

ATZ/MTZ-Fachbuch

Johannes Liebl · Matthias Lederer  
Klaus Rohde-Brandenburger  
Jan-Welm Biermann · Martin Roth  
Heinz Schäfer

# Energiemanagement im Kraftfahrzeug

Optimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen  
und Verbrauch konventioneller und  
elektrifizierter Automobile



Springer Vieweg

---

# **ATZ/MTZ-Fachbuch**

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

---

Johannes Liebl · Matthias Lederer ·  
Klaus Rohde-Brandenburger ·  
Jan-Welm Biermann · Martin Roth ·  
Heinz Schäfer

# Energiemanagement im Kraftfahrzeug

Optimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und  
Verbrauch konventioneller und  
elektrifizierter Automobile

 Springer Vieweg

Johannes Liebl  
Moosburg, Deutschland

Matthias Lederer  
Energiemanagement Gesamtfahrzeug  
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG  
Weissach, Deutschland

Klaus Rohde-Brandenburger  
Isenbüttel, Deutschland

Jan-Welm Biermann  
RWTH Aachen  
Inst. für Kraftfahrzeuge  
Aachen, Deutschland

Martin Roth  
Vorentwicklung/Konzepte funktional  
Dr.-Ing. h.c.F. Porsche AG  
Weissach, Deutschland

Heinz Schäfer  
hofer eds GmbH  
Würzburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-04450-3  
DOI 10.1007/978-3-658-04451-0

ISBN 978-3-658-04451-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

# Vorwort

Über viele Jahre unseres Berufslebens haben wir als Ingenieure mit allen Facetten der Themen Kraftstoffverbrauch, CO<sub>2</sub>, Fahrleistung und Gewicht von PKW zu tun gehabt. Lange Zeit ging es dabei vorwiegend um Fahrzeuge mit konventionellen Otto- und Dieselantrieben, in den letzten Jahren kamen aber auch vermehrt reinelektrische oder elektrifizierte Antriebe hinzu. Diese gestiegene Komplexität erforderte zur Verbrauchsoptimierung zunehmend ein umfassendes Energiemanagement aller Verbraucher. Wir haben diese Verbrauchsthemen aus dem Gesamtfahrzeug-Blickwinkel bei drei verschiedenen Fahrzeugherstellern, aus dem Zulieferer-Blickwinkel und auch aus dem Blickwinkel der universitären Lehre bearbeitet. Die Stoffsammlung zu diesem Buch gleicht daher auch einem Streifzug durch die Automobilentwicklung der letzten Jahre.

Das bei Ingenieuren schon immer vorhandene Streben nach geringeren Energieverbräuchen von Kraftfahrzeugen ist durch die Themen Ressourcenknappheit, Klimaveränderung und gesetzliche Vorgaben in den letzten Jahren enorm unter Druck gesetzt worden. Die gleichzeitig gestiegene Komplexität der im Fahrzeug installierten Verbraucher macht es zwingend erforderlich, das Thema Verbrauch immer aus der Gesamtfahrzeugsicht zu betrachten. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass nicht singulär nur der Verbrauch optimiert wird zu Lasten anderer Ziele. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Kunden im Allgemeinen nicht bereit sind, auf Komfort und insbesondere auch auf Fahrleistung zugunsten von Verbrauch zu verzichten. Aufgabe der Bereiche Gesamtfahrzeugentwicklung bei den Automobilherstellern ist es deshalb, als koordinierende Stelle das Fachwissen aller beteiligten Bereiche so zusammenzuführen, dass am Ende für das Fahrzeug und damit für den Kunden das beste Ergebnis herauskommt. Das äußerst komplexe Thema Kraftstoffverbrauch ist ein gutes Beispiel dafür, wie wichtig eine gute interdisziplinäre Zusammenarbeit ist und wie wichtig vor allem die Kommunikation und Koordination sind.

Der Kraftstoff beschäftigt auf dem Weg vom Einfüllstutzen bis zum Abgasendrohr nahezu jede Fachabteilung eines Automobilunternehmens. Es beginnt bei der Tankgröße und der Kraftstoffförderung. Hier treffen schon Tankkonstrukteure auf Kollegen der Elektrik und der Aggregateentwicklung. Der Motor muss mit Hilfe dieses Kraftstoffes alle denkba-

ren Antriebsbedürfnisse bedienen. Das sind zum Beispiel Nebenaggregate zur Erzeugung von Strom, Kälte oder hydraulischer Leistung. Es müssen Luftwiderstand, Rollwiderstand und Massenkräfte überwunden werden. Darüber hinaus fordern auch Reibleistungen im gesamten Triebstrang vom Getriebe über Differential und Gelenkwelle bis zum Radlager als parasitäre Verbraucher ihren Anteil von der Antriebsleistung. Allein bis hier sind schon fast alle Abteilungen einer Fahrzeugentwicklung betroffen. Spätestens beim Gedanken daran, dass jedes noch so kleine Gewicht im Fahrzeug zum Verbrauch beiträgt, wird klar, dass selbst der Interieur-Designer über das Gewicht der Sitzbezugstoffe mit dem Thema Verbrauch direkt zu tun hat.

Gegen Ende einer Entwicklung wird schließlich, neben vielen anderen Dingen, der Verbrauch typgeprüft und die zertifizierten Werte zieren das Fahrzeugdatenblatt am Fahrzeug im Verkaufsraum des Händlers. Und ab diesem Zeitpunkt haben auch Entwickler sogar direkt mit dem Kunden zu tun, denn mit Sicherheit gibt es irgendjemanden, der sich darüber beklagt, dass er im täglichen Leben mit seinem Fahrzeug mehr verbraucht, als der Hersteller angibt.

Die Mitarbeiter der Fachabteilungen und auch die Zulieferer haben in ihrem Verantwortungsbereich natürlich für die Bauteile ganz eigene Produkteigenschaften zu entwickeln. Der Verbrauch ist für die meisten verständlicherweise eher eine Störgröße, um die sich eigentlich andere zu kümmern haben. In letzten Jahren hat jedoch ein Bewusstseinswandel stattgefunden. Gewichts- und CO<sub>2</sub>-Vorgaben werden akzeptiert und der eigene Beitrag dazu wird anerkannt. Was jedoch fehlt sind Hilfsmittel, um den eigenen Beitrag quantifizieren zu können. Insbesondere die Interaktion der immer zahlreicher werdenden Komfort- und Sicherheitseinrichtungen mit immer komplexeren Funktionen zur Ansteuerung erfordern ein intelligentes Energiemanagement im Fahrzeug, damit Kundenwünsche und gesetzliche CO<sub>2</sub>-Vorgaben zukünftig gleichzeitig erfüllt werden können. Man kann aber nicht von allen Konstrukteuren aller Fachbereiche erwarten, dass sie zum Thema Verbrauch so geschult sind, dass sie die Auswirkung ihres Bauteils auf den Verbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emission des Gesamtfahrzeugs genügend genau abschätzen können.

Dieses Buch soll genau für diesen Personenkreis eine Hilfestellung geben. Dabei liegt der Fokus nicht in der tiefen wissenschaftlichen Herleitung von Verbrauchszusammenhängen für die Weiterbildung von Verbrauchsspezialisten, sondern vielmehr in der praxisgerechten Anwendung von grundlegenden physikalischen Zusammenhängen. Die Zielgruppe sind nicht nur die Techniker und Ingenieure einer Fahrzeugentwicklung, sondern alle Mitarbeiter von Automobilherstellern und Zulieferern, die in der täglichen Praxis mit dem Thema Verbrauch, CO<sub>2</sub> und Fahrleistung in irgendeiner Weise zu tun haben.

Nicht nur am privaten Stammtisch oder in Internetforen, sondern auch in vermeintlichen Fachdiskussionen oder in Studien von NGO's sind uns immer wieder utopische Thesen und Forderungen zum Thema Verbrauch begegnet. Unsere Motivation für dieses

---

Buch ist die Hoffnung, durch eine anschauliche physikalische Betrachtung von Verbrauchszusammenhängen das Fahrzeugenergiemanagement verständlicher zu machen, um damit zu einer Versachlichung solcher Diskussionen beizutragen.

Dr.-Ing. Johannes Liebl, ehemals BMW AG

Dr.-Ing. Matthias Lederer, Porsche AG

Dr.-Ing. Klaus Rohde-Brandenburger, Volkswagen AG

Prof. Dr.-Ing. Jan-Welm Biermann, RWTH Aachen

Dr.-Ing. Martin Roth, Porsche AG

Dr.-Ing. Heinz Schäfer, hofer eds GmbH

---

## Autorenverzeichnis

**Johannes Liebl** Moosburg, Deutschland

**Matthias Lederer** Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Energiemanagement Gesamtfahrzeug,  
Porschestraße, 71287 Weissach, Deutschland

**Klaus Rohde-Brandenburger** Isenbüttel, Deutschland

**Jan-Welm Biermann** RWTH Aachen Inst. für Kraftfahrzeuge, Steinbachstr. 7,  
52074 Aachen, Deutschland

**Martin Roth** Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Vorentwicklung/Konzepte funktional,  
Porschestraße, 71287 Weissach, Deutschland

**Heinz Schäfer** hofer eds GmbH Geschäftsführer, Sedanstraße 21b,  
97082 Würzburg, Deutschland

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	XIX
<b>1 Einleitung</b> .....	1
Johannes Liebl	
1.1 Mobilität .....	1
1.2 Herausforderungen .....	2
1.3 Individuelle Mobilität .....	4
1.4 Freiwillige Selbstverpflichtungen der Automobilhersteller .....	6
1.5 Gesellschaftlicher und politischer Druck .....	7
1.6 Gesamtfahrzeugansatz als Lösung .....	8
Literatur .....	9
<b>2 Anforderungen an das Energiemanagement</b> .....	11
Matthias Lederer	
2.1 Gesetzliche Anforderungen .....	12
2.1.1 Lokale gesetzliche Anforderungen .....	13
2.1.1.1 London Congestion Charge .....	15
2.1.1.2 Mailand „Eco Pass“ .....	16
2.1.1.3 Peking Zulassungsbeschränkung .....	16
2.1.2 Länderspezifische gesetzliche Anforderungen für Einzelfahrzeuge	17
2.1.3 Länderspezifische gesetzliche Flottenanforderungen mit Strafzah-	
lungen oder Verkaufsverboten .....	25
2.2 Kundenanforderungen .....	40
2.2.1 Realverbrauch .....	42
2.2.2 Soziale Akzeptanz .....	43
2.2.3 Wettbewerbsfähigkeit .....	44
Literatur .....	45
<b>3 Energieträger</b> .....	47
Matthias Lederer	
3.1 Grundlagen .....	47

3.2	Konventionelle Kraftstoffe	52
3.3	Regenerative Kraftstoffe	53
	Literatur	56
<b>4</b>	<b>Komponenten</b>	<b>57</b>
	Johannes Liebl und Heinz Schäfer	
4.1	Verbrennungsmotoren	57
4.1.1	Energiewandlung	58
4.1.2	Entwicklungstrends bei Verbrennungsmotoren	60
4.2	Getriebe	61
4.2.1	Handschaftgetriebe	62
4.2.2	Automatisierte Getriebe	63
4.2.2.1	Automatische Getriebe	63
4.2.2.2	Automatisierte Schaltgetriebe	64
4.2.2.3	Doppelkupplungsgetriebe	65
4.2.2.4	Stufenlose Automatikgetriebe	66
4.2.3	Entwicklungstrends bei Getrieben	69
4.3	Nebenaggregate	70
4.4	Elektrische Maschinen und Antriebe	72
4.4.1	Bauformen	77
4.4.2	Maschinenarten	80
4.4.2.1	Asynchronmaschinen	80
4.4.2.2	Permanenterregte Synchronmaschinen (PSM, IPM)	81
4.4.2.3	Fremderregte Synchronmaschinen	83
4.4.2.4	Synchronreluktanzmaschine (SYRM)	84
4.5	Energiespeicher	85
4.5.1	Begriffe und Einordnung der Systeme	85
4.5.2	Batterien	86
4.5.3	Alternative Energiespeicher	88
4.5.3.1	Superkondensatoren (Supercaps)	88
4.5.3.2	Schwungradspeicher	88
4.5.4	Vergleiche von Energiespeicher	90
4.6	Leistungselektronik	90
4.6.1	Umrichter	90
4.6.1.1	Prinzipieller Aufbau	91
4.6.1.2	Wirkungsgrad	93
4.6.2	DC/DC-Wandler	94
4.6.2.1	Allgemeines	95
4.6.2.2	Anwendungen in der Traktion	95
4.6.2.3	Einsatz bei leistungsverzweigten Systemen	97
4.6.3	Kühlkonzepte der Leistungselektronik	97

<b>5</b>	<b>Fahrzeugauslegung</b> .....	101
	Jan-Welm Biermann	
5.1	Fahrwiderstände .....	102
5.1.1	Radwiderstand .....	102
5.1.2	Luftwiderstand .....	103
5.1.3	Steigungswiderstand .....	104
5.1.4	Beschleunigungswiderstand .....	105
5.1.5	Gesamtwiderstand .....	105
5.2	Konventionell angetriebene Fahrzeuge .....	106
5.2.1	Fahrleistungen .....	107
5.2.1.1	Leistungsbilanz .....	107
5.2.1.2	Getriebeauslegung .....	110
5.2.1.3	Leistungsbedingtes Steigvermögen .....	114
5.2.1.4	Leistungsbedingtes Beschleunigungsvermögen .....	115
5.2.2	Kraftstoff-/Energieverbrauch .....	116
5.2.2.1	Reduktion Fahrwiderstände .....	116
5.2.2.2	Optimierung Betriebsweise .....	117
5.2.3	Fahrzeugbeispiel .....	120
5.3	Hybridfahrzeuge .....	123
5.3.1	Funktionen von Hybridantrieben .....	125
5.3.1.1	Start/Stopp .....	125
5.3.1.2	Segeln mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor .....	127
5.3.1.3	Elektrisches Fahren .....	128
5.3.1.4	Boosten .....	128
5.3.1.5	Nutzbremmung .....	128
5.3.1.6	Lastpunktanhebung/-verschiebung .....	130
5.3.1.7	Phlegmatisierung .....	132
5.3.2	Klassifizierung von Hybridantrieben .....	132
5.3.3	Hybridstrukturen .....	135
5.3.3.1	Serieller Hybridantrieb .....	135
5.3.3.2	Paralleler Hybridantrieb .....	136
5.3.3.3	Kombinierter Hybridantrieb .....	140
5.3.3.4	Leistungsverzweigter Hybridantrieb .....	140
5.3.4	Fahrzeugbeispiel Porsche Panamera S E-Hybrid .....	147
5.3.4.1	Schlupfstart .....	149
5.3.4.2	Anreiß-Start .....	150
5.4	Elektrofahrzeuge .....	151
5.4.1	Batterieelektrischer Antrieb .....	151
5.4.2	Range Extender .....	153
5.4.3	Brennstoffzellenfahrzeug .....	154
5.4.4	Fahrzeugbeispiel City Bus ika .....	156
	Literatur .....	160

<b>6</b>	<b>Bewertungsansätze zu Verbrauch und Fahrleistung</b> . . . . .	163
	Klaus Rohde-Brandenburger	
6.1	Basis für verursachergerechte Aufteilung des Verbrauchs . . . . .	165
6.1.1	Verbrauchsmodell für Otto- und Dieselmotoren, Willans-Ansatz . . . . .	166
6.1.2	Verbrauchsauswirkung der Übersetzung . . . . .	175
6.1.2.1	Primärer Verbrauchseinfluss des Getriebes . . . . .	175
6.1.2.2	Sekundärer Verbrauchseinfluss des Getriebes . . . . .	182
6.1.3	Energiebedarf für Fahrwiderstände und Verbraucher . . . . .	186
6.1.3.1	Energiebedarf für Roll-, Luft- und Beschleunigungswiderstand . . . . .	188
6.1.3.2	Energiebedarf für Getriebeverluste . . . . .	196
6.1.3.3	Energiebedarf für Gelenkwellen . . . . .	196
6.1.3.4	Energiebedarf für Restbremsmomente . . . . .	199
6.1.3.5	Energiebedarf für elektrische Verbraucher . . . . .	201
6.1.3.6	Energiebedarf für Klimaanlage . . . . .	205
6.1.4	Natürliche Rekuperation . . . . .	207
6.2	Verbrauchskennzahlen, Fuel Reduction Value . . . . .	212
6.2.1	Verbrauchskennzahl für Rollwiderstand, $FRV_R$ . . . . .	213
6.2.2	Verbrauchskennzahl für Luftwiderstand, $FRV_L$ . . . . .	214
6.2.3	Verbrauchskennzahl für Masse, $FRV_m$ . . . . .	218
6.2.4	Verbrauchskennzahl für elektrische Verbraucher, $FRV_E$ . . . . .	225
6.2.5	Verbrauchskennzahl für mechanische Verbraucher, $FRV_{mech.}$ . . . . .	227
6.2.6	Verbrauchskennzahl für Fahrwiderstand, $FRV_F$ . . . . .	228
6.2.7	$FRV_x$ -Sensitivitäts-Vergleich mit anderen Fahrzyklen . . . . .	229
6.3	Verursachergerechte Aufteilung des Verbrauchs . . . . .	231
6.4	Gesamtfahrzeug-Vergleichs-Methoden . . . . .	234
6.4.1	Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrad . . . . .	234
6.4.2	Höchstgeschwindigkeits-Gütegrad ( $GG_{v_{max}}$ ) . . . . .	238
	Literatur . . . . .	241
<b>7</b>	<b>Verbrauch in Fahrzyklen und im Realverkehr</b> . . . . .	243
	Klaus Rohde-Brandenburger	
7.1	Historie zur Entwicklung von Fahrzyklen . . . . .	243
7.2	Gesetzliche Randbedingungen . . . . .	244
7.2.1	Definitionen zur Fahrzeugmasse . . . . .	244
7.2.2	Schwungmassen . . . . .	247
7.2.3	Ausrollversuch zur Fahrwiderstandsbestimmung . . . . .	249
7.2.4	Prüfbedingungen . . . . .	252
7.2.5	Rollen-Anpassung . . . . .	253
7.2.6	Rollen-Auslauf . . . . .	253
7.2.7	Besonderheiten bei Allradfahrzeugen . . . . .	254
7.3	Fahrzyklen und Verbrauchsangaben . . . . .	255

7.3.1	Europa: Neuer Europäischer Fahr-Zyklus (NEFZ) . . . . .	256
7.3.2	USA: 2-cycle- und 5-cycle-Test . . . . .	263
7.3.2.1	USA bis Modelljahr 2008: FTP-75- und Highway-Zyklus, (2-Cycle-Test) . . . . .	263
7.3.2.2	USA ab Modelljahr 2008: 5-Cycle-Test . . . . .	269
7.3.3	Japan: JC08-Zyklus . . . . .	277
7.3.4	Ausblick auf WLTP . . . . .	279
7.3.5	Kennzahlen für Zyklenvergleich . . . . .	286
7.4	Einflussparameter auf den Verbrauch im Realverkehr . . . . .	292
7.4.1	Verbrauchseinfluss durch Streckenlänge und Temperatur . . . . .	294
7.4.2	Fahrereinfluss (Geschwindigkeit, Gangwahl, Dynamik) . . . . .	298
7.4.3	Einfluss von Komfortverbrauchern . . . . .	298
7.4.4	Weitere Einflussgrößen auf den Realverbrauch . . . . .	300
7.5	NEFZ-Verbrauch ist Real-Verbrauch . . . . .	300
	Literatur . . . . .	306
<b>8</b>	<b>Energieeffizientes Fahren</b> . . . . .	<b>307</b>
	Matthias Lederer	
8.1	Grundlagen . . . . .	307
8.2	Optimierung Fahrsituationen . . . . .	308
8.3	Effiziente Routenwahl . . . . .	320
	Literatur . . . . .	320
<b>9</b>	<b>Betriebsstrategie</b> . . . . .	<b>323</b>
	Martin Roth	
9.1	Standardbetriebsstrategien und lernende Betriebsstrategien . . . . .	324
9.1.1	Betriebsstrategie für die Wahl der Gänge eines Getriebes . . . . .	324
9.1.1.1	Beeinflussbare Eigenschaften . . . . .	324
9.1.1.2	Bedienelemente . . . . .	324
9.1.1.3	Hoch-/Rückschaltkennfelder . . . . .	325
9.1.1.4	Zusatzkennfelder . . . . .	325
9.1.1.5	Zusatzfunktionen . . . . .	326
9.1.1.6	Zugkraftansatz . . . . .	327
9.1.2	Betriebsstrategie für „Segeln“ . . . . .	328
9.1.2.1	Einfachster Betriebsstrategie-Ansatz . . . . .	329
9.1.2.2	Verbesserter Betriebsstrategieansatz . . . . .	329
9.1.3	Regelbasierte Betriebsstrategie für den Antriebsstrang eines Voll- Hybridfahrzeugs . . . . .	332
9.1.3.1	Relevante Fahrmodi und Fahrzustände . . . . .	332
9.1.3.2	Energetische Rahmenbedingungen . . . . .	333
9.2	Prädiktive Betriebsstrategie . . . . .	339

9.2.1	Prädiktiver Betriebsstrategieansatz mit Optimierung für konventionelles Fahren . . . . .	339
9.2.1.1	Ermittlung aktueller Fahrerwunsch und Fahrertyp . . . . .	340
9.2.1.2	Auswertung der Fahrzeug-Sensordaten . . . . .	340
9.2.1.3	Ermittlung voraussichtliche Fahrstrecke inkl. Streckeninformationen . . . . .	341
9.2.1.4	Abschätzung Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	342
9.2.1.5	Generierung eines möglichen „Fahrerschlauches“ der voraussichtlichen Geschwindigkeit über der vorausliegenden Fahrroute . . . . .	342
9.2.1.6	Abschätzung zukünftiger Fahrerwunsch . . . . .	343
9.2.1.7	Abschätzung Einfluss Verkehrsleitsysteme . . . . .	343
9.2.1.8	Ermittlung optimale Betriebspunkte . . . . .	344
9.2.1.9	Ermittlung Abweichung der umgesetzten Betriebspunkte . . . . .	346
9.2.2	Porsche Innodrive . . . . .	347
9.2.2.1	Generischer Betriebsstrategieansatz für längsgeregeltes Fahren . . . . .	347
9.2.2.2	Optimale Fahrstrategie . . . . .	350
9.2.2.3	Längsregelung . . . . .	351
9.2.2.4	Verbrauchseinsparung . . . . .	352
9.2.3	Prädiktive Gesamtfahrzeugbetriebsstrategie . . . . .	355
9.2.3.1	Prädiktive Fahrstrategie für längsgeregeltes Fahren . . . . .	356
9.2.3.2	Prädiktiv-optimierte Betriebsstrategie der Komfort- und Fahrwerkssysteme . . . . .	357
9.2.3.3	Wechselwirkungen bei Hochleistungsverbrauchern . . . . .	358
9.2.4	Ansätze für Optimierungsalgorithmen . . . . .	358
9.2.4.1	Betriebspunktendatenbank . . . . .	359
9.2.4.2	Dynamische Programmierung nach Bellman . . . . .	360
9.2.5	Ausblick – zukünftige Assistenzsysteme mit prädiktiver Betriebsstrategie zur Erhöhung der Energieeffizienz . . . . .	362
9.2.5.1	Potenziale durch die Infrastruktur . . . . .	362
9.2.5.2	Potenziale durch fahrzeugbezogene Systeme . . . . .	363
	Literatur . . . . .	364
<b>10</b>	<b>Simulation . . . . .</b>	<b>367</b>
	Martin Roth	
10.1	Grundlagen . . . . .	367
10.1.1	Varianten der Simulation . . . . .	368
10.1.2	Allgemeine Anwendungsbeispiele . . . . .	368
10.1.3	Warum ist Simulation im Energie-Management sinnvoll? . . . . .	369
10.2	Beispiele Gesamtfahrzeug-Verbrauchssimulation . . . . .	370
10.2.1	Modellaufbau und Rahmenbedingungen . . . . .	370

10.2.1.1 Fahrzeugmodell	370
10.2.1.2 Testspezifikation	371
10.2.2 Energieflussanalysen am Beispiel NEFZ	373
10.2.2.1 Modellaufbau	374
10.2.2.2 Hybridischer Betrieb im NEFZ	374
10.2.2.3 Elektrischer Betrieb im NEFZ	376
10.2.2.4 Erkenntnisse der Energieflussanalyse	377
10.2.3 Simulationsanalyse für eine Verbrauchsoptimierung	377
10.2.3.1 Teilverbrauchsanalyse NEFZ	378
10.2.3.2 Teilverbrauchsanalyse Hochlastzyklus	380
10.3 Simulation im Ziel-Konflikt zwischen Fahr-Performance und Verbrauch	381
10.3.1 Rennstart-Simulation mit „Launch Control“	383
10.3.1.1 Grundlagen Rennstart	383
10.3.1.2 Simulationsmodell Rennstart	384
10.3.1.3 Hauptfunktionen des Simulationsmodells	386
10.3.2 Optimale Schlupfregelung einer Launch Control	392
10.3.2.1 Optimale Schlupfregelung – Grundstrategie	393
10.3.2.2 Optimale Schlupfregelung – Vorausbestimmung des nominalen Momentenbedarfs	394
10.3.2.3 Optimale Schlupfregelung – Regelfälle	396
10.4 Gekoppelte Simulationen	400
10.4.1 Co-Simulation am Beispiel PHEV-Supersportwagen auf Nürburgring-Nordschleife	401
10.4.1.1 Beschreibung der Co-Simulation	401
10.4.1.2 Ergebnisse Simulation Fahrdynamik PHEV-Supersportwagen auf Nürburgring-Nordschleife	402
10.4.2 Off-Line-Kopplung am Beispiel PHEV-Supersportwagen auf Nürburgring-Nordschleife	405
10.4.2.1 Aufbau Simulationsmodell Kühlung EM	406
10.4.2.2 Lastfall mit konstanter Belastung	408
10.4.2.3 Lastfall Nürburgring-Nordschleife	408
10.4.2.4 Auslegungssimulation für Kühlmittelstrom	410
10.4.2.5 Auslegungssimulation für Kühlluft einlass	411
Literatur	412
<b>11 Formeln, Tabellen und Diagramme für die Praxis</b>	<b>415</b>
Klaus Rohde-Brandenburger	
11.1 Definition von drei Beispielfahrzeugen für Kap. 6	415
11.2 Formeln	416
11.2.1 Effektiver Mitteldruck $p_{me}$	416
11.2.2 Berechnung des $v_{1000}$ -Wertes	418
11.2.3 Berechnung des $n/v$ -Wertes	420

---

11.2.4 Umrechnung des Verbrauchs von mpg in l/100 km . . . . .	421
11.3 Tabellen und Diagramme . . . . .	423
11.3.1 Zusammenhang zwischen Drehmoment und effektivem Mittel- druck . . . . .	423
11.3.2 Leistungs-Tabellen und -Diagramme . . . . .	424
11.3.2.1 Luftwiderstandsleistung bei Konstantfahrt . . . . .	426
11.3.2.2 Rollwiderstandsleistung bei Konstantfahrt . . . . .	427
11.3.2.3 Fahrwiderstandsleistung der Beispielfahrzeuge bei Konstantfahrt . . . . .	428
11.3.2.4 Antriebsleistung für die drei Beispielfahrzeuge bei Konstantfahrt . . . . .	429
11.3.2.5 Antriebs-Leistungsbedarf für Steigungswiderstand . . . . .	430
11.3.2.6 Antriebs-Leistungsbedarf für Gegenwind . . . . .	431
11.3.3 Teil-Verbrauchs-Tabellen und -Diagramme . . . . .	432
11.3.3.1 Teil-Verbrauch für die Motorreibung (Nullleistungsver- brauch) . . . . .	433
11.3.3.2 Teil-Verbrauch für Rollwiderstand . . . . .	435
11.3.3.3 Teil-Verbrauch für Luftwiderstand . . . . .	437
11.3.3.4 Teil-Verbrauch für elektrische Leistung . . . . .	439
11.3.3.5 Teil-Verbrauch für mechanische Leistung . . . . .	440
11.3.3.6 Verbrauch für Höhendifferenz . . . . .	441
11.4 Formelzeichen . . . . .	445
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>453</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batteriefahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BN	Bordnetz
BTL	synthetische Biokraftstoffe (Biomass to Liquid)
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CARB	Kalifornische Kommission für Luftreinhaltung (California Air Resources Board)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CN	Ländercode für China
CY	Ländercode für Zypern
DG CLIMA	Generaldirektorat der EU Kommission für Klimawandel
E	Ländercode für Spanien
EKI	Energie-Kosten-Indikator
EM	Elektrische Maschine (Motor-Generator)
EPA	Environmental Protection Agency
ES	Energiespeicher
ETBE	Ethyl-tert-Butylether
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
FE	Fuel Economy
FFV	Ethanoltaugliche Fahrzeuge (Flexible Fuel Vehicles)
FRV	Fuel Reduction Value
FTP75	Federal Test Procedure
GHG	Green House Gas
HFET	Highway Fuel Economy Test
HIL	Hardware-in-the-loop
HR	Ländercode für Kroatien
HV	Hochvolt
HVO	hydrierte Pflanzenöle (Hydrotreated Vegetable Oils)
JC08	Japan-Fahrzyklus
JRC	Gemeinsame Forschungsstelle der EU Kommission (Joint Research Centre)
K0	Trennkupplung im Hybridantriebstrang zwischen VKM und EM
LDT	Leichte Nutzfahrzeuge (Light Duty Trucks)

LE	Leistungselektronik zum Steuern der EM
LPV	Lastpunktverschiebung
LV	Ländercode für Lettland
MIL	Model-in-the-loop
MJ	Modelljahr
MKS	Mehrkörpersimulation
MTBE	Methyl-tert-Butylether
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NoVA	Normverbrauchsabgabe (Österreich)
PC	Personenkraftwagen (Passenger Cars)
PHEV	Plug-in Fahrzeug (Plug-in Electric Vehicle)
PkwEnVKV	Pkw Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung
RBM	Restbremsmoment
ROK	Ländercode für Südkorea
SC03	US-Fahrzyklus mit Klimabetrieb
SIL	Software-in-the-loop
SoC	State of Charge, Beladungszustand des Energiespeichers
SoP	Produktionsstart (Start of Production)
TLAAS	Temporary Lead Time Allowance Alternative Standard
TTW	vom Tank zum Rad (Tank to Wheel)
US06	US-Hochgeschwindigkeitstest
VKM	Verbrennungs-Kraft-Maschine
WLTC	Worldwide harmonized Light Vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure
WTT	von Quelle zum Tank (Well to Tank)
WTW	von Quelle zum Rad (Well to Wheel)

---

## 1.1 Mobilität

Mobilität ist eine elementare Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg unserer Gesellschaft. Dieser wirtschaftliche Erfolg basiert auf der Erschließung verzweigter nationaler und internationaler Märkte und einer arbeitsteiligen Gesellschaft. Diese Wirtschaftsordnung funktioniert nur, weil die Menschen mobil sind. Mobilität ist damit ein Schlüsselfaktor für Wachstum und Beschäftigung und sichert unseren Wohlstand. Mobilität vermittelt außerdem ein Gefühl von Freiheit und Unabhängigkeit. Mobilität ermöglicht es uns, in andere Länder zu reisen und anderen Menschen zu begegnen. Mobilität öffnet Horizonte. Diese individuelle Mobilität trägt in hohem Maße zur Lebensqualität der Menschen bei. Wir verdanken diese Mobilität Kraftstoffen, Verbrennungsmotoren und Turbinen, die Fahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge antreiben. Ein über die letzten gut hundert Jahre eingeschwungenes System, das bis auf wenige, dafür aber spürbare Störungen bei der Versorgung mit Erdöl funktionierte.

Eine dieser Störungen war die erste Ölkrise, die deutlich die Abhängigkeit der Industriestaaten von fossiler Energie zeigte. Die Organisation der erdölexportierenden Länder (OPEC) hatte im Herbst 1973 bewusst die Fördermengen gedrosselt, um auf einige erdölimportierende Staaten politischen Druck auszuüben. Die Länder reagierten daraufhin unterschiedlich. In Deutschland verhängten die Politiker im November und Dezember 1973 ein Sonntagsfahrverbot und ein vorübergehendes Tempolimit – 100 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf Landstraßen. Ein jahrzehntelanger wirtschaftlicher Aufschwung des deutschen Westens wurde massiv gestört. Diese Ölkrise hat sich in das Gedächtnis der Bevölkerung eingebrannt.

---

Johannes Liebl ✉  
Moosburg, Deutschland  
e-mail: kontakt@johannes-liebl.de

Seit den 1990er Jahren bedrohen Diskussionen um den Klimawandel dieses Mobilitätssystem erneut. Aus Verbrennungsprozessen emittiertes Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) soll die globale Erderwärmung beschleunigen und dadurch die klimatischen Verhältnisse auf der Erde derart verändern, dass es vermehrt zu Umweltkatastrophen kommen kann. Obwohl nicht alle Klimaforscher diese Meinung teilen, müssen wir dieses Umweltrisiko vermeiden und für die nachfolgenden Generationen neue Wege finden, um die Mobilität zu erhalten. Die zeitgleich geführten Diskussionen um die begrenzten fossilen Ressourcen haben zudem den Wertewandel in unserer Gesellschaft beschleunigt.

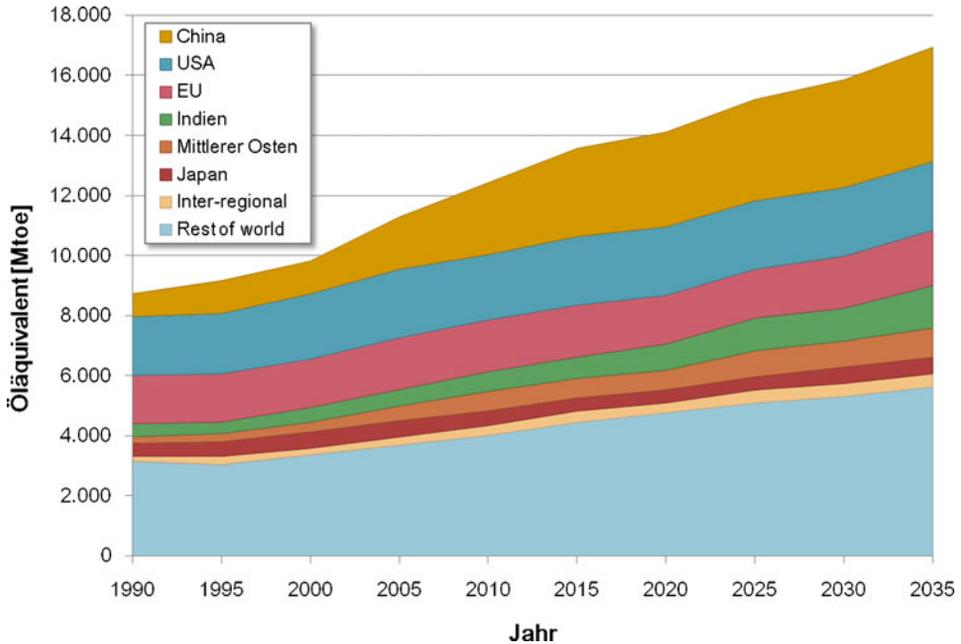
Dieser Wertewandel hat auch die Politik verändert. Die Energiewende soll unsere Gesellschaft in eine erdölunabhängige und umweltfreundliche Mobilität führen. Fahren mit elektrischem Strom hat sich zu einem Lösungsansatz entwickelt. Alle Diskussionen fokussieren sich hier auf die Personenkraftwagen, weil elektrische Antriebe bei Nutzfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen nur eine untergeordnete Rolle spielen können. Die deutsche Bundeskanzlerin, Angela Merkel, will Deutschland zur Nummer eins bei Elektroautos machen. Unter Elektroautos versteht sie batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge, Plug-In-Fahrzeuge und Brennstoffzellen-Fahrzeuge. 2011 gibt sie das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen in 2020 und sechs Millionen Elektrofahrzeugen in 2030 vor. Seitdem wird kein Thema so kontrovers diskutiert wie die Elektromobilität. Einerseits sind die Argumente, wie lokal emissionsfreies Fahren, Unabhängigkeit von erdölfördernden Ländern und beeindruckende Fahrerlebnisse hoch attraktiv, andererseits hemmen geringe Reichweiten, problematisches „Nachtanken“ und hohe Kosten batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge heute noch den Einsatz in der Breite. Das Marktwachstum für Elektromobilität ist einerseits abhängig von der technischen und betriebswirtschaftlichen Entwicklung von Energiespeichern, andererseits abhängig von der Infrastruktur mit Ladestationen, insbesondere mit Schnellladestationen.

Der Markt für Elektromobilität wird zwar wachsen, kann aber in den nächsten Jahrzehnten das Mobilitätsbedürfnis der Menschen nicht abdecken. Der Weg der Elektrifizierung ist ein evolutionärer Weg. Deshalb werden Verbrennungsmotoren noch lange ihre dominierende Stellung als Antriebsquelle behalten. Einerseits wird die Elektrifizierung die Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren treiben, andererseits werden die Verbrennungsmotoren die Weiterentwicklung der Elektrifizierung treiben. Erfolgversprechend ist die vernetzte Betrachtung des Systems elektrifizierter verbrennungsmotorischer Antriebe mit dem Antriebstrang und dem Fahrzeug. Erst ein funktionsorientierter integrativer Gesamtfahrzeugansatz führt unsere Gesellschaft in eine nachhaltige Mobilität.

---

## 1.2 Herausforderungen

Die Internationale Energie-Agentur (IEA) hat im Februar 2013 in Baden-Württemberg ihre neueste Prognose zum Weltenergiebedarf vorgestellt (Abb. 1.1) [1]. Dieser Agentur gehören die wesentlichen Erdöl-importierenden Staaten Europas und Nordamerikas an, sowie Australien, Neuseeland, Japan und Südkorea. Die Studie prognostiziert ein Anwachsen der



**Abb. 1.1** Anteile der Regionen am Weltenergiebedarf (Quelle: IEA)

Weltbevölkerung von 6,7 Milliarden in 2008 auf 8,5 Milliarden in 2030. Bei unveränderter Politik wird dabei der Weltenergieverbrauch von etwa 12.000 Mtoe (Millionen Tonnen Öläquivalent) auf 18.000 Mtoe ansteigen. Das sind 50 %.

Unterstellt man im günstigsten Fall die Umsetzung des Ziels der Klimakonferenz von Kopenhagen, die Erwärmung des Weltklimas auf 2 °C zu begrenzen, steigt der Energiebedarf immer noch um fast 30 % auf knapp 15.000 Mtoe an. Diese Umsetzung in reale Energiepolitik gilt aber aus Gründen der Finanzierbarkeit als wenig wahrscheinlich. Berücksichtigt man die Absichten der einzelnen Regierungen, ergibt sich das aus heutiger Sicht wahrscheinlichste Szenario „New Policies“ mit einem Energiebedarf von 16.500 Mtoe in 2035.

Die Zunahme des Weltenergieverbrauchs wird im Wesentlichen getrieben durch das Bevölkerungswachstum in Asien und neue aufstrebende Industrienationen wie China und Indien. Die Studie zeigt einerseits, dass bis 2035 der Energiebedarf in Europa, USA und Japan etwa konstant bleibt, zeigt aber andererseits auch, dass sich der Energiebedarf in China um etwa 75 % erhöht und in Indien sogar verdoppelt. Auch die Entwicklungsländer (Rest of world) melden deutlich steigenden Energiebedarf an.

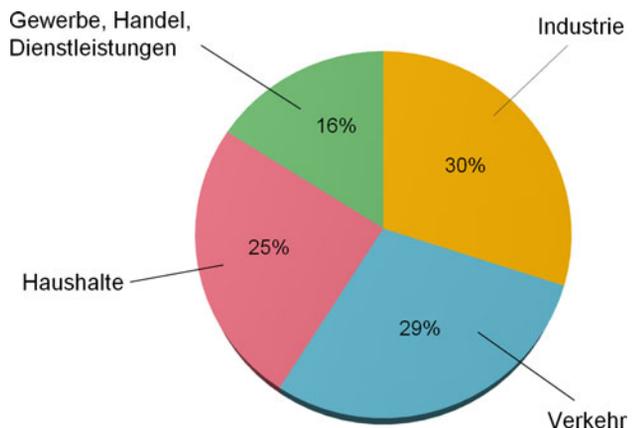
### 1.3 Individuelle Mobilität

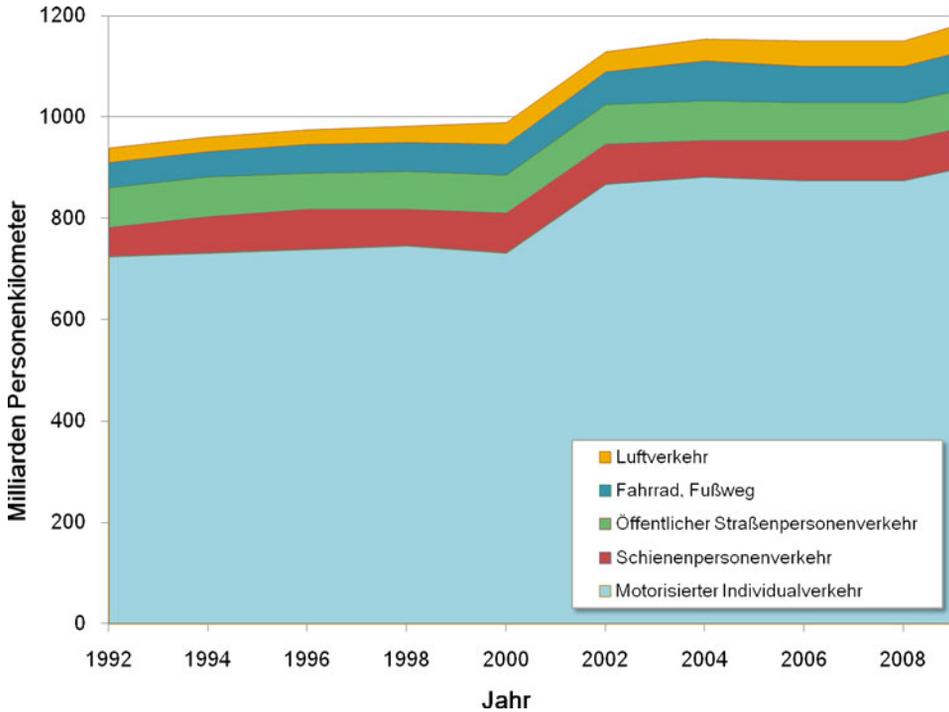
Für Deutschland zeigt das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) beispielhaft für das Jahr 2011 die Verteilung der Energiebedarfe nach Abb. 1.2 auf, [2]. Mit 30 % bzw. 29 % haben Industrie und Verkehr etwa je zur Hälfte den höchsten Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Es folgen die Haushalte mit einem Viertel. Die noch verbleibenden 16 % verteilen sich auf Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. Diese Verteilung verändert sich über die Jahre nur unwesentlich.

Bei der Analyse des Verkehrssektors zeigen die Zahlen der Deutschen Energieagentur dena, dass die Dominanz des Personenkraftwagens über Jahre hinweg ungebrochen ist, Abb. 1.3 [3]. Die Personenverkehrsleistung ist in den letzten 20 Jahren um ein Viertel gestiegen und wird nahezu konstant zu 80 % vom motorisierten Verkehr mit Personenkraftwagen und Kraftrad getragen. 2009 wurden fast 1,2 Billionen Personenverkehrskilometer zurückgelegt. Bei einer Bevölkerung von ca. 80 Millionen Menschen hat dazu jeder Deutsche pro Jahr knapp 15.000 km beigetragen. Wenn keine zusätzlichen politischen Maßnahmen ergriffen werden, gehen die Energieszenarien der Bundesregierung bis 2030 von einer Stagnation aus. Der Anstieg von 2000 bis 2002 beruht auf einer geänderten Abgrenzung der Datenbasis bei der dena und ist für unsere Analyse vernachlässigbar.

Damit steht der Personenkraftwagen bei Energie- und Umweltdiskussionen häufig im Mittelpunkt. Viele Menschen haben beim Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch ihres Fahrzeugs eine individuelle Meinung. Das liegt daran, dass gerade der Kraftstoffverbrauch wie kaum eine andere Fahrzeugeigenschaft vom Fahrer und vom Umfeld abhängt. Für eine objektive Bewertung des Energieverbrauchs eines Kraftfahrzeugs definierte der Gesetzgeber ein genau beschriebenes Messverfahren auf dem Rollenprüfstand. Bis Ende 1995 wurde der Kraftstoffverbrauch im „Drittmix“ angegeben. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch setzte sich damals zu gleichen Anteilen aus einem simulierten Stadtverkehr bis 50 km/h und Konstantfahrten bei 90 km/h und 120 km/h im höchsten eingelegten Gang zusammen. Ab 1996 erfolgte in der Europäischen Union die Ermittlung des Kraftstoffver-

**Abb. 1.2** Energieverteilung in Deutschland in 2011 (Quelle: BMWi)





**Abb. 1.3** Personenverkehrsleistung nach Verkehrsart (Quelle: dena 2011)

brauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ). Seitdem wird der Kraftstoffverbrauch aus der Abgasmenge errechnet. Die Messung der Abgasemissionen für die Vorgabe EURO 2 und den Kraftstoffverbrauch erfolgte in dieser Zeit erst 40 Sekunden nach dem Motorstart. Bei dieser Vorgehensweise wurde der Warmlaufanteil im Motorleerlauf ausgeblendet. Für eine praxisorientiertere Messung wurde die Vorschrift mit der Abgasemissionsstufe EURO 3 zu 2000 angepasst. Der Motorbetrieb wird seitdem ab Start berücksichtigt, siehe Kap. 7.

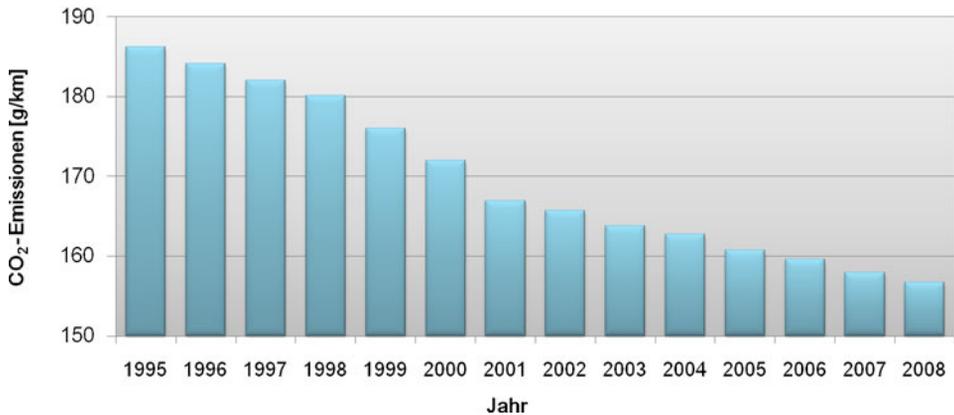
Das Ergebnis dieses Labortests eignet sich gut für die Bewertung zum Einsatz von Effizienzmaßnahmen innerhalb der Fahrzeugflotte eines Automobilherstellers und für Wettbewerbsvergleiche. Ungeeignet ist dieser Labortest für den Rückschluss auf den Kraftstoffverbrauch in Kundenhand, weil die Komfortverbraucher ausgeschaltet sind, die Bandbreite des realen Verkehrsbetriebs und das individuelle Fahrverhalten der Menschen nicht berücksichtigt werden. Die Gesetzgeber arbeiten deshalb an einer neuen Testprozedur mit einem neuen Fahrzyklus, der „Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure“ (WLTP). Eine praxisorientierte Bewertung der Fahrzeugtechnik allein auf Basis der gesetzlichen Zulassungsvorschriften wird aber nicht ausreichen. Das Fahrerverhalten, die Qualität der Verkehrsabläufe und der Infrastruktur müssen in der Diskussion um den Maßnahmenkatalog zur Effizienzsteigerung mit einbezogen werden.

## 1.4 Freiwillige Selbstverpflichtungen der Automobilhersteller

Bei der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs nahm die deutsche Automobilindustrie bereits in den 1970er Jahren eine Vorreiterrolle ein. 1978 verpflichtete sie sich dazu, bis 1985 den Kraftstoffverbrauch der in Deutschland neu in den Verkehr gebrachten Personenkraftwagen um 15 % zu vermindern. Diese Zusage wurde nach dem Bericht des VDA mit einer tatsächlichen Reduzierung von 23 % deutlich übertroffen. 1995 gingen die deutschen Automobilhersteller eine weitere Selbstverpflichtung ein. Der Kraftstoffverbrauch der in Deutschland neu zugelassenen Personenkraftwagen sollte im Zeitraum 1995 bis 2005 um durchschnittlich 25 % gesenkt werden. Nach Angaben des VDA wurde auch diese Zusage erfüllt. Damit wurde im Zeitraum 1978 bis 2005 der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch von Personenkraftwagen in Deutschland um etwa 42 % reduziert. Da der Kraftstoffverbrauch bei identischem Kraftstoff direkt proportional zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, entspricht das in gleichem Maße einer Absenkung bei diesen Emissionen.

Auf europäischer Ebene begannen die Diskussionen über eine CO<sub>2</sub>-Beschränkung des Verkehrssektors erst in den 1990er Jahren. 1995 stellte die Europäische Kommission ihre Strategie vor. Bis 2010 sollte die verkaufte Neuwagenflotte in Europa nur mehr durchschnittlich 120 gCO<sub>2</sub>/km emittieren dürfen. 1998 verabschiedete die EU die sogenannte „Drei-Säulen-Strategie“. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Strategie war die freiwillige Selbstverpflichtung des Verbands der europäischen Automobilhersteller (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, ACEA) bis 2008 die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Neuwagenflotte auf durchschnittlich 140 g/km zu senken. Das entspricht einer Verminderung um 25 % gegenüber den in 1995 neu zugelassenen Personenkraftwagen. Ergänzt wurde diese Selbstverpflichtung um die Zusage der koreanischen und japanischen Automobilhersteller die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Neuwagenflotte in Europa auf ebenfalls 140 g/km abzusenken – allerdings erst ein Jahr später. Die zweite Säule dieser Strategie war es, die Kunden beim Neuwagenkauf über Produktinformationen zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen, dem sogenannten Labeling, zu umweltbewusstem Handeln zu motivieren. Als dritte Säule sollte eine CO<sub>2</sub>-basierte Besteuerung zu weiteren Kaufanreizen für effiziente Fahrzeuge führen.

Bis 2001 konnte die Automobilindustrie die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter rasch absenken, Abb. 1.4, [4]. Aus der Bilanz der Folgejahre zogen die Politiker den Schluss, dass das vereinbarte Ziel zu 2008 nicht erreichbar sein wird. Schärfere gesetzliche Vorgaben bei den Abgasemissionen und der passiven Sicherheit sowie der Kundenwunsch nach mehr Komfort und Transportkapazität trieben das Fahrzeuggewicht nach oben. Obwohl die Ingenieure aufwendige Leichtbaumaßnahmen in den Fahrzeugen umsetzten, konnten diese Gewichtszunehmungen höchstens kompensiert werden. Ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion war daraus eher die Ausnahme.



**Abb. 1.4** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ab 1995 (Quelle: EU Kommission Transport and Environment)

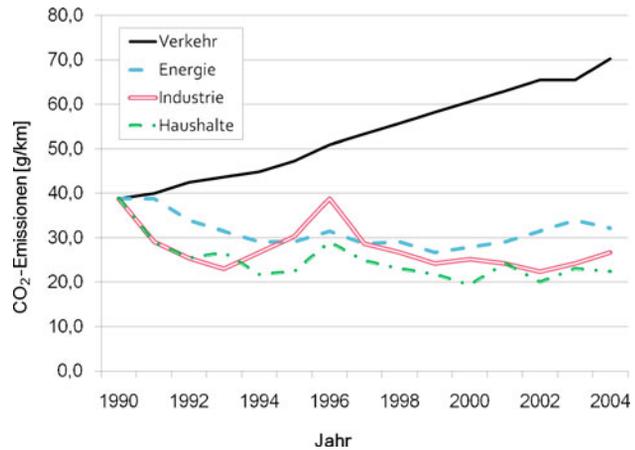
## 1.5 Gesellschaftlicher und politischer Druck

Die Automobilindustrie ist schon seit Jahrzehnten im Blickfeld der Umweltpolitik. Mitte der 1980er Jahre führten die Gesetzgeber zunächst in Deutschland dann auch im Rest von Europa bleifreien Ottokraftstoff und die Katalysatorpflicht ein. Die Nachrüstung von Altfahrzeugen mit unregelmäßigem Katalysatoren wurde steuerlich gefördert. Die Abgasnormen verschärften sich seitdem regelmäßig. Zu den immer schärfer werdenden Beschränkungen von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden kommen bei Otto- und Dieselmotoren Grenzen für die Partikelmasse und die Partikelanzahl dazu. Über die steuerlich geförderte Nachrüstung von Dieselpartikelfiltern griffen die Politiker unabhängig von der gesetzlichen Notwendigkeit in die Technik der Fahrzeuge ein. Im März 2007 wurde in Deutschland die Feinstaub-Plaketten-Verordnung eingeführt. Ohne entsprechende Plakette ist ein Befahren vieler Innenstädte nicht mehr erlaubt.

Der Personenkraftwagen ist deshalb wie kaum ein anderer Energieverbraucher an der Umwelt- und Energiediskussion beteiligt. Unterstützt wird diese Diskussion durch die kontinuierliche Zunahme des Mobilitätsbedürfnisses der Bevölkerung. Die beachtlichen CO<sub>2</sub>-Erfolge in den Fahrzeugflotten der Automobilhersteller können dieses ständig wachsende Mobilitätsbedürfnis unserer Gesellschaft nicht kompensieren. Seit 1990 fallen in Europa die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Energieversorgung in den Haushalten und der Industrie. Der Verkehrssektor ist aus oben genannten Gründen der einzige Bereich mit steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, Abb. 1.5, [4].

Einige Politiker und Umweltverbände nutzten dieses Zahlenmaterial, um Stimmung gegen die deutsche Automobilindustrie zu machen. Japanische Hybridfahrzeuge wurden als die Lösung angesehen. Eine Politikerin, die damals in der deutschen Regierung saß, empfahl sogar Fahrzeuge von dem japanischen Automobilhersteller Toyota zu kaufen. Deutsche

**Abb. 1.5** Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa durch wachsendes Mobilitätsbedürfnis (Quelle: auf Basis Daten Deutsche Bank)

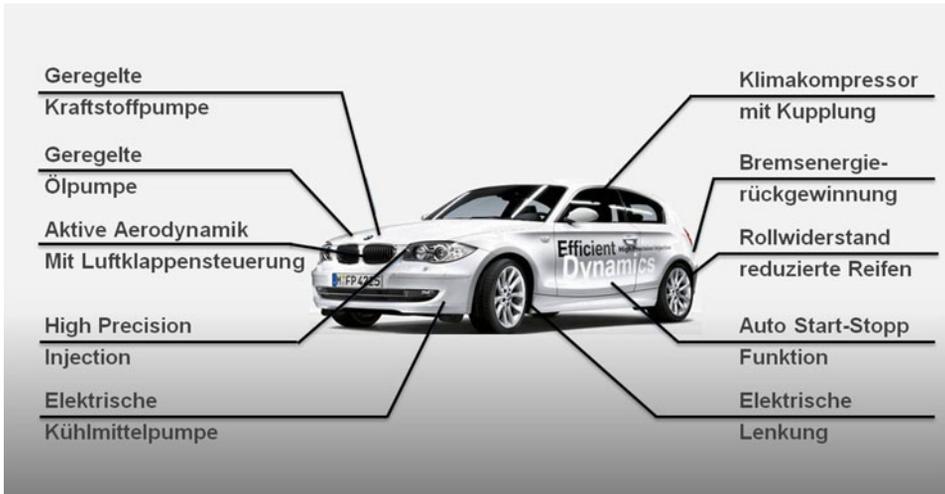


Ingenieure wurden beschimpft, die Hybridtechnik verschlafen zu haben. Sachlich vorgebrachte ingenieurmäßige Argumente wurden von vielen Politikern und Umweltverbänden nicht gehört und scheiterten. Der Druck auf die deutschen Automobilhersteller stieg. Diese haben den Handlungsbedarf erkannt. Da Hybridfahrzeuge aber nur für spezielle Fahrprofile eine sinnvolle Lösung darstellen, sind sie nur für bestimmte Nutzergruppen sinnvoll. Für den Breitereinsatz entwickelte die deutsche Automobilindustrie deshalb einen eigenen Weg in die CO<sub>2</sub>-arme Mobilität.

## 1.6 Gesamtfahrzeugansatz als Lösung

BMW überraschte 2007 auf dem Genfer Automobilsalon bei der überarbeiteten 1er Reihe als erster Automobilhersteller mit sehr niedrigen CO<sub>2</sub>-Angaben. Die Lösung hieß BMW EfficientDynamics [5], ein Gesamtfahrzeugansatz, der neben den klassischen Effizienzmaßnahmen im Antrieb auch die Fahrwiderstände reduzierte und die Energieströme im Fahrzeug bedarfsorientiert lenkte, Abb. 1.6. Dieser Ansatz hat sich in Folge in der Breite durchgesetzt. Weitere Automobilhersteller haben ein halbes Jahr später zur IAA 2007 nachgezogen.

Dieser Gesamtfahrzeugansatz hat die Arbeitsweise der ganzen Automobilindustrie verändert. Alle kundenwertigen Funktionen werden seitdem energetisch bewertet. Mechanische, elektrische, hydraulische, pneumatische und thermische Energieflüsse werden miteinander verglichen. Für diese fundierte Bewertung mussten die Entwicklungsabteilungen zunächst ein Verständnis für das gesamte Energienetzwerk entwickeln. Dazu wurde dieses Energienetzwerk mit Unterstützung der Hochschulen simulationsfähig gemacht. Schnittstellen wurden definiert und die Teilsysteme modelliert. Simulationstools wurden geschaffen und an Prüfständen und in Fahrzeugen verifiziert.



**Abb. 1.6** Gesamtfahrzeugansatz am Beispiel BMW EfficientDynamics (Quelle: BMW AG)

Über eine funktionsorientierte Bewertung der Energieströme wurde es möglich, die im Gesamtfahrzeug historisch gewachsenen CO<sub>2</sub>-Treiber zu ermitteln. In die Lastenhefte wurden bis dahin fehlende energetische Zielvorgaben aufgenommen. So wurden neue Zielsysteme geschaffen. Die Automobilhersteller erstellten individuelle CO<sub>2</sub>-Strategien, um ihre Ziele zu erreichen. Für die Umsetzung und Integration in die Fahrzeuge wurden analog dem Kosten- und Gewichtsprozess Energiemanagementprozesse aufgesetzt.

Die in der Vergangenheit fachstellenspezifisch gewachsenen Energiebordnetze veränderten sich. Mit diesem funktionsorientierten integrativen Gesamtfahrzeugansatz konnten Fahrzeuge mit klassischen Otto- und Dieselmotorenantrieben Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Reduzierungen bis zu 20 % und mehr erreichen. Werte, die vorher ohne Hybridtechnik nicht für möglich gehalten wurden.

## Literatur

- [1] [www.Energie-Fakten.de](http://www.Energie-Fakten.de)
- [2] BMWi, Energiestatistiken 21.05.2013
- [3] [www.dana.de](http://www.dana.de)
- [4] [www.dbresearch.de](http://www.dbresearch.de)
- [5] [www.bmw.de/EfficientDynamics](http://www.bmw.de/EfficientDynamics)

Matthias Lederer

Die Anforderungen an Automobile sind seit den ersten motorisierten Kutschen Ende des 19. Jahrhunderts stetig gestiegen. Zu Beginn gingen die Fahrzeughersteller davon aus, dass die Kunden bei besonderen Anforderungen auch selbst in der Lage waren, ihr Fahrzeug entsprechend zu modifizieren. Davon zeugt auch das Zitat von Henry Ford: „Jeder Kunde kann seinen Wagen beliebig anstreichen lassen, wenn der Wagen nur schwarz ist.“

Seitdem haben sich zunehmend vielschichtige Anforderungen entwickelt, die sich aus dem Wunsch nach zunehmender Individualisierung, aufgrund verschiedenster Einsatzzwecke aber auch gesetzlicher Anforderungen sowie Markenausprägungen und vielen weiteren Einflüssen ergeben haben.

Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass die Summe der Anforderungen an ein Fahrzeug, zusammengetragen im sogenannten Lastenheft, inzwischen mehrere hundert Seiten umfassen kann. In diesem Lastenheft werden alle Anforderungen an ein Fahrzeug üblicherweise etwa drei Jahre vor der ersten Produktion, dem „Start of Production (SoP)“ fixiert. Die Aufgabe der Entwicklung ist es, diese Anforderungen dann umzusetzen und speziell auch das Energiemanagement der Fahrzeuge entsprechend zu entwickeln.

Die Anforderungen an das Energiemanagement also insbesondere an den Verbrauch der Fahrzeuge standen lange Zeit bei der Entwicklung von Automobilen im Hintergrund. Erstmals in den 70er Jahren bedingt durch die Ölkrise trat die Reduzierung des Energieverbrauchs und parallel die Suche nach alternativen Kraftstoffen aufgrund der drohenden Kraftstoffverknappung in den Vordergrund. Auswirkungen waren beispielsweise die Entwicklung von Hybridantrieben [1] oder die Entwicklung von Fahrzeugen mit Holzvergaser anstelle von Benzin als Kraftstoff [2].

---

Matthias Lederer ✉

Energiemanagement Gesamtfahrzeug, Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Porschestraße,  
71287 Weissach, Deutschland  
e-mail: matthias.lederer@porsche.de

Nachdem die Ölkrise überwunden war, wurden diese kurzfristigen Trends allerdings schnell wieder vergessen. Erst zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde durch steigende Kraftstoffpreise und die Diskussion um Ressourcenverknappung und Klimawandel die Anforderung an höhere Effizienz priorisiert. Inzwischen ist der Kraftstoffverbrauch laut aktueller Studien unter den Top 3 Kaufgründen für Pkw [3, 4].

Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen an den Kraftstoffverbrauch von Pkw dargestellt. Diese Ziele sollten als Grundlage für die Auslegung von neuen Pkw dienen. Nach der Analyse von gesetzlichen Anforderungen, Kundenverbrauchsanforderungen, Wettbewerbszielen und sozialer Akzeptanz wird bei der Zieldefinition üblicherweise das schärfste dieser Ziele im Lastenheft festgelegt. Die genaue Zielstellung, also ob beispielsweise Bestwerte im Wettbewerbsumfeld angestrebt werden oder eine gewisse Bandbreite im Wettbewerbsumfeld ausreichend ist, wird je nach Fahrzeugmarke oder spezifischem Fahrzeugprojekt unterschiedlich sein. Es ist sinnvoll, für jede dieser Zielkategorien eine markenspezifische Festlegung zu treffen und diese bei der Zielableitung zu verfolgen.

Bezüglich der gesetzlichen Anforderungen muss darauf verwiesen werden, dass die dargestellte Zusammenfassung aufgrund der veränderlichen Gesetzeslage teilweise nicht mehr den aktuellsten Stand darstellen kann. Im Zweifelsfall ist deshalb der entsprechende Gesetztext als Referenz heranzuziehen.

---

## 2.1 Gesetzliche Anforderungen

Gesetzliche Anforderungen haben sich zunehmend in verschiedenen Ausprägungen etabliert. Vermutlich die erste Flottengesetzgebung zur Verbrauchsregulierung wurde in 1975 in Kalifornien verabschiedet. Die „Corporate Average Fuel Economy (CAFE)“ Gesetzgebung legte – motiviert durch die Ölkrise – Obergrenzen für die Pkw- und Lkw-Flotten der Hersteller fest. Seit dieser Zeit haben sich eine Vielzahl von verschiedenen Gesetzen entwickelt, die sich in drei Kategorien unterteilen lassen.

- **Lokale Anforderungen für Einzelfahrzeuge mit Steuer- oder Abgabenbegünstigung**  
Aufgrund lokaler Besonderheiten oder besonderer Initiativen haben einige Städte inzwischen eigene Regulierungen aufgesetzt, die den Verbrauch beziehungsweise die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen betreffen. Beispiel für solche Regulierungen ist die „Congestion Charge“ für London.  
Derartige Anforderungen haben üblicherweise eine geringe Bedeutung für den Gesamtabsatz und sind geprägt von hoher Volatilität. Geringe Standardisierung und kurzfristige Änderungen führen dazu, dass solche lokalen Regulierungen nur selten bei der Zielfestlegung für Fahrzeuge berücksichtigt werden.
- **Länderspezifische Anforderungen für Einzelfahrzeuge mit Steuer- oder Abgabenbegünstigung**  
In vielen Ländern hat sich aus der Kfz-Steuergesetzgebung, welche ursprünglich meist abhängig vom Hubraum der Fahrzeuge war, eine CO<sub>2</sub>-abhängige Steuer entwickelt.