3</sup>	-	-	0,0193868	0,0403931	0,0096934	0,0201965	0,0201965	0,0201965
CSB	g	-	-	0,0001176	0,0003692	5,878E-05	0,0001846	0,0001846	0,0001846

## 5.2.4 Literaturverzeichnis zum Anhang 2

- [BFAI 2007] [http://www.bfai.de/DE/Content/\\_\\_\\_SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?flident=MKT20060418110511&source=DBNL&source=NL](http://www.bfai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?flident=MKT20060418110511&source=DBNL&source=NL)
- [BMW 2007] BMWi: Energiedaten. Berlin 2007
- [Bossel et al. 2005] Bossel, U.; Eliasson, B.; Taylor, G.: The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? [www.efcf.com/reports](http://www.efcf.com/reports) 2005
- [concawe 2006] CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe), EURCAR (European Council for Automotive R&D), JRC (EU Joint Research Center): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context - WTT Appendix 1. 2006
- [DLR et al. 2004] Nitsch, J., und 11 weitere Autoren (DLR (Koordinator), IFEU, Wuppertal Institut): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Im Auftrag des BMU, Berlin 2004
- [ecoinvent 200x] In: Dones, R. et al. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- [ecoinvent 2003] Faist Emmenegger, M.; Heck, T.; Jungbluth N.: Erdgas. Endbericht ecoinvent 2000 No. 6-V. Paul Scherrer Institut Villigen/CH, Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf/CH 2003
- [ecoinvent 2004] Jungbluth, N.: Erdöl. Endbericht ecoinvent 2000 No. 6-IV. Paul Scherrer Institut Villigen/CH, Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf/ CH 2004
- [ecoinvent 2004] Althaus, H.-J.; Chudacoff, M.; Hellweg, S.; Hirsch, R.; Jungbluth, N.; Osses, M.; Primas, A.: Life cycle inventories of chemicals. Endbericht ecoinvent 2000 No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf/CH 2004
- [ecoinvent 2004] Spielmann, M.; Kägi, T.; Stadler, P.; Tietje, O.: Life cycle inventories of transport services. Endbericht ecoinvent 2000 No. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf/CH 2004
- [Erdöl Erdgas 2006] <http://www.erdoel-erdgas.de/article/articleview/56/1/69/>
- [enro-portal 2005] <http://www.enro-portal.de/erdgas.php>
- [FhG UMSICHT 2004] Hiller, Ralf: Wasserstoffherzeugung und -speicherung - Grenzen und Möglichkeiten. Brennstoffzellen; 6. Symposium der Energieagentur NRW; 2004
- [LBST 2001] Altmann, M.; Stiller, C. (L-B-Systemtechnik): Wasserstoff-Erzeugung in offshore Windparks (Handout). Ottobrunn 2001
- [ngo-online 2006] [http://www.ngo-online.de/ganze\\_nachricht.php?Nr=14511](http://www.ngo-online.de/ganze_nachricht.php?Nr=14511)

[StatBA 2007] Statistisches Bundesamt:

<http://www.destatis.de/basis/d/logh/loghtab13.php>

[Suncor 2005] Suncor: 2005 Report on sustainability. x 2005

[Syncrude 2006] Syncrude: 2005 sustainability report. x 2006



### 5.3 Anhang 3: Vorkettendaten zu Biokraftstoffen

Datendokumentation für ausgewählte Biokraftstoffe - Zuarbeiten des DBFZ zum renewbility-Endbericht

Franziska Müller-Langer, Anastasios Perimenis, Daniela Thrän; Leipzig 2009

Die nachfolgend zusammengefassten Arbeiten des DBFZ waren Bestandteil des Arbeitspaketes 3 „Erstellung einer Datenbasis zur ganzheitliche Technologieanalyse (d. h. zur ökologischen, ökonomischen und beschäftigungsseitigen Analyse von Techniken für die Mobilitätsbereitstellung inkl. ihrer Vorketten)“.

#### 5.3.1 Biokraftstoffe im Überblick

Für die Erzeugung alternativer Kraftstoffe auf der Basis biogener Energieträger gibt es generell vielfältige Möglichkeiten (siehe auch /1/). Biogene Energieträger können dabei über sehr unterschiedliche Energiebereitstellungspfade zu gasförmigen und flüssigen Biokraftstoffen aufgearbeitet werden, die für den Einsatz zur Nutzenergiebereitstellung in Form von Kraft geeignet sind. Diese Aufarbeitung („Veredelung“) beinhaltet die Aufwertung der Energieträger hinsichtlich einer oder mehrerer der nachfolgend genannten Eigenschaften:

- Energiedichte,
- Handhabung,
- Speicherung und Transport,
- Umweltverträglichkeit,
- Verwertbarkeit von Rückständen.

Je nach Art der Biomassekonversion („Veredelungsverfahren“) werden generell drei wesentliche Pfade unterschieden. Diese werden im Anschluss vorgestellt.

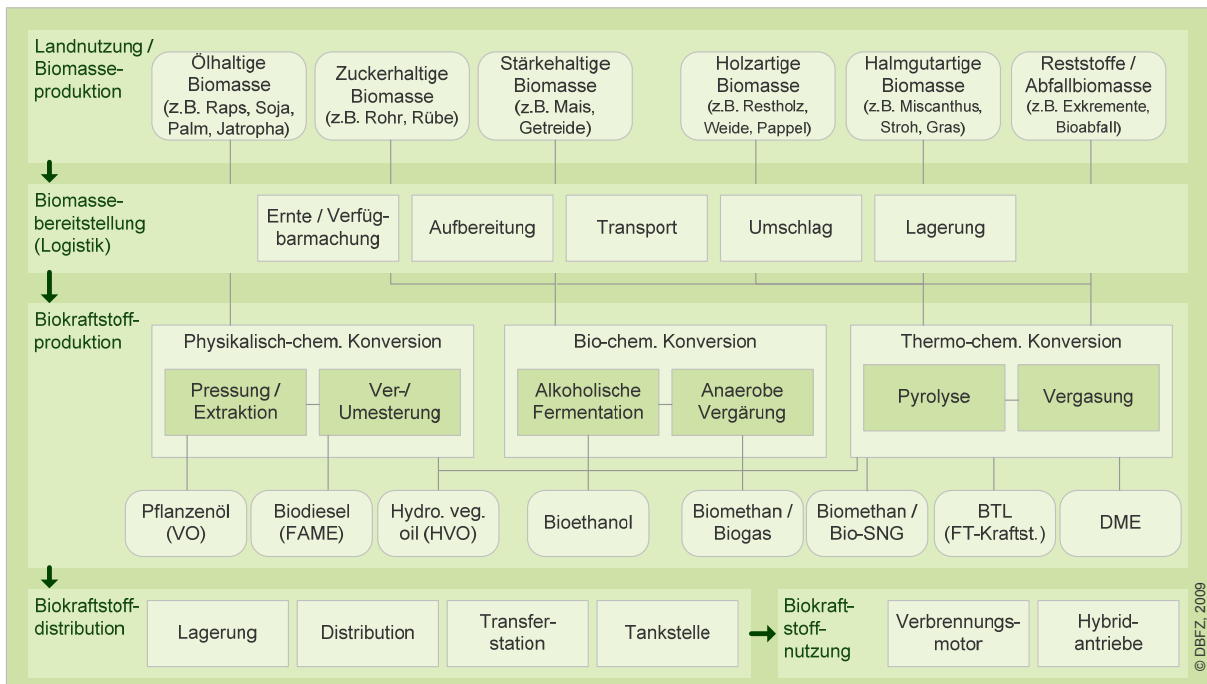


Abbildung 32: Bereitstellungspfade zur Nutzenergiebereitstellung aus biogenen Energieträgern

### Physikalisch-chemische Erzeugung

Zu den Verfahren der physikalisch-chemischen Konversion zählen alle Optionen der Kraftstoffbereitstellung aus biogenen Energieträgern auf Basis von Ölen und Fetten unterschiedlicher Konzentrationen (z. B. Pflanzenölsaaten, aber auch Altfette und tierische Fette). Dies sind im Einzelnen:

- Durch einfaches mechanisches Pressen der ölhaltigen Pflanzensaaten wird die flüssige Ölphase von der festen Phase (sog. Presskuchen) getrennt. Das Pflanzenöl kann nach entsprechender Reinigung als Kraftstoff in dafür geeigneten Motoren eingesetzt werden.
- Alternativ oder additiv dazu wird bei der Extraktion den Pflanzensaaten das Öl mit Hilfe eines Lösemittels (z. B. Hexan) entzogen. Die Trennung von Öl und Lösemittel sowie Extraktionsrückstand erfolgt anschließend durch eine Destillation. Dieses Öl kann – wie das ausschließlich durch Pressung gewonnene Öl – als Kraftstoff genutzt werden.
- Zur Verbesserung der Kraftstoffeigenschaften hinsichtlich der Nutzung werden Öle und Fette über eine Umesterung mittels Additiv (z. B. Methanol) chemisch zu sog. Fettsäuremethylester (FAME) umgewandelt.

### Bio-chemische Erzeugung

Bei der bio-chemischen Konversion erfolgt die Umwandlung dafür geeigneter Bioenergieträger in Sekundärenergieträger durch den gezielten Einsatz von

Mikroorganismen und damit durch biologische Prozesse. Für eine Kraftstoffproduktion sind dabei die nachfolgend aufgeführten Routen relevant:

- Durch alkoholische Gärung (d. h. aerobe Fermentation) erfolgt die Konversion von zellulose-, stärke- und zuckerhaltiger Biomasse, wobei die Kohlenhydrate mit Hilfe von Mikroorganismen (z. B. Hefe) gespalten und über mehrere Zwischenprodukte zu Ethanol umgewandelt werden. Während zuckerhaltige Biomasse direkt vergoren werden kann, müssen stärkehaltige Energieträger zunächst enzymatisch in Zucker umgewandelt werden. Gleiches gilt für zelluloseartige Bestandteile, die vor der Fermentation einer Hydrolyse unterzogen werden. Nach der Fermentation wird das in der sog. fermentierten Maische enthaltene Ethanol über Destillation, Rektifikation und Entwässerung gereinigt.
- Bei der anaeroben Fermentation (d. h. Vergärung unter Sauerstoffabschluss) findet die Konversion von organischen Substraten zu einem Gasgemisch (sog. Biogas) statt, das zu Großteilen aus Methan besteht. Die Vergärung besteht aus mehreren Teilprozessen, wobei organische Verbindungen durch säurebildende und methanbildende Bakterien abgebaut werden. Für den Einsatz als Kraftstoff wird das Biogas entsprechend durch Gasreinigung auf Erdgasqualität aufbereitet. Biogas kann ebenso über die Dampfreformierung zu Synthesegas konditioniert werden.

### Thermo-chemische Erzeugung

Durch eine thermo-chemische Konversion erfolgt die Umwandlung organischer Stoffe (im Regelfall biogener Festbrennstoffe) maßgeblich unter dem Einfluss von Wärme in flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger mit definierten Eigenschaften. Dabei sind für die Kraftstofferzeugung folgende Konversionsrouten von Bedeutung:

- Über die Route der Vergasung wird Biomasse bei hohen Temperaturen (600 bis 1.500 °C) und unterstöchiometrischer Zufuhr eines sauerstoffhaltigen Vergasungsmittels (wie Luft, Sauerstoff oder Wasserdampf) möglichst vollständig in gasförmige Energieträger umgewandelt /84/. Je nach Vergasungsmittel kann die partielle Oxidation des Einsatzmaterials die notwendige Wärme für die endothermen Reaktionsschritte liefern, so dass eine Energiezufuhr von außen nicht erforderlich ist (d. h. autotherme Vergasung). Wird die erforderliche Prozesswärme durch Wärmeträger oder Beheizung von außen zugeführt, liegt eine allotherme Vergasung vor. Über eine anschließende Gasreinigung und -konditionierung kann das bei der Vergasung entstehende Rohgas so aufbereitet werden, dass es in einer Synthese zu flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen (z. B. Methanol, Fischer-Tropsch, Dimethylether, Synthetic Natural Gas) umgewandelt oder weiter zu einem gasförmigen Kraftstoff (z. B. Wasserstoff) aufbereitet werden kann. Daneben besteht die Option der Dampfreformierung, bei der die in gasförmigen Bioenergieträgern (z. B. Rohgas aus der Vergasung) enthaltenen Kohlenwasserstoffe mit

Wasserdampf katalytisch zu Wasserstoff und Kohlenstoffoxiden umgesetzt werden.

- Bei der Pyrolyse (d. h. Verflüssigung) werden feste Bioenergieträger unter möglichst hoher Ausbeute zu flüssigen Komponenten umgewandelt (z. B. zu sog. Pyrolyseöl). Grundlage dafür ist die pyrolytische Zersetzung der organischen Stoffe bei hohen Temperaturen sowie unter Sauerstoffabschluss. Während das Pyrolyseöl generell direkt genutzt werden könnte, ist das Pyrolyseslurry (d. h. Gemisch aus Pyrolyseöl und -koks) für eine anschließende Vergasung geeignet.

### 5.3.2 Technologien für die Bereitstellung ausgewählter Biokraftstoffe

#### Hydrierte pflanzliche und tierische Öle und Fette

Eine weitere Möglichkeit (neben der Ver-/Umesterung pflanzlicher und tierischer Öle und Fette) Öle durch chemische Umwandlung an die Eigenschaften fossiler Kraftstoffe und damit an die vorhandenen Motoren anzupassen, stellt die katalytische Reaktion mit Wasserstoff (d. h. die Hydrierung) dar. Derartige hydrierte biogene Öle werden auch als HVO (Hydrogenated bzw. Hydrotreated Vegetable Oils) bezeichnet.

Zur Herstellung von hydrierten pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten werden zwei Herstellungsarten unterschieden: die gemeinsame Hydrierung von mit Mineralölkomponenten in herkömmlichen Raffinerien und die Hydrierung ausschließlich von in speziellen Anlagen; beide Varianten werden nachfolgend diskutiert. Ziel dieser Verfahren ist es, einen dieselähnlichen Kraftstoff teilweise oder ganz auf Basis biogener Energieträger zu produzieren und zugleich die vorhandenen Distributions- und Vermarktungsstrukturen der Mineralölwirtschaft zu nutzen. Die Literatur- und Referenzverweise zu nachstehenden Erläuterungen können /1/ entnommen werden.

#### Hydrierung in Mineralölraffinieren

Aus mineralischem Rohöl werden in einer Mineralölraffinerie durch Entsalzung, atmosphärische Destillation und Vakuumdestillation sowie weitere Verarbeitungsschritte (z. B. Hydrierung, Cracken) u. a. die Hauptprodukte Benzin und Mitteldestillat (d. h. Heizöl, Diesel) hergestellt. Als Zwischenstufe entsteht nach Entsalzung, atmosphärischer Destillation und Vakuumdestillation des Rückstandes sogenanntes Vakuumgasöl. Diesem Vakuumgasöl können Raps- oder andere Pflanzenöle in Anteilen bis zu etwa 30 % beigemischt werden.

Das Verfahren basiert ursprünglich auf zwei Verfahrensschritten, dem Hydrotreating und dem Hydrocracking. Im sogenannten Hydrotreater werden die Heteroatome (d. h. Schwefel (S), Sauerstoff (O), Stickstoff (N)) des Pflanzenöls unter Einbindung von Wasserstoff (d. h. Hydrierung) aus den Molekülen entfernt. Es entstehen Kohlenwasserstoffe sowie die gasförmigen Rückstände Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Die entstandenen Kohlenwasserstoffketten werden im Hydrocracker wiederum unter Wasserstoffeinbindung (d. h. Hydrierung) in

kleinere Strukturen gespalten (d. h. gecrackt); der Bruch der Bindungen erfolgt dabei statistisch. Als Kuppelprodukte entstehen Propan ( $C_3H_8$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Wasser ( $H_2O$ ). Die Gesamtkonversion des Einsatzmaterials liegt bei bis zu 90 %.

Ein neueres Verfahren verzichtet auf den Einsatz eines Hydrocrackers und wendet nach der Zumischung von Rapsöl lediglich einen Verfahrensschritt, die Mitteldestillatentschwefelung (MDE) im Hydrotreater, an. Dabei findet bereits ein Cracken der Triglycerid-Moleküle statt. Mit diesem Hydrotreater-Verfahren können Kraftstoffe mit einem Anteil von 10, 20 bzw. 30 % rapsölbasierender gesättigter Kohlenwasserstoffketten (Paraffine) im Endprodukt hergestellt werden. Die gebildeten Kohlenwasserstoffe sind mineralöltypische Verbindungen (Mitteldestillate), deren Eigenschaften sich – je nach Prozessbedingungen und Ausgangsprodukten – mehr oder weniger stark voneinander unterscheiden. Längerkettige pflanzenölbasierte Paraffine beeinträchtigen die Kältetauglichkeit, so dass der mögliche Beimischungsanteil im Winter stark begrenzt ist. Andernfalls sind spezielle Additive für die Verbesserung der Kälteeigenschaften eines derartigen Kraftstoffs erforderlich. Die Dichte von hydrierten Pflanzenölen ist mit etwa 780 kg/m<sup>3</sup> deutlich geringer und die Cetanzahl mit Werten bis zu 99 deutlich höher als von Dieselmotorkraftstoff, Biodiesel oder naturbelassenem Pflanzenöl. Allerdings geht während des Umwandlungsverfahrens die gute biologische Abbaubarkeit pflanzlicher Öle verloren. Außerdem führt der hohe Sauerstoffgehalt des Pflanzenöls zu einem erhöhten Wasserstoffverbrauch bei der Herstellung im Vergleich zu einer konventionellen Raffinerie.

Bei entsprechender Prozessführung erfüllt der teils auf Pflanzenöl und z. T. auf Mineralöl basierende Kraftstoff die Normanforderungen an Dieselmotorkraftstoff; er kann damit wie Dieselmotorkraftstoff eingesetzt werden. Erste Erfahrungen mit diesem Verfahren wurden bereits in den 1970er Jahren in der VEBA-Raffinerie Gelsenkirchen gemacht.

### Hydrierung in speziellen Anlagen

Neben der Verarbeitung in Mineralölraffinerien kann die Hydrierung von Pflanzenölen auch in speziell dafür konzipierten raffinerienahen Anlagen erfolgen. Beispielsweise können mit dem sogenannten NExBTL-Verfahren in einem raffinerieähnlichen Prozess aus verschiedenen Arten von pflanzlichen oder tierischen Ölen bzw. Fetten hochwertige Kraftstoffe mit vergleichsweise günstigeren Eigenschaften (z. B. höhere Cetanzahl bei niedrigerer Viskosität) hergestellt werden.

In einer ersten Verfahrensstufe werden bei diesem Verfahren bei Bedarf zunächst Feststoffe und Wasser aus dem Pflanzenöl abgeschieden. Dafür kommen die für die Pflanzenölraffination bzw. Biodieselproduktion bekannten Verfahren zum Einsatz. Anschließend wird das Pflanzenöl erwärmt und in Hydrotreating-Reaktoren gepumpt. Für diesen Prozess werden üblicherweise Festbettreaktoren verwendet, die bei einem Temperaturniveau von ca. 350 bis 450 °C und einem Wasserstoffpartialdruck von 48 bis 152 bar arbeiten. Dabei werden Standardkatalysatoren (z. B. auf Basis von Kobalt- oder Nickelmolybdän) eingesetzt.

Die massespezifische Umsatzrate wird mit etwa 1,23 t Rohmaterial je t Kraftstoff angegeben. Als Kuppelprodukte entstehen als Energieträger nutzbares Brenngas sowie zu einem kleinen Anteil Benzinfraktionen. Der spezifische Wasserstoffbedarf beträgt ca. 0,09 GJ Wasserstoff je GJ Kraftstoff. Das Reaktoreffluent mit Hauptprodukt, Recyclegas und Kuppelprodukten werden im Anschluss entsprechend separiert. Abhängig von den Eigenschaften des eingesetzten Rohmaterials muss der im Kreislauf gefahrene Wasserstoff entschwefelt werden.

Der so hergestellte Premiumkraftstoff ist frei von Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Aromaten und weist ähnliche Eigenschaften wie synthetisch hergestellter Dieselmotorkraftstoff auf. Die Kennwerte der DIN EN 590 werden mit Ausnahme der Dichte (z. B. 775 bis 785 kg/m<sup>3</sup> für HVO gegenüber 820 bis 845 kg/m<sup>3</sup> für DIN-Diesel) eingehalten.

Tabelle 102: Kenndaten für HVO

Rohstoff		Pflanzenöl
Anlagenkapazität (KS spezifisch)		
volumenspezifisch	[m <sup>3</sup> /a]	217949
massespezifisch	[t/a]	170000
energiespezifisch	[GJ/a]	3612500
	[MW <sub>KS</sub> ]	125
Jährliche Verfügbarkeit der Anlage (bei Nennlast)	[h/a]	8000
Jährlicher Nutzungsgrad der Anlage	[h/a]	8000
Laufzeit (Lebensdauer) des Gesamtanlage	[a]	20
<b>STOFF- UND ENERGIESTRÖME PRODUKHERSTELLUNG</b>		
<b>INPUT (Verbrauch) frei Anlage</b>		
Rohstoff	[t <sub>Rohstoff</sub> /h]	25,8
	MW <sub>RS</sub>	269
Eigenschaften Rohstoff 1		
unterer Heizwert	[GJ/t]	37,6
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	920
Prozesswasser	[kg <sub>HS</sub> /h]	2760
Wasserstoff	[kg <sub>HS</sub> /h]	893
Chemikalien	[kg <sub>HS</sub> /h]	64
Prozessenergie (HE)		
Strombedarf extern (d.h. aus dt. Stromnetz)	[kW <sub>el,extern</sub> ]	935
	kWh/kg <sub>HP</sub>	0,04
Prozesswärmebedarf	[kW <sub>th,extern</sub> ]	4038
	kWh/kg <sub>HP</sub>	0,19
<b>OUTPUT frei Anlage</b>		
Hauptprodukt		
Kraftstoff, volumenspezifisch	[m <sup>3</sup> /h]	27
Kraftstoff, massspezifisch	[t/h]	21,25
unterer Heizwert	[GJ/t]	44
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	780
Propan	[t <sub>NP</sub> /h]	1,53
Abwasser	[t <sub>RS</sub> /h]	4760

## BTL (Fischer-Tropsch-Diesel)

Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe (FT-KW oder auch BTL) zählen zu den synthetischen Kraftstoffen, deren Herstellung auf der Synthese von zuvor erzeugtem Synthesegas zu flüssigen Kraftstoffen mit definierten Eigenschaften basiert. Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse sind eine, abgesehen von Forschungs- und Demonstrationsanlagen, am Markt bislang noch nicht verfügbare Entwicklung. Der prinzipielle Verfahrensablauf ist in Abbildung 34 dargestellt und wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

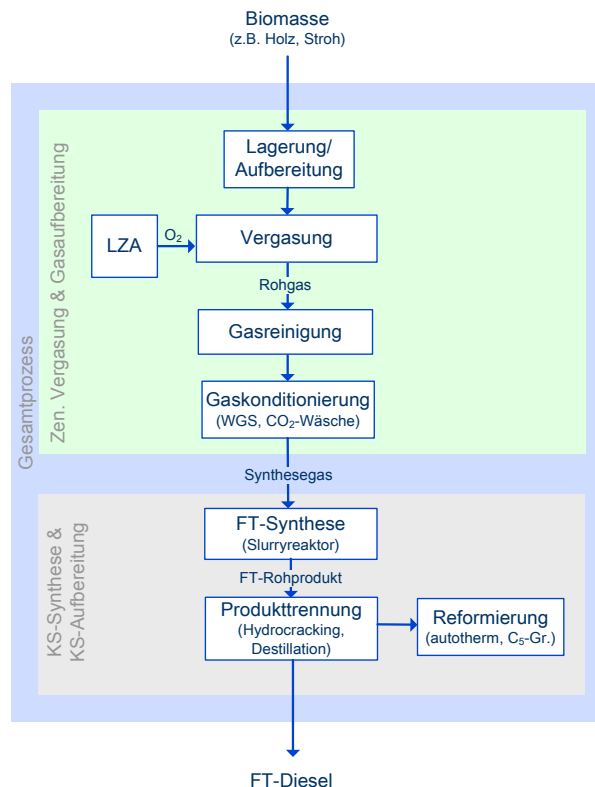


Abbildung 33: Verfahrensablauf zur BTL-Produktion

## Biomasseaufbereitung

Die Aufbereitung der Biomasse beinhaltet deren Vorbereitung und Anpassung an die Besonderheiten des jeweiligen Vergasungsverfahrens, wobei hier mechanische, thermische sowie ggf. thermo-chemische Verfahren verwendet werden.

Zu den mechanischen Verfahren zählen die Einstellung der benötigten Korngröße des Brennstoffs (Zerkleinerung, ggf. Siebung oder Pelletierung) und die Abtrennung von Störstoffen. Die thermische Aufbereitung umfasst die Vortrocknung des Brennstoffs auf den für die Vergasung erforderlichen Wassergehalt. Bei der thermo-chemischen Aufbereitung der Biomasse wird diese einer Pyrolyse unterzogen; dabei wird der Brennstoff durch den Einfluss von Wärme in Pyrolysegas, -öl oder -koks umgewandelt.

/1/



## Biomassevergasung

Bei der anschließenden Vergasung wird die Biomasse (Vergasungsstoff) in hochkalorisches Gas umgewandelt. Dabei wird ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel unterstöchiometrisch zugeführt. Dazu können prinzipiell Sauerstoff, Wasserdampf und/oder Kohlenstoffdioxid verwendet werden – der Einsatz von Luft als Vergasungsmittel wird im Fall der Produktion synthetischer Kraftstoffe wegen der hohen Inertgasanteile im Produktgas ausgeschlossen. Ähnliches gilt – wenn auch in vermindertem Maße – für Kohlenstoffdioxid, weshalb zumeist Sauerstoff oder Wasserdampf bzw. Gemische aus beiden Vergasungsmitteln eingesetzt werden.

Der Vorgang der Vergasung lässt sich grob in vier verschiedene Bereiche aufteilen. Zunächst findet eine Aufheizung und Trocknung des Brennstoffs statt. Anschließend erfolgt die pyrolytische Zersetzung. In der anschließenden Oxidation erfolgt die Aufspaltung des Kokes. Bei der nachfolgenden Reduktion werden die während der Oxidation entstehenden Verbrennungsprodukte und Wasserdampf mit festem Kohlenstoff reduziert. Im Ergebnis entsteht ein Rohgas, das hauptsächlich Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, Methan sowie Wasserdampf enthält.

Vergasungsverfahren werden wesentlich von der Reaktorart, der Art der Wärmebereitstellung und dem Druckniveau beeinflusst. Für die Biokraftstofferzeugung sind dabei die folgenden Reaktorbauarten relevant /1//11//12//17//19/:

- Wirbelschichtverfahren (d. h. Ausbildung einer stationären oder zirkulierenden Wirbelschicht durch das von unten in den Reaktor strömende Vergasungsmittel). Durch eine homogene Brennstoffverteilung im gesamten Reaktionsraum können sich keine unterschiedlichen Reaktions- und Temperaturzonen ausbilden, und die verschiedenen Teilreaktionen laufen bei einer gut regelbaren Temperatur von 700 bis 900 °C parallel ab. Verfahrensbedingt sind damit im Vergleich zu Festbettverfahren bessere Wärme- und Stoffübertragungen zwischen Gas und Feststoff und damit ein verbesserter Durchsatz bei kompakten Anlagengrößen erreichbar. Wirbelschichten haben sich in der stationären wie auch in der zirkulierenden Ausführung großtechnisch bewährt.
- Sonderverfahren (d. h. Einsatz einer mehrstufigen Technik unter örtlicher Trennung der genannten Teilschritte der Vergasung, z. B. mittels pyrolytischer Zersetzung in einem Drehrohrreaktor und anschließender Flugstromvergasung). Bei den Flugstrom-Druckvergasungsverfahren wird Vergasungsstoff geringer Partikelgröße bei hohen Temperaturen (1.200 bis 2.000 °C) innerhalb weniger Sekunden vergast. Drücke von bis zu 100 bar sind möglich. Hohe Kohlenstoffumsätze sind realisierbar (> 99 %). Flugstromvergaser sind für viele Brennstoffe geeignet, die allerdings in pumpfähiger Form vorliegen müssen. Das erzeugte Produktgas ist teerfrei und methanarm, die Asche wird flüssig abgezogen. Von einstufiger Vergasung wird gesprochen, wenn fein gemahlener oder flüssiger Brennstoff direkt vergast

wird. Beispiele hierfür sind die Vergasung von Schwarzlauge (Nebenprodukt aus der Papierherstellung), aber auch die Kohlevergasung, wie sie in modernen Kraftwerken praktiziert wird. Bei Einsatz von biogenen Festbrennstoffen wird ein sog. mehrstufiges Verfahren erforderlich; hierzu befinden sich zum einen die Spaltung des Brennstoffes in flüchtige (Pyrolysegas) und feste Bestandteile (Holzkohle) – Choren®-Verfahren – sowie die Erzeugung von Pyrolyseslurries – Bioliq®-Pilotanlage – in der Entwicklung. Der Vorteil der Flugstromvergasung ist damit in der Erzeugung eines praktisch teerfreien Produktgases zu sehen. Allerdings ist der Anlagenaufwand zur Beherrschung der hohen Temperaturen sowie zur Aufbereitung des Brennstoffes vergleichsweise hoch

### Gasreinigung und -konditionierung

Das bei der Vergasung gebildete Produktgas (sog. Rohgas) kann noch nicht der Synthese zugeführt werden. Vor allem die empfindlichen Katalysatoren würden aufgrund der im Rohgas enthaltenen Schadstoffe beeinträchtigt werden und machen deshalb eine Abscheidung der Schadkomponenten (z. B. Teer, Staub, Alkali-, Schwefel-, Halogen- und Stickstoffverbindungen) vor der Synthese erforderlich. Zur Gasreinigung kommen daher u. a. die folgenden Verfahren zum Einsatz /4//9//20/:

Zyklone werden bei der Wirbelschichtvergasung eingesetzt bzw. sind ein essentieller Bestandteil von zirkulierenden Wirbelschichten und dienen der Grobabscheidung von Partikeln wie Bettmaterial oder Staub, geringfügig auch von Teer. Sie sind über einen weiten Temperaturbereich einsetzbar und ihre Technik ist erprobt und kostengünstig.

Filter in Form von Gewebe-, Schütttschicht-, Keramik- und Elektrofiltern erreichen höhere Abscheidegrade als die Zyklone (bis 99,99 %), sind allerdings auch mit höheren Investitionskosten verbunden. Es können Partikel sowie teilweise Teere und Alkalien entfernt werden. Die verschiedenen Filterverfahren unterscheiden sich in den erreichbaren Abscheidegraden, im technischen Aufwand und damit in den Kosten sowie im verwendbaren Temperaturbereich.

Sog. „Teercracker“ werden zur thermischen Zersetzung von Teerverbindungen bei hohen Temperaturen (bis über 1.200 °C) genutzt. Beim „thermischen Cracken“ wird ein Teil des Rohgases mit Sauerstoff zur Erzeugung der hohen Temperaturen verbrannt. Bei diesem Verfahren werden bis zu 90 % der Teere umgesetzt.

Nasswäscher dienen zur Abscheidung einer ganzen Reihe von Schadstoffen (beispielsweise Partikel, Teere, Alkalien, Schwefel-, Halogen- und Stickstoffverbindungen), die absorptiv gebunden werden. Als Waschmittel werden Wasser oder organische Lösungsmittel wie Biodiesel (Rapsmethylester, RME) verwendet. Auch das Selexol- und das Rectisolverfahren (Tieftemperaturwäsche, kommerzielles Verfahren in der Kohlevergasung) sind an dieser Stelle zu nennen.

Adsorptive Verfahren dienen u. a. zur Schwefelentfernung und werden z. B. als „Polizeifilter“ verwendet: das Synthesegas muss absolut schwefelfrei sein, weil Schwefel (in Form von Schwefelwasserstoff  $H_2S$ ) als „Katalysatorgift“ wirkt. Hier

kommen beispielsweise Zinkoxid (ZnO-Adsorber), Eisenoxid oder Aktivkohle zum Einsatz.

Unter dem Begriff der Gaskonditionierung versteht man die Anpassung der Gaszusammensetzung an die Anforderungen des Syntheseprozesses. Dazu gehören die Einstellung des für die Synthese optimalen Verhältnisses von Wasserstoff zu Kohlenstoffmonoxid ( $H_2/CO$ -Verhältnis) sowie die Entfernung von Kohlenstoffdioxid aus dem Gasstrom. Außerdem gehört die Reformierung von Kohlenwasserstoffen zur Konditionierung des Gases.

## Synthese

Die Synthese zu BTL wurde 1925 von den Herren Fischer und Tropsch am Kaiser-Wilhelm-Institut (KWI) für Kohleforschung in Mülheim/Ruhr als Verfahren zur Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Kohle entwickelt. Ab 1938 begann die industrielle Verwertung, deren anschließende Entwicklung und Anwendung Hand in Hand mit der Entwicklung des Ölpreises ging.

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist ein Polymerisationsprozess, bei dem Synthesegas, das im Wesentlichen aus  $H_2$  und CO besteht, zu kettenförmigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt wird. Die Produkte bilden sich, indem  $CH_2$ -Kettenbausteine zu Kohlenwasserstoffketten zusammengefügt werden. Die Basisreaktion ist stark exotherm, weshalb der Wärmeabfuhr aus dem Prozess große Bedeutung zukommt. Die Selektivität, also die Verteilung der Produkte (Spektrum aus leichten Kohlenwasserstoffen ( $C_1$  bis  $C_4$ ), Benzin ( $C_5$  bis  $C_{10}$ ), Dieselölen ( $C_{11}$  bis  $C_{20}$ ) und Wachsen ( $C_{21+}$ )), ist abhängig von der sog. Kettenwachstumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  und wird von einer Reihe von Faktoren, wie z. B. Temperatur, Druck, Katalysator, Reaktortyp und dem  $H_2/CO$ -Verhältnis im Speisegas beeinflusst, wobei die folgenden Zusammenhänge gelten: allgemein steigt  $\alpha$  mit sinkendem  $H_2/CO$ -Verhältnis, mit sinkender Reaktionstemperatur und mit steigendem Druck.

Für die Synthese kommen vorrangig sog. Niedertemperaturverfahren zum Einsatz. Dabei werden im Wesentlichen zwei Reaktortypen unterschieden /1//4//9/:

- Festbettreaktoren (Tubular Fixed Bed Reactor, TFBR). Der Festbett- oder Rohrbündelreaktor besteht aus einem Behälter, in dem vertikal verlaufende lange und schmale Rohre in Bündeln angeordnet sind. Über den Kopf des Reaktors wird dieser mit Synthesegas beschickt, das die Röhren sehr schnell durchströmt, um nach Möglichkeit turbulente Strömungsverhältnisse zu schaffen. Die flüssigen Reaktionsprodukte, z. B. Wachse, verlassen den Reaktorraum selbständig über den Boden. An den Außenseiten der Rohre erfolgt die Abfuhr der Wärme durch Dampferzeugung.
- Suspensionsreaktoren (Slurry Bubble Column Reactor, SBCR). Der Reaktor ist aus einem Reaktormantel aufgebaut, der eine Kühlschlange enthält. Das Synthesegas wird am Boden zugeführt und steigt durch die Suspension (Wachse, Katalysatorpartikel) auf. Am Gasauslass, der sich am Reaktorkopf befindet, erfolgt der Abzug von nicht umgesetzten Synthesegasen, gasförmigen

Kohlenwasserstoffen und Wasser. Auch hier wird – wie beim Festbettreaktor – die überschüssige Wärme durch Erzeugung von Dampf abgeführt. Der Katalysator liegt suspendiert vor und kann deshalb während des Betriebs ausgetauscht werden.

### **Kraftstoffaufbereitung**

Das Spektrum der Produkte, die den FT-Synthesereaktor verlassen, muss für eine motorische Nutzung aufbereitet werden. Es erfolgt die Trennung der einzelnen Fraktionen und im Ergebnis liegen Rohbenzin (Naphtha,  $C_5$  bis  $C_{10}$ ), FT-Diesel ( $C_{11}$  bis  $C_{20}$ ) und Wachse ( $C_{21+}$ ) vor. Naphtha ist ein Rohbenzin, das als Rohstoff in der Petrochemie dient. Es kann durch Isomerisierung (Transformation langkettiger Kohlenwasserstoffe zu verzweigten) in gebrauchsfertiges Benzin umgewandelt werden.

Die Aufarbeitung der Wachsfraction ( $C_{21+}$ ) erfolgt dann über den Verfahrensweg des Hydrocrackens, wobei die langkettigen Kohlenwasserstoffe in die gewünschten Diesel- und Mitteldestillate unter Anwesenheit von Wasserstoff aufgespaltet werden. Um die Klopfestigkeit des Kraftstoffs zu erhöhen und die Fließeigenschaften bei tieferen Temperaturen zu verbessern, muss eine Isomerisierung vorgenommen werden, also eine Transformation eines Teils der langkettigen (aliphatischen) Kohlenwasserstoffmoleküle zu verzweigten. Auf die zur Herstellung gebrauchsfertigen Dieselmotorkraftstoffs erforderliche Additivierung soll hier nicht eingegangen werden /1//6//21/.

Tabelle 103: Kenndaten für BtL

		BTL - FT-Diesel		
Rohstoff		Restholz	KUP	Stroh
Anlagenkapazität (KS spezifisch)				
volumenspezifisch	[m³/a]	190526	196842	187368
massespezifisch	[t/a]	144800	149600	142400
energiespezifisch	[GJ/a]	6371200	6582400	6265600
	[MW <sub>KS</sub> ]	221	229	218
Jährliche Verfügbarkeit der Anlage (bei Nennlast)	[h/a]	8000	8000	8000
Jährlicher Nutzungsgrad der Anlage	[h/a]	8000	8000	8000
Laufzeit (Lebensdauer) des Gesamtanlage	[a]	20	20	20
<b>STOFF- UND ENERGIESTRÖME PRODUKTHERSTELLUNG</b>				
<b>INPUT (Verbrauch) frei Anlage</b>				
Rohstoff	[t <sub>Rohstoff</sub> /h]	139,5	144	137
	MW <sub>RS</sub>	518	518	530
Eigenschaften Rohstoff 1				
TS	[Ma. %]			
Feuchte	[Ma. %]	23,08	23,00	14
unterer Heizwert	[GJ/t]	13,37	12,95	13,94
Aschegehalt	[Ma. %]	0,46	1,39	4,6
Strombereitstellung intern	[kW <sub>el, intern</sub> ]	6200	6400	16000
	kWh/kg <sub>HP</sub>	0,34	0,34	0,90
<b>OUTPUT frei Anlage</b>				
Hauptprodukt				
Kraftstoff, volumenspezifisch	[m³/h]	24		
Kraftstoff, massspezifisch	[t/h]	18,1	18,7	17,8
unterer Heizwert	[GJ/t]	44	44	44
Dichte	[kg/m³]	760	760	760
Nebenprodukte				
Naphtha	[t <sub>NP</sub> /h]	3,72	3,84	3,65
Abwasser	[t <sub>RS</sub> /h]	12,186	12,58	11,94
Filterstaub	[t <sub>RS</sub> /h]	0,27	0,28	0,26
Schlacke	[t <sub>RS</sub> /h]	2,07	2,14	2,03

### 5.3.3 Biomethan

Die Erzeugung von Biomethan kann durch bio-chemische Umwandlung zu Biogas (d. h. anaerobe Vergärung) wie auch durch die thermo-chemische Konversion zu Bio-SNG (d. h. auf Basis der Biomassevergasung) erfolgen. Um Biomethan in das Erdgasnetz einspeisen zu können, sind vielfältige Verfahrensschritte notwendig. Dabei nimmt die Reinigung bzw. Aufbereitung der Gase auf Erdgasqualität eine ebenso bedeutende Rolle ein wie die Druckerhöhung des einzuspeisenden Gases auf den vorherrschenden Druck in der Erdgasleitung. Außerdem muss der Biomethantransport zur eigentlichen Einspeisestelle sichergestellt werden. Mit der Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz ist es möglich den Ort der Gasnutzung vom Ort der Gasproduktion zu entkoppeln. Dies ermöglicht u. a. die Versorgung von Gebieten mit hoher Nachfrage nach erneuerbaren Brenn- bzw. Treibstoffen und die zentrale und damit effiziente Nutzung dezentral anfallender Biomassen. Die Literatur- und Referenzverweise zu nachstehenden Erläuterungen können /21/ entnommen werden.

#### **Biomethan aus bio-chemisch erzeugtem Biogas**

Biogas kann aus einer großen Palette organischer Substanzen hergestellt werden. Neben den typischen landwirtschaftlichen Ressourcen (tierische Exkremente und nachwachsende Rohstoffe) bieten auch Reststoffe aus Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe ein breites Spektrum an einsetzbaren Substraten.

Die zur Produktion von Biogas notwendigen Anlagen sind verfügbar und Stand der Technik. Allerdings wird das heute gewonnene Biogas in der Regel direkt an der Anlage zur Gewinnung von Strom und Wärme eingesetzt. Um Biogas in das Erdgasnetz einspeisen bzw. als Treibstoff im Verkehrsbereich nutzen zu können, muss eine Anpassung der Brennstoffqualität an die chemischen Eigenschaften von Erdgas erfolgen. Diverse im Gas enthaltene Elemente (in erster Linie Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff) müssen entfernt und der Methangehalt somit erhöht werden. Zusätzlich ist das Gas zu trocknen. Für die unterschiedlichen Aufbereitungsschritte des Biogases, stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Technologien zur Nutzung von Erdgas sind erprobt und deren Verbreitung im stationären und mobilen Bereich wird momentan stark forciert.

Wie in Abbildung 35 zu sehen, ist der Prozess der Biomethanherstellung durch anaerobe Fermentation, in die Rohbiogasproduktion und die Aufbereitung zu Biomethan zu unterscheiden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte, vom Substrathandling bis zur Biomethanaufbereitung näher erläutert.

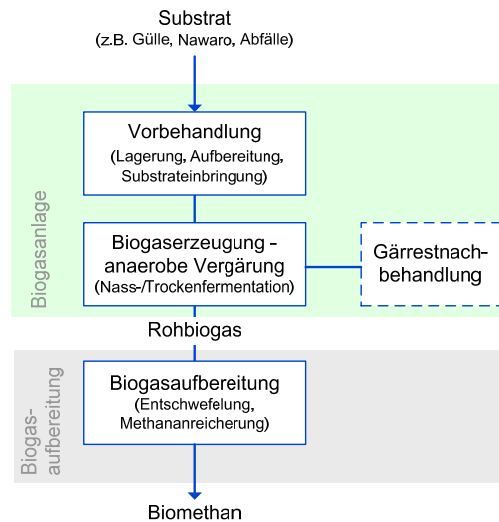


Abbildung 34: Systemkomponenten der bio-chemischen Biomethanbereitstellung

Für die Bereitstellung von Biomethan durch anaerobe Fermentation steht eine Vielzahl von Substraten zur Verfügung. Die größten Biogasmengen werden deutschlandweit derzeit aus landwirtschaftlichen Produkten hergestellt. Heute werden hauptsächlich Maissilage, Getreide (Korn und Ganzpflanzensilage) und Gras eingesetzt, wobei der Mais als Energiepflanze eine herausragende Position einnimmt. Eine weitere wichtige Substratquelle, vor allem für die zukünftigen Entwicklungen, stellen Abfälle bzw. Reststoffe dar. Neben landwirtschaftlichen Reststoffen wie Ernterückständen, Futterresten oder Landschaftspflegegut werden vermehrt auch Abfälle aus Industrie (z. B. Nahrungsmittelproduktion) bzw. Gewerbe (z. B. Speisereste) sowie Kommunen (Bioabfälle) eine Schlüsselposition einnehmen und einen großen Anteil an der produzierten Biogasmenge haben.

### Substratvorbehandlung

Unter der Substratvorbehandlung werden die Prozessschritte verstanden, die notwendig sind, um das Substrat vom Gesteungsort in die Biogasanlage zu bringen. Dies umfasst im Einzelnen die Anlieferung, die Lagerung, die Aufbereitung, den Transport und die Einbringung der Substrate in den Fermenter. In der Substrataufbereitung liegt dabei ein großes Potenzial der Optimierung der Gesamtanlage.

Anlieferung. Der Transport der Substrate spielt eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der ökonomischen Bilanzierung der Biogasanlage. Gerade bei wachsender Anlagengröße steigen die Transportwege der Substrate auf mitunter unwirtschaftliche Entfernungen. Hinzu kommt noch der Abtransport der Gärrückstände. Die Stoffstromlogistik ist somit ein limitierender Faktor für die maximale Größe einer Biogasanlage.



Lagerung. Die Gestaltung der Lager ist von den verwendeten Substraten und der Anlieferungskonzeption abhängig. Die Dimensionierung richtet sich nach Substrataufkommen, Fermenterleistung, auszugleichenden Lieferschwankungen, Flächenausstattung, Ertrag bei Kosubstraten sowie Lieferverträgen bei betriebsfremden Substraten. Darüber hinaus müssen Betriebsstörungen abgefangen werden können. Übliche Lagerbauformen sind Fahrsilos oder Gruben, für flüssige Substrate Tanks; zudem können Vorgruben als kurzfristige Lager genutzt werden.

Aufbereitung. Art und Umfang der Substrataufbereitung beeinflussen den Ablauf des Gärprozesses und damit die Ausnutzung des energetischen Potenzials der verwendeten Substrate. Ziel der Aufbereitung ist es, einerseits den gesetzlichen Ansprüchen (z. B. Hygienisierung bei hygienekritischen Stoffgruppen) und andererseits den Mikroorganismen als Methanerzeuger weitestgehend gerecht zu werden. Die substratspezifische Aufbereitung kann die folgenden Prozessschritte umfassen: (i) Sortierung und Störstoffabtrennung, (ii) Hygienisierung, (iii) Zerkleinerung, (iv) Anmischung, (v) Homogenisierung sowie (vi) zahlreiche Verfahren, die sich derzeit noch im Entwicklungsstadium befinden, wie z. B. Mikrowellenbehandlung, Ultraschall, Zugabe von Enzymen.

Substrateinbringung. Für einen stabilen Gärprozess ist aus prozessbiologischer Sicht ein kontinuierlicher Substratstrom durch die Biogasanlage der Idealfall. Da dieser in der Praxis kaum realisiert werden kann, ist eine quasikontinuierliche Substratzugabe (d. h. in mehreren Chargen pro Tag) in den Fermenter der Regelfall. Je nach Substratbeschaffenheit kann die Anlagentechnik für den Transport und die Einbringung in Aggregate für pumpfähige und stapelbare Substrate unterschieden werden. Bei großen Differenzen zwischen Substrat- und Fermentertemperatur (z. B. bei Einbringung nach einer Hygienisierungsstufe oder im Winter) wird die Prozessbiologie stark gestört, was zur Verminderung des Gasertrages führen kann. Als technische Lösungen werden hier zuweilen Wärmetauscher und beheizte Vorgruben verwendet.

### **Biogaserzeugung durch anaerobe Vergärung**

Die Erzeugung von Biogas erfolgt durch die bio-chemische Konversion (d. h. anaerobe Fermentation bzw. Vergärung) von geeigneten Substraten. Die technische Umsetzung der Vergärung orientiert sich zwangsläufig an den biologischen Grundlagen des anaeroben Vergärungsprozesses. Dabei kommen, je nach Anforderungen seitens der Substrate, verschiedene Anlagenkonfigurationen zum Einsatz. Ungeachtet dessen gibt es einen grundsätzlichen Verfahrensablauf, so dass sich alle Anlagen hinsichtlich ihres systemtechnischen Aufbaus ähneln.

Kernstück der Biogasanlage ist der Fermenter, inklusive dazu gehöriger Peripherie. Die verschiedenen Ausführungen der Fermenter sind hinsichtlich Materialien und Bauweise sehr unterschiedlich wobei ein großer Teil von landwirtschaftlichen Güllelagern abgeleitet und an die spezifischen Anforderungen der Biogastechnik angepasst wurde. Abhängig von den zur Verfügung stehenden Substraten, dem gewählten Gärverfahren und den örtlichen Gegebenheiten können Fermenter unterschiedlich ausgeführt

werden. So wird prinzipiell zwischen den Verfahren der Nass- und Feststoffvergärung unterschieden.

Nassvergärung. Die Nassvergärung wird in mit Tanks vergleichbaren Behältern durchgeführt. Prinzipiell wird zwischen liegenden und stehenden Fermentern differenziert:

- Liegende Fermenter haben einen zylindrischen oder rechteckigen Querschnitt und sind hinsichtlich ihres Volumens begrenzt (bis ca. 2.000 m<sup>3</sup>). Häufig werden sie nicht vor Ort gefertigt und sind dann auf Größen bis ca. 800 m<sup>3</sup> limitiert. Oftmals werden sie als Stahltanks ausgeführt und kommen als Hauptfermenter für kleinere Anlagen oder als Vorfermenter für größere Anlagen mit stehenden Hauptfermentern in Frage. Liegende Fermenter werden auch parallel betrieben, um größere Durchsatzmengen zu realisieren. Weil liegende Behälter in der Regel um ein Mehrfaches länger als hoch sind, stellt sich insbesondere bei hohen Feststoffgehalten die sog. Pfropfenströmung ein. Das Substrat wandert hierbei langsam von der Eintrags- zur Austragsseite, wobei sich ein Pfropfen bildet, der durch den Fermenter strömt. Die Möglichkeit, nicht ausgegorenes Substrat ungewollt aus dem Fermenter auszutragen, wird dadurch verringert und die Verweilzeit kann für das gesamte Material mit höherer Sicherheit gewährleistet werden.
- Stehende Fermenter sind überwiegend als Rundbehälter ausgeführt und werden vor Ort erstellt. Sie können vollständig durchmischt (sog. Rührkesselprinzip) oder (was die Ausnahme bei sehr hohen Feststoffgehalten ist) als Pfropfenstromreaktor betrieben werden. Stehende Fermenter sind die in der Praxis vornehmlich ausgeführten Fermenter mit einem Volumen von typischerweise bis zu ca. 6.000 m<sup>3</sup>; üblicherweise zwischen 1.500 m<sup>3</sup> und 3.000 m<sup>3</sup>.

Feststoffvergärung. Im Gegensatz zur Nassvergärung wird bei diesem Verfahren das Gärgut nicht verflüssigt. Das ermöglicht bei diskontinuierlichen Feststoffvergärungsverfahren die Nutzung stapelbarer Substrate ohne eine aufwändige Substrataufbereitung sowie den Verzicht auf eine Durchmischung und reduziert so den Energie- und Wasserbedarf bei der Biogasherstellung. Das in den Fermenter eingebrachte Gärsubstrat wird bei diskontinuierlichen Verfahren während des Prozesses ständig feucht gehalten, indem mittels Perkolat die Lebensbedingungen für die Bakterien gewährleistet werden. Bei dieser Art der Feststoffvergärung findet keine ständige Durchmischung des Materials statt und somit sind keine Pumpen und Rührwerke für das Gärsubstrat nötig.

Bei kontinuierlichen Feststoffvergärungsverfahren erfolgt in der Regel eine Förderung des Substrates im oben beschriebenen Pfropfenstrom und meist eine quer zur Förderrichtung erfolgende lokale Durchmischung. Für die Vergärung stapelbarer organischer Substrate wird eine Vielzahl von Verfahrensvarianten eingesetzt, welche hauptsächlich als einstufige Prozesse im meso- oder thermophilen Temperaturbereich betrieben werden. Die konstruktive Ausführung der Feststofffermentationsverfahren ist

sehr verschiedenartig. So eignen sich mehrere Module, um die Biogasproduktion zu vergleichmäßigen und um größere Fermentervolumina zu realisieren.

### **Biogasaufbereitung zu Biomethan**

Die Zusammensetzung von Biogas und die erzielbaren Gasausbeuten hängen im Wesentlichen von den eingesetzten Substraten und dem Vergärungsprozess ab. Biogas setzt sich je nach Gegebenheiten aus ca. 55 bis 70% Methan, 30 bis 45 % Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Wasserdampf und Spurengasen zusammen. Verfahrensbedingt können auch einige Prozente Stickstoff oder Sauerstoff enthalten sein.

Für einen Einsatz als Erdgassubstitut muss Biogas den Eigenschaften des Erdgases angepasst werden (d. h., die DVGW-Arbeitsblätter G260, G262 und G485 sind einzuhalten). Insbesondere der Heizwert und der Wobbe-Index sind anzupassen. Dies geschieht durch Entfernen unerwünschter Stoffe, wie Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und Wasser, in mehreren Prozessstufen.

Zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität steht eine Vielzahl unterschiedlich bewährter Verfahren zur Verfügung. Dazu zählen in erster Linie physikalische Verfahren, basierend auf Adsorption und Absorption, Kühlung und Membrantrennung, sowie chemische Absorptionsverfahren. Die Biogasaufbereitung zum Erdgassubstitut mit einem Methananteil von etwa 98 % erfolgt in mehreren Schritten. Neben der Entschwefelung und der Gastrocknung, kommt vor allem der Methananreicherung bzw. CO<sub>2</sub>-Abtrennung eine entscheidende Rolle zu. Die jeweiligen Gasaufbereitungsschritte sind abhängig von technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen und werden entsprechend kombiniert und miteinander verknüpft.

Entschwefelung. Eine ausreichende Entschwefelung ist oftmals Grundvoraussetzung um den nachgeschalteten Methananreicherungsprozess nicht zu gefährden (Ausnahme: Druckwasserwäsche). Grundsätzlich kann nach Verfahrensprinzip (d. h. biologische bzw. absorptive, chemische und adsorptive oder auch sorptionskatalytische Verfahren) und nach Anwendungsfall (d. h. Grob- oder Feinent Schwefelung bis auf 5 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>) unterschieden werden. Nachfolgend werden die für eine Biogaseschwefelung wesentlichen Verfahren vorgestellt:

- Sulfidfällung durch Zugabe von Eisensalzen in den Vergärungsprozess zur Grobentschwefelung (z. B. von 2.000 ppmv auf 100 bis 150 ppmv) mit vorrangigem Einsatz in kleinen Biogasanlagen mit erforderlicher entsprechende Nachreinigung des (Roh-)Biogases.
- Integrierte biologische Entschwefelung durch Einblasung von Luft (i. d. R. 8 bis 12 Vol.-% des Biogasvolumenstroms) in den Gasraum des Fermenters mit jedoch nur unzureichender Entschwefelung.
- Tropfkörperanlagen mit speziellen Füllkörpern, auf denen sich H<sub>2</sub>S oxidierende Mikroorganismen ansiedeln, welche aufgrund der durch den Lufteintrag notwendigen anschließenden technisch aufwendigen N<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Abtrennung nur bedingt zur Biomethan-Aufbereitung geeignet sind.

- Biowäscher für die biologische Grobentschwefelung mittlerer und großer Biogasströme so genannte Biowäscher mit  $\text{H}_2\text{S}$ -Absorption (Auswaschung) in 20 %-iger Natronlauge ( $\text{NaOH}$ ) sowie der Notwendigkeit einer weiteren Feinentschwefelung.
- Aktivkohleschüttung zur  $\text{H}_2\text{S}$ -Abscheidung mit imprägnierter Aktivkohle (z. B. mit Kaliumjodid ( $\text{KI}$ ), Kaliumcarbonat ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) oder Kaliumpermanganat ( $\text{KMnO}_4$ )) zur Feinentschwefelung.
- Zinkoxidbett- bekannt aus der großtechnischen Gasreinigung (z. B. Erdgasentschwefelung) -aufgrund der hohen Prozesstemperaturen ist dieses Verfahren nur in Kombination mit weiteren heißen Verfahrensstufen sinnvoll und daher für Biogas i. d. R. ungeeignet.

Methananreicherung. Um das (Roh-)Biogas mit Methan anzureichern, ist eine  $\text{CO}_2$ -Abtrennung erforderlich. Durch die Methananreicherung werden die oben genannten notwendigen Gaseigenschaften für die Biogaseinspeisung in Erdgasnetze erzielt. Prinzipiell einsetzbare Verfahren werden nachfolgend kurz charakterisiert, wobei für die Biogasaufbereitung gegenwärtig hauptsächlich die Druckwasserwäsche und die Druckwechseladsorption und mit Abstrichen auch chemische und physikalische Wäschen mit unterschiedlichen Waschlösungen zur Anwendung kommen. Ausschlaggebend für die Wahl des Verfahrens sind die Gasbeschaffenheit, die erreichbare Produktgasqualität, die Methanverluste und letztendlich die Aufbereitungskosten, welche je nach den örtlichen Gegebenheiten schwanken können.

- Druckwechseladsorption (DWA). Die Anwendung von Aktivkohlen, Molekularsieben (Zeolithen) und Kohlenstoffmolekularsieben zur physikalischen Gastrennung mittels kinetischer, sterischer und Gleichgewichtseffekte wird als Druckwechseladsorptionstechnik verstanden. Dieses Verfahren ist weit verbreitet und technisch ausgereift. Je nach Dauer der vier Zyklen für Adsorption (d. h. Adsorption von  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf und  $\text{CO}_2$  bei Druck von ca. 6 bis 10 bar), Desorption (d. h. durch Druckentspannung), Evakuierung (d. h. weitere Desorption durch Spülen mit Roh- oder Produktgas) und Druckaufbau werden für Biogasaufbereitungsanlagen vier bis sechs Adsorber parallel geschaltet. Der Gesamtenergiebedarf ist im Vergleich zu anderen Verfahren eher gering, wobei der Strombedarf, aufgrund der ständigen Druckwechsel, als relativ hoch einzustufen ist. Von Vorteil ist auch, dass dieses Verfahren für kleine Kapazitäten prädestiniert ist. Der Nachteil der DWA liegt derzeit in den vergleichsweise hohen Methanverlusten im Abluftstrom. Dieser muss aufgrund der hohen Treibhausgaswirksamkeit von Methan nachoxidiert werden.
- Druckwasserwäsche (DWW). Die Druckwasserwäsche ist das am meisten realisierte Verfahren. Es nutzt die unterschiedlichen Löslichkeiten von  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  in Wasser. Vorgereinigtes Biogas wird zunächst auf ca. 3 bar und in einer anschließenden Kompressorstufe auf ca. 9 bar verdichtet, bevor es die mit  $\text{H}_2\text{O}$  beaufschlagte Absorptionskolonne (Rieselbettreaktor) im Gegenstrom durchströmt. In der Kolonne lösen sich die basischen und sauren Bestandteile

im Wasser. Eventuell im Rohgas enthaltene Stäube und Mikroorganismen werden größtenteils ebenfalls vom Waschwasser aufgenommen. Eine vorgeschaltete Entschwefelung bzw. Trocknung ist bei diesem Verfahren nicht notwendig. Weitere Vorteile der Druckwasserwäsche liegen in der großen Flexibilität, um sich vorherrschenden Bedingungen anzupassen. Der Energiebedarf für die Umwälzung der üblicherweise großen Waschwassermenge, liegt in den gleichen Größenordnungen wie bei der DWA. Der Nachteil besteht auch hier im vergleichsweise hohen Methanschlupf (ca. 1 %).

- Genosorb-Wäsche. Ähnlich dem Funktionsprinzip der Druckwasserwäsche arbeitet das Genosorb-Verfahren. Statt Wasser wird hier eine Waschlösung (Genosorb) bei 7 bar mit dem Biogas in Kontakt gebracht, wobei neben Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff auch Wasser abgetrennt werden können. Damit ist die Genosorb-Wäsche das einzige Verfahren, welche alle drei Störstoffe in einem Verfahrensschritt entfernen kann. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte jedoch eine Grobentschwefelung vorgeschaltet sein. Die Regeneration der Waschlösung erfolgt bei 50°C durch schrittweises entspannen und abschließendem Spülen mit Umgebungsluft.
- Aminwäsche. Die Aminwäsche ist ein chemisches Absorptionsverfahren, bei dem das Biogas drucklos mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht und dabei das Kohlendioxid in das Waschmedium übertritt. Als Waschlaugen finden für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung oft z. B. Monoethanolamin (MEA) (in Niederdruckverfahren und wenn nur CO<sub>2</sub> ausgewaschen werden soll) oder Diethanolamin (DEA) (in Hochdruckverfahren ohne Regeneration) Verwendung. Für die Abtrennung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S dienen Methyldiethanolamin (MDEA) oder auch Triethanolamin (TEA). Zur Wiedergewinnung des Waschmittels wird der Absorptionsstufe eine Desorptions- bzw. Regenerationsstufe nachgeschaltet, wobei üblicherweise H<sub>2</sub>O-Dampf eingesetzt wird. Dies beinhaltet den großen Nachteil des Verfahrens, den hohen Bedarf an thermischer Energie.
- Membrantrennverfahren. Die Membrantechnik ist ein noch relativ neues Verfahren, welches sich mehr oder weniger im Entwicklungsstadium befindet. Es werden zwar bereits vereinzelt Membrantrennverfahren eingesetzt, die Trennleistungen reichen zurzeit aber noch nicht aus, um die geforderten Produktreinheiten zu erreichen. Einen entscheidenden Einfluss auf die Trennleistung haben insbesondere die Modulbauform (Flach-, Hohlfaden-, Platten-, Wickelmodul), die Modulverschaltungen (Reihen- oder Parallelschaltungen mit Rückführungen), der Wertstoffstrom (Permeat, Retentat) und die Druckverhältnisse (Hochdruck, Vakuum). Membranverfahren könnten wirtschaftlich in Kombination mit Wäschern oder Adsorptionsanlagen zur Vorreinigung von Prozessströmen eingesetzt werden.

- Kryogene Verfahren. Die kryogene Gasaufbereitung (d. h. Trennung von  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ ) umfasst zum einen die Rektifikation (Gasverflüssigung), bei der flüssiges  $\text{CO}_2$  entsteht und zum anderen die Tieftemperaturtrennung, die ein Ausfrieren von  $\text{CO}_2$  erreicht. Beides sind technisch sehr anspruchsvolle Verfahren, die eine vorherige Entschwefelung und Trocknung des Gases erfordern. Sie sind, besonders in Bezug auf die Anwendung für Biogas, nicht praxiserprobt. Als problematisch gestaltet sich dabei vor allem der hohe Energiebedarf. Die erreichbaren Gasqualitäten und der geringe Methanverlust sprechen allerdings für eine Weiterentwicklung des Verfahrens.

Gastrocknung. Die Auswahl des anzuwendenden Gastrocknungsverfahrens bzw. einer entsprechenden Kombination verschiedener Verfahren ist abhängig vom Biogasaufbereitungspfad, im Wesentlichen vom oben genannten  $\text{CO}_2$ -Abtrennverfahren und vom Biogasdurchsatz. Eine Trocknung des Biogases ist zwingend notwendig um einerseits Korrosion (durch Bildung von aggressiven Kondensaten aus Wasser und den Gaskomponenten  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{O}_2$ ) zu verhindern und um andererseits Biogasreinigungsprozesse in ihrer Wirkung nicht zu beeinträchtigen. Eine Vortrocknung wird zunächst durch die Biogasverdichtung erreicht. Hierbei entsteht Kondensat, so dass nach der Verdichtung die Teilabscheidung von Wasser und kondensierbaren Kohlenwasserstoffen möglich ist. Als Trocknungsverfahren für Biogas sind die Adsorption mit Hilfe von Kieselgel und Aktivkohlen, die Kondensationstrocknung und die Glykolwäsche als absorptives Verfahren geeignet.



Tabelle 104: Kenndaten Biomethan aus Biogas

		Biomethan/Biogas	
Rohstoff		Nawaro	Bioabfall
Anlagenkapazität (KS spezifisch)			
volumenspezifisch	[m³/a]	1749597	1776000
massespezifisch	[t/a]	1260	1279
energiespezifisch	[GJ/a]	62985	63936
	[MW <sub>KS</sub> ]	2,19	2,22
Jährliche Verfügbarkeit der Anlage (bei Nennlast)	[h/a]	8000	8000
Jährlicher Nutzungsgrad der Anlage	[h/a]	8000	8000
Laufzeit (Lebensdauer) des Gesamtanlage	[a]	20	20
<b>STOFF- UND ENERGIESTRÖME PRODUKTHERSTELLUNG</b>			
<b>INPUT (Verbrauch) frei Anlage</b>			
Rohstoff	[t <sub>Rohstoff</sub> /h]	2,88	3,88
	MW <sub>RS</sub>	5,28	4,31
Eigenschaften Rohstoff 1			
TS	[Ma. %]	32	58
Biogasertrag	m³/t <sub>FM</sub>	187	110
unterer Heizwert	[GJ/t]	7,3	4,0
Eigenschaften Rohstoff 2			
TS	[Ma. %]	9,00	
Biogasertrag	m³/t <sub>FM</sub>	25,00	
unterer Heizwert	[GJ/t]	0,50	
Prozessenergie (HE)			
Strombedarf extern (d.h. aus dt. Stromnetz)	[kW <sub>el,extern</sub> ]	188	235
	kWh/kg <sub>HP</sub>	1,19	1,47
Prozesswärmebereitstellung intern			
	[kW <sub>th,intern</sub> ]	213	303
	kWh/kg <sub>HP</sub>	1,35	1,90
Kompression	GJ <sub>el</sub> /GJ <sub>KS</sub>	0,02	0,02
<b>OUTPUT frei Anlage</b>			
Hauptprodukt			
Kraftstoff, volumenspezifisch	[m³/h]	219	222
Kraftstoff, massspezifisch	[t/h]	0,16	0,16
unterer Heizwert	[GJ/t]	50	50
Dichte	[kg/m³]	0,72	0,72
Gärreste	[t <sub>NP</sub> /h]	2,30	2,8



## Biomethan aus thermo-chemisch erzeugtem Bio-SNG

Eine weitere Option der Bereitstellung von Erdgassubstituten ist die thermo-chemische Erzeugung. Bereits in den 1970- und -80er Jahren stand die Produktion von SNG auf der Basis von Synthesegas im Fokus der Technikentwicklung, jedoch ging aufgrund der Preisentwicklung für Erdgas das kommerzielle Interesse verloren. Eine erste Demonstrationsanlage zur Produktion von Bio-SNG wird gegenwärtig in Güssing (Österreich) in Betrieb genommen.

Der thermo-chemische Produktionsprozess der Biomethan Erzeugung erlaubt es, biogene Festbrennstoffe (z. B. Holz und Stroh) in Gas zu konvertieren, welches aufgrund seines hohen Methangehaltes (etwa 95 %) in das Erdgasnetz eingespeist werden kann. Weitgehend analog zu BTL kann der Konversionspfad generell in die fünf Prozessstufen unterteilt werden (siehe Abbildung 36).

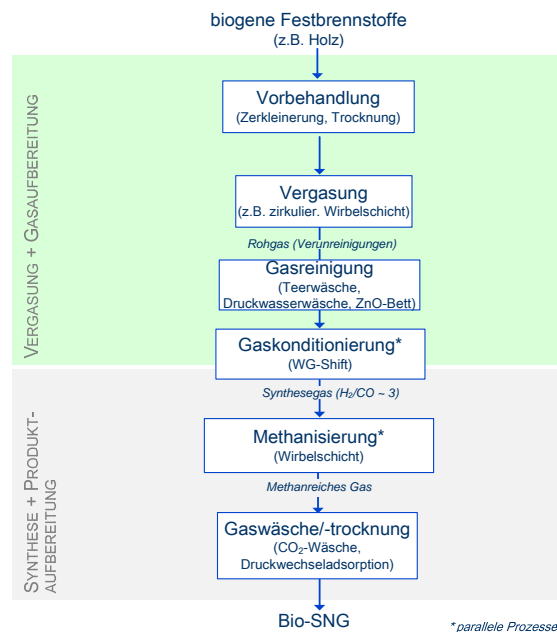


Abbildung 35: Konversionspfad der thermo-chemischen Biomethanerzeugung

Wesentliche technische Grundlagen zur Einordnung der Teilschritte Biomasseaufbereitung, Vergasung sowie Gasreinigung und -konditionierung wurden – da für die Produktion synthetischer Biokraftstoffe weitgehend analog – bereits in Kapitel 0.0.0 diskutiert. Daher liegt der Fokus der nachfolgenden Betrachtungen auf der Kraftstoffsynthese sowie der abschließenden Gasaufbereitung zum Biomethan Bio-SNG, das entsprechend in das Erdgasnetz eingespeist werden und somit der mobilen Nutzung zugeführt werden kann.

## Methanisierung und Gaskonditionierung

Um den Methangehalt des gereinigten Gases zu erhöhen, wird das Gas einer katalysatorgestützten Synthese (der sogenannte Methanisierung) unterzogen. Die üblicher Weise eingesetzten Nickelkatalysatoren arbeiten im Allgemeinen bei erhöhten Temperaturen (280 bis 400 °C) und Drücken (1 bis 60 bar). Bei Gasen mit hohem Wasserstoffgehalt ( $H_2/CO$ -Verhältnis  $> 3$ ) wird entsprechend neben Kohlenmonoxid auch Kohlendioxid (zusammen mit Wasserstoff) in Methan (und Wasser) umgesetzt. Um einen hohen Kohlenmonoxidumsatz während der Methanisierung sicherzustellen, ist ein  $H_2/CO$ -Verhältnis von mindesten 3/1 notwendig. Da das gereinigte Gas jedoch je nach den Prozessparametern des Vergasungsprozesses durch  $H_2/CO$ -Verhältnisse zwischen 0,3 und 2,0 gekennzeichnet ist, muss dieses entweder durch (i) Wasserstoffzugabe oder durch (ii) die Konvertierung von Kohlenmonoxid in Wasserstoff (und Kohlendioxid) unter Anwesenheit von Wasser erhöht werden. Da die in zur Unterstützung der Methanisierungsreaktion eingesetzten Nickelkatalysatoren bei erhöhten Drücken und Temperaturen jedoch ebenfalls die Wassergas-Shift-Reaktion katalysieren, kann die Einstellung eines ausreichenden  $H_2/CO$ -Verhältnisses durch die Wassergas-Shift-Reaktion (u. a. in Abhängigkeit vom eingesetzten Methanisierungsreaktor) prinzipiell anstatt in einem gesonderten Reaktor vor der Methanisierung auch im Methanisierungsreaktor parallel zur Methansynthese erfolgen.

Grundsätzlich können Methanisierungsreaktoren entsprechend dem fluid-dynamischen Verhalten ihrer Katalysatoren in Festbett- und Wirbelschichtreaktoren unterteilt werden.

- Festbettreaktoren. Aufgrund der stark exothermen Methanisierungsreaktion und den begrenzten radialen und axialen Wärmübertragungsraten von Festbettreaktoren kann ein einzelner Festbettreaktor nur unter großen Aufwendungen isotherm betrieben werden. Um trotzdem annähernd isotherme Reaktionsbedingungen zu erhalten und den Methanisierungsprozess auf diese Weise gut kontrollieren zu können, werden meist mehrere Festbettreaktoren mit moderaten Konversionsraten und damit auch moderaten Abwärmeströmen miteinander verschaltet.
- Wirbelschichtreaktoren. Im Gegensatz zu Festbettreaktoren findet die Methanisierung in Wirbelschichtreaktoren in einem katalytischen Wirbelbett statt. Die intensive Bewegung und gleichmäßige Verteilung des Katalysators ermöglicht hohe Wärmeübertragungsraten und homogene Reaktionsbedingungen im gesamten Reaktor. Durch einen Wärmeübertrager im Wirbelbett kann die Reaktionswärme der exothermen Methanisierungsreaktion abgeführt werden und nahezu isotherme Bedingungen im Reaktor erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil von Wirbelschichtreaktoren ist die Möglichkeit, die Wassergas-Shift-Reaktion sowie die Reformierung niedriger Kohlenwasserstoffe (z. B.  $C_2H_4$ ) in den Reaktor zu integrieren und so auf einen externen Wassergas-Shift-Reaktor zu verzichten.

## Aufbereitung zu Biomethan

Um das erzeugte Gas nach der Methanisierung in das Erdgasnetz einspeisen zu können, muss das Gas qualitativ den Ansprüchen des Gasnetzes genügen. Nach der Methanisierung ist daher eine Aufbereitung des Roh-Biomethans notwendig. Diese Aufbereitung umfasst im Wesentlichen die Entfernung von  $\text{CO}_2$  aus dem Gas und eine Gastrocknung. Für beide Prozessschritte sind diverse Techniken am Markt verfügbar und finden in den verschiedensten Bereichen wie der Biogasaufbereitung, der Kunststoffindustrie aber auch der Aufbereitung von Kohlegas Anwendung.

Kohlendioxidentfernung. Mit Blick auf die Kohlendioxidentfernung kann generell zwischen absorptiven und adsorptiven Verfahren unterschieden werden.

- Adsorptive Verfahren wie die Pressure Swing Adsorption (PSA) oder die Temperature Swing Adsorption (TSA), bei denen Kohlendioxid unter anderem an Aktivkohle oder Zeolithen adsorbiert wird, sind jedoch aufgrund hoher spezifischer Aufwendungen (bezogen auf den Kohlendioxiddurchsatz) für die Aufbereitung von Roh-Biomethan weniger geeignet. Diese Verfahren kommen im Wesentlichen bei kleinen Anlagengrößen (und geringeren Kohlendioxidströmen) wie zum Beispiel bei der Aufbereitung von Biogas zum Einsatz, wo ihre verhältnismäßig geringen Investitionskosten maßgeblichen Einfluss auf die Wahl geeigneter Verfahren haben.
- Absorptive Verfahren zur Kohlendioxidentfernung können in physikalische und chemische Absorptionsprozesse eingeteilt werden. Bei der physikalischen Absorption wird Kohlendioxid aufgrund seiner hohen Löslichkeit im Lösungsmittel im Vergleich zu Methan aus dem Gasstrom absorbiert. Bei der chemischen Absorption reagiert das Kohlenmonoxid mit dem Waschmedium und bildet so flüssige Verbindungen, die mit dem verbleibenden Waschmedium abtransportiert werden. Zwei bedeutende physikalische Absorptionsprozesse sind der Rectisolprozess® von Linde sowie der Selexolprozess® von Dow Chemicals. Aminwäschen sind den chemischen Absorptionsprozessen zuzuordnen.

Um das Roh-Biomethan zu trocknen, wird dieses zunächst unter den Taupunkt abgekühlt. Um die Kondensationsrate zu verbessern, kann das Gas vorab komprimiert werden. Um das Gas bei Bedarf noch weiter zu trocknen, können wie auch bei der Kohlendioxidentfernung absorptive wie auch adsorptive Verfahren eingesetzt werden. Da adsorptive Verfahren jedoch meist durch hohe Betriebsaufwendungen gekennzeichnet sind, erscheinen absorptive Verfahren bei der thermo-chemischen Biomethanproduktion vorteilhaft. Ein bedeutendes absorptives Verfahren zur Gastrocknung ist die Absorption von Wasser in einem glykolhaltigen Medium.

Für die Roh-Biomethan-Aufbereitung relevante Verfahren der Kohlendioxidentfernung und der Gastrocknung sind im Folgenden beschrieben. Sowohl der Selexolprozess® als auch der Rectisolprozess® sind äußerst komplex und erfordern hohe Gasdrücke um ausreichende Gasreinheiten zu erzielen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Prozesse ist

jedoch, dass neben Kohlendioxid auch andere Verunreinigungen aus dem Gas entfernt werden.

- Beim Rectisolprozess<sup>®</sup> wird kaltes Methanol (-30 to -45 °C) als Lösungsmittel verwendet. Um ausreichende Absorptionsraten zu erzielen, arbeitet das Verfahren bei Drücken zwischen 30 und 60 bar. Neben CO<sub>2</sub> werden außerdem Verunreinigungen wie zum Beispiel CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, HCN, NH<sub>3</sub> absorbiert.
- Der Selexolprozess<sup>®</sup> nutzt im Wesentlichen Polyethylenglykol als Lösungsmittel und arbeitet bei Drücken zwischen 10 und 30 bar sowie Temperaturen zwischen 0 und 175 °C. Das Spektrum der absorbierbaren Verunreinigungen ähnelt dem des Rectisolprozess<sup>®</sup>. Im Allgemeinen werden jedoch geringere Reinheitsgrade in Bezug auf Schwefelverbindungen erreicht als beim Rectisolprozess<sup>®</sup>.

Die chemische Absorption mit Hilfe von Aminlösungen arbeiten bei niedrigeren Drücken als die genannten physikalischen Absorptionsverfahren und erzielen hohe Absorptionsraten bei gleichzeitig geringem Waschmediumdurchsatz. Als Waschmedium wird im Allgemeinen eine Wasser-Amin-Lösung verwendet, die Kohlendioxid (und in Abhängigkeit von der Lösung auch Schwefelverbindungen) chemisch bindet. Das Waschmedium wird durch Wärmezufuhr regeneriert. Aminwäschen sind daher durch geringen Stromverbrauch, hohen Wärmebedarf und niedrige Methankoabsorption (< 0,1 %) gekennzeichnet.

Trocknung. Glykol-basierte Trocknungsverfahren verwenden im Allgemeinen Triethylenglykol (TEG) als Absorptionsmedium und erzielen sehr niedrige Wassertaupunkte (bis zu -100 °C). Zur Regeneration des wasserbeladenen Triethylenglykol muss dieses bis auf etwa 200 °C erhitzt werden.

Tabelle 105: Kenndaten Bio-SNG

		Biomethan/Bio-SNG	
Rohstoff		Restholz	KUP
Anlagenkapazität (KS spezifisch)			
volumenspezifisch	[m³/a]	19792000	20438889
massespezifisch	[t/a]	14250	14716
energiespezifisch	[GJ/a]	712512	735800
	[MW <sub>KS</sub> ]	25	26
Jährliche Verfügbarkeit der Anlage (bei Nennlast)	[h/a]	8000	8000
Jährlicher Nutzungsgrad der Anlage	[h/a]	8000	8000
Laufzeit (Lebensdauer) des Gesamtanlage	[a]	20	20
<b>STOFF- UND ENERGIESTRÖME PRODUKTHERSTELLUNG</b>			
<b>INPUT (Verbrauch) frei Anlage</b>			
Rohstoff	[t <sub>Rohstoff</sub> /h]	10,40	10,74
	MW <sub>RS</sub>	38,62	38,63
Eigenschaften Rohstoff 1			
Feuchte	[Ma. %]	23,08	23,00
unterer Heizwert	[GJ/t]	13,37	12,95
Aschegehalt	[Ma. %]	0,46	1,39
RME	[kg <sub>HS</sub> /h]	63,75	63,75
SiO <sub>2</sub> (frisches Bettmaterial)	[kg <sub>HS</sub> /h]	143,75	143,75
Precoatmaterial	[kg <sub>HS</sub> /h]	63,75	63,75
NaOH (für basische Wäsche)	[kg <sub>HS</sub> /h]	1,25	1,25
Prozessenergie (HE)			
Strombedarf extern (d.h. aus dt. Stromnetz)	[kW <sub>el,extern</sub> ]	2270	2342
	kWh/kg <sub>HP</sub>	1,27	1,27
Strombereitstellung intern	[kW <sub>el,intern</sub> ]	840	865
	kWh/kg <sub>HP</sub>	0,47	0,47
Prozesswärmebereitstellung intern	[kW <sub>th,intern</sub> ]	3720	3843
	kWh/kg <sub>HP</sub>	2,09	2,09
Kompression	GJ <sub>el</sub> /GJ <sub>KS</sub>	0,02	
<b>OUTPUT frei Anlage</b>			
Hauptprodukt			
Kraftstoff, volumenspezifisch	[m³/h]	2474,00	
Kraftstoff, massspezifisch	[t/h]	1,78	
unterer Heizwert	[GJ/t]	50,00	50,00
Dichte	[kg/m³]	0,72	0,72

## Biowasserstoff

Die ersten Aufbereitungs- und Konversionsschritte zur Herstellung von Wasserstoff auf der Basis biogener Festbrennstoffe gleichen denen der Herstellung von Synthesegas (z. B. für die Produktion von FT-Diesel). Da sich nach der Biomassevergasung, Gasreinigung und -konditionierung keine Synthese anschließt, zählt Wasserstoff nicht zu den synthetischen Kraftstoffen. Die wesentlichen Systemkomponenten zur Wasserstoffproduktion und -aufbereitung zu komprimiertem bzw. verflüssigtem Wasserstoff sind in Abbildung 37 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

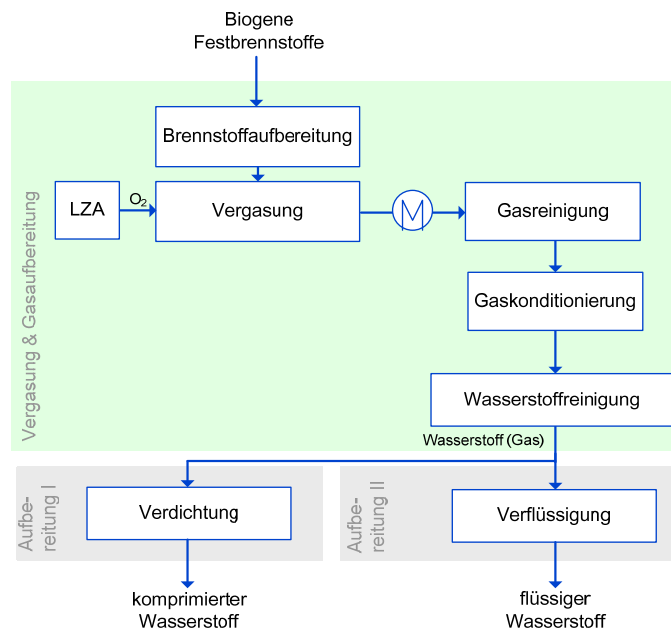


Abbildung 36: Systemelemente der Wasserstoffproduktion

Die Prozessschritte der Brennstoffaufbereitung, der Biomassevergasung sowie der Gasreinigung und -konditionierung erfolgen analog zur Produktion von synthesesfähigen Gasen und können mit weitgehend analogen Technologien realisiert werden. Anders jedoch als bei der Herstellung von Synthesegas steht bei der Auswahl geeigneter Vergasungsreaktoren im Vordergrund, ein Rohgas mit einem möglichst hohen  $H_2/CO$ -Verhältnis (Stöchiometriefaktor) zu erhalten. Die Gasreinigung kann weitgehend analog über nasse und trockene Verfahren erfolgen. Die Gaskonditionierung wird optional über eine endotherme Dampfreformierung realisiert mit dem Ziel, noch im Produktgas enthaltenes  $CH_4$  in  $H_2$  und  $CO$  umzuwandeln. Letzteres wird im Anschluss über die exotherme Wasser-Gas-Shift-Reaktion zu zusätzlichem  $H_2$  und  $CO_2$  konvertiert. Die abschließende Gasreinigung erfolgt nach der Auskondensation des im wasserstoffreichen Gas enthaltenen Wassers über die physikalische Druckwechseladsorption [10]. Anschließend erfolgt die weitere Wasserstoffaufbereitung (d. h. Komprimierung respektive Verflüssigung).

## Gaskonditionierung

Nach der Gasreinigung erfolgt zur Wasserstoffanreicherung die Gaskonditionierung. Das gereinigte Gas kann einen beachtlichen Anteil von Methan und anderen leichten Kohlenwasserstoffen haben, die den Heizwert steigern. Über eine optionale sog. Dampfreformierung können diese Komponenten zu CO und H<sub>2</sub> aufgespalten werden. Die gleichfalls angewandte autotherme Reformierung kombiniert die Dampfreformierung mit einer selbstständigen Prozesswärme-Bereitstellung über partielle Oxidation eines Teilstromes des zu reformierenden Gases.

- Dampfreformierung. Bei der stark endothermen Dampfreformierung werden die Kohlenwasserstoffe zusammen mit H<sub>2</sub>O-Dampf in einem Dampf-zu-Kohlenstoff-Verhältnis von 2,5 bis 3,5 an einem Katalysator (Nickel-Aluminium oder Edelmetalle auf einem Trägermaterial) bei Temperaturen von etwa 800 bis 900 °C und einem Druckniveau von 26 bis 40 bar umgesetzt /5//13/. Dabei wird das zu reformierende Kreislaufgas mit Prozessdampf gemischt, vorgewärmt und gleichmäßig über die Rohre des Reformers verteilt. Bei der Methanreformierung hängt die Zusammensetzung des Produktgases von dem Dampf-zu-Kohlenstoff-Verhältnis, der Gasqualität am Reformereintritt sowie der Temperatur am Reformeraustritt ab; die typische Zusammensetzung liegt bei H<sub>2</sub> (70 bis 75 Vol.%), CO (8 bis 18 Vol.%), CO<sub>2</sub> (10 bis 12 Vol.%) and CH<sub>4</sub> (2 bis 5 Vol.%) /13/.
- Autotherme Reformierung. Der Prozess der autothermen Reformierung ist in seiner Reaktionskinetik dem der Dampfreformierung gleich bzw. in seinem Verfahrensablauf ähnlich. Die Technologie der Wärmebereitstellung wird durch eine interne partielle Oxidation des Kreislaufgases mit Sauerstoff oder Luft als exothermer Reaktionsablauf realisiert. Die Prozessparameter sind für den Druckbereich mit bis zu 70 bar angegeben, die Reformeraustrittstemperatur liegt bei 800 bis 1.100 °C. Das produzierte Gas hat jedoch ein vergleichsweise geringeres H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis.

Eine exotherme *Wasser-Gas-Shift-Reaktion* erfolgt im Anschluss an die optionale Reformierung kurzketziger Kohlenwasserstoffe zur weiteren Steigerung des Wasserstoffgehaltes. Hierzu wird ein Teil des CO mit H<sub>2</sub>O-Dampf zu H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> konvertiert. Dies wird im Regelfall durch ein zweistufiges Shiftsystem, bestehend aus einem Hochtemperatur-Shift (350 °C, Eisen-Chrom-basierter Katalysator, CO-Konversionsraten von 80 bis 90 %) und einem Niedertemperatur-Shift (190 bis 210 °C, Kupfer-basierter Katalysator), realisiert /16/. Dabei werden ca. 90 bis 97 % des CO aus dem Reformer zu CO<sub>2</sub> umgesetzt /5/. Alternativ dazu kann ebenso ein einstufiger sog. Mitteltemperatur-Shift zum Einsatz kommen /15/. Aufgrund des einfachen Aufbaus der Shift-Reaktoren sind die aufzubringenden Investitionskosten vergleichsweise sehr niedrig.



## Wasserstoffreinigung

Die finale Wasserstoffreinigung erfolgt in den vorhandenen Anlagen zur Wasserstoffproduktion seit Ende der späten 1980-er über den vielseitig zum Einsatz kommenden physikalischen Separationsprozess der Druckwechseladsorption /7/. Die DWA ermöglicht die Produktion hochreinen Wasserstoffs (Reinheit bis 99,999 Vol.%); mit chemischen und physikalischen Absorptionsverfahren (d. h. vergleichsweise energieaufwändigere Wäschen) wäre nur ein Reinheitsgrad von 95 bis 98 Vol.% erreichbar /14/. Um diese Reinheit zu erreichen, sollte das konditionierte Gas eine Reinheit von über 50 Vol.% aufweisen /10/. Der DWA-Prozess nutzt die Unterschiede der Partialdrücke der verschiedenen Gaskomponenten und arbeitet bei Temperaturen um die 40 °C. Die zu entfernenden Gaskomponenten werden auf hohem Druckniveau (ca. 5 bis 50 bar) adsorbiert und – nach einem Druckwechsel – auf niedrigem Druckniveau (ca. 0,14 bis 0,35 bar) desorbiert.

Üblicherweise wird zunächst noch enthaltenes Wasser auskondensiert. Anschließend durchläuft das Gas 3 bis 12 parallel verschaltete Adsorber, welche in zyklischer Reihenfolge arbeiten /8/. Abhängig von der Größe der abzuscheidenden Gasmoleküle kommen als Adsorbens Materialien wie Aktivkohle oder Zeolithmolekularsiebe (z. B. Aluminiumoxid und Silikagel) zum Einsatz. Während in einem DWA-Reaktor die Gasverunreinigungen adsorbiert werden, erfolgt in einem weiteren DWA-Reaktor die Desorption der adsorbierten Gase sowie die Regeneration des Bettmaterials. Das Desorptionsgas (sog. Restgas) enthält CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O-Dampf sowie geringe Mengen H<sub>2</sub>; die anteilige Zusammensetzung variiert stark und hängt von der Auslegung der DWA ab. Das brennbare Restgas kann einerseits zur Wärmebereitstellung für die Biomassetrocknung oder die Gaskonditionierung genutzt werden; prinzipiell kann es ebenso zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

## Wasserstoffaufbereitung

Zur Distribution und Nutzung als Kraftstoff muss der gasförmige Wasserstoff für eine höhere Energiedichte entsprechend aufbereitet werden. Während Einrichtungen zur Wasserstoffkompression unabhängig von der Kapazität der Produktionsanlagen errichtet werden können, ist die Installation von Verflüssigungsanlagen nur für großtechnische Anlagen sinnvoll /2/.

- Wasserstoffkomprimierung. Zur Verdichtung können analoge Kompressoren wie für die Erdgasverdichtung verwendet werden, sie müssen lediglich geeignete Dichtungen (z. B. aus Teflon) aufweisen. Üblicherweise erfolgt eine Kompression über mehrere Stufen. Die Investkosten für Wasserstoffkompressoren sind stark abhängig vom Saug- und Ausgangsdruck sowie vom Volumenstrom. Der erforderliche Saugdruck wird wiederum determiniert vom Ausgangsdruck an der Produktionsanlage (je nach Anwendung bei etwa 13 bis 30 bar) dem Leitungsdruck der Wasserstoffpipeline oder dem minimalen Druck des CGHyd.-Trailers (min. 250 bar) je nach Art der Versorgung.

- Wasserstoffverflüssigung. Verglichen mit gasförmigem Wasserstoff (GHyd.) verfügt flüssiger Wasserstoff (LHyd.) über eine wesentlich höhere Dichte und ist somit im Hinblick auf die Speicherung und den Transport besser geeignet. Dazu wird Wasserstoff durch kryogene Verfahren verflüssigt. Wasserstoff kommt als sog. ortho- und para-Wasserstoff vor (Verhältnis 75 %/25 %), wobei kryogener para-Wasserstoff die energetisch günstigere Modifikation darstellt. Infolge der langsamen Umsetzung von ortho- in para-Wasserstoff erfolgt die H<sub>2</sub>-Verflüssigung katalytisch. Dadurch wird vermieden, dass die frei werdende Reaktionswärme zu einer erhöhten Verdampfung des LHyd. führt [3]. In großtechnischem Maßstab wird die Wasserstoffverflüssigung über den Claude-Prozess in drei Schritten realisiert. Der theoretische Energiebedarf zur Verflüssigung beträgt 3 kWh/kg H<sub>2</sub>, praktisch sind es etwa 10 kWh/kg. Obwohl die Reinheit des Wasserstoffs aus der DWA-Anlage bereits sehr hoch ist, muss für die Verflüssigung eine weitere Reinigung auf kleiner 1 ppm (z. B. mittels Tieftemperaturadsorption) durchgeführt werden. Heutige Verflüssigungssysteme haben Kapazitäten von ca. 4 bis 54 t/d Wasserstoff.

Tabelle 106: Kenndaten Biowasserstoff

Rohstoff		Restholz
Anlagenkapazität (KS spezifisch)		
volumenspezifisch	[m <sup>3</sup> /a]	2006667
massespezifisch	[t/a]	33712
energiespezifisch	[GJ/a]	142062
	[MW <sub>KS</sub> ]	5
Jährliche Verfügbarkeit der Anlage (bei Nennlast)	[h/a]	8000
Jährlicher Nutzungsgrad der Anlage	[h/a]	8000
Laufzeit (Lebensdauer) des Gesamtanlage	[a]	20
<b>STOFF- UND ENERGIESTRÖME PRODUKTHERSTELLUNG</b>		
<b>INPUT (Verbrauch) frei Anlage</b>		
Rohstoff	[t <sub>Rohstoff</sub> /h]	67,3
	MW <sub>RS</sub>	250
Eigenschaften Rohstoff 1		
TS	[Ma. %]	
Feuchte	[Ma. %]	23,08
unterer Heizwert	[GJ/t]	13,37
Aschegehalt	[Ma. %]	0,46
Prozessenergie (HE)		
Strombedarf extern (d.h. aus dt. Stromnetz)	[kW <sub>el,extern</sub> ]	21154
	kWh/kg <sub>HP</sub>	5,02
Kompression	GJ <sub>el</sub> /GJ <sub>KS</sub>	0.05 - 0.11
<b>OUTPUT frei Anlage</b>		
Hauptprodukt		
Kraftstoff, volumenspezifisch	[m <sup>3</sup> /h]	251
Kraftstoff, massspezifisch	[t/h]	4,21
unterer Heizwert	[GJ/t]	120
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	16,8

### 5.3.4 Literaturverzeichnis zum Anhang 3

- /1/ KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H.: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin: Springer 2009
- /2/ ALTMANN, M. ET AL.: Potential for Hydrogen as a Fuel for Transport in the Long Term (2020 - 2030) - Full Background Report. European Commission, Joint Research Centre (DG JRC) Institute for Prospective Technological Studies, 2004
- /3/ ALTMANN, M. ET AL.: Wasserstofferzeugung in offshore Windparks „Killer-Kriterien“, grobe Auslegung und Kostenabschätzung. Studie im Auftrag der Gesellschaft für Energie und Ökologie mbH, Ottobrunn, 2001
- /4/ BOERRIGTER, H. ET AL.: Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation and development potentials. Utrecht, Niederlande, 2003
- /5/ CONTADINI, J.F.; DINIZ, C.V.; SPERLING, D. & MOORE, R.M.: Hydrogen production plants: emissions and thermal efficiency analysis. Institute of Transportation Studies, University of California, 2000
- /6/ EKBOM, T.; BERGLIN, N. & LÖGDBERG, S.: Black liquor gasification with motor fuel production – BLGMF II, A techno-economic feasibility study on catalytic Fischer-Tropsch synthesis for synthetic diesel production in comparison with methanol and DME as transport fuels. Nykomb Synergetics AB, STFi-Packforsk, KTH Royal Institute of Technology, Statoil, Structor Hulthén Stråth, Final Report, 2005
- /7/ FLESHMAN, J.: Revamps in Steam reforming Plants – Cost-Efficient Increases in Capacity. Presented by Foster Wheeler USA at Sued-Chemie Inc. Catalyst Conference in Long Beach, California, June 2000
- /8/ HAEUSSINGER, P.; LOHMUELLER, R. & WATSON, A.M.: Hydrogen. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Sixth, Completely Revised Edition. Volume 17, Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- /9/ HAMELINCK, C. Outlook for advanced biofuels, Dissertation, Universität Utrecht, 2004
- /10/ HEMMES, K.; DE GROOT, A. & DEN UIL, H.: Bio-H2 Application potential of biomass related hydrogen production technologies to the Dutch energy infrastructure of 2020-2050. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), Utrecht, 2003
- /11/ ISING, M.: Der UMSICHT-Vergaser – Biomassevergasung für KWK im mittleren Leistungsbereich. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, Münster, 2004
- /12/ KNOEF, H, Handbook Biomass Gasification BTG biomass technology group, Enschede, 2005
- /13/ LURGI: Hydrogen. Brochure of Lurgi Oel Gas Chemie GmbH, 2003
- /14/ MAKIHIRA, A.; BARRETO, L. & RIAHI, K.: Assessment of Alternative Hydrogen Pathways: Natural Gas and Biomass. Interim Report IR-03-037, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria, December 2003
- /15/ MOLBURG, J.C. & DOCTOR, R.D.: Hydrogen from Steam-Methane Reforming. Argonne National Laboratory, Proceedings of the 20th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh PA: September 2003

- /16/ ROJEY, A.; MINKKINEN, A.; ARLIE, J.-P. & LEBAS, E.: Combined Production of Hydrogen, Clean Power and Quality Fuels. Institut Français du Pétrole (IFP), Presented at the first European Hydrogen Energy Conference, 2 to 5 September, 2003, Alpexpo – Alpes Congrès, Grenoble, France, 2003
- /17/ SCHLEITZER, D.-K.: Ganzheitliche Systemanalyse der energetischen Butzung biogener Vergasungsgase in Brennstoffzellen. UMSICHT-Schriftenreihe Band 40, Dortmund, 2002
- /18/ SPATH, P.L. & MANN, M.K.: Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam reforming. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Colorado, February 2001
- /19/ STAHL, K.: Das Kombikraftwerk mit integrierter Biomasse-Vergasung in Värnamo/ Schweden. VGB Kraftwerkstechnik 76, Heft 4, 1996
- /20/ TIJMENSEN, M., ET AL., Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification, Biomass and Bioenergy 23, 2002
- /21/ U.S. DEPARTMENT OF ENERGY/ NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL): Gasification Plant Cost and Performance Optimization, Task 1, IGCC Plant Cost Optimization. No. DE-AC26-99FT40342, 2003
- /22/ MÜLLER-LANGER, F. ; RÖNSCH, R.; WEITHÄUSER, M.; OEHMICHEN, K.; SEIFFERT, M.; MAJER, S.; SCHOLWIN, F.; THRÄN, D.: Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem. Endbericht zum Forschungsvorhaben FZK 22031005, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Leipzig, 2009