

Henning Wallentowitz | Arndt Freialdenhoven

Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges

Technologien, Märkte und Implikationen

2., überarbeitete Auflage

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

ATZ

Henning Wallentowitz | Arndt Freialdenhoven

Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges

Henning Wallentowitz | Arndt Freialdenhoven

Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges

Technologien, Märkte und Implikationen

2., überarbeitete Auflage

Mit 211 Abbildungen

STUDIUM | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2010
2., überarbeitete Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Satz: Fromm MediaDesign, Selters/Ts.
Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1412-8

Vorwort

Die zweite Auflage des vorliegenden Fachbuches „Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges“ richtet sich an alle Interessierten, die sich mit den aktuell diskutierten Elektrofahrzeugen eingehend beschäftigen und einen Einblick in die verschiedenen technologischen und finanziellen Aspekte der Elektromobilität erhalten wollen.

Getrieben durch vor allem strengere gesetzliche Auflagen und eine drohende Verknappung der Rohölvorkommen gab es bereits in den 1990er Jahren erste Prototypen und sogar Kleinserien mit rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, die aber aufgrund einiger Unzulänglichkeiten bei der Energiespeicherung und wegen der Kosten bald wieder eingestellt wurden. Erst durch die Verfügbarkeit von Lithium-Ionen-Akkus sowie angekündigte strengere legislative Regularien sind in den letzten Jahren wieder verstärkt Entwicklungsbemühungen bei den Fahrzeugherstellern und der Zulieferindustrie zu beobachten, batteriebetriebene Elektrofahrzeuge auf den Markt zu bringen. Nach dem erfolgreichen Markteintritt des kalifornischen Sportwagens Tesla Roadster haben auch viele etablierte Fahrzeughersteller angekündigt, in den nächsten Jahren batteriebetriebene Elektrofahrzeuge auf den Markt bringen zu wollen.

Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Buch vor allem technische, wirtschaftliche und strategische Aspekte der Elektromobilität aufgezeigt. Das geschieht auf der Grundlage einer detaillierten Darstellung der relevanten Treiber für eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges in Form von Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen. Die derzeit in der Fahrzeugentwicklung diskutierten Lösungen zur Optimierung des konventionellen Verbrennungsmotors, der unterschiedlichen Hybridvarianten und der rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuge werden mit den entsprechenden Funktionalitäten und Technologien dargestellt.

Die für Elektrofahrzeuge relevanten Schlüsseltechnologien wie Elektromotoren, die Ansteuerungen und Batterien werden auf Basis unterschiedlicher Fahrzeugklassen detailliert beschrieben und unter Berücksichtigung von typischen Fahrzyklen dimensioniert. Die wichtigsten Komponenten der Elektromobilität werden zudem unter Kostenaspekten betrachtet und es wird eine Abschätzung für die relevanten Systeme durchgeführt.

Abschließend werden die Implikationen für die Automobilindustrie aufgezeigt. Dazu werden die Umverteilungen der Kompetenzen von Fahrzeugherstellern und Zulieferern beim Übergang auf batteriebetriebene Fahrzeuge erläutert und es werden verschiedene Möglichkeiten von Kooperationen aufgezeigt. Die Einführung von Elektrofahrzeugen ermöglicht gegebenenfalls auch die Etablierung von neuen Geschäftsmodellen, die ebenfalls analysiert werden.

Die Verfasser bedanken sich bei Herrn Dipl.-Kfm. Ingo Olschewski von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen, der an der Erstellung der ersten Auflage dieses Buches erheblichen Anteil hatte, und bei Felix Wallentowitz, M.A., der die zweite Auflage in der Erstellung betreut hat.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Treiber für Veränderungen	3
2.1 Legislative	3
2.1.1 Globale Umweltbelastung	4
2.1.2 Lokale Umweltbelastung	13
2.1.2.1 Lokale Umweltbelastung in Europa	13
2.1.2.2 Lokale Umweltbelastung in Kalifornien	18
2.1.2.3 Lokale Umweltbelastung in Asien	23
2.1.2.4 Kundenanforderungen in China	23
2.2 Kundenanforderungen	24
2.3 Ressourcenverfügbarkeit	26
2.3.1 Rohstoffmarkt	26
2.3.2 Ölressourcen	27
2.3.3 Ölförderung	28
2.3.4 Ölbedarf	29
2.3.5 Ölpreis	31
2.3.6 Politische Aspekte der Ölverfügbarkeit	34
2.4 Fazit	37
3 Zunehmende Elektrifizierung des Antriebstranges	38
3.1 Optimierung des konventionellen Verbrennungsmotors	39
3.1.1 Optimierung des Verbrauchs	40
3.1.1.1 Benzindirekteinspritzung	40
3.1.1.2 Aufladung und Downsizing	42
3.1.1.3 Zylinderabschaltung	48
3.1.1.4 Variabler Ventiltrieb	48
3.1.1.5 Variable Kompression	51
3.1.1.6 Nutzung der thermischen Abgasenergie	52
3.1.1.7 Neue Brennverfahren	53
3.1.2 Reduktion der Abgasemissionen	54
3.1.2.1 Drei-Wege-Katalysator	54
3.1.2.2 NO _x -Speicherkatalysator	56
3.1.2.3 SCR-Katalysator	56
3.1.2.4 Rußpartikelfilter	57
3.1.2.5 Abgasrückführung	57
3.1.3 Zwischenfazit	58

3.2	Hybridantriebe	58
3.2.1	Mikro-Hybrid	61
3.2.2	Mild Hybrid	62
3.2.3	Vollhybride	63
3.2.3.1	Parallele und leistungsverzweigte Hybride	65
3.2.3.2	Serielle Hybride	68
3.2.4	Plug-In Hybride	70
3.3	Elektrofahrzeuge	71
3.3.1	Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge	71
3.3.2	Brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge	75
3.3.2.1	Bauweisen der Brennstoffzellen	76
3.3.2.2	Leistungsmerkmale	78
3.4	Marktbedeutung und Bewertung der Antriebssysteme	83
3.5	Fazit	87
4	Schlüsseltechnologien für Elektrofahrzeuge und deren Dimensionierung ...	90
4.1	Erforderliche Schlüsseltechnologien	90
4.1.1	Elektromotoren als Energiewandler	90
4.1.1.1	Gleichstrommotoren	94
4.1.1.2	Asynchronmaschine	96
4.1.1.3	Synchronmaschine	100
4.1.1.4	Reluktanzmaschine	101
4.1.2	Übersicht erforderlicher Schlüsseltechnologien	102
4.1.3	Batterie als Energiespeicher	104
4.1.4	Batterie-Ladetechniken	115
4.2	Dimensionierung der Schlüsselkomponenten	119
4.2.1	Fahrwiderstände	120
4.2.1.1	Radwiderstand	120
4.2.1.2	Luftwiderstand	121
4.2.1.3	Steigungswiderstand	122
4.2.1.4	Beschleunigungswiderstand	124
4.2.2	Gesamtwiderstand	125
4.2.2.1	Nebenverbraucher	126
4.2.3	Betrachtete Fahrzeugklassen	127
4.2.4	Relevante Fahrzyklen	128
4.2.5	Auslegung des Elektromotors und der Steuerung	130
4.2.6	Auslegung der Batterie	135
4.3	Fazit	137
5	Kostenbetrachtung der Antriebstechnologie	139
5.1	Ansätze zur Entwicklung eines Elektrofahrzeugs	140
5.2	Kostenentwicklung der Schlüsselkomponenten	142
5.2.1	Komponenten des Antriebs	142
5.2.2	Energiespeicher – Batterie	149
5.3	Kostenmodell der verschiedenen Antriebssysteme	155
5.4	Fazit Kostenentwicklung	158

6	Implikationen für die Automobilindustrie	159
6.1	Übersicht veränderter Fahrzeugkomponenten	159
6.1.1	Änderungen am Gesamtfahrzeug	159
6.1.2	Übersicht der entfallenden Komponenten	161
6.1.3	Übersicht der neuen Fahrzeugkomponenten	163
6.1.3.1	Komponenten des Antriebsstrangs	164
6.1.3.2	Komponenten des Bordnetzes	165
6.1.3.3	Thermomanagement	165
6.1.3.4	Komponenten des Fahrwerks	166
6.1.4	Konsequenzen für Automobilzulieferer	171
6.1.5	Kernkompetenzen und Differenzierungsmerkmale der Fahrzeughersteller	176
6.2	Kooperationen auf dem Gebiet des elektrischen Antriebsstrangs	178
6.2.1	Grundlagen von Kooperationsmodellen	178
6.2.2	Chancen und Risiken von Kooperationen	179
6.2.3	Beispiele für Kooperationen im Bereich der Elektromobilität	180
6.3	Geschäftsmodelle zur Elektromobilität	184
6.3.1	Definition von Geschäftsmodellen	185
6.3.2	Geschäftsmodell „Fahrzeugkauf“	186
6.3.3	Geschäftsmodell „Fahrzeugleasing“	186
6.3.4	Geschäftsmodell „Batterieleasing“	187
6.3.5	Geschäftsmodell „CarSharing“	189
6.3.6	Geschäftsmodell „Better Place“	189
6.3.7	Bewertung der Geschäftsmodellvarianten	190
6.4	Fazit	192
7	Zusammenfassung	193
	Literatur	197
	Sachwortverzeichnis	209

1 Einleitung

Die Bruttosozialprodukte von Volkswirtschaften hängen nahezu proportional von deren erbrachten Transportleistungen ab. Daher benötigen erfolgreiche Gesellschaften leistungsfähige Verkehrssysteme. Hinzu kommt, dass wirtschaftlich erfolgreiche Länder auch einen intensiven Individualverkehr aufweisen, der sich in berufsbedingten Verkehr und in Freizeitverkehr gliedert. Diese Verkehre werden vor allem durch Personenwagen bedient, die bisher mit Verbrennungsmotoren ausgerüstet sind. Damit hängt diese Mobilität unmittelbar vom Öl ab, das zwar seit vielen Jahrzehnten nur noch für 40 Jahre vorhanden sein soll, jetzt aber wohl wirklich knapp werden wird. Deshalb gilt es, wie bereits vor einigen Jahren, nach Alternativen zu suchen bzw. solche zu marktfähigen Produkten zu entwickeln. Die Elektrifizierung des Antriebsstranges, sei es durch Batterien oder durch Brennstoffzellen ist eine der heute aktuellen Alternativen. An dieser Elektrifizierung wird weltweit bei nahezu allen Fahrzeugherstellern und den Zulieferern gearbeitet. Das wird auch Auswirkungen auf die bisherigen Antriebstechnologien haben.

Seit den Anfängen der durch Motoren angetriebenen Mobilität hat es stets den Wettbewerb zwischen elektrisch und verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen gegeben. Gasmotoren wurden nur für stationäre Zwecke angewendet. Wegen der guten Speicherbarkeit der Energie im Kraftstofftank hat sich der Verbrennungsmotor durchsetzen können. Besonders in den vergangenen rund 25 Jahren sind auch Nachteile der giftigen Emissionen (CO, NO_x, CH, Partikel) durch Katalysatoren und Filter weitgehend behoben worden. Die Kraftstoffverbräuche wurden deutlich gesenkt, und damit auch die CO₂-Emissionen. Allerdings hat sich in der Gesellschaft die Meinung durchgesetzt, dass vor allem die CO₂-Emissionen wegen ihrer Klimaschädlichkeit noch weiter gesenkt werden müssten. Diesem Ziel meinen Fachleute mit der Einführung elektrisch betriebener Fahrzeuge nahe zu kommen. Die lokale Emissionsfreiheit ist dabei auch unbestritten. Unklar bleiben allerdings noch die Quellen für die Primärenergien, also die, aus denen der Strom oder der Wasserstoff erzeugt werden, die dann im Fahrzeug für den Vortrieb sorgen sollen.

Diese Bemühungen, andere Energiequellen zu erschließen, haben einen weiteren Grund in der Tatsache, dass ein wachsender Ölbedarf lediglich durch eine geringe Anzahl an Förderländern gedeckt wird, die oft auch politisch instabil sind. Die Rahmenbedingungen der Märkte sind maßgeblich durch steigende Preise der konventionellen Kraftstoffe, strikter werdende legislative Abgasbestimmungen sowie wachsende Kundenanforderungen in Bezug auf die Kostenstrukturen und die ökologische Nachhaltigkeit der Fahrzeuge geprägt. Diese Veränderungen führen in der heutigen Zeit zu einem tiefgreifenden Wandel des automobilen Umfelds.

Die beiden durch Drosselungen der Ölfördermengen hervorgerufenen Ölkrisen in den Jahren 1973 und 1979 führten den westlichen Industrienationen vor Augen, wie abhängig sie von dem endlichen Rohstoff Rohöl sind. Als direkte Reaktionen waren stark steigende Kraftstoffpreise zu beobachten und es wurden sogar autofreie Sonntage staatlich verordnet, um den Verbrauch zu reduzieren. Diese autofreien Sonntage werden derzeit bereits wieder ins Gespräch gebracht, bzw. von einigen Städten angekündigt.

Mit dem Ziel, die Luftqualität in den Ballungsgebieten und vor allem in den großen Metropolen weltweit signifikant zu verbessern, haben die Gesetzgeber in den letzten Jahren

die Vorschriften verschärft und immer striktere Abgasgesetzgebungen eingeführt. So erhebt beispielsweise London in einem Innenstadtbereich die sogenannte „Congestion Charge“, bei der die kostenfreie Einfahrt nur mit besonders umweltfreundlichen Fahrzeugen gestattet ist. In Deutschland wird versucht, mit Hilfe von Umweltzonen die Feinstaubbelastung in ausgewählten Zentren zu verringern. Allerdings scheint sich hier der Erfolg nicht überall einzustellen.

Diese nicht immer technisch bzw. wissenschaftlich begründbaren Aktivitäten haben keine wirkliche Diskussion zum Verbrennungsmotor erzeugt. Er wird noch für Jahrzehnte die Hauptantriebsquelle sein. Die vor allem politisch motivierten Maßnahmen haben die Entwicklungsaktivitäten erneut auf die Elektromobilität gelenkt. Ein weiterer Treiber für diese derzeit intensiven Arbeiten sind Maßnahmen sowohl in China als auch in Japan, welche die Herausarbeitung eines technischen Vorsprungs bei der Elektromobilität zum Ziel haben. Bei unseren Diskussionen wird allerdings häufig die andere Verkehrsstruktur in diesen Ländern vernachlässigt. Während in Deutschland, bzw. in Europa, die Fahrzeuge für Kurz- und Langstrecken die gleichen sind, gibt es in den Metropolregionen Asiens bereits seit längerer Zeit Kleinwagen (unter anderem auch wegen der Parkplatzsituation) für Kurzstrecken, die sich besonders zur Elektrifizierung eignen.

Eine auch für Europa realisierbare Lösung bietet sich wahrscheinlich in der Hybridisierung der vorhandenen verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge an. Durch die Ergänzung des Verbrennungsmotors mit einem oder mehreren Elektromotoren lassen sich verschiedene Hybridstrategien realisieren. Die erforderliche Batterie für die Antriebsenergie kann dann relativ klein ausfallen, damit bleiben die Kosten geringer und es ist ein lokal emissionsfreier Betrieb möglich. Auf längeren Strecken bleibt der Verbrennungsmotor die Hauptantriebsquelle. Als Wettbewerber tritt möglicherweise die Brennstoffzelle auf, die mit gespeichertem Wasserstoff (das dürfte auf absehbare Zeit der geeignete Energieträger sein) betrieben wird, der nach aktuellem Forschungsstand auch größere Reichweiten als die Batterie ermöglicht.

Die Elektrotraktion ist also in jedem Fall ein Feld, auf dem es in der Zukunft erhebliche Aktivitäten geben wird. Diese Entwicklung wird auch dadurch unterstützt, dass es in den vergangenen Jahren bei den Batterien signifikante Fortschritte gegeben hat, die z. B. zur Lithium-Ionen Batterie geführt haben. Zumindest sind damit die Chancen für die Einführung von Elektro-, Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeugen erheblich gestiegen.

2 Treiber für Veränderungen

Die Entwicklung alternativer Antriebe wird im Wesentlichen von drei Faktoren beeinflusst, die für die Unternehmen zugleich die Rahmenbedingungen bilden, **Abb. 2-1**. Den ersten Einflussfaktor stellt der Gesetzgeber dar, der durch die Vorgabe von Reglementierungen die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen der Automobilhersteller direkt beeinflusst. Den zweiten wesentlichen Veränderungstreiber bildet der Kunde, der durch einen stetigen Wandel in seinem Verhalten und seinen facettenreichen Bedürfnissen ständig neue Anforderungen an das Automobil entstehen lässt. Die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen bildet den dritten bedeutenden Veränderungstreiber, der die Entwicklung hin zu alternativen Antriebssystemen bestimmt.



Abb. 2-1: Treiber für zunehmende Diversifizierung und Elektrifizierung des Antriebstrangs [FRE09]

2.1 Legislative

Die Gesetzgeber bemühen sich seit langem, Zero-Emission-Fahrzeuge einzuführen. So planten 13 Staaten der USA in den 1990er Jahren die Einführung von Gesetzen, nach denen im Jahr 1998 zumindest 3 % der verkauften Fahrzeuge „Zero-Emissionen“ aufweisen sollten. Ab dem Jahr 2003 sollten es 5 % sein. Die damals nicht verfügbaren Batterien haben diese Vorstellungen der Gesetzgeber beendet. Nun gibt es neue Versuche, diese Ziele einer besseren ökologischen Verfügbarkeit zu erreichen [MCK06, RBC08]. Dabei gibt es globale und lokale Betrachtungsweisen, die auch nicht immer nur die Natur im Blick haben.

2.1.1 Globale Umweltbelastung

Derzeit gibt es in einigen Gesellschaften der Welt einen erheblichen Streit über die genauen Ursachen der beobachtbaren Erderwärmung. So halten einige Wissenschaftler die aktuellen Wetteränderungen für eine weitere natürliche Schwankung, wie sie schon früher zu Eiszeiten und zu Trockenzeiten in Europa geführt haben. Vor allem Klimaforscher weisen auf den gestiegenen CO_2 -Gehalt der Atmosphäre hin, der zum sogenannten Treibhauseffekt führt [IPC07]. Dieser Effekt wird auf die Eigenschaft von Gasen zurückgeführt für elektromagnetische Strahlungen unterschiedlicher Wellenlänge verschiedene Durchlässigkeiten zu besitzen. Diese als Treibhausgase bezeichneten Gase sind für kurzwellige Strahlungen leichter durchlässig als für langwellige Strahlungen. In Bezug auf die Erdatmosphäre bedeutet dies, dass die in der Atmosphäre enthaltenen Gase eine relativ hohe Durchlässigkeit für die einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlungen haben, jedoch für die von der Erde reflektierten langwelligeren Strahlungen relativ undurchlässig sind. Die langwelligeren Strahlungen werden von der Erdatmosphäre stärker absorbiert und geben dadurch Wärmeenergie ab, siehe **Abb. 2-2**. Ändert sich die Zusammensetzung der Gase in der Atmosphäre, so hat dies einen Einfluss auf die durch Adsorption frei werdende Wärmeenergie und damit auf das thermische Gleichgewicht der Erde.

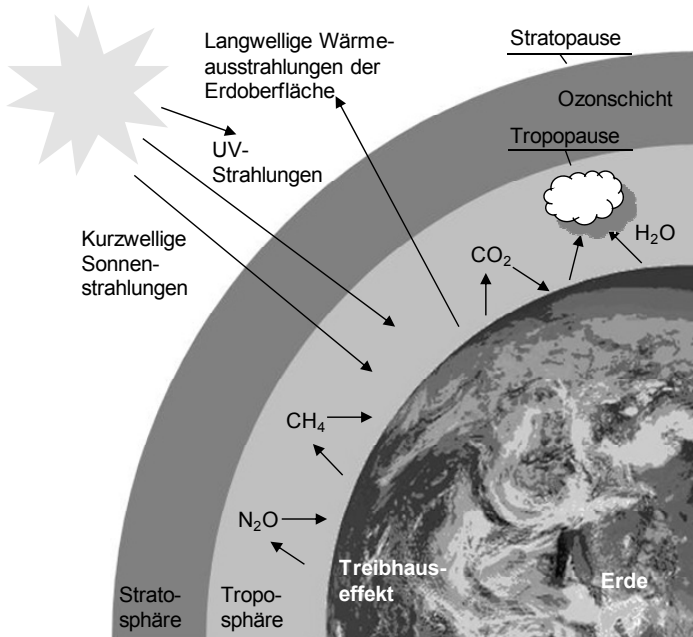


Abb. 2-2: Treibhauseffekt [BHK09]

Dem Kohlenstoffdioxid (CO_2), der nach Wasserdampf wegen seiner abgegebenen Menge das zweitwirksamste Klimagas sei, wird dafür die größte Bedeutung zugeschrieben [PIS05]. Es lässt sich zeigen, dass die CO_2 -Konzentration auf der Erde seit der Industrialisierung kontinuierlich angestiegen ist, **Abb. 2-3**. Deshalb bietet sich der Schluss an, dass der Mensch an dieser Entwicklung maßgeblich beteiligt ist, denn er hat die Kohlenstoff-

Vorräte der Erde intensiv ausgebeutet [IPC07]. Unbeantwortet bleibt dabei allerdings die Frage nach den Ursachen früherer Anstiege der CO₂-Konzentrationen, wie sie in den antarktischen Eismassen gemessen werden konnten. Damals konnten die Menschen dafür sicherlich nicht ursächlich sein.

Heute gehen die Klima-Wissenschaftler davon aus, dass dieser anthropogene Anteil des gesamten CO₂-Ausstosses entgegen dem natürlich hervorgerufenen Anteil nicht ökologisch ausbalanciert ist und er somit Einfluss auf die weltweite Klimaentwicklung nimmt.

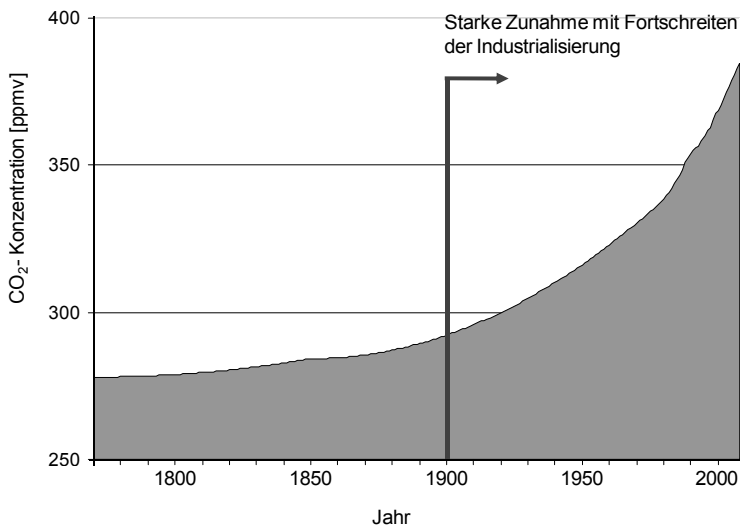


Abb. 2-3: Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Luft [NOA09]

Zu Beginn des Industriezeitalters entsprach der Volumenanteil des CO₂ in der Luft 278 ppm. Dieser Anteil stieg im Laufe der Jahre exponentiell an, so dass im Jahr 2008 bereits 385 ppm zu messen waren [NOA09]. Das ist eine Zunahme von 38 %, wobei der Gradient der Zunahme Anlass zur Sorge geben kann. Insgesamt sind allerdings noch viele offene Fragen zu beantworten, so dass zumindest der Mensch als alleinige Ursache für den Klimawandel noch nicht verantwortlich gemacht werden kann.

Der anthropogene, also der durch den Menschen erzeugte, CO₂-Ausstoß beträgt weltweit derzeit etwa 4 % des gesamten CO₂-Ausstoßes [WAL05]. Setzt man diese 4 % zu 100 % und teilt den CO₂-Ausstoß auf die verschiedenen Verursacher auf, erhält man z. B. für Deutschland die Verhältnisse in **Abb. 2-4**.

Der Pkw-Verkehr ist nach **Abb. 2-4** mit 12 % an den anthropogenen CO₂-Emissionen beteiligt. Bezieht man diese 12 % auf die Gesamtheit der CO₂-Emissionen der Welt (4 %), dann macht der Pkw-Verkehr nur 0,48 % aller CO₂-Emissionen aus. Der Hebel zur Verbesserung des Klimas dürfte damit relativ kurz sein. Allerdings stellt die CO₂-Reduktion auch eine Maßnahme dar, den Ressourcenverbrauch an kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen, in Form von Erdgas, Erdöl oder Kohle, zu verringern. Da wir hier Knappheiten entgegengehen, sind Änderungen im Fahrzeugantrieb also durchaus zielführend. Dabei sollte nur nicht die Hoffnung aufkommen, mit dieser Maßnahme die Welt vor dem Klimawandel retten zu können.

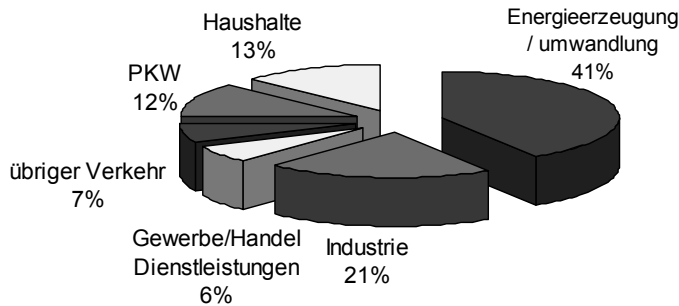


Abb. 2-4: Zusammensetzung des anthropogenen CO₂-Ausstoßes in Deutschland [BUN06]

Zusätzlich sind die Aktivitäten zur Elektrifizierung des Antriebsstranges vor einem wettbewerbspolitischen Hintergrund zu sehen. Hinter der Frage, welche Nation als Erste einen wirtschaftlich vertretbaren emissionsfreien Antrieb zur Verfügung hat, steckt in erheblichem Maße auch Wirtschaftspolitik.

Insbesondere die Aktivitäten der Europäischen Union (EU) spiegeln diese wirtschaftspolitischen Entwicklungen wider. Nachdem die europäischen Fahrzeughersteller ihre Selbstverpflichtungen, die CO₂-Emissionen bis 2008 auf 140 g/km zu reduzieren [BWU08], nicht einhalten konnten, sind auf EU-Ebene gesetzliche Maßnahmen für die CO₂-Flottenausstöße entworfen worden. Das Europaparlament, die EU-Staaten und die Europäische Kommission einigten sich im Dezember 2008 auf die Einführung eines Stufenplans, siehe **Abb. 2-5**.

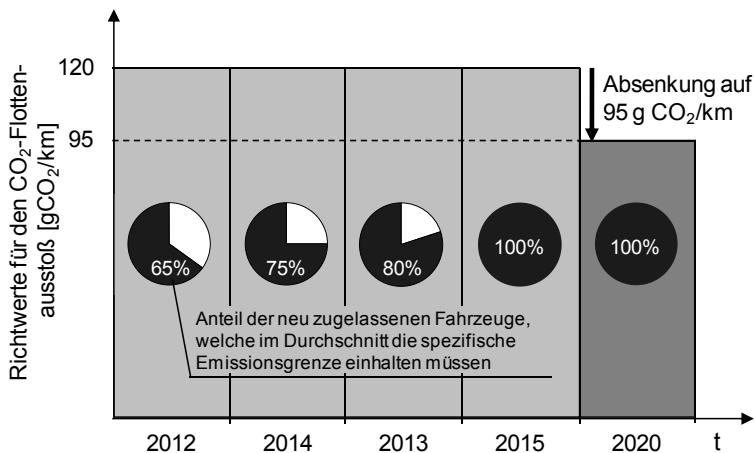


Abb. 2-5: Stufenplan CO₂-Emission der Europäischen Union

Durch die Verbesserung der Motorentechnik soll eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes auf 130 g/km möglich sein. Diese Emission bezieht sich bei der Fahrtstrecke auf den NEDC (New European Driving Cycle), also eine definierte Testprozedur, die nicht direkt etwas mit dem praktischen Alltagsbetrieb zu tun hat. Durch zusätzliche technische Maßnahmen

wie Leichtlaufreifen oder den Einsatz von Biokraftstoffen wird mit einer weiteren Reduktion um 10 g/km gerechnet. Somit ist das zukunftsweisende Ziel das Erreichen eines durchschnittlichen CO₂-Ausstoßes von 120 g/km. Erfüllt werden soll dieses Ziel über eine jährliche Erhöhung des Prozentanteils der Neuwagen, deren durchschnittliche spezifische CO₂-Emission einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten darf. Diese durchschnittliche spezifische CO₂-Emission darf beispielsweise in 2012 von 65 % der in Europa zugelassenen Neuwagen eines Herstellers im Durchschnitt nicht überschritten werden. Bis 2015 wird stufenweise gefordert, dass der durchschnittliche Kohlenstoffdioxid ausstoß aller Fahrzeuge die durchschnittliche spezifische CO₂-Emission nicht überschreitet. Weitreichendes Ziel soll bis 2020 die Orientierung an einem Grenzwert des Kohlenstoffdioxid ausstoßes von 95 g CO₂/km sein. [EUR08]

Sowohl die 120 g/km als auch der Wert von 95 g/km sind derzeit nur als Richtwerte zu verstehen, an denen sich die Entwicklung der Obergrenze für den CO₂-Ausstoß für Neuwagen orientieren soll. Die Grenzwerte, die ein Hersteller tatsächlich einhalten muss, um Strafzahlungen zu vermeiden, werden durch die bereits erwähnte durchschnittliche spezifische CO₂-Emission bestimmt. Dies ist ein Grenzwert für den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß, der sich über das Durchschnittsgewicht der Fahrzeugflotte für jeden einzelnen Hersteller berechnen lässt. Folglich existiert für jeden Hersteller ein für seine Fahrzeugflotte spezifischer Grenzwert. Die Differenz zwischen diesem Grenzwert und dem tatsächlichen durchschnittlichen Ausstoß seiner Fahrzeugflotte bildet den Wert, nach dem sich die Strafzahlung des Fahrzeugherstellers richtet, **Abb. 2-6**. Es muss also weder jedes Fahrzeug noch der Durchschnitt der Fahrzeugflotte eines Herstellers die im Stufenplan angesetzten 120 g/km bzw. 95 g CO₂/km einhalten [EUR09]. Ab dem Jahr 2012 fallen je nach Höhe der Überschreitung des Grenzwertes pro Gramm Überschreitung unterschiedlich hohe Strafzahlungen an. Beispielsweise müssen für das erste Gramm, das den Grenzwert überschreitet, 5 € und für das zweite Gramm 15 € je neu zugelassenem Fahrzeug gezahlt werden. Bei einer Überschreitung des Grenzwertes von mehr als 3 Gramm fallen für jedes weitere Gramm bereits 95 € an, siehe **Abb. 2-6**.

Diese Regelungen der Europäischen Union betreffen alle in Europa zugelassenen Neuwagen. Für Nischenanbieter mit einer Absatzzahl unter 10.000 Stück/Jahr gelten hierbei Ausnahmen. Unter anderem richtet sich der Grenzwert nach dem wirtschaftlichen und technischen Potenzial sowie nach den Besonderheiten des Marktes für den hergestellten Fahrzeugtyp. Des Weiteren wird differenziert zwischen verbundenen Unternehmen und Emissionsgemeinschaften. Verbundene Unternehmen sind solche, die demselben Konzern angehören. Zum Volkswagen Konzern gehören beispielsweise die Hersteller bzw. Marken Audi, Skoda, Seat und VW sowie zukünftig Porsche und zum BMW Konzern die Marken Mini, BMW und Rolls Royce. Der CO₂-Emissionsgrenzwert ergibt sich dann aus dem Durchschnittsgewicht der neu zugelassenen Fahrzeuge des Konzerns. Damit werden auch die gegebenenfalls anfallenden Strafzahlungen für den gesamten Konzern bestimmt. Unter Emissionsgemeinschaften wird eine Kombination zweier oder mehrerer voneinander unabhängiger Hersteller verstanden, die mit dem Ziel entsteht, dass alle an der Gemeinschaft beteiligten Hersteller den nun für die Gemeinschaft geltenden durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionsgrenzwert einhalten können. In einer Emissionsgemeinschaft tauschen die Hersteller lediglich Daten aus, die den CO₂-Ausstoß und die Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge betreffen. [EUR09]