

FHTW Berlin  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften II  
Studiengang Fahrzeugtechnik



Fachhochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

*University of Applied Sciences*

Entwicklung eines modular aufgebauten  
Fahrzeugkonzeptes zur Langzeitnutzung unter  
Berücksichtigung der Ergebnisse einer vergleichenden  
Sachbilanz-Studie

Diplomarbeit

eingereicht von

Tim Salatzki



# Entwicklung eines modular aufgebauten Fahrzeugkonzeptes zur Langzeitnutzung unter Berücksichtigung der Ergebnisse einer vergleichenden Sachbilanz-Studie

## Diplomarbeit

eingereicht von:	Tim Salatzki Matrikelnummer: 0506272
Erstprüfer:	Prof. Dr. Werner Stednitz
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Roland Kayser
Beginn:	02.05.2008
Abgabe:	15.09.2008

## Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Berlin, .....

Unterschrift .....

# Inhalt

<b>Erklärung</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Aufgabenstellung</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Sachbilanz-Studie</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Lebenszyklusanalysen zur ökologischen Produktbewertung</b> .....	<b>4</b>
2.1.1 Ganzheitliche Bilanzierung über den gesamten Produktlebenszyklus.....	4
2.1.2 Ökobilanz- und Sachbilanz-Studien .....	5
2.1.2.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	7
2.1.2.2 Sachbilanz.....	8
2.1.2.3 Auswertung .....	9
<b>2.2 Durchführung der Sachbilanz-Studie</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Ziel der Untersuchung .....	11
2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit der untersuchten Fahrzeuge .....	13
2.2.3 Untersuchungsrahmen .....	14
2.2.4 Datengrundlage und Datenqualität .....	16
2.2.5 Modellannahmen und Festlegungen der Umweltbilanz.....	22
<b>2.3 Ergebnisse der Sachbilanz-Studie</b> .....	<b>23</b>
2.3.1 Werkstoffzusammensetzungen .....	23
2.3.2 Rohstoffgewinnungs-, Rohstoffweiterverarbeitungs- und Fahrzeugherstellungsphase .....	25
2.3.3 Nutzungsphase .....	32
2.3.4 Verwertungsphase .....	34

---

<b>2.4 Vergleich der zwei Halteoptionen</b> .....	<b>34</b>
2.4.1 Energieverbrauch .....	35
2.4.2 Schadstoffausstoß.....	37
2.4.3 Auswertung .....	39
<b>3 Fahrzeugsicherheit</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1 Begriffserklärungen</b> .....	<b>43</b>
3.1.1 Aktive Sicherheit.....	44
3.1.1.1 Fahrassistenzsysteme .....	44
3.1.1.2 Fahrerassistenzsysteme.....	45
3.1.2 Passive Sicherheit.....	46
<b>3.2 Meilensteine der Fahrzeugsicherheit bis 2008</b> .....	<b>48</b>
<b>3.3 Entwicklung der Verkehrsunfälle und deren Folgen bis 2008</b> .....	<b>51</b>
3.3.1 Statistik .....	51
3.3.2 Gründe der positiven Entwicklung .....	53
<b>3.4 Zukünftige Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit</b> .....	<b>54</b>
<b>3.5 Auswirkung der Sicherheit auf die Langzeitnutzung von Fahrzeugen</b> .....	<b>55</b>
<b>4 Entwicklung des Fahrzeugkonzepts</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1 Derzeitige Entwicklungen und zukünftige Trends in der Fahrzeugtechnik</b> .....	<b>58</b>
4.1.1 Zielkonflikte der Fahrzeugentwicklung .....	60
4.1.2 Integrierter Umweltschutz während Entwicklung und Produktion .....	61
<b>4.2 Ressourcen und Werkstoffe im Fahrzeugbau</b> .....	<b>63</b>
4.2.1 Stahl- und Eisenwerkstoffe .....	64
4.2.2 Aluminiumwerkstoffe .....	65
4.2.3 Magnesiumwerkstoffe.....	67
4.2.4 Weitere Leicht-, Bunt- und Sondermetalle .....	68
4.2.5 Kunststoffe .....	69
4.2.6 Weitere nichtmetallische Werkstoffe.....	71
<b>4.3 Modul- und Plattformbauweise</b> .....	<b>71</b>
4.3.1 Fahrzeugmodul und -system .....	72
4.3.2 Fahrzeug- und Produktplattform .....	74

---

<b>4.4 Wege zur Kraftstoffersparnis und Verringerung der Schadstoffemissionen.....</b>	<b>75</b>
4.4.1 Motor und Antrieb.....	77
4.4.1.1 Motorentwicklungen und -konzepte .....	78
4.4.1.2 Antriebskonzepte.....	79
4.4.1.3 Kraftstoffe.....	80
4.4.2 Leichtbau.....	82
4.4.3 Sonstige Maßnahmen .....	84
4.4.4 Zusammenfassung.....	85
<b>4.5 Einbeziehung der Erkenntnisse der durchgeführten Sachbilanz-Studie....</b>	<b>85</b>
<b>4.6 Fahrzeugkonzept zur Langzeitnutzung .....</b>	<b>87</b>
4.6.1 Anforderungen und Vorgaben .....	88
4.6.2 Layout .....	89
4.6.3 Aggregate.....	91
4.6.4 Fahrwerk .....	92
4.6.5 Karosserie .....	93
4.6.6 Interieur .....	96
4.6.7 Elektrik und Elektronik.....	97
4.6.8 Sicherheit .....	99
4.6.9 Zusammenfassung.....	101
<b>5 Schlussbetrachtung .....</b>	<b>103</b>
<b>6 Literatur .....</b>	<b>106</b>
<b>7 Anhang .....</b>	<b>116</b>
7.1 Eigenschaften der Vergleichsfahrzeuge.....	116
7.2 Extrapolation Energieverbrauch Automobilproduktion.....	118
7.3 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf Citroën DS 21.....	119
7.4 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf Citroën CX 20.....	120
7.5 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf Ford Mondeo 1.8i.....	121
7.6 Berechnung des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase .....	122
7.7 Berechnung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes während der Nutzungsphase.....	124

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 – Überblick der ganzheitlichen Bilanzierung [modif. nach 121, S.19] .....	4
Abbildung 2-2 – Phasen einer Ökobilanz-Studie bzw. Sachbilanz-Studie (ohne Wirkungsabschätzung) [modif. nach 22, S.16] .....	7
Abbildung 2-3 – Haltedauer der verschiedenen Fahrzeuge [eigene Darstellung].....	12
Abbildung 2-4 – Jahresfahrleistung Pkw in Deutschland [eigene Darstellung nach 12]	12
Abbildung 2-5 – Untersuchungsrahmen der Sachbilanz-Studie [modif. nach 86, S.12]	16
Abbildung 2-6 – Übersicht Energieverbrauch bei Fahrzeugproduktion im Zeitraum 1996 bis 2006 [eigene Darstellung nach 93 – 140] .....	19
Abbildung 2-7 – Werkstoffzusammensetzung Citroën DS 21 [eigene Darstellung] .....	24
Abbildung 2-8 – Werkstoffzusammensetzung Citroën CX 20 [eigene Darstellung] .....	24
Abbildung 2-9 – Werkstoffzusammensetzung Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung].	25
Abbildung 2-10 – Rohstoffbedarf Citroën DS 21 [eigene Darstellung].....	27
Abbildung 2-11 – Rohstoffbedarf Citroën CX 20 [eigene Darstellung].....	27
Abbildung 2-12 – Rohstoffbedarf Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung] .....	28
Abbildung 2-13 – Gegenüberstellung der verwendeten Rohstoffe [eigene Darstellung].	29
Abbildung 2-14 – Abfallmenge und Wasserbedarf bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung].	30
Abbildung 2-15 – Energieverbrauch bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung].....	31
Abbildung 2-16 – Schadstoffausstoß bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung].....	32
Abbildung 2-17 – Energieverbrauch in der Nutzungsphase [eigene Darstellung].....	32
Abbildung 2-18 – Schadstoffausstoß während der Nutzung von jeweils 12 Jahren [eigene Darstellung].....	33
Abbildung 2-19 – Vergleich Energieverbrauch durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung].....	36
Abbildung 2-20 – Vergleich CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung].....	37
Abbildung 2-21 – Vergleich CO-Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung].....	38
Abbildung 2-22 – Vergleich NO <sub>x</sub> -Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung].....	39

Abbildung 2-23 – Vergleich Rohstoffbedarf der Fahrzeugproduktion in den beiden Optionen [eigene Darstellung] .....	41
Abbildung 2-24 – Vergleich Abraum und Wasserverbrauch durch Fahrzeugproduktion in den beiden Optionen [eigene Darstellung] .....	42
Abbildung 3-1 – Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit [modif. nach 41, S.3] .....	43
Abbildung 3-2 – Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit [eigene Darstellung nach 99 und 141 – 165].....	50
Abbildung 3-3 – Entwicklung Verkehrstote und Fahrzeugbestand in Deutschland von 1953 bis 2007 [modif. nach 73, S.6 und 73, S.20f] .....	52
Abbildung 4-1 – Zielkonflikt in der Fahrzeugentwicklung [eigene Darstellung] .....	60
Abbildung 4-2 – Durchschnittliche Fahrzeugzusammensetzung 1965 - 2000 [eigene Darstellung nach 83, S.14 und 1, S.168] .....	63
Abbildung 4-3 – Hauptmodule des neuen Fahrzeugkonzepts [eigene Darstellung].....	90
Abbildung 7-1 – Extrapolation des Gesamtenergieverbrauchs in der Automobilfabrik pro produziertem Fahrzeug [eigene Darstellung] .....	118

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 – technische Daten der Fahrzeuge [eigene Darstellung nach 57, 59, 76, 49, 50, 79, 37, 17, 18].....	14
Tabelle 2-2 – Annahmen und Festlegungen der Sachbilanz-Studie [eigene Darstellung nach 86, S.17f] .....	22
Tabelle 2-3 – Entwicklung der Emissionsgrenzwerte in Deutschland [modif. nach 32 und 80] .....	34
Tabelle 4-1 – Eigenschaften des Fahrzeugkonzeptes zur Langzeitnutzung [eigene Darstellung].....	102
Tabelle 7-1 – Eigenschaften Vergleichsfahrzeuge [eigene Darstellung] .....	116
Tabelle 7-2 – Werkstoffzusammensetzung Citroën DS [eigene Darstellung] .....	119
Tabelle 7-3 – Rohstoffbedarf Citroën DS 21 [eigene Darstellung].....	119
Tabelle 7-4 – Werkstoffzusammensetzung Citroën CX [eigene Darstellung] .....	120
Tabelle 7-5 – Rohstoffbedarf Citroën CX 20 [eigene Darstellung].....	120
Tabelle 7-6 – Werkstoffzusammensetzung Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung] .....	121
Tabelle 7-7 – Rohstoffbedarf Ford Mondeo [eigene Darstellung].....	121

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
AbfG	Abfallgesetz
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACRS	Air Cushion Restraint System
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AMS	Zeitschrift Auto Motor und Sport
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMW	Bayrische Motorenwerke
CAN	Controlled Area Network
CNG	Compressed Natural Gas
ca.	cirka
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECE	Economic Commission for Europe
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
EWB	Electronic Wedge Brake
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FDR	Fahrdynamikregelung
g	Gramm
g/km	Gramm pro Kilometer
GaBi	Software zur Erstellung von Lebenszyklusbilanzen
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
HC	Sammelbegriff für flüchtige organische Substanzen (Kohlenwasserstoffe)
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
ISO	Internationale Organisation für Normung
IZU	Infozentrum UmweltWirtschaft
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
KW	Kilowatt
KWh	Kilowattstunden
l	Liter

---

LDW	Lane Departure Warning
LKS	Lane Keeping Support
min <sup>-1</sup>	Umdrehungen pro Minute
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
MOST	Media Oriented Systems Transport
MWh	Megawattstunden
NCAP	New Car Assessment Program
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NEFZm	Neuer europäischer Fahrzyklus modifiziert
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NM VOC	Non Methane Volatile Organic Compounds (flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan)
NO <sub>x</sub>	Sammelbezeichnung für gasförmige Stickstoffoxide
o.J.	ohne Jahr
Pkw	Personenkraftwagen
PROBAS	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
RL	Richtlinie
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
sonst.	sonstige
SUV	Sports Utility Vehicle
TMC	Traffic Message Channel
u.a.	unter anderem
USA	United States of Amerika (Vereinigte Staaten von Amerika)
VDA	Verband der Automobilindustrie
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

## 1 Einleitung

Die Automobilindustrie steht derzeit vor komplexen Herausforderungen. Bedingt durch gesellschaftliche und politische Entwicklungen müssen die Hersteller immer strenger werdende Anforderungen, die sowohl den Schadstoffausstoß als auch die Sicherheit betreffen, erfüllen. Im Zuge der zuletzt stark gestiegenen Kraftstoffpreise achten auch die Kunden zunehmend auf den Kraftstoffverbrauch, mit dem die Abgasemissionen eng zusammenhängen. Daher stehen speziell die Umweltauswirkungen infolge der Fahrzeugnutzung im Fokus der Aufmerksamkeit. Neben dem Kundenwunsch nach Fahrzeugen mit geringerem Verbrauch wird auch von Seiten der Politik, durch die zukünftige Festlegung des maximalen CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes von 120 Gramm pro Kilometer im Jahr 2012 sowie durch die Begrenzung des Schadstoffausstoßes, Druck auf die Automobilhersteller ausgeübt. Dieser hat in den letzten Jahren schon zu einer Vielzahl an Innovationen im Bereich der Motoren- und Antriebstechnik geführt.

Bei einer solchen Betrachtung wird jedoch nur den Auswirkungen der Nutzung Beachtung geschenkt, wogegen die Konsequenzen der Produktion sowie des Recyclings völlig außer Acht gelassen werden. Vor allem durch die Bemühungen der Hersteller in Bezug auf die Reduktion des Fahrzeuggewichts kommen zunehmend „exotische“ Werkstoffe, wie z.B. Faserverbundwerkstoffe oder auch spezielle Leichtmetalle, zum Einsatz. An dieser Stelle stellt sich jedoch die Frage, ob der Aufwand für deren Gewinnung und Weiterverarbeitung durch den geminderten Kraftstoffverbrauch überhaupt kompensiert werden kann.

Zudem ist derzeit ungeklärt, ob es sich für die Kunden und vor allem in Bezug auf die Umweltwirkungen über die gesamte Lebensdauer zwangsläufig lohnt, in regelmäßigen Abständen einen Neuwagen anzuschaffen. Wäre es hierbei nicht sinnvoller, ein älteres Fahrzeug länger zu nutzen? Bei diesem wurden schon Rohstoffe und Energie für die Herstellung verbraucht, welche für die Produktion eines neuen Fahrzeugs noch einmal zusätzlich aufgewendet werden müssten.

Bezüglich dieser Fragestellung bleibt zu klären, ob sich die Automobilhersteller mit ihren derzeitigen Fahrzeugen auf dem richtigen Weg befinden, oder ob nicht vielmehr ein neuartiges Konzept entwickelt werden müsste, welches über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann. Bei diesem ist nur ein einmaliger Aufwand für die Produktion nötig, welcher zugleich mit einer verlängerten Nutzungsdauer einhergeht. Vor der Entwicklung eines solchen Konzepts, ist im Vorfeld eine ausführliche Bilanz hinsichtlich der Auswirkungen der Produktion sowie der einzelnen Werkstoffe auf die Nutzung des Fahrzeugs

zu erstellen. Auf Basis der Bilanzergebnisse können gerechtfertigte Entscheidungen hinsichtlich adäquater Werkstoffe sowie der tatsächlichen Umweltauswirkungen durch Produktion und Nutzung getroffen werden.

## **1.1 Aufgabenstellung**

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Fahrzeugkonzepts zur Langzeitnutzung. Dafür gilt es Informationen zu den derzeit verwendeten Werkstoffen zu sammeln, mögliche Bauweisen zu bewerten sowie zukünftige Trends in der Fahrzeugtechnik aufzuzeigen, um die so gewonnenen Erkenntnisse in das neue Konzept einfließen zu lassen.

Bedingt durch die lang andauernde Nutzung können jedoch keine bestehenden Bewertungskriterien, hinsichtlich der Auswirkungen der jeweiligen einzusetzenden Werkstoffe, festgelegt werden. In diesem Fall bedarf es eines ganzheitlichen Ansatzes, bei dem sowohl die Auswirkungen der Produktion als auch der Nutzung erfasst und bewertet werden.

Hierzu sollen die Ergebnisse einer mit verschiedenen älteren Fahrzeugen durchzuführenden Sachbilanz-Studie beitragen. Durch den Vergleich zweier Halteoptionen werden dabei die verschiedenen Auswirkungen hinsichtlich Produktion und Nutzung einer langfristigen Fahrzeugverwendung untersucht. In der ersten Halteoption wird ein Fahrzeug über einen Zeitraum von 36 Jahren durchgehend genutzt, wo hingegen bei der zweiten Option alle 12 Jahre, entsprechend der durchschnittlichen Haltedauer in Deutschland, das vorhandene Fahrzeug durch ein neues ersetzt wird. Zu berücksichtigen sind hierbei die im Zuge der Produktion und Nutzung verbrauchten Rohstoffe inklusive des anfallenden Abraums, des Energieverbrauchs sowie des Schadstoffausstoßes. Am Ergebnis der Sachbilanz-Studie lässt sich ableiten, welchen Faktoren im Hinblick auf eine langfristige Nutzung besondere Beachtung geschenkt werden muss.

Der ganzheitliche Ansatz beschränkt sich gleichwohl nicht nur auf die Gesamtumweltwirkungen des neuen Konzepts. In diesem Zusammenhang soll eine Untersuchung der Entwicklung der Fahrzeugsicherheit zeigen, ob ein Fahrzeug auch bei langer Nutzung den aktuellen Sicherheitsanforderungen entsprechen kann.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit beginnt mit einer vergleichende Sachbilanz-Studie im zweiten Kapitel, dessen Ergebnisse Einfluss auf die spätere Gestaltung des neuen Fahrzeugkonzepts nehmen.

---

Zudem wird dabei geklärt, welche der beiden untersuchten Halteoptionen rückblickend über die geringeren Umweltauswirkungen verfügt.

Das dritte Kapitel beinhaltet eine Untersuchung der bisherigen Fortschritte im Bereich der Fahrzeugsicherheit sowie einen Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen. Zugleich wird bewertet, ob die Sicherheit auch entsprechend der Dauer einer langfristigen Nutzung gewährleistet werden kann bzw. welche Schritte dafür unternommen werden müssen.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Fahrzeugentwicklung. Im Zuge dessen werden die Zielkonflikte der Automobilindustrie dargelegt sowie auf die Relevanz eines frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebundenen Umweltschutzes hingewiesen. Darauf folgt eine Beschreibung der gängigsten im Automobilbau eingesetzten Werkstoffe sowie einiger Baukonzepte. Zum Abschluss werden verschiedene Wege zur Gewichts- und Verbrauchsreduktion bewertet. Auf Basis der gesammelten und evaluierten Daten wird darauf hin das neue Fahrzeugkonzept zur Langzeitnutzung beschrieben. Hierbei wird unter anderem auf die Bauweise inklusive der Innenausstattung, auf die dabei eingesetzten Werkstoffe, sowie auf die Sicherheitsausstattung eingegangen.

Die Arbeit schließt mit einer Schlussbetrachtung im fünften Kapitel.

## 2 Sachbilanz-Studie

### 2.1 Lebenszyklusanalysen zur ökologischen Produktbewertung

Zur Ermittlung der Umweltwirkungen eines oder mehrerer Produkte im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz-Studie genannt, ist es entscheidend, welchen Einfluss diese während ihrer gesamten Lebensdauer auf die Umwelt ausüben [86, S.6]. Als Basis dient hierbei nicht der aus der klassischen Betriebswirtschaftslehre bekannte Produktlebenszyklus sondern ein Modell, welches den gesamten ökologischen Lebenszyklus beschreibt [69, S.19]. Dabei geht es nicht nur um isolierte Umweltaspekte während einzelner Phasen, z.B. der Nutzung oder der Produktion, sondern um die Betrachtung aller relevanten Größen und Prozesse über den gesamten ökologischen Lebenszyklus, also „von der Wiege bis zur Bahre“ [10 S.6], [69, S.39], [10 S.9], [86, S.3], [81, S.1].

#### 2.1.1 Ganzheitliche Bilanzierung über den gesamten Produktlebenszyklus

Die ganzheitliche Bilanzierung beinhaltet alle relevanten Umweltwirkungen während des ökologischen Produktlebenszyklus. Sie bietet die Möglichkeit einzelne Produkte hinsichtlich ihrer ökologischen Eigenschaften zu bewerten. Bei der Durchführung mehrerer Bilanzierung können auch unterschiedliche Produkte miteinander verglichen werden [86, S.6]. Diese Art der Bilanzierung, auch Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz-Studie genannt, beschreibt die mit einem Produkt verbundenen Umweltwirkungen präzise und quantifizierbar [86, S.6]. Abbildung 2-1 gibt einen grafischen Überblick über deren Teilaspekte.

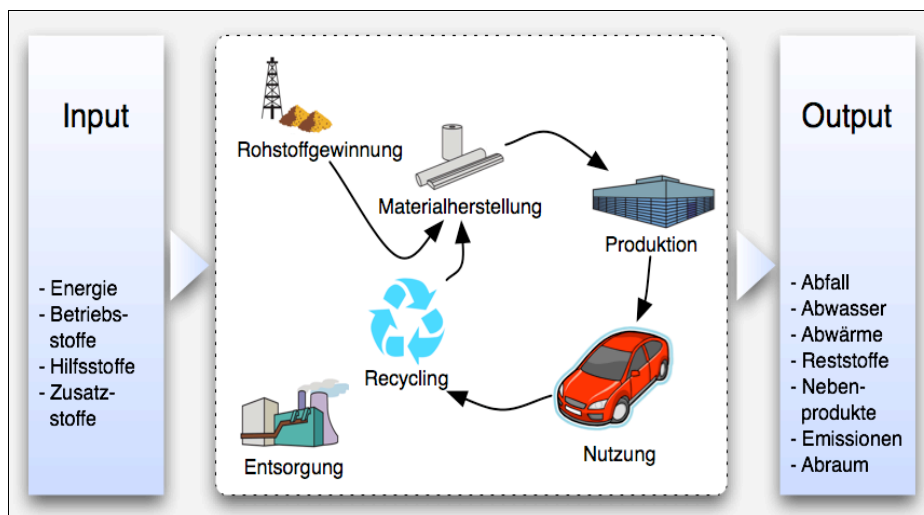


Abbildung 2-1 – Überblick der ganzheitlichen Bilanzierung [modif. nach 121, S.19]

Für die Beurteilung eines oder mehrerer Produkte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt, ist eine ganzheitliche Sicht, welche alle Produktlebensphasen sowie Transformationsvorgänge mit einbezieht, unerlässlich [69, S.55].

Eine solche umfassende Betrachtung ist nötig, da Produkte und Werkstoffe während ihrer gesamten Lebenszeit in Interaktion mit der Umwelt stehen [10, S.8]. Diese Wechselwirkungen beginnen mit der Phase der Rohstoffgewinnung, welche die Gewinnung sowie die Weiterverarbeitung und den Transport der Rohstoffe beinhaltet. Die anschließende Phase umfasst die Produktion des Fahrzeugs in der Automobilfabrik. Darauf hin folgt die Nutzungsphase. Für die Darstellung der gesamten Umweltwirkungen darf die „End-of-Life“ Phase nicht unbeachtet bleiben, welche die Entsorgung bzw. Verwertung des Fahrzeugs umfasst [121, S.23]. Zusammenfassend unterteilt sich der Produktlebenszyklus in folgende Phasen: Design und Konstruktion, Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe, Herstellung des Produktes, Nutzung sowie Recycling und Entsorgung [44, S.12], [39, S.189].

In allen genannten Phasen werden Energie und Ressourcen, der Input, verbraucht und Emissionen sowie Abfälle, der Output, entstehen [86, S.6]. Die Summe dieser Belastungen der Umwelt sind entscheidend für Umweltverträglichkeit eines Produkts, in diesem Fall eines Fahrzeugs [20, S.44], [121, S.19].

### **2.1.2 Ökobilanz- und Sachbilanz-Studien**

Die Ökobilanz-Studie beruht auf der ganzheitlichen Bilanzierung aller wesentlichen Stoff- und Energieflüsse während des gesamten Untersuchungszeitraumes [10, S.9], [69, S.39]. Der Ablauf einer solchen Studie ist in der Norm ISO 14040:2006 festgelegt, wodurch eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse durch einen festgelegten Ablauf gewährleistet ist [22, S.4], [91, S.18]. Sie beinhaltet die Vorgaben für die Beurteilung einzelner bzw. den Vergleich verschiedener Produkte [81, S.1]

Anzumerken ist jedoch, dass die Studie nur aus Sicht des Umweltschutzes bzw. der ökologischen Auswirkungen eines Produkts auf die Umwelt durchgeführt wird. Ökonomische oder auch soziale Auswirkungen bleiben unberücksichtigt, da diese außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen [81, S.2], [22, S.14].

Die Ökobilanz-Studie ist ein statisches Instrument zur Ermittlung von Umweltwirkungen, wobei Input- und Output-Flüsse zu einem festgelegten Zeitpunkt ermittelt und bewertet werden. Daher sind Veränderungen über der Zeit nur eingeschränkt erfassbar [44, S.29].

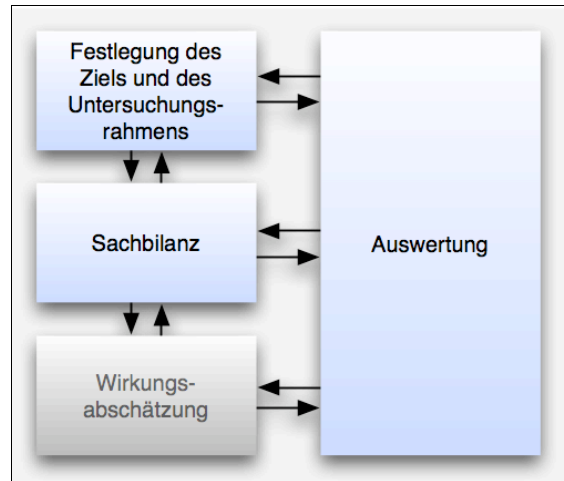
Zur Durchführung einer Ökobilanz-Studie ist eine präzise Zielsetzung mit detailliert festgelegten Rahmenbedingungen erforderlich. Diese beinhalten den Bilanzierungsgegens-

tand sowie die beabsichtigte Anwendung der Studie [10, S.12]. Da die nachfolgenden Analysen und Auswertungen auf eine bestimmte funktionelle Einheit bezogen sind, muss diese zu Beginn der Untersuchung festgelegt werden [22, S.14]. Des Weiteren ist eine eindeutige Bestimmung der Systemgrenzen und die Festlegung der zum System gehörenden Prozesse notwendig [10, S.12]. Nach der Ermittlung aller relevanten Daten kann in Abhängigkeit vom Ziel und Untersuchungsrahmen eine Auswertung erfolgen [22, S.20]. Die Ökobilanz-Studie verfolgt dabei einen iterativen Ansatz, bei dem Ergebnisse einzelner Phasen in anderen, nachfolgenden Verwendung finden [22, S.15]. Aufgrund der Fülle an Informationen, die über den gesamten Lebensweg anfallen, ist es notwendig, sich auf die für die Bilanz relevanten Verfahrensschritte und die wichtigsten Indikatoren für Material- und Rohstoffverbrauch zu beschränken [69, S.40].

Mit der Auswertung der Daten geht die Wirkungsabschätzung einher. Dabei wird den jeweiligen Stoffströmen eine entsprechende Umweltwirkung zugeordnet, um deren Bedeutung beurteilen zu können [22, S.27]. Dadurch besteht die Möglichkeit auch unterschiedliche Stoffe miteinander zu vergleichen, wenn sie einer gemeinsamen Umweltwirkung zugeordnet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Umrechnung aller zum Treibhauseffekt beitragenden Stoffströme in CO<sub>2</sub>-Äquivalente mit Hilfe von Äquivalenzfaktoren [85, S.9]. Weitere Umwelteinflussfaktoren, die in der Wirkungsabschätzung vereinbart werden, sind Bodenversauerung, Eutropierungspotential, Versauerungspotential und Sommersmogpotential [71, S.3], [86, S.7], [85, S.9]. Durch die zusätzliche Bereitstellung von Informationen zur Einschätzung der Untersuchungsergebnisse kann deren Umweltrelevanz festgestellt werden [22, S.5].

Die in der ISO Norm beschriebene Ökobilanz-Studie umfasst somit vier Phasen, von denen eine, die Wirkungsabschätzung, in der folgenden Untersuchung, ab Kapitel 2.2, keine Beachtung findet [86, S.10]. Der Schwerpunkt liegt hierbei vielmehr auf dem Ressourcen- sowie Energieverbrauch.

Jedoch auch ohne die Phase der Wirkungsabschätzung kann dem in der Norm festgelegten Ablauf entsprochen werden. Es handelt sich dann jedoch um eine so genannte Sachbilanz-Studie mit insgesamt drei Phasen: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz und Auswertung [71, S.3]. Die einzelnen Schritte sind nicht an eine strenge sequenzielle Abfolge gebunden, sondern können bei Bedarf den speziellen Bedingungen der jeweiligen Analyse angepasst werden [10, S.11]. Eine grafische Übersicht über die verschiedenen Phasen der Ökobilanz-Studie und deren Interaktion untereinander zeigt die Abbildung 2-2.



**Abbildung 2-2 – Phasen einer Ökobilanz-Studie bzw. Sachbilanz-Studie (ohne Wirkungsabschätzung) [modif. nach 22, S.16]**

Die einzelnen Ablaufschritte der Sachbilanz-Studie werden nachfolgend kurz erläutert.

#### **2.1.2.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen**

In den ersten Schritten der Sachbilanz-Studie werden alle zu beachtenden Merkmale der Bilanzierung festgelegt und erläutert. Dabei wird der Untersuchungsgegenstand beschrieben und das Ziel der Analyse festgelegt [91, S.19]. Damit einher geht die Definition des Zwecks sowie der Zielgruppe der Bilanz, an die sie sich richtet [86, S.6]. Im weiteren Verlauf wird der Untersuchungsrahmen festgelegt. Hierbei wird über die Abgrenzung der Systemgrenzen, der Funktionen des Produktes und der funktionellen Einheit das zu untersuchende System bzw. Produkt eindeutig beschrieben [22, S.23], [86, S.6]. Hinzu kommen Informationen über die geforderte Datenqualität sowie die Dokumentation der Annahmen und Einschränkungen [91, S. 19]. Dabei ist sicherzustellen, dass die Studie in ihrer Tiefe und mit allen Einzelheiten widerspruchsfrei und für das vorgegebene Ziel hinreichend ist [22, S.23].

Die Festlegung der Systemgrenzen ist ein wesentlicher Prozess innerhalb der vorbereitenden Maßnahmen zur Ermittlung der Produktinformationen [69, S.94]. Als Teil der Systemgrenzen wird in den Abschneidekriterien festgelegt, welche Prozessmodule inklusive Vor- und Teilprozesse in der Studie Verwendung finden und welche aufgrund ihrer untergeordneten Bedeutung nicht mit einbezogen werden. Des Weiteren wird darin festgelegt, auf welche räumlichen und zeitlichen Gegebenheiten sich die Analyse bezieht [69, S.94], [22, S.24]. Die Prozesse der Herstellung eines Produktes schließen z.B. die Gewinnung und Weiterverarbeitung der verwendeten Rohstoffe mit ein. Da für die weitere Herstellung sowie für die Nutzung und Verwertung zusätzliche Produkte und Anlagen erforderlich

sind, muss eine Grenze vereinbart werden. Diese legt fest, welche Prozesse dem analysierten Produkt hinzugerechnet werden und welche keine Beachtung finden [71, S.3]. Diese Festlegungen resultieren in einem definierten Produktsystem, das alle für die Analyse wichtigen Lebenswegphasen einbezieht [69, S.95].

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Sachbilanz-Studie ist die Erläuterung der funktionalen Einheit sowie bei vergleichenden Untersuchungen auch der funktionalen Äquivalenz. Die Grundüberlegung ist, dass alle zu untersuchenden Produkte den gleichen Nutzen haben müssen [81, S.2]. Der Vergleich zwischen mehreren unterschiedlichen Produkten ist in diesem Fall nur möglich, wenn alle Vergleichsprodukte einen bestimmten Nutzen oder eine Funktion in analoger Weise erbringen bzw. ausführen können [10, S.12]. Daher werden im Zuge der Festlegung der funktionalen Einheit die Funktionen und der Nutzen der zu untersuchenden Produkte quantifiziert [81, S.3], [22, S.23].

Aufgrund der Fülle an Daten und der teils schwierigen Datenerhebung kann es nötig sein, bestimmte Einschränkungen diesbezüglich innerhalb des Untersuchungsrahmens festzulegen [22, S.26].

Als letzter Schritt ist die Beschreibung der Datenqualität der Studie von entscheidender Bedeutung. Nur dadurch kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse beurteilt sowie die Resultate richtig interpretiert werden [22, S.25].

#### **2.1.2.2 Sachbilanz**

Die Durchführung der Sachbilanz, als Teil der Sachbilanz-Studie, erfolgt auf naturwissenschaftlich-technischer Ebene. Sie beinhaltet die Datenerhebung, also die Bestandsaufnahme aller umweltrelevanter Stoff- und Energieflüsse, sowie die Berechnungsverfahren zur Quantifizierung aller relevanter Stoffströme des betrachteten Produktsystems [91, S.2], [22, S.25], [86, S.6].

Mit Hilfe der Sachbilanz werden alle durch den vorher festgelegten Untersuchungsrahmen als relevant definierten Stoffströme, also die Input- und Output-Flüsse, des Produktsystems über dessen gesamten Lebenszyklus umfassend quantifiziert [10, S.13]. Diese Stoffströme beinhalten eine möglichst realitätsnahe Abbildung aller Herstellungs-, Nutzungs- sowie Entsorgungsprozesse. Die entsprechenden Vorketten der Stoff- und Energiegewinnung finden dabei ebenso Verwendung, wie die über den Lebenszyklus anfallenden Transportprozesse [10, S.12]. Die ermittelten Input-Flüsse beinhalten Rohstoffe und Energieträger, wo hingegen die Output-Flüsse aus dem hergestellten Produkt sowie Emissionen und Abfälle bestehen [86, S.6]. Diese verschiedenen Stoffflüsse werden zur Erstellung der Sachbilanz letztlich aufsummiert. Dieses Ergebnis ist jedoch nur bedingt

aussagekräftig, da sich nur eingeschränkt Schlussfolgerungen über die Umweltwirkungen der einzelnen Stoffe ziehen lassen [86, S.7]. Dies ist Aufgabe der Auswertung.

### **2.1.2.3 Auswertung**

Die abschließende Interpretation der zuvor gesammelten und berechneten Daten wird in der Auswertungsphase durchgeführt. Sie soll ein Ergebnis liefern, das mit dem zuvor festgelegten Ziel sowie dem Untersuchungsrahmen übereinstimmt und somit zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterungen von Einschränkungen sowie dem Aussprechen von Empfehlungen dient [71, S.3], [22, S.31]. Die Auswertung liefert zudem eine leicht verständliche, vollständige und in sich schlüssige Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Sachbilanz-Studie [22, S.32]. Den zuvor ermittelten Ergebnissen der Sachbilanz werden nun einzelne Umweltwirkungen und -effekte zugeordnet, die miteinander verglichen, abgewogen und anschließend zu einem Gesamturteil zusammengefasst werden [91, S.20], [22, S.31]. Dabei geht es um eine Priorisierung der verschiedenen Umweltwirkungen, die jedoch nicht immer auf Basis objektiver Sachverhalte erfolgen kann. Sie hängt in hohem Maße von persönlichen und zum Teil auch subjektiven Werturteilen des Autors über die Relevanz verschiedener Umweltbeeinträchtigungen ab. Dennoch müssen diese Urteile hinreichend begründet sein. Im Allgemeinen gilt, dass je umweltschädlicher eine Wirkungskategorie ist, desto höhere Priorität sollte ihr beigemessen werden [71, S.3], [81, S.5].

Anschließend bietet die Auswertungsphase die Möglichkeit weitere Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu geben. Im Zuge dessen können auch die Ergebnisse unterschiedlicher Sachbilanz-Studien miteinander verglichen und bewertet werden [71, S.3].

## **2.2 Durchführung der Sachbilanz-Studie**

Die folgende Sachbilanz-Studie wird entsprechend des soeben erläuterten Schemas auf Grundlage der ganzheitlichen Bilanzierung durchgeführt. Der ökologische Produktlebenszyklus beginnt mit der Phase der Rohstoffgewinnung sowie deren Verarbeitung, geht dann über die Herstellung und Nutzung bis zur Verwertung des Fahrzeugs [91, S.18]. Dabei entzieht sich die Nutzungsphase weitestgehend dem Einflussbereich der Automobilhersteller [39, S.194]. Durch die Verknüpfung dieser einzelnen Phasen kann die Umweltbelastung, die ein Fahrzeug über seinen gesamten Lebenszyklus erzeugt, ermittelt werden [68, S.8]. Somit sind Vergleiche zwischen verschiedenen Fahrzeugen hinsichtlich ihrer gesamten Umweltwirkungen möglich. Die Erhebung der für die Untersuchung relevanten Daten wird entsprechend dem in Abbildung 2-1 dargestellten Ablauf durchgeführt.

Zu Beginn einer jeden wirtschaftlichen Leistungserstellung steht die Gewinnung und Nutzung verwertbarer Rohstoffe in Kombination mit Energie-, Wasser- und Flächeninanspruchnahmen. Zudem wird die Umwelt durch Treibhausgase, Luftschadstoffe, Abwässer und Restabfälle belastet [6, S.149].

### **Herstellungsphase inkl. Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung**

Die für die Herstellung von Fahrzeugen benötigten verschiedenen Rohstoffe, sowie der Energieverbrauch bei deren Gewinnung und Weiterverarbeitung, werden aus der Fahrzeugzusammensetzung ermittelt. Die in der Phase der Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung gewonnenen Werkstoffe gehen über in die eigentliche Fahrzeugherstellung. Die Produktion bzw. Montage erfolgt unter weiterem Energieeinsatz, wobei der überwiegende Energieaufwand aus der Produktion der Werkstoffe stammt [71, S.1]. Im Verlauf des Produktionsprozesses entstehen neben dem Verbrauch von natürlichen Ressourcen wie Energie oder Wasser auch Schadstoffemissionen, z.B. in Gießereien, Kunststofffertigungen oder auch Lackier- und Beschichtungsanlagen [39, S.192]. Zusammenfassend können während der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie der Fahrzeugproduktion folgende wesentliche Umweltwirkungen unterschieden werden: die Nutzung natürlicher Ressourcen sowie Energie, die anfallenden Transportprozesse der Rohstoffe, Zwischenprodukte und des fertigen Automobils sowie die entstandenen Abfallprodukte [39, S.193].

### **Nutzungsphase**

Die nächste Phase im Produktlebenszyklus wird als Nutzungsphase bezeichnet. Sie ist vom Gebrauch des Fahrzeugs durch den Fahrer geprägt. Bezogen auf den gesamten Produktlebenszyklus entsteht zu dieser Zeit der größte Anteil an den Gesamtumweltauswirkungen des Automobils. Sie umfassen beispielsweise die durch den Verbrennungsprozess im Motor ausgestoßene Menge an Schadstoffen und die damit einhergehende Luftverschmutzung [10 S.252], [39, S.193]. Die in der Nutzungsphase dominierenden Abgasemissionen werden über die Fahrleistung, die Kraftstoffzusammensetzung, den Kraftstoffverbrauch sowie die spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie den Energieverbrauch ist allein der Kraftstoffverbrauch maßgebend [71, S.31]. Bezogen auf diesen Verbrauch werden alle relevanten und vorgelagerten Prozesse von der Rohstoffförderung über die Kraftstoffbereitstellung bis zum direkten Fahrbetrieb erfasst [86, S.11]. Wenn es die entsprechende Bilanz erfordert, gehen auch die während der Nutzung des Fahrzeugs benötigten Verschleiß- und Instandhaltungsproduk-

te, z.B. Reifen, Betriebsflüssigkeiten etc. mit ihrem Herstellungsaufwand und Schadstoffemissionen in die Bilanz mit ein [10 S.252], [71, S.23].

### **Verwertungsphase**

Die letzte Phase, auch „End-of-Life“-Phase genannt, umfasst die Verwertung bzw. das Recycling des Fahrzeugs. Das Ziel des Recyclings ist es durch Rückführung und Rückgewinnung von Stoffen Abfälle zu vermeiden bzw. zu verringern sowie natürliche Ressourcen zu schonen [44, S.3]. Mit Hilfe der stofflichen Verwertung der Altprodukte zu Sekundärrohstoffen sollen möglichst viele Primärrohstoffe eingespart werden [3, S.56]. Ein Altprodukt ist in diesem Zusammenhang ein Gebrauchsprodukt nach beendeter Nutzungsphase. Dieses behält im Gegensatz zu einem Verbrauchsprodukt seine Gestalt und Form über den gesamten Nutzungszeitraum bei [44, S.3]. Das nach dem Ende der Nutzungsphase anfallende Altprodukt ist durch ein meist heterogenes Stoffgemisch gekennzeichnet [44, S.11]. Seine Entstehung hat unterschiedliche Ursachen, z.B.: Verschleiß, Beschädigung, zu hohe Betriebskosten, Modell- bzw. Innovationszyklen sowie Leistungsverlust [44, S.14]. Neben der stofflichen Verwertung wird auch ein Produktrecycling durchgeführt, dabei bleibt die Gestalt des Recyclingobjektes erhalten. Als Beispiel hierfür, sind aufgearbeitete Bauteile wie Motoren oder Fahrwerksteile zu nennen [10, S.108], [44, S.14]. Für die Durchführung und die Ergebnisse der Sachbilanz-Studie ist es entscheidend, ob die Verwertungsphase, z.B. in Form von Gutschriften für den Einsatz von Sekundär- anstatt von Primärrohstoffen, in die Bilanzierung mit eingeht.

#### **2.2.1 Ziel der Untersuchung**

Das Ziel der anschließenden Sachbilanz-Studie ist der Vergleich zweier unterschiedlicher Halteoptionen von Personenkraftwagen. Die hierfür ausgewählten Mittelklassefahrzeuge verfügen über vergleichbare Nutzungseigenschaften. Sie sind für den Transport von 5 Personen mit Gepäck ausgelegt, haben mindestens 4 Türen sowie verfügen jeweils über einen Ottomotor mit ähnlichen Leistungsdaten.

Die Wahl der Fahrzeuge wurde von der Verfügbarkeit technischer Daten sowie Materialzusammensetzungen eingeschränkt. Bei der ersten Halteoption wird im Jahre 1972 eine Citroën DS 21 gekauft und über einen Zeitraum von 36 Jahren bis ins Jahr 2007 gehalten. Im Laufe des Untersuchungszeitraumes werden das Fahrzeug und seine Komponenten zweimal aufgearbeitet.

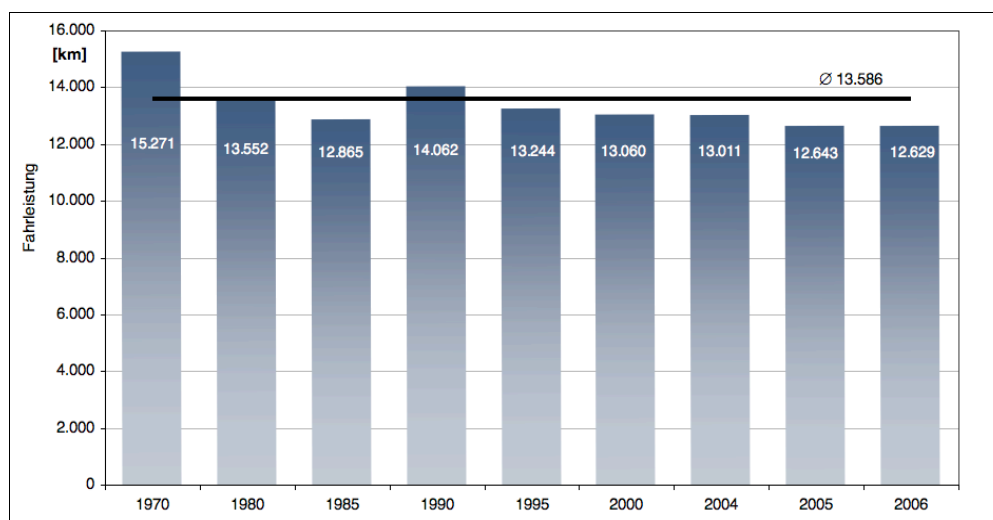
Die zweite Option orientiert sich am heutigen durchschnittlichen Fahrzeugalter in Deutschland, d.h. der Zeitraum bis das Fahrzeug aus dem Zentralregister des KBA (Kraftfahrt-Bundesamtes) gelöscht wird. Dieser Zeitraum beträgt heute, im Jahr 2008, 12

Jahre [40, S.4f]. Auch hier gelten die gleichen Startbedingungen, d.h. ein bestimmtes Fahrzeug, wie auch bei der ersten Option eine Citroën DS 21, wird im Jahre 1972 gekauft. Dieser Wagen wird jedoch nach einem Zeitraum von 12 Jahren durch einen Fabrikneuen ersetzt. Der zweite Fahrzeugtyp, ein Citroën CX 20, wird demzufolge im Jahre 1984 angeschafft. Auch dieser wird wiederum 12 Jahre gehalten und im Jahre 1996 durch einen Ford Mondeo 1.8i ersetzt, welcher ebenfalls 12 Jahre bis 2007 gehalten wird. Abbildung 2-3 zeigt noch einmal eine grafische Übersicht über die unterschiedlichen Fahrzeugtypen und die entsprechenden Haltedauern der zwei Optionen.

	1972	1973 - 1983	1984	1985 - 1995	1996	1997 - 2007
Option 1	Citraën DS 21					
Option 2	Citraën DS 21		Citraën CX 20			Ford Mondeo 1.8i

**Abbildung 2-3 – Haltedauer der verschiedenen Fahrzeuge [eigene Darstellung]**

Die jährlichen Kilometerfahrleistungen entsprechen dem durch die BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) ermittelten Durchschnittswert [12]. In Abbildung 2-4 ist die Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen Kilometerfahrleistung in Deutschland bezogen auf den Untersuchungszeitraum von 1972 bis 2008 dargestellt. Der aus den bekannten Jahresfahrleistungen gebildete Mittelwert wird für die Fahrzeuge beider Optionen gewählt. Die Zahlen der Jahre, welche in der Statistik nicht vorlagen, werden aus den vorhandenen Daten interpoliert. Der Durchschnittswert des Untersuchungszeitraums beträgt 13.586 km im Jahr.



**Abbildung 2-4 – Jahresfahrleistung Pkw in Deutschland [eigene Darstellung nach 12]**

Die beiden Halteoptionen werden hinsichtlich ihrer jeweiligen Umweltbelastungen verglichen. Diese beinhalten die Summe des Rohstoffaufwands, des Energieverbrauchs sowie des Schadstoffausstoßes. Dazu wird für beide Optionen eine vergleichende Sachbilanz-Studie über den gesamten Produktlebenszyklus der ausgewählten Fahrzeuge durchgeführt. Bei der zweiten Option werden notwendigerweise die Umweltauswirkungen der drei unterschiedlichen Fahrzeuge addiert, um die Gesamtbelastung über den Untersuchungszeitraum bestimmen zu können. Dadurch kann nachgewiesen werden, welche der beiden Halteoptionen zu geringeren Umweltbelastungen über den gewählten Zeitraum von 36 Jahren führt.

### **2.2.2 Funktion und funktionelle Einheit der untersuchten Fahrzeuge**

Bei einer vergleichenden Sachbilanz-Studie werden Produkte mit demselben Zweck bzw. derselben Funktion hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen gegenüber gestellt [81, S.1]. Hierbei ist auf die so genannte funktionale Äquivalenz zu achten, das bedeutet die Produkte müssen hinsichtlich ihrer Eigenschaften vergleichbar sein. Dabei sind die Funktionen und die funktionelle Einheit der Vergleichsobjekte zu Beginn festzulegen und ihre Einhaltung zu belegen.

Als funktionelle Einheit, die alle Vergleichsobjekte der Bilanzierung gemeinsam haben, ist ein, mit einem Otto-Motor und manuellem Getriebe zur Kraftübertragung ausgestattetes, Fahrzeug mit mindestens vier Türen und fünf Sitzplätzen innerhalb des Mittelklassesegments definiert.

Die Gesamtfahrleistung der jeweiligen Fahrzeuge ergibt sich aus der zuvor festgelegten Haltedauer sowie Jahresfahrleistung, vgl. Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4.

Jedes Fahrzeug verfügt über die ab Werk gelieferte Grundausstattung sowie vergleichbare Gebrauchseigenschaften. Die Tabelle 2-1 zeigt eine Zusammenfassung der technischen Daten der Fahrzeuge. Eine ausführliche Tabelle, welche auch die Sicherheitsmerkmale, die Serienausstattung sowie weitere Informationen zu den technischen Besonderheiten der jeweiligen Fahrzeuge darstellt, ist dem Anhang 7.1 zu entnehmen.

**Tabelle 2-1 – technische Daten der Fahrzeuge [eigene Darstellung nach 57, 59, 76, 49, 50, 79, 37, 17, 18]**

	<b>Citroën DS 21</b>	<b>Citroën CX 20</b>	<b>Ford Mondeo 1.8i</b>
<b>Karosserieversion</b>	Limousine, 4-türig	Limousine, 4-türig	Limousine, 4-türig
<b>Antriebsart</b>	Frontantrieb	Frontantrieb	Frontantrieb
<b>Länge</b>	4874 mm	4659 mm	4556 mm
<b>Breite</b>	1803 mm	1760 mm	1751 mm
<b>Höhe</b>	1470 mm	1360 mm	1424 mm
<b>DIN Leergewicht</b>	1320 kg	1385 kg	1322 kg
<b>zul. Gesamtgewicht</b>	1800 kg	1885 kg	1780 kg
<b>Hubraum</b>	2175 cm <sup>3</sup>	1995 cm <sup>3</sup>	1796 cm <sup>3</sup>
<b>Zylinder</b>	4	4	4
<b>Kraftstoffart</b>	Benzin	Benzin	Benzin
<b>Nennleistung</b>	76 KW / 5.500 min <sup>-1</sup>	78 KW / 5500 min <sup>-1</sup>	85 KW / 5500 min <sup>-1</sup>
<b>Drehmoment</b>	170 Nm / 3500 min <sup>-1</sup>	159 Nm / 3250 min <sup>-1</sup>	158 Nm / 3750 min <sup>-1</sup>
<b>Getriebe</b>	5-Gang manuell	5-Gang manuell	5-Gang manuell
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>	175 km/h	176 km/h	195 km/h

### 2.2.3 Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen orientiert sich eng am Produktlebenszyklus des Automobils. Keine Beachtung finden Prozesse, die nicht direkt mit den einzelnen Phasen in Verbindung stehen, wie z.B. die Erbauung der notwendigen Fabriken sowie der dazugehörigen Infrastruktur oder auch der Aufwand für Forschung und Entwicklung [71, S.1].

Aufgrund des Umfangs und der hohen Komplexität der zu erfassenden Daten und der damit zusammenhängenden Prozessbäume ist die Entwicklung eines geeigneten Modells unabdingbar [10, S.9f]. Modelle sind in diesem Fall eine Abbildung der Realität, deren Ziel es ist, trotz der notwendigen Vereinfachungen die Inhalte und Verbindungen der realen Sachverhalte möglichst vollständig darzustellen [10, S.10]. Die Stärke der Vereinfachungen, der Abstrahierungsgrad, steht dabei in einem reziproken Verhältnis zum Modellierungsaufwand. Je niedriger der Abstrahierungsgrad, also je mehr Informationen verarbeitet werden, desto aufwändiger gestaltet sich die Darstellung der realen Gegebenheiten. Der durch die große Informationstiefe stark steigende Erstellungsaufwand einer Sachbilanz-Studie sollte durch einen Mehrnutzen gerechtfertigt sein [44, S.30], wodurch die Balance zwischen Aufwand und Nutzen gewahrt bleibt. Daher ist der Untersuchungsrahmen der Sachbilanz-Studie in dieser Arbeit so gesteckt, dass nur die direkten

Prozesse in der Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase des Fahrzeugs modelliert werden.

### **Herstellungsphase inkl. Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung**

Die Modellierung der Herstellungsphase umfasst dabei die Prozesse für die Rohstoffgewinnung, deren Weiterverarbeitung zu Werkstoffen und Halbzeugen sowie die Fertigung des Fahrzeugs mit all seinen Komponenten in der Automobilfabrik.

### **Nutzungsphase**

In der Nutzungsphase werden alle den direkten Fahrbetrieb betreffenden Prozesse, wie Kraftstoffbereitstellung und Distribution, modelliert. Um auch einen Einblick in den Wartungsaufwand zu geben, werden auch diese Daten gesammelt, jedoch gehen sie in die Bilanz nicht mit ein. Frühere Ökobilanzen der Volkswagen AG, wie z.B. „Sachbilanz des Golf A4“, haben gezeigt, dass davon keine wesentlichen Umweltbelastungen ausgehen [86, S.11].

### **Verwertungsphase**

Die Modellierung der Verwertungsphase umfasst die heute gesetzlich im Abfallgesetz (AbfG) vorgeschriebenen Abläufe der Altfahrzeugverwertung [91, S.3]. Für die aus den Verwertungsprozessen gewonnenen Sekundärrohstoffe werden in der Sachbilanz-Studie keine Gutschriften erteilt. Auch der Energieaufwand und die Emissionen der Verwertung werden nicht bilanziert, da deren Einfluss auf die Gesamtumweltwirkungen vernachlässigbar gering ist [86, S.31].

Durch die immer weiter steigenden Rohstoffpreise und der zunehmend schwierigeren Rohstoffgewinnung wird dem Recycling ein immer größerer Stellenwert als Beitrag zur Primärressourcenschonung beigemessen [64, S.1]. Dennoch wird in dieser Studie vom „worst-case“, dem ungünstigsten anzunehmenden Fall, ausgegangen. Dabei werden, wie schon erwähnt, keine Gutschriften erteilt.

Abbildung 2-5 stellt zusammenfassend die zuvor genannten Punkte des Untersuchungsrahmes der Sachbilanz-Analyse grafisch dar. Die eingerahmten Themen werden im Zuge der durchzuführenden Sachbilanz-Studie näher betrachtet.

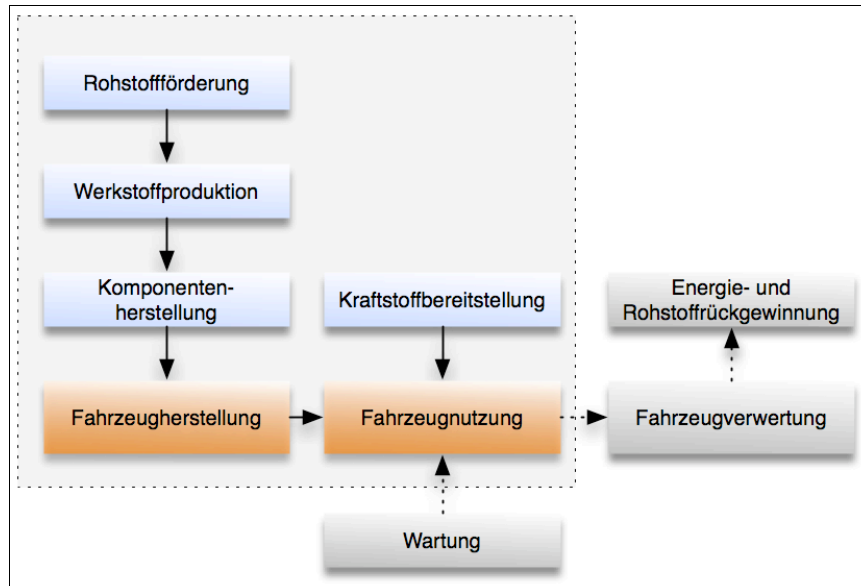


Abbildung 2-5 – Untersuchungsrahmen der Sachbilanz-Studie [modif. nach 86, S.12]

#### 2.2.4 Datengrundlage und Datenqualität

Die Datenrecherche und -verifikation hinsichtlich der mit der Herstellung der Fahrzeuge zusammenhängenden Stoffströme gestaltet sich schwierig. Erst Mitte der 1990er Jahre begannen einzelne Automobilfirmen, allen voran Volkswagen [71], mit der Öko- und Sachbilanzierung einzelner Fahrzeugtypen. Im Zuge dieser Veröffentlichungen wurden auch genauere Informationen zu den Materialzusammensetzungen und den Produktionsprozessen verfügbar. Zu dieser Zeit erschien auch die erste offizielle Norm, die ISO 14040: 1997-08, die den genauen Ablauf einer solchen Sachbilanz-Studie festlegt.

##### Herstellungsphase inkl. Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung

Die Produktion des ersten zu untersuchenden Fahrzeugs, der Citroën DS 21, fand im Jahre 1972 statt. Das zweite Fahrzeug, der Citroën CX 20, wurde 1984 produziert und liegt damit ebenfalls vor der Zeit der ersten publizierten Sachbilanz-Studien. Daher sind keine Materialzusammensetzungen für diese Fahrzeugtypen verfügbar. Die Fahrzeugzusammensetzungen, welche auch Bestandteil der ersten von Volkswagen veröffentlichten Studien waren [71], [83, S.17], bilden die Grundlage zur Ermittlung des Energie- und Rohstoffaufwands für die Herstellung des jeweiligen Fahrzeugs.

Mit Hilfe von Fachdatenbanken, z.B. GEMIS [60] und PROBAS [82], sowie speziellen Programmen zur Modellierung von Stoffströmen, z.B. GaBi [62], kann für die einzelnen angegebenen Bestandteile der jeweilige **Rohstoff- sowie Energieaufwand für deren Gewinnung und Weiterverarbeitung** ermittelt werden [71, S.19].

Die aus den Fachdatenbanken entnommenen Werte beziehen sich dabei auf das Jahr 2000. Rückwirkend betrachtet kam es jedoch im Laufe des Untersuchungszeitraums von 36 Jahren zu großen Veränderungen bei der Energieherstellung [14], d.h. die Verteilung des Brennstoffeinsatzes hat sich stark gewandelt. Dabei hat sich der Einsatz von Braun- und Steinkohle verringert, wo hingegen der Anteil von Erdgas sowie erneuerbaren Energien zugenommen hat. Zusätzlich wurden in dem Zeitraum die Techniken zur Schadstoffreduktion erheblich weiterentwickelt. Detaillierte Informationen diesbezüglich finden sich jedoch nur über den Zeitraum der letzten 18 Jahre, von 1990 bis 2008 [14]. Aufgrund dessen wird der Energieverbrauch sowie der Schadstoffausstoß mit einer zuvor ermittelten rückwirkenden Steigerung von 1,8 Prozent pro Jahr multipliziert, welcher sich an der in Abbildung 2-6 dargestellten Entwicklung des Energieverbrauchs der Automobilwerke im Zeitraum von 1996 bis 2006 orientiert. Der Energieverbrauch wird in diesem Zusammenhang nur in der Einheit MWh angegeben. Eine Aufteilung auf die entsprechenden Brennstoffe ist aufgrund der unvollständigen Informationen nicht möglich.

Die Daten zur Materialzusammensetzung der einzelnen Fahrzeuge sind entweder nicht öffentlich zugänglich, wie beim Ford Mondeo, oder sie wurden zur damaligen Zeit beim Citroën DS (1972) und Citroën CX (1984) nicht erhoben bzw. sind nicht mehr verfügbar. Aus diesem Grund kann die jeweilige Materialzusammensetzung nicht aus der entsprechenden Fahrzeugstückliste entnommen werden, sondern muss über andere Wege ermittelt werden [71, S.9].

Bei der Citroën DS wurden zur Ermittlung der Fahrzeugzusammensetzung einzelne größere Elemente, wie z.B. Motorblock, Rohkarosserie, Motor- und Kofferraumhaube, Türen, Räder, Reifen, Teile der Innenausstattung usw. selbst gewogen und deren Werkstoff festgestellt. Die Daten anderer Teile, wie z.B. Anbauteile des Motors, Verkleidungen, Dämmmaterialien oder auch der Lackierung geben Erfahrungswerte wieder. Diese basieren auf den Angaben der, auf die Reparatur und Restaurierung solcher Fahrzeuge spezialisierten, Fachbetriebe „Atelier Automobile“ im Meilenwerk Berlin [2], sowie „Dirk Sassen“ in Düsseldorf [23]. Die so ermittelten Werte wurden mit den Durchschnittswerten der entsprechenden Fahrzeugklasse im Jahre 1972 verglichen und kleinere Anpassungen durchgeführt [44, S.A-10].

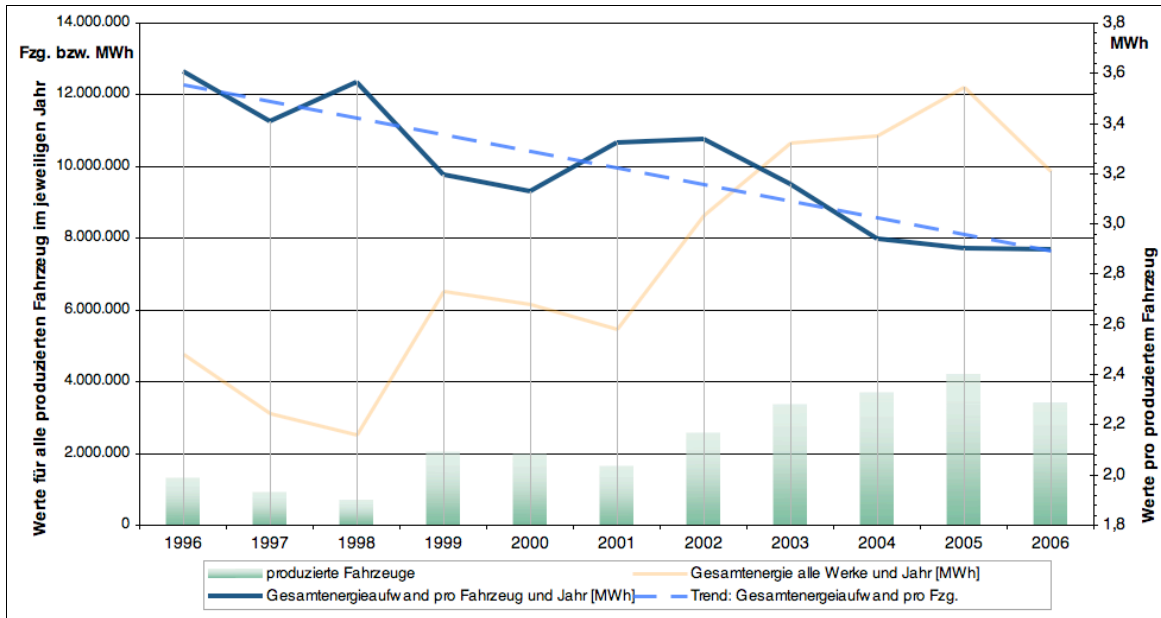
Beim Citroën CX werden bekannte Veränderungen zur Citroën DS in der Fahrzeugzusammensetzung berücksichtigt. Hierbei sind Einsatz eines Stahldaches sowie einer aus Stahl gefertigten Motor- und Kofferraumhaube zu nennen, welche bei der Citroën DS aus Kunststoff bzw. Aluminium gefertigt sind. Diese bekannten Veränderungen werden eben-

falls mit den Durchschnittswerten der Fahrzeugzusammensetzungen des Mittelklasse-segmentes des Jahres 1984 abgeglichen.

Bei dem Abgleich mit den durchschnittlichen Fahrzeugzusammensetzungen ist die Beachtung des Segmentes von großer Bedeutung, da die werkstoffliche Zusammensetzung von der gewählten Fahrzeugklasse abhängig ist [44, S.38]. Durch die Kombination von gemessenen und Durchschnittswerten ist eine hohe Genauigkeit erreichbar. Je präziser die Daten der Werkstoffzusammensetzung, desto aussagekräftiger sind die im weiteren Verlauf daraus zu ermittelnden Werte. Die Zusammensetzung des Ford Mondeo konnte zum Teil der Fachliteratur entnommen werden [61, S.89]. Die dort vermerkten Werte für das Turbo Diesel Modell werden mit Hilfe von Experteninformationen auf das ausgewählte Modell angepasst. Die Darstellung der ermittelten Werkstoffzusammensetzungen erfolgt gemäß der VDA Norm 231-106 [83, S.18].

Detaillierte Daten hinsichtlich des **Energieverbrauchs bei der Produktion**, bezogen auf einzelne Fahrzeuge, sind ebenfalls erst im Zuge der Sachbilanz-Studien veröffentlicht worden [71, S.27]. Es ist daher unumgänglich auf Basis der bekannten Daten eine rückwirkende Extrapolation durchzuführen. Grundlage für die Extrapolation bilden Veröffentlichungen der Hersteller Volkswagen, Mercedes Benz, BMW, Audi und Magna Steyr [93 – 140]. Die Publikation enthalten Informationen bezüglich der produzierten Fahrzeuge sowie des Gesamtenergieverbrauchs für die Jahre 1996 bis 2006.

In Abbildung 2-6 sind die mit Hilfe der Publikationen ermittelten Ergebnisse abgebildet. Darin sind die Anzahl der produzierten Fahrzeuge (grüne Balken) sowie der Gesamtenergieverbrauch für alle betrachteten Automobilwerke (orange Linie) dargestellt. Aus diesen Daten kann der Energieverbrauch pro produziertem Fahrzeug (blaue Linie) berechnet werden. Auf Grundlage dieser Werte lässt sich wiederum der fehlende Energieverbrauch pro Fahrzeug für die Jahre 1984 und 1972 extrapolieren. In diesem Fall gibt die Trendlinie (blau gestrichelte Linie) einen Ausblick auf die vorangegangene Entwicklung. Die Berechnungen ergeben eine durchschnittliche rückwirkende Steigerung des Energieverbrauchs um 65 KWh pro Jahr. Das bedeutet, dass der Verbrauch, rückwirkend gesehen, um 0,78 MWh über die durchschnittliche Haltedauer von 12 Jahren abgenommen hat. Die Trendlinie wurde in diesem Fall mit einer linearen Funktion errechnet, auch wenn anzunehmen ist, dass die Einsparungen in Zukunft nicht in dem dargestellten Maße weitergehen. Die jährliche Abnahme wird in Zukunft geringer, so dass sich die Trendlinie abflacht und somit eine logarithmische Form annimmt. Dem Anhang 7.2 ist eine grafische Übersicht der Extrapolation der Verbrauchsdaten zu entnehmen.



**Abbildung 2-6 – Übersicht Energieverbrauch bei Fahrzeugproduktion im Zeitraum 1996 bis 2006 [eigene Darstellung nach 93 – 140]**

### Nutzungsphase

Die Datenerhebung im Zuge der Nutzungsphase fällt im Gegensatz zur eben erläuterten Rohstoffgewinnungs- sowie Produktionsphase erheblich leichter [71, S.12]. Die Informationen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs, des Schadstoffausstoßes sowie des Wartungsaufwandes sind frei verfügbar. Die Basis für den Kraftstoffverbrauch der untersuchten Fahrzeuge bilden bei dieser Sachbilanz-Studie die durch die Zeitschrift „Auto Motor und Sport“ (AMS) gemessenen Werte [19], welche nicht mit dem im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelten Verbrauch gleichzusetzen sind. Die Verbrauchsangaben der AMS wurden durch Tests der jeweiligen Fahrzeuge ermittelt und basieren auf einem mit dem realen Einsatz vergleichbaren Testverfahren.

Die Verbrauchsmessung entsprechend des NEFZ ist in der Richtlinie 93/116/EWG beschrieben und für das Typengenehmigungsverfahren für Pkw bindend [77, S.3]. Dieser, unter Laborbedingungen mit einem festgelegten Prüfablauf ermittelte, Wert wird jedoch von vielen Institutionen, wie z.B. dem ADAC, als wirklichkeitsfern angesehen und ist unter realen Einsatzbedingungen nur schwer bis gar nicht zu erreichen [71, S.23], [5]. Zudem bleibt beim diesem Testverfahren der Einfluss von Zusatzaggregaten, wie z.B. Klimaanlage, welche zu einem höheren Verbrauch führen können, unberücksichtigt [77, S.3]. Im Allgemeinen wird angenommen, dass der reale Verbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 15% bis 20% über den im NEFZ ermittelten Werten liegen [77, S.3].

Auf Basis des realitätsnahen Kraftstoffverbrauchs werden sowohl der daraus resultierende Energieverbrauch als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugs berechnet [86, S.16]. Die genaue Berechnung des Energieverbrauchs anhand des Energiegehalts des Kraftstoffs wird im Anhang 7.6 erläutert.

Basis für die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bildet eine Excel Tabelle [31] des Infozentrums UmweltWirtschaft (IZU) am Bayerischen Landesamt für Umwelt. Diese bietet die Möglichkeit, durch Eingabe der verbrauchten Kraftstoffmenge in Liter, die daraus resultierende Gesamtmenge an CO<sub>2</sub> in Kilogramm zu errechnen. Die Tabelle beruht sowohl auf Informationen aus der GEMIS Datenbank [60] als auch auf verschiedenen veröffentlichten Publikationen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [7].

Die GEMIS Datenbank (Globales Emissions-Modell Integrierter System) bietet Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten für Lebenszyklen von Energie-, Stoff und Transportprozessen sowie beliebiger Kombinationen davon [60].

Die, mit Hilfe dieser bereitgestellten Excel Tabelle, errechneten CO<sub>2</sub>-Werte beinhalten nicht nur die direkten Emissionen durch den Verbrennungsprozess im Motor, sondern auch die indirekten Emissionen durch Gewinnung und Bereitstellung des Kraftstoffes. Der für alle Fahrzeugtypen verwendete Kraftstoff ist hierbei Benzin. Die direkten und indirekten Emissionen werden zusammengefasst als so genannter Emissionsfaktor, welcher mit der Menge an Kraftstoff multipliziert wird, wodurch die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub> inklusive der Vorkette errechnet werden kann. Die ermittelte Menge an CO<sub>2</sub> zeigt somit einen wirklichkeitsnahen Wert basierend auf einem real gemessenen Kraftstoffverbrauch inkl. der vorgelagerten Prozesse. Die hiermit ermittelten Werte liegen deutlich über den durch die Automobilhersteller veröffentlichten Angaben, da diese zum einen nur auf dem NEFZ Verbrauch beruhen und zum anderen die Vorkette der Kraftstoffbereitstellung unbeachtet bleibt.

Die Berechnung der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase auf Basis des Kraftstoffverbrauchs wird noch einmal zusammenfassend im Anhang 7.7 erläutert.

Sonstige Emissionen, wie z.B. CO (Kohlenstoffmonoxid) und NO<sub>x</sub> (Stickoxide), treten im Vergleich zu CO<sub>2</sub> in nur sehr geringen Mengen auf [71, S.28]. Zudem wird in der derzeitigen Diskussion hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ein Hauptaugenmerk auf den Ausstoß von CO<sub>2</sub> gelegt. Aufgrund dessen gehen die sonstigen Luftemissionen nicht in die Bilanzierung ein, bleiben jedoch nicht unerwähnt und werden ermittelt.

Informationen zum Aufwand der zwei Aufarbeitungen des über den gesamten Zeitraum gehaltenen Fahrzeugs der ersten Halteoption werden durch Expertenaussagen, die auf

solche Arbeiten spezialisierten Fachbetriebe „Atelier Automobile“ im Meilenwerk Berlin [2], sowie „Dirk Sassen“ in Düsseldorf [23], ermittelt.

### **Verwertungsphase**

Die in der anschließenden Verwertungsphase gewonnenen Sekundärrohstoffe gehen nicht in die Bilanz in Form von Gutschriften ein. Der Recyclingprozess hat sich über den Untersuchungszeitraum hinweg stark verändert, so dass kein allgemein gültiger Durchschnittswert gefunden werden kann. Aus diesem Grund bleiben im Rahmen der Sachbilanz-Studie auch eventuelle Gutschriften, die sich für die Gesamtumweltbelastung des jeweiligen Fahrzeugs positiv auswirken, unberücksichtigt [86, S.12]. Der Energieaufwand für die Zerlegung des Fahrzeugs inkl. shreddern ist im Vergleich zur Herstellungs- und Nutzungsphase verschwindend gering, weshalb dieser ebenfalls in der Studie unberücksichtigt bleibt [91, S.192], [71, S.27]. Dennoch ist der Einsatz weiterer hier nicht bilanzierter Ressourcen und Energien notwendig, um z.B. den durch die Zerlegung des Fahrzeugs gewonnenen Metallschrott oder auch die sortenrein getrennten Kunststoffe einzuschmelzen und somit Sekundärrohstoffe zu gewinnen [91, S.193].

### **Zusammenfassung**

Zusammenfassend lassen sich die verwendeten Daten in zwei Gruppen einteilen, die Produkt- sowie die Prozessdaten [86, S.14], [85, S.16]. Die Produktdaten beschreiben das Fahrzeug an sich und umfassen u.a. Angaben zur Materialzusammensetzung, Kraftstoffverbrauch und den damit verbundenen Emissionen sowie Angaben zu den Recyclingmengen. Die entsprechenden Daten werden mit Hilfe des Automobilherstellers bzw. durch eigene Untersuchungen erhoben und bilden die Basis für die Prozessdaten. Diese beinhalten die einzelnen Herstellungs- sowie Verarbeitungsprozesse mit den Unterpunkten Strombereitstellung, Werkstoff- und Halbzeugherstellung der Fahrzeugfertigung sowie Kraftstoffbereitstellung. Bei der Ermittlung der Werte finden die zuvor erwähnten Fachdatenbanken sowie Spezialprogramme ihre Anwendung.

Für die hier erläuterten Phasen des ökologischen Produktlebenszyklus gilt, dass für alle untersuchten Fahrzeuge stets die gleichen Abläufe der Energieherstellung und Werkstoffverarbeitung gewählt werden [86, S.14], [85, S.16]. Die Diskrepanz zwischen den einzelnen Fahrzeugen beruht lediglich auf den unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen, Herstellungsprozessen sowie Fahremissionen. Veränderungen über den Untersuchungszeitraum von 36 Jahren in der Rohstoff- sowie Zulieferindustrie werden nicht berücksichtigt [86, S.14].

### 2.2.5 Modellannahmen und Festlegungen der Umweltbilanz

In der folgenden Tabelle 2-2 sind alle im Rahmen der Sachbilanz-Studie festgelegten Bedingungen und Annahmen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 2-2 – Annahmen und Festlegungen der Sachbilanz-Studie [eigene Darstellung nach 86, S.17f]**

<b>Ziel der Sachbilanz-Studie</b>
Vergleich der Gesamtumweltwirkungen zweier Halteoptionen über einen Untersuchungszeitraum von 36 Jahren
<b>Untersuchungsrahmen</b>
Funktion der Systeme
Transport von bis zu fünf Personen
Funktionelle Einheit
PKW mit mindestens 4 Türen und 5 Sitzplätzen im Mittelklassesegment mit realitätsnahem Kraftstoffverbrauch und einer Jahresfahrleistung von 13.586 km
Vergleichbarkeit
vergleichbare Motoreigenschaften und Fahrleistungen Fahrzeuge in der Basisausstattung
Systemgrenzen
schließen den gesamten Produktlebenszyklus der Fahrzeuge ein
Abschneidekriterien
Wartung nicht Teil der Bilanzierung keine Gutschriften für durch Recycling gewonnene Sekundärrohstoffe keine Bilanzierung des Energieaufwands der Verwertung
<b>Datengrundlage</b>
technische Datenblätter der Fahrzeughersteller eigene Untersuchungen und Gewichtsmessungen Experteninformationen Verbrauchsangaben der Zeitschrift „Auto Motor und Sport“ Fachdatenbanken zur Ermittlung der Stoffströme
<b>Bilanzergebnisse</b>
Werkstoffzusammensetzung gemäß VDA Norm 231-106 Sachbilanzergebnisse umfassen CO <sub>2</sub> -, CO- und NO <sub>x</sub> -Emissionen, Energie- sowie Ressourcenaufwand
<b>Auswertung</b>
Bewertung von Sachbilanzergebnissen unterteilt in Lebenszyklusphasen und Prozesse Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse der zwei Halteoptionen

## 2.3 Ergebnisse der Sachbilanz-Studie

Dieser Abschnitt beinhaltet die Ergebnisse der durchgeführten Sachbilanz-Studie, welche analog zu den in Kapitel 2.2 erläuterten Lebenszyklusphasen beschrieben werden. Im Zuge der Herstellungsphase werden die Materialzusammensetzungen der einzelnen Fahrzeuge präsentiert. Diese bilden die Grundlage für die darauf folgende Ermittlung des Rohstoff- und Energieverbrauchs sowie der Schadstoffemissionen in der Produktion. Des Weiteren werden der Energieverbrauch als auch die verschiedenen Schadstoffemissionen, welche durch die Fahrzeugnutzung auftreten, dargestellt und beschrieben.

### 2.3.1 Werkstoffzusammensetzungen

Die Werte der prozentualen Werkstoffzusammensetzungen werden nach der in Kapitel 2.2.4 erläuterten Methode ermittelt. Erschwert wird die Datenrecherche, neben der schwierigen Informationsbeschaffung, ferner durch die sehr komplexe Zusammensetzung der Fahrzeuge. Sie bestehen zum Teil aus über 20.000 Einzelteilen [83, S.13] [86, S.9]. Aufgrund dessen ist eine genaue Ermittlung der Materialkomposition nicht möglich, weshalb die folgenden Abbildungen lediglich Näherungswerte zeigen. Diese liegen jedoch, infolge der Methode der Datenermittlung, sehr nah an den realen Werten.

Die einzelnen Werkstoffklassen enthalten keine Information hinsichtlich einer weiteren Unterteilung der in den einzelnen Bereichen enthaltenen Materialien, z.B. verschiedener Stahllegierungen im Bereich Stahl- und Eisenwerkstoffe [83, S.20]. Zudem werden in Bezug auf Einsatz von Sekundärmaterialien in den jeweiligen Werkstoffklassen keine Angaben gemacht [83, S.20].

Die prozentualen Angaben beziehen auf die jeweiligen Leergewichte der Fahrzeuge von denen zuvor 68 Kilogramm für den Fahrer und sieben Kilogramm für das Gepäck abgezogen werden. Folgende Fahrzeuggewichte bilden die Grundlage für die nachfolgende Werkstoffzusammensetzung, Abbildung 2-7 bis 2-9, sowie den Rohstoffbedarf, Abbildung 2-10 bis 2-12:

- Citroën DS 21: 1245 Kilogramm
- Citroën CX 20: 1310 Kilogramm
- Ford Mondeo 1.8i: 1247 Kilogramm

Beim Vergleich der drei Zusammensetzungen über die Dauer des Untersuchungszeitraums lassen sich verschiedene Entwicklungen hinsichtlich der Verteilung der verwendeten Werkstoffe erkennen. Diese decken sich weitestgehend mit den in der Fachliteratur erwähnten Durchschnittswerten für die jeweiligen Baujahre, siehe Abbildung 4-2 [83, S.14], [1, S.168]. Deutlich werden die Veränderungen vor allem bei den Stahl- und Ei-

senwerkstoffen, deren Anteil am Fahrzeuggesamtgewicht von 72,3 Prozent bei der Citroën DS über 68,8 Prozent beim Citroën CX bis auf 64 Prozent beim Ford Mondeo abgenommen hat. Im Gegenzug hat der Anteil leichter Werkstoffe, wie z.B. Aluminium von 2,7 Prozent bis auf 9 Prozent zugenommen. Ähnlich verhält es sich auch bei den Kunststoffen, deren Anteil am Gesamtgewicht sich von 4,5 auf 11,5 Prozent erhöht hat. Die Werkstoffzusammensetzungen der drei untersuchten Fahrzeuge sind nachfolgend, in den Abbildungen 2-7 bis 2-9, in Form von Tortendiagrammen dargestellt.

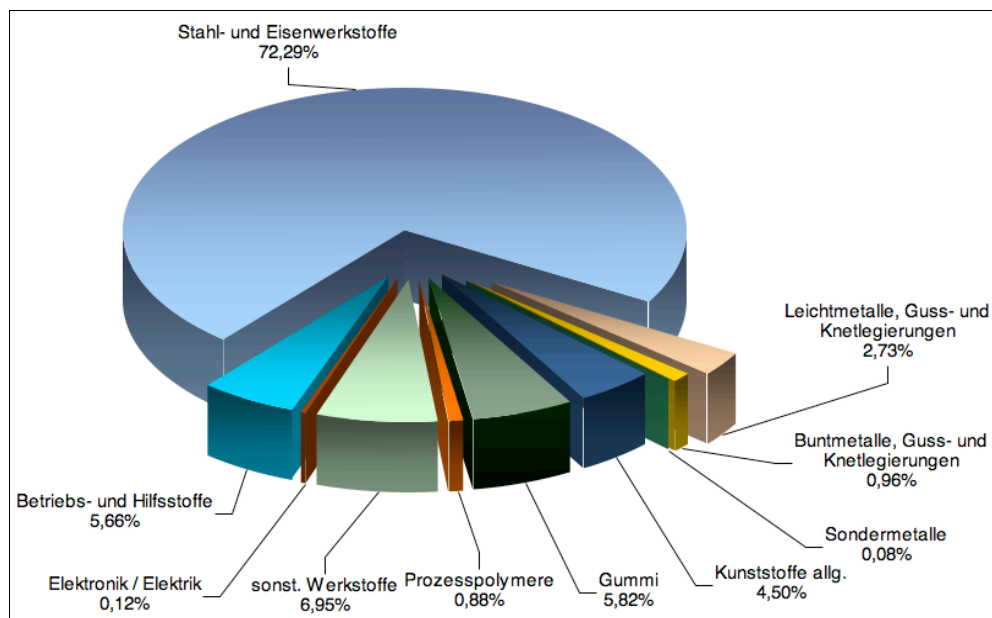


Abbildung 2-7 – Werkstoffzusammensetzung Citroën DS 21 [eigene Darstellung]

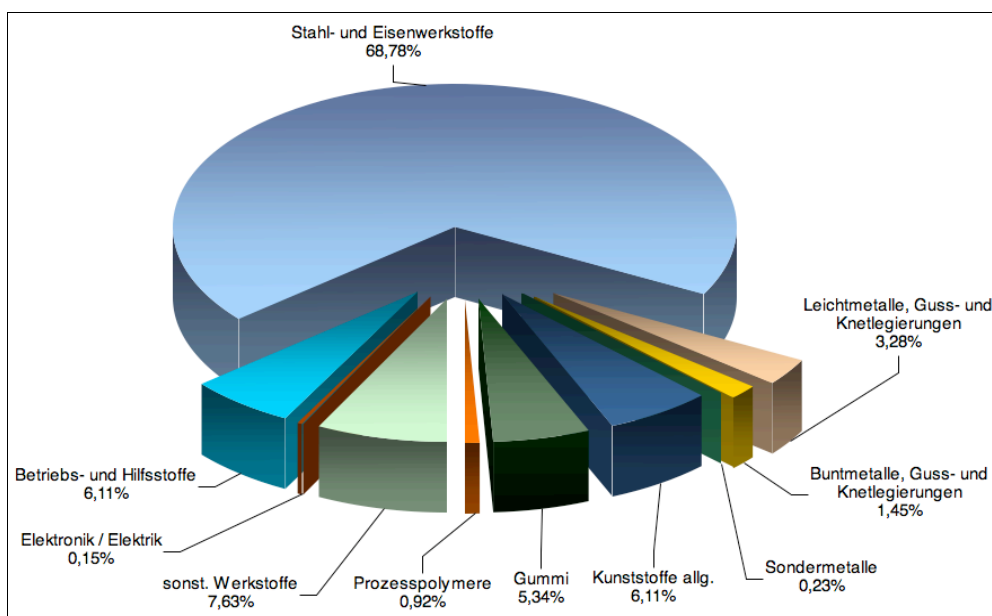


Abbildung 2-8 – Werkstoffzusammensetzung Citroën CX 20 [eigene Darstellung]

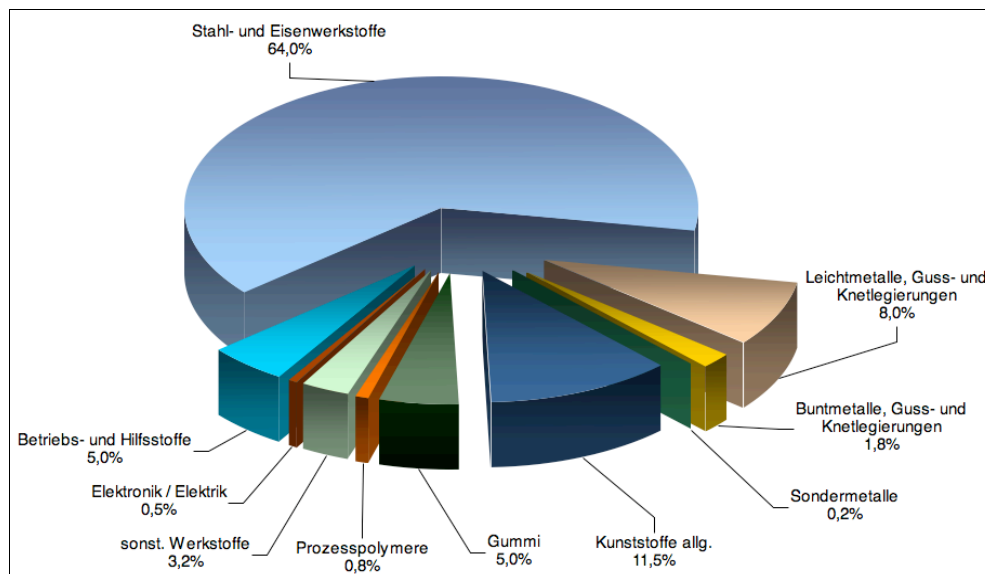


Abbildung 2-9 – Werkstoffzusammensetzung Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung]

### 2.3.2 Rohstoffgewinnungs-, Rohstoffweiterverarbeitungs- und Fahrzeugherstellungsphase

Die im Kapitel 2.3.1 dargestellten Fahrzeugzusammensetzungen bilden die Grundlage für die im Kapitel 2.2.4 erläuterten Verfahren zur Ermittlung des Rohstoffaufwands sowie des Energieverbrauchs bei der Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung. Aufgrund der unvollständigen Datenbasis des PROBAS Systems, ist es nicht möglich für jeden Werkstoff des Fahrzeugs den ursprünglichen Rohstoff- sowie Energieaufwand zu ermitteln. Zudem werden die verwendeten Betriebsstoffe nicht bilanziert, d.h. sie werden in nicht abgebildet. Aus diesem Grund summieren sich die, in Abbildung 2-10 bis 2-12 dargestellten, Rohstoffe bei der Citroën DS auf 89,4 Prozent, beim Citroën CX auf 88 Prozent und beim Ford Mondeo auf 93 Prozent des Fahrzeuggesamtgewichts. Trotz dieser Einschränkungen geben die Darstellungen eine realistische Näherung an die tatsächlichen Werte und bilden eine gute Grundlage für den Vergleich der Fahrzeuge.

Wie schon zu Beginn des Kapitels 2.3.1 erläutert, werden die einzelnen Werkstoffgruppen nicht weiter unterteilt, da die unvollständige Datenbasis hinsichtlich der in den Fahrzeugen verwendeten Werkstoffen dies nicht zulässt. Somit zeigen die dargestellten Werte nur den Aufwand für die jeweilige Werkstoffgruppe und nicht für die einzelnen darin enthaltenen Materialien. Bei Stahl- und Eisenwerkstoffen wird demzufolge nur die eigentliche Stahlblechherstellung bilanziert und nicht die Herstellung der verschiedenen Stahlarten. In der Gruppe der Kunststoffe verhält es sich ähnlich. Da das PROBAS System

Informationen zu verschiedenen Kunststoffarten enthält, wird in diesem Fall aus den verschiedenen Kunststoffarten ein Mittelwert für den Rohstoff- sowie Energieaufwand gebildet. Dieser wird im weiteren Verlauf für alle im Fahrzeug vorhandenen Kunststoffe verwendet.

Diese Einschränkungen lassen den Schluss zu, dass der reale Rohstoff- und Energieverbrauch über den ermittelten Werten liegt. Da jedoch für alle drei Fahrzeuge dieselben Einschränkungen hinsichtlich der Datenbasis und Berechnung gelten, lassen sich die Ergebnisse miteinander vergleichen.

### **Rohstoffbedarf**

Analog zur Werkstoffzusammensetzung hat sich der Rohstoffbedarf über den Untersuchungszeitraum hinweg stark gewandelt. Aufgrund des vermehrten Einsatzes leichter Werkstoffe, wie z.B. Aluminium und Kunststoff, hat der Anteil daraus resultierender Rohstoffe zugenommen, wo hingegen Eisenerz als Grundstoff für die verschiedenen Stahlbauteile immer weiter abgenommen hat. Zudem lässt sich eine wachsende Diversifizierung der Rohstoffarten erkennen, was dem zunehmenden Einsatz zusätzlicher neuer sowie sekundärer Rohstoffen geschuldet ist. In diesem Zusammenhang ist besonders Aluminium zu erwähnen. Bei der Citroën DS fand nur Primäraluminium Verwendung. Entsprechend den Angaben in der Fachliteratur wurden dem gegenüber beim Citroën CX 30 Prozent und beim Ford Mondeo 90 Prozent recyceltes Aluminium genutzt, was sich deutlich in der Rohstoffverteilung sowie dem Energieverbrauch niederschlägt [71, S.31]. Bei Kupfer beträgt das Verhältnis entsprechend dem Durchschnitt in Deutschland 50 Prozent Primär- zu 50 Prozent Sekundärmaterial [82].

Die nachfolgenden Abbildungen 2-10 bis 2-12 zeigen die, auf Basis der Werkstoffzusammensetzungen ermittelte, prozentuale Aufteilung der für die jeweiligen Fahrzeuge verwendeten Rohstoffe. Bei der Produktion entstehen jedoch auch Verschnittmengen verschiedener Metalle, welche zu einem erhöhten Rohstoffaufwand führen [83, S.21]. Auf Grund fehlender Informationen hinsichtlich der prozentualen Verteilung sind diese Mengen in den Abbildungen nicht enthalten.

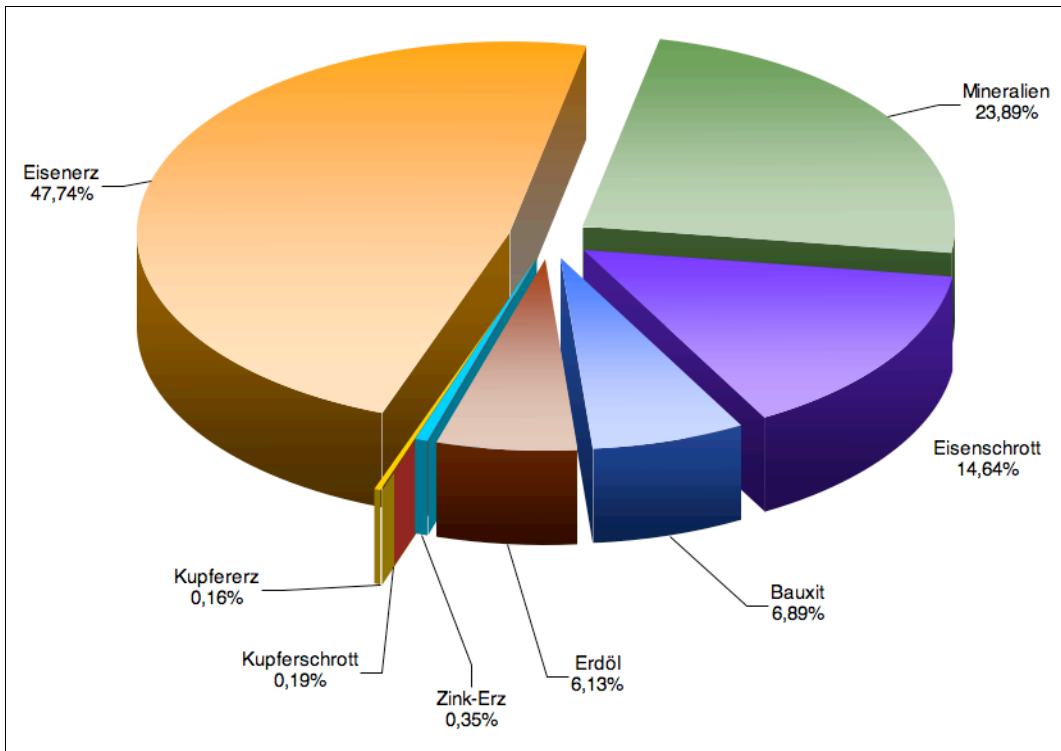


Abbildung 2-10 – Rohstoffbedarf Citroën DS 21 [eigene Darstellung]

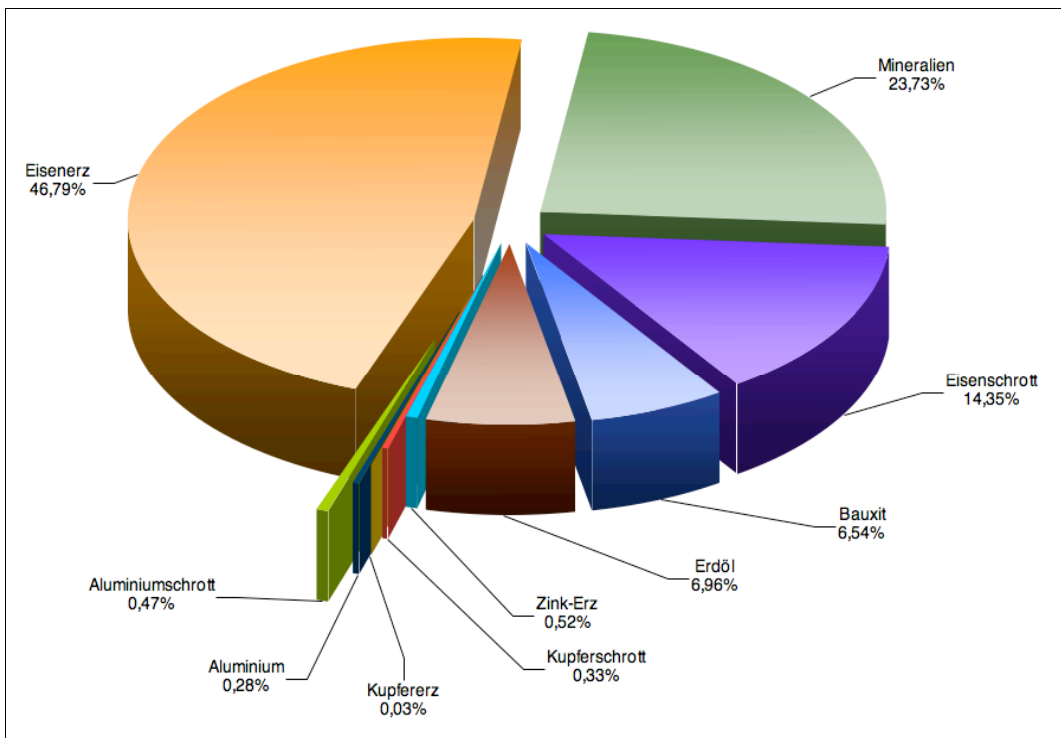
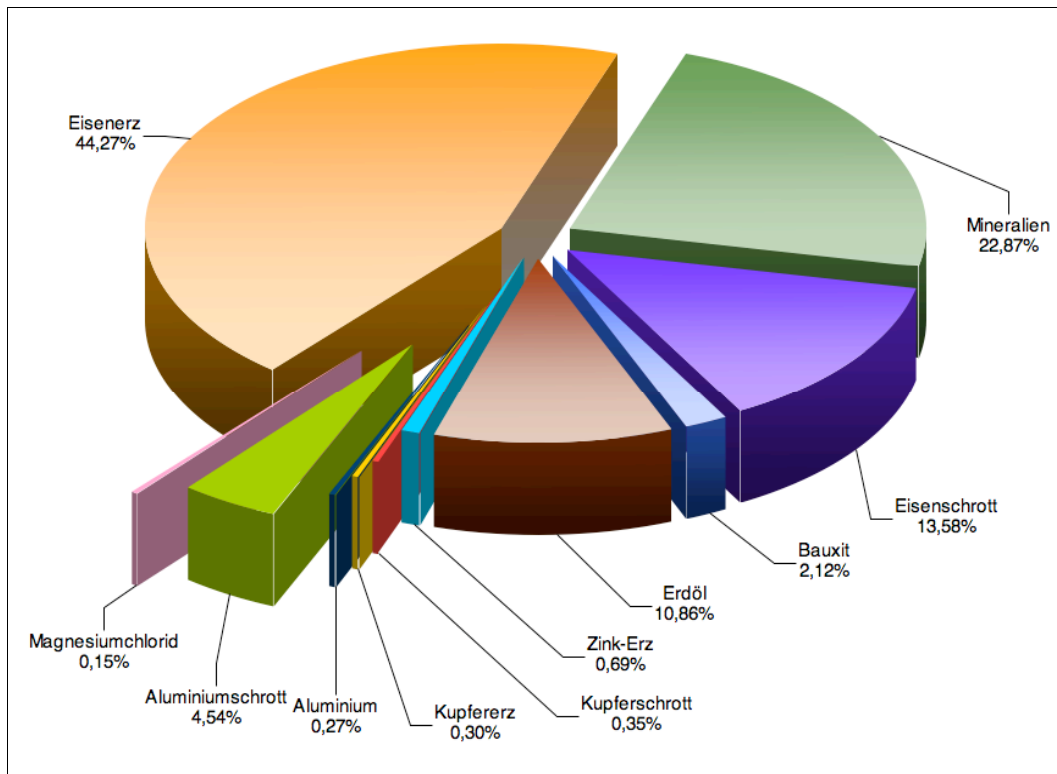


Abbildung 2-11 – Rohstoffbedarf Citroën CX 20 [eigene Darstellung]



**Abbildung 2-12 – Rohstoffbedarf Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung]**

Eine für jedes Fahrzeug separate Auflistung der verwendeten Rohstoffe nach deren Gewicht ist dem Anhang 7.3 bis 7.5 zu entnehmen.

Neben dem individuellen Rohstoffbedarf der einzelnen Fahrzeuge ist auch die Einbeziehung der zeitlichen Entwicklung für die anschließende Auswertung der Sachbilanz-Studie von großer Bedeutung. Durch eine Gegenüberstellung der jeweiligen Fahrzeuge werden die Veränderungen bzgl. der eingesetzten Rohstoffe nochmals deutlich, siehe Abbildung 2-13.

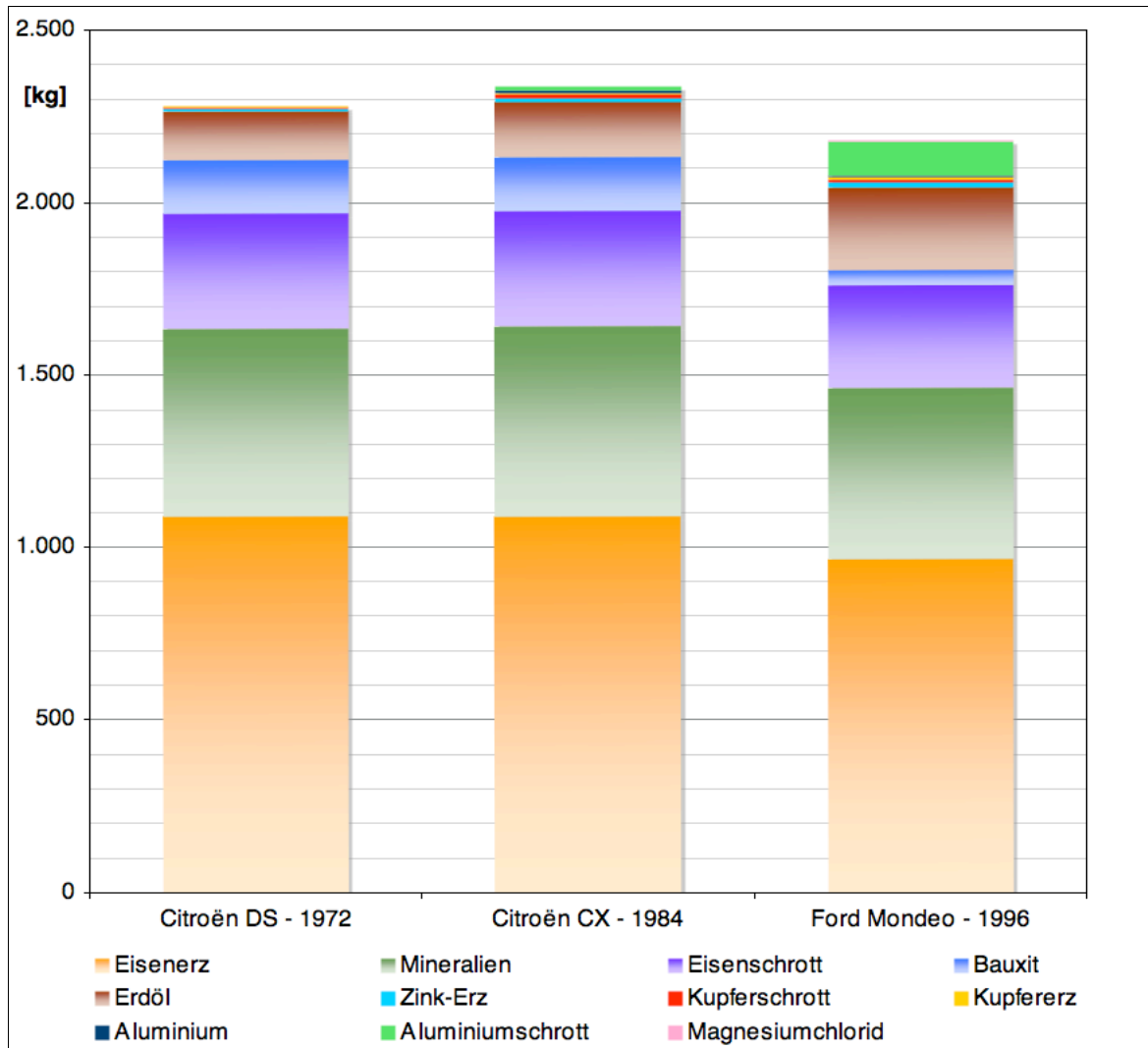
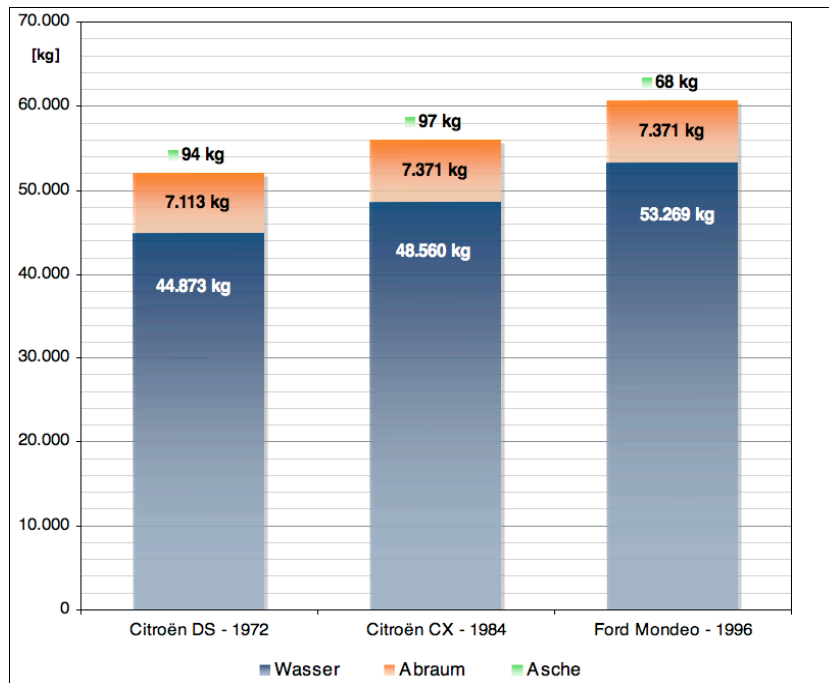


Abbildung 2-13 – Gegenüberstellung der verwendeten Rohstoffe [eigene Darstellung]

Neben den für die Herstellung der Werkstoffe verwendeten Rohstoffen darf nicht der bei deren Gewinnung und Weiterverarbeitung anfallende Abraum sowie der Wasserverbrauch außer Acht gelassen werden, siehe Abbildung 2-14. Hierbei lässt sich erkennen, dass trotz der gleichzeitigen Reduzierung des Rohstoffaufwandes beim Ford Mondeo der Wasserverbrauch sowie die Abraummenge gestiegen sind.



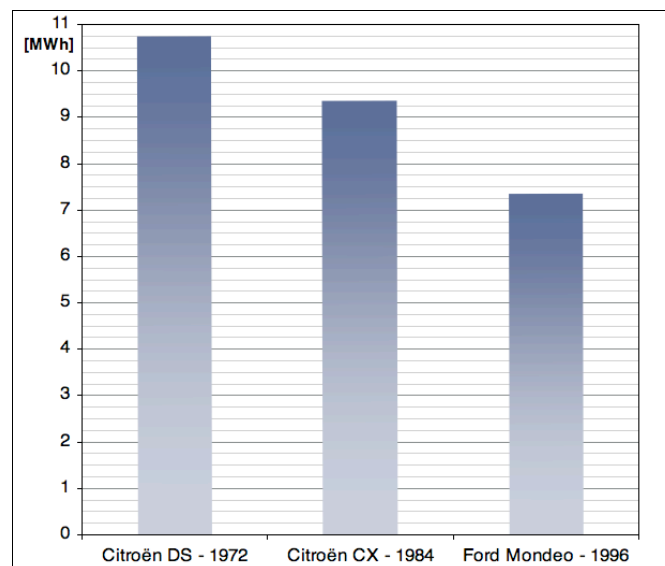
**Abbildung 2-14 – Abfallmenge und Wasserbedarf bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung]**

### Energieverbrauch

Basierend auf dem jeweiligen Aufwand für die Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie die Fahrzeugherstellung wurde der Gesamtenergieverbrauch ermittelt. Die hierbei verwendeten Daten ergeben sich aus den Angaben des PROBAS Systems für die Rohstoffe sowie aus dem in Kapitel 2.2.4 sowie Abbildung 2-6 gezeigten Aufwand für die Fahrzeugherstellung [82]. Da die Informationen im PROBAS System auf den Zahlen des Jahres 2000 beruhen, ist eine Extrapolation der Daten entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 2.2.4 nötig, um den jeweiligen Verbrauch in den Produktionsjahren 1972, 1984 und 1996 näherungsweise zu ermitteln. Hierbei wird der zuvor für die rückwirkende Berechnung des Energieverbrauchs in der Produktion ermittelte Faktor von 1,8 Prozent pro Jahr verwendet.

Bei der Untersuchung hat sich gezeigt, dass der Energieaufwand für die Gewinnung der Werkstoffe größer als für die Fertigung des Fahrzeugs ist, was auch in der Fachliteratur bestätigt wird [71, S.31]. Das Verhältnis bei den untersuchten Automobilen beträgt ungefähr 60 zu 40.

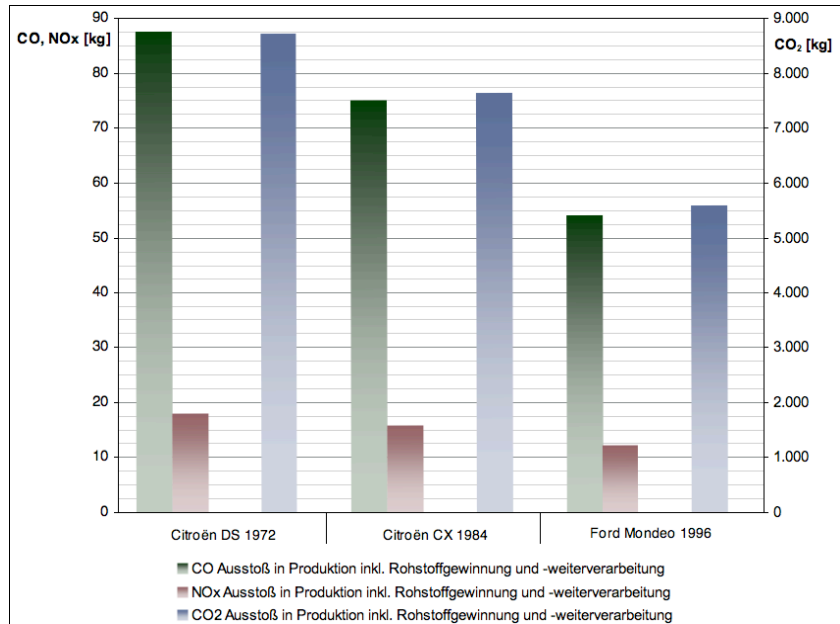
Der Energieverbrauch beinhaltet dabei sowohl die elektrische als auch die durch Prozesswärme zur Verfügung gestellte Energie, wobei die in verschiedenen Einheiten angegebenen Werte in MWh umgerechnet werden. Abbildung 2-15 zeigt den jeweiligen Gesamtenergieverbrauch für die Herstellung der drei Fahrzeugtypen. Dabei wird deutlich, dass im Laufe des Untersuchungszeitraums der Energieverbrauch pro Fahrzeug stark gesunken ist, von 10,75 MWh bei der Citroën DS über 9,36 MWh beim Citroën CX bis auf 7,34 MWh beim Ford Mondeo. Die Gründe hierfür liegen in der immer effizienteren Energiegewinnung sowie im verstärkten Einsatz recycelter Werkstoffe, wie z.B. Aluminium.



**Abbildung 2-15 – Energieverbrauch bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung]**

### Schadstoffausstoß

Die Senkung des Schadstoffausstoßes bei der Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie der Herstellung des Fahrzeugs verhält sich analog zur Entwicklung des Energieverbrauchs, da ein Großteil der Schadstoffe bei der Energiegewinnung entstehen, siehe Abbildung 2-16.

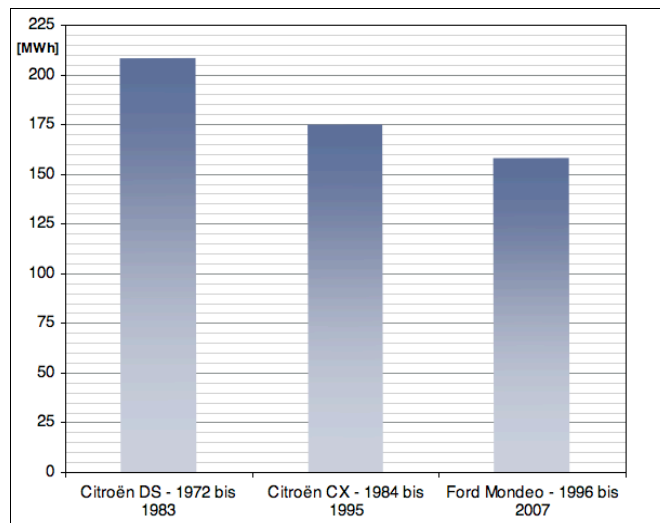


**Abbildung 2-16 – Schadstoffausstoß bei Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung sowie Fahrzeugherstellung [eigene Darstellung]**

### 2.3.3 Nutzungsphase

#### Energieverbrauch

Der Energieverbrauch während der Nutzungsphase ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch sowie -herstellung in Kombination mit der Jahresfahrleistung der Fahrzeuge [71, S.27], siehe Abbildung 2-17. Entsprechend der in Kapitel 2.2.4 und im Anhang 7.6 erläuterten Vorgehensweise wurde der Energieverbrauch auf Grundlage des Kraftstoffverbrauchs berechnet.



**Abbildung 2-17 – Energieverbrauch in der Nutzungsphase [eigene Darstellung]**

Der Austausch an Verschleißteilen findet bei den drei Fahrzeugen in einem ähnlichen Umfang statt. Durch den sehr geringen Einfluss der Wartungsaktivitäten auf den Gesamtenergieverbrauch, und somit ebenfalls auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß, gehen diese in die Bilanzierung nicht mit ein.

### Schadstoffausstoß

Übereinstimmend mit der in Kapitel 2.2.4 sowie im Anhang 7.7 beschriebenen Vorgehensweise, wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge pro Kilometer ermittelt:

- Citroën DS 21: 365 g CO<sub>2</sub> / km bei 12,5 l/100km
- Citroën CX 20: 306,6 g CO<sub>2</sub> / km bei 10,5 l/100km
- Ford Mondeo 1.8i: 277,4 g CO<sub>2</sub> / km bei 9,5 l/100km

Mit Hilfe dieser Werte und der Jahresfahrleistung kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der jeweiligen Nutzungsphase von 12 Jahren berechnet werden.

Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt Abbildung 2-18 auch den Ausstoß der limitierten Luftschadstoffe CO und NO<sub>x</sub>. Aufgrund des Alters der Fahrzeuge und der damit verbundenen schwierigen Informationsbeschaffung war es nicht möglich, die genauen jeweiligen Emissionsfaktoren zu ermitteln. Aus diesem Grund zeigen die dargestellten CO- und NO<sub>x</sub>-Werte nur die durchschnittlichen Emissionen in den jeweiligen Produktionsjahren, bezogen auf ein einzelnes Fahrzeug [32]. Die Werte für CO und NO<sub>x</sub> setzten sich dabei aus der Start- sowie der Warmphase des Motors zusammen.

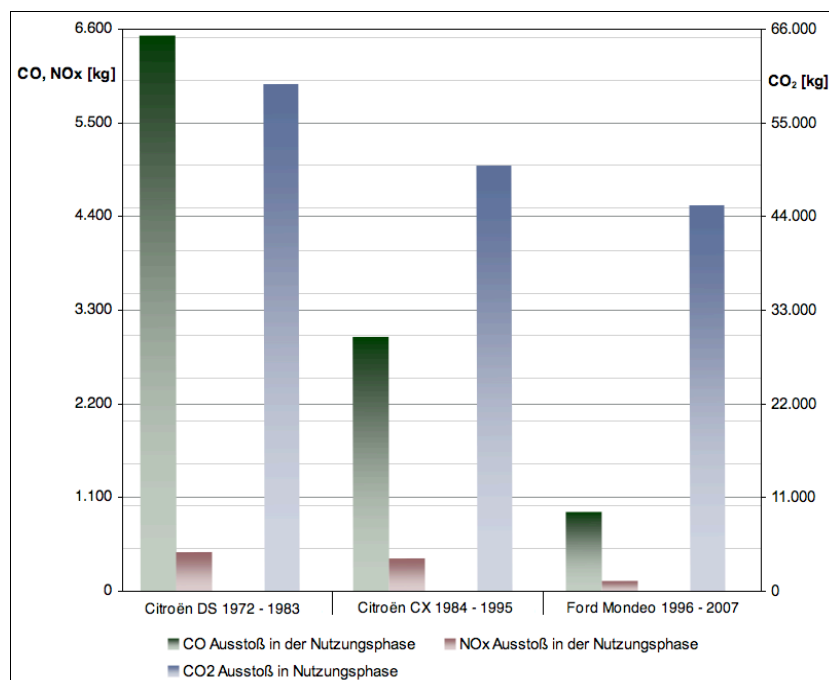


Abbildung 2-18 – Schadstoffausstoß während der Nutzung von jeweils 12 Jahren [eigene Darstellung]

Auch wenn diese Angaben nicht die exakten Werte der untersuchten Fahrzeuge wiedergeben, so zeigen sie doch die großen Fortschritte, welche im Bereich der Abgasreinigung im Laufe des Untersuchungszeitraums gemacht wurden. Deutlich werden diese Verbesserungen auch in der Entwicklung der gesetzlichen Vorschriften, welche für die Erteilung einer Betriebserlaubnis eines neuen Fahrzeugs eingehalten werden müssen, siehe Tabelle 2-3.

**Tabelle 2-3 – Entwicklung der Emissionsgrenzwerte in Deutschland [modif. nach 32 und 80]**

Datum	Norm	Messzyklus	Grenzwerte in g/km			
			CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC + NO <sub>x</sub>
01.01.74	ECE 15.00	ECE 15	30 - 65	5,1 - 8,2	-	-
01.09.75	ECE 15.01	ECE 15	24 - 52	4,3 - 7,0	-	-
01.10.77	ECE 15.02	ECE 15	24 - 52	4,3 - 7,0	3,0 - 4,7	-
01.10.80	ECE 15.03	ECE 15	19 - 42	3,8 - 6,2	2,5 - 4,0	-
01.10.82	ECE 15.04	ECE 15	16,60	-	-	3,56
01.07.92	Euro 1	NEFZ	3,16	-	-	1,13
01.01.96	Euro 2	EUDC	2,20	-	-	0,50
01.01.00	Euro 3	NEFZm	2,30	0,20	0,15	-
01.01.05	Euro 4	NEFZm	1,00	0,10	0,08	-

### 2.3.4 Verwertungsphase

Heutzutage hat der Pkw verglichen mit anderen Konsumprodukten eine der höchsten Recyclingraten, welche sogar höher ist als bei Papier [71, S.31]. Aus den schon im Kapitel 2.2.3 und 2.2.4 beschriebenen Gründen, geht die Verwertungsphase dennoch nicht in die Bilanz ein.

## 2.4 Vergleich der zwei Halteoptionen

Im folgenden Kapitel werden die beiden zu Beginn der Arbeit beschriebenen Halteoptionen miteinander verglichen. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Abbildungen 2-19 bis 2-22 nicht nach Rohstoffgewinnung, -weiterarbeitung und Herstellung sowie Nutzung unterteilt, sondern die einzelnen Phasen werden kombiniert in einer Grafik dargestellt. Die verschiedenen, jedoch nach einem einheitlichen Muster aufgebauten, Abbildungen zeigen jeweils den Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen über die Dauer des Untersuchungszeitraums von 36 Jahren.

Die durchgehende rote Linie in den Abbildungen kennzeichnet die erste Halteoption. Durch die über den gesamten Zeitraum identischen Fahrzeugdaten ist ein gleichbleiben-

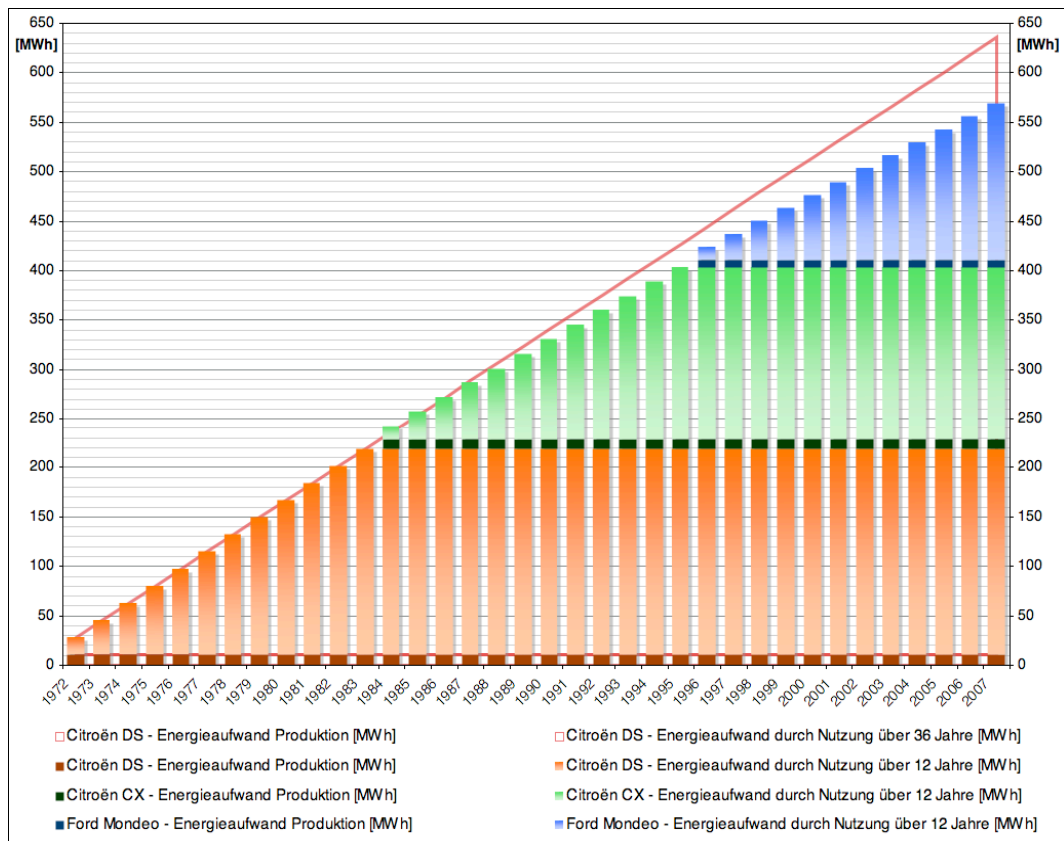
der, linearer Anstieg der Geraden zu erkennen, da während der Nutzung die Werte eines jeden neuen Jahres zu denen des vorherigen hinzuaddiert werden.

Die gestapelten Balken symbolisieren die zweite Halteoption, bei der drei Fahrzeuge produziert und jeweils über 12 Jahre genutzt werden. Nach Ablauf dieses Zeitraums bleiben die ermittelten Angaben erhalten und die Werte des neuen Fahrzeugs werden den alten hinzugerechnet. In diesem Zusammenhang wird der Aufwand einer jeden Produktion dargestellt, in dem er den Werten der vorherigen Nutzung hinzugerechnet wird, wodurch sich die gestapelten Balken ergeben. Während der jeweiligen 12-jährigen Nutzungsphase nehmen die Werte linearer zu. Die Steigung ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen technischen Eigenschaften bei jedem Fahrzeug unterschiedlich. Auch die Werte der Produktionen unterscheiden sich entsprechend der Angaben im Kapitel 2.3.2 und 2.3.3.

Mit Hilfe dieser Darstellungsweise können die Auswirkungen der beiden Optionen visuell in einer Grafik miteinander verglichen werden. Je nachdem, welche Variante in der Summe über den geringeren Verbrauch bzw. die niedrigeren Emissionen verfügt, hat im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit einen Vorteil.

#### **2.4.1 Energieverbrauch**

Der in Abbildung 2-19 veranschaulichte Energieverbrauch basiert auf den Werten der Abbildung 2-15 sowie Abbildung 2-17. Dabei wird die für die zweimalige Aufarbeitung der über den gesamten Untersuchungszeitraum gehaltenen Citroën DS notwendige Energie nicht dargestellt. Nach Expertenmeinung der Firma „Atelier Automobile“ ist der Energieverbrauch hierfür, im Vergleich zu Fahrzeugproduktion, vernachlässigbar gering [2].

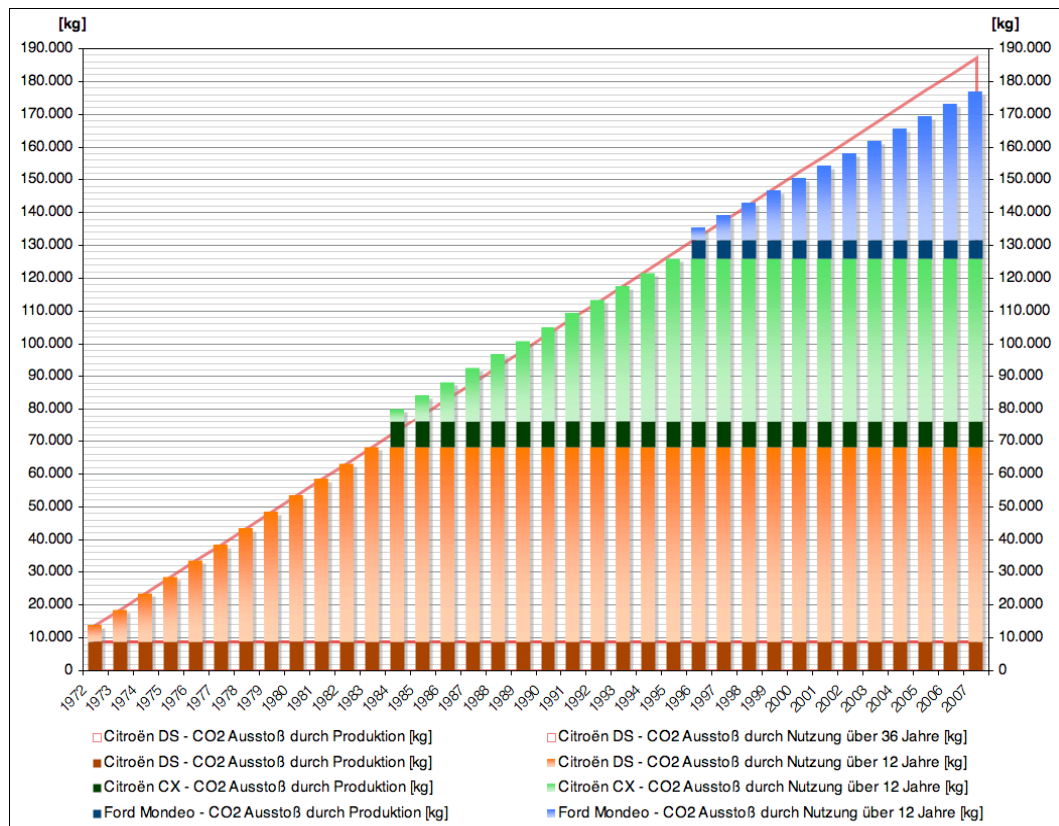


**Abbildung 2-19 – Vergleich Energieverbrauch durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung]**

Wie auch schon von der Fachliteratur bestätigt [71, S.31], zeigt sich, dass die Auswirkungen der Fahrzeugnutzung hinsichtlich des Energieverbrauchs diejenigen der Produktion bei weitem übertreffen. Der Abstand wird umso größer, je höher der Kraftstoffverbrauch des betreffenden Fahrzeugs ist. Im Falle der, in der ersten Variante verwendeten, Citroën DS beträgt er 12,5 l/100km, wodurch die verbrauchte Energie im Vergleich zu den beiden anderen Fahrzeugen der zweiten Halteoption, welche weniger Kraftstoff verbrauchen, erheblich größer ist. Deutlich wird diese Auswirkung auch im flacheren Anstieg des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase des Citroën CX 20 und Ford Mondeo. Der geringere Verbrauch kompensiert überdies den Aufwand für die Produktion. Trotz der Kombination von dreimaliger Produktion und dementsprechender Nutzung verbraucht die zweite Halteoption 10,47 Prozent weniger Energie als die erste Option, bei der nur eine Fahrzeugproduktion mit anschließender Nutzung anfällt. Somit wird deutlich, dass trotz des zusätzlichen Energieverbrauchs für die Produktion der Fahrzeuge die zweite Option hinsichtlich des Gesamtverbrauchs im Vorteil ist.

## 2.4.2 Schadstoffausstoß

Die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes über den Untersuchungszeitraum ist in Abbildung 2-20 dargestellt. Die Daten basieren auf den Angaben in Abbildung 2-16 und Abbildung 2-18.



**Abbildung 2-20 – Vergleich CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung]**

Der Verlauf des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verhält sich weitestgehend analog zum Energieverbrauch, da dieser vor allem in der Nutzungsphase direkt mit dem Kraftstoffverbrauch verbunden ist. In Abbildung 2-20 ist gleichwohl zu erkennen, dass im Gegensatz zum Energieverbrauch die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Fahrzeugproduktion einen größeren Anteil haben. Demzufolge dauert es bei der zweiten Halteoption länger, bis die durch die Produktion hervorgerufenen Mehremissionen, durch einen verringerten Verbrauch der Fahrzeuge, kompensiert sind. Im Endeffekt beträgt der Unterschied zwischen den beiden Optionen nur 5,65 Prozent des Maximalwerts. Dieser Wert liegt durchaus im Bereich möglicher Unsicherheiten bei der Datenerfassung und -berechnung, wodurch in diesem Fall keiner der beiden Optionen ein klarer Vorteil zuzusprechen ist.

Besonders deutlich werden die Veränderungen durch den Einsatz neuer Fahrzeuge bei den limitierten Luftschadstoffemissionen CO und NO<sub>x</sub>, welche sich bei der zweiten Halteoption stark verringert haben, vgl. Abbildung 2-21 sowie Abbildung 2-22. Durch die Vielzahl an, im Laufe des Untersuchungszeitraums erlassenen, gesetzlichen Vorschriften, wurden technische Entwicklungen seitens der Automobilhersteller zur Schadstoffreduzierung im Abgas nötig [80, S.1ff], vgl. Tabelle 2-3. In diesem Zusammenhang sind insbesondere der geregelte Katalysator sowie verschiedene innermotorische Maßnahmen zu nennen.

Wie schon in Kapitel 2.3.3 erwähnt, beziehen sich Angaben zu den CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen nicht direkt auf die untersuchten Fahrzeuge, sondern geben nur den Durchschnittswert aller Pkws der jeweiligen Produktionsjahre wieder. Um dennoch eine Entwicklung über den Untersuchungszeitraum hinweg zeigen zu können, werden diese Durchschnittswerte dargestellt. Die Auswirkungen der Fahrzeugproduktion auf die beiden Luftschadstoffe sind hingegen nur marginal und fallen gegenüber der durch die Nutzung hervorgerufene Menge kaum ins Gewicht.

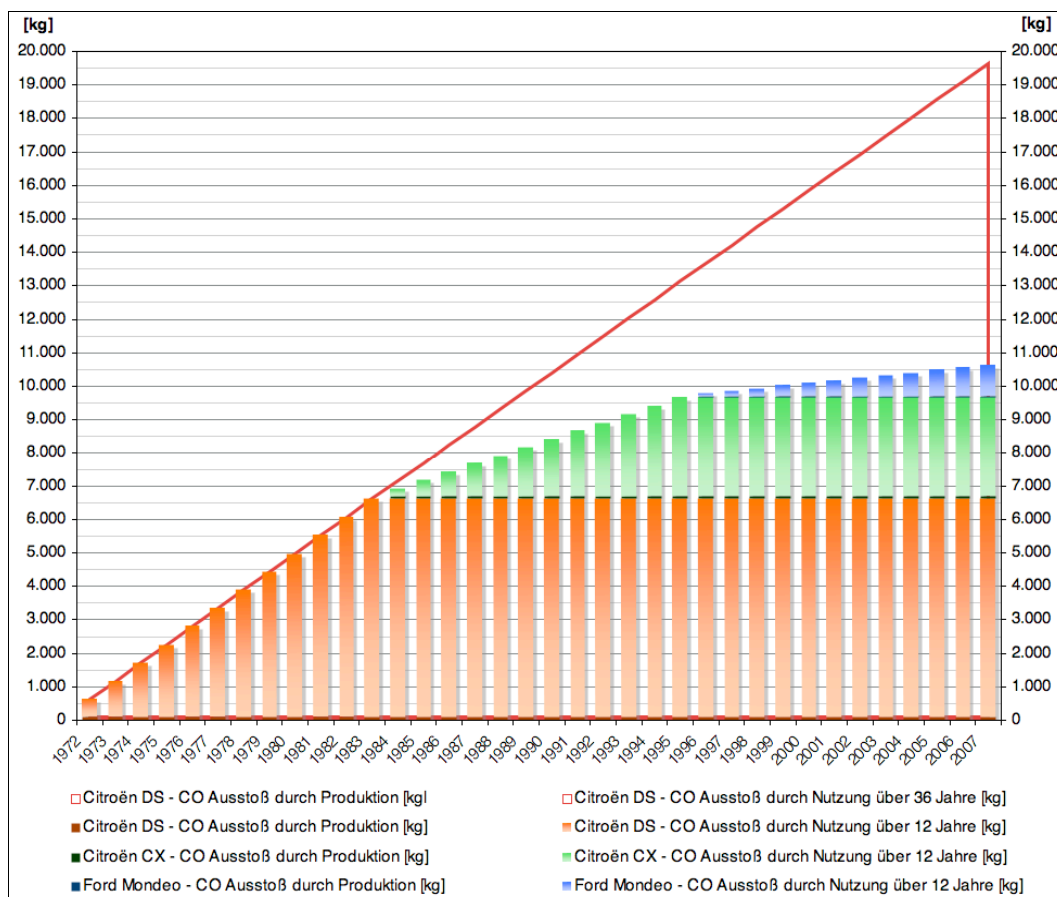


Abbildung 2-21 – Vergleich CO-Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung]

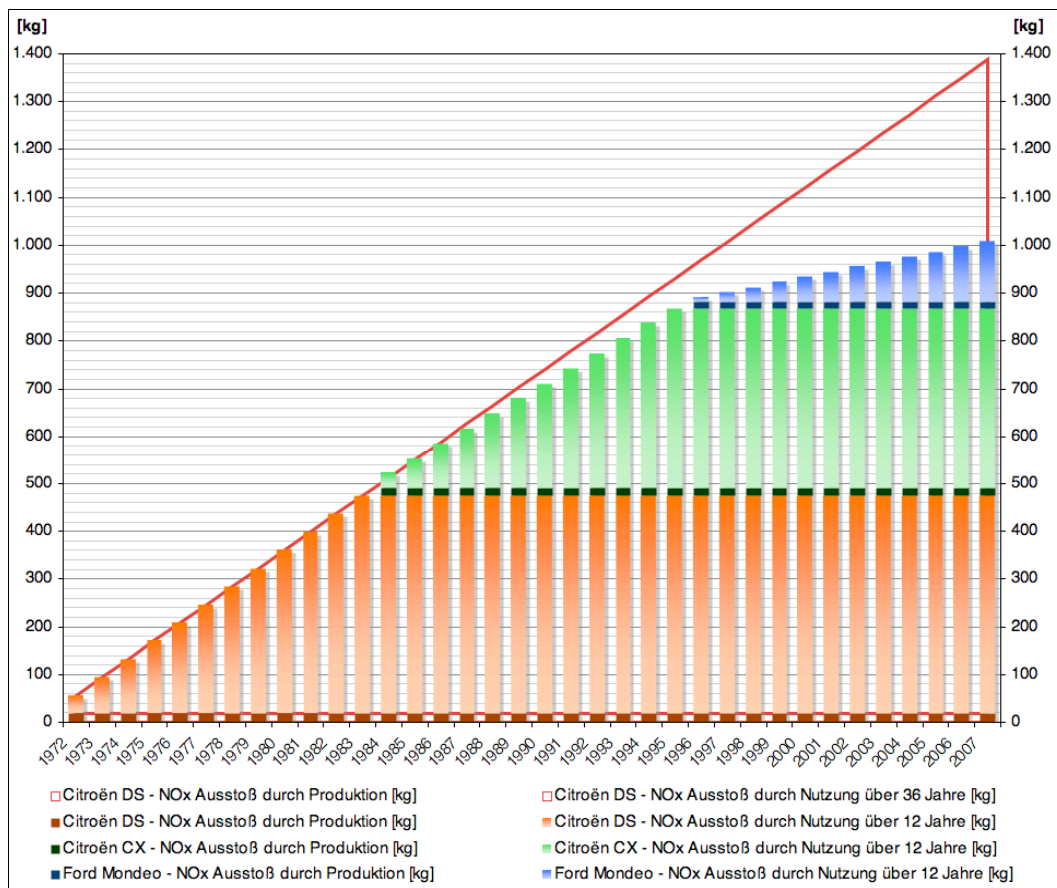


Abbildung 2-22 – Vergleich NO<sub>x</sub>-Ausstoß durch Produktion und Nutzung [eigene Darstellung]

### 2.4.3 Auswertung

Die folgende Auswertung erfolgt auf Basis der zuvor durch die Sachbilanz-Studie ermittelten Daten. Dabei sind der Energieverbrauch, die verschiedenen Emissionen, der Rohstoffbedarf sowie der anfallende Abraum und der Wasserverbrauch von Bedeutung. Auf Grundlage dieser Information werden die beiden Optionen hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit bewertet.

Im Bezug auf den Energieverbrauch sowie die damit einhergehenden Schadstoffemissionen ist die zweite Option im Vorteil. Obwohl zwei zusätzliche Fahrzeuge produziert werden, bringt deren geringerer Kraftstoffverbrauch erhebliche Vorteile in Bezug auf die verbrauchte Energie über den Untersuchungszeitraum, vgl. Abbildung 2-19 und Abbildung 2-20. Wäre bei der zweiten Option der Verbrauch der Fahrzeuge gegenüber dem Vorgänger nicht jeweils gesunken sondern gleich geblieben, so hätten die Auswirkungen der Produktion nicht kompensiert werden können und die Halteoption wäre im Vorteil. Daraus

folgt, dass sich in diesem Zusammenhang der Einsatz neuer Modelle nur dann lohnt, wenn sie über einen geringeren Kraftstoffverbrauch als ihre Vorgänger verfügen.

Demgegenüber haben sich die Luftschadstoffemissionen unabhängig vom Kraftstoffverbrauch stark reduziert, wodurch auch in diesem Fall die zweite Option im Vorteil ist, siehe Abbildung 2-21 und Abbildung 2-22. Geschuldet ist diese Entwicklung jedoch mehr den fortlaufend strenger werdenden gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich der Abgaszusammensetzung und weniger der Verbrauchsminderung. Speziell für die erste Option des Vergleichs würde der nachträgliche Einbau eines einfachen Dreiwege-Katalysators nach „EURO 1“ erhebliche Verbesserungen bezüglich der Schadstoffemissionen mit sich bringen. Hierdurch könnten die Emissionswerte erheblich gesenkt werden, wodurch der Nachteil gegenüber der zweiten Option bedeutend verringert würde.

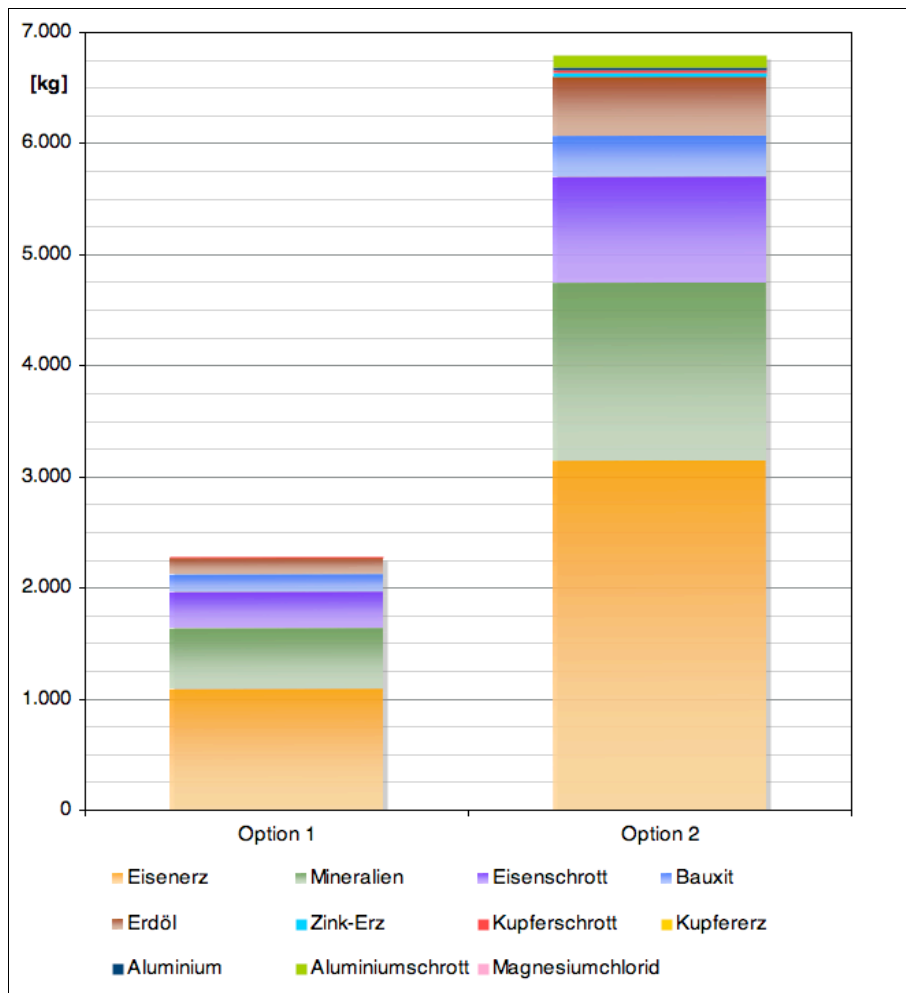
Durch die starke Reduktion der Emissionen während der Nutzungsphase fällt bei neuen Fahrzeugen die Produktion wieder stärker ins Gewicht. Jedoch wird sich die Abnahme sich in Zukunft nicht mehr in diesem großen Umfang fortsetzen. Auch hier verhält es sich wie beim Energieverbrauch, die Anschaffung neuer Fahrzeuge lohnt sich im Vergleich zur Langzeitnutzung nur dann, wenn sie über geringere Emissionen als ihre Vorgänger verfügen. Nur so können die durch die zusätzliche Produktion freigesetzten Schadstoffe ausgeglichen werden.

Anders als bei den beiden eben genannten Vergleichen verhält es sich beim Rohstoffbedarf, der eine Sonderrolle einnimmt. Ein Vergleich der beiden Halteoptionen ist hierbei durch die Addition des jeweiligen Aufwands infolge der Fahrzeugherstellung möglich. Da sich der Rohstoffverbrauch in diesem Fall nur auf die Produktion des Fahrzeugs bezieht, kann dieser über den Untersuchungszeitraum hinweg nicht durch verringerten Energieverbrauch oder Schadstoffausstoß in der Nutzungsphase, kompensiert werden. Dies war sowohl beim Energieverbrauch als auch bei den verschiedenen Emissionen möglich. Für beide Optionen gilt in diesem Zusammenhang, dass in der Nutzungsphase sowie durch die Aufarbeitung des Fahrzeugs der ersten Halteoption nur unwesentliche Rohstoffmengen verbraucht werden, weshalb diese unbeachtet bleiben. Zudem kann die durch den Kraftstoffverbrauch benötigte Rohölmenge, bedingt durch fehlende Zahlen, nicht mit in die Bilanz eingehen.

Bedingt durch den in die Vergangenheit reichenden Untersuchungszeitraum und die daraus resultierenden unvollständigen Daten kann keine, für alle Fahrzeuge der Sachbilanz-Studie geltende, Recyclingquote ermittelt werden. Mögliche Gutschriften für die Einsparung von Ressourcen durch Rückgewinnung von Sekundärmaterialien können somit nicht erteilt werden. Um die Fahrzeuge der verschiedenen Herstellungsjahre hinsichtlich

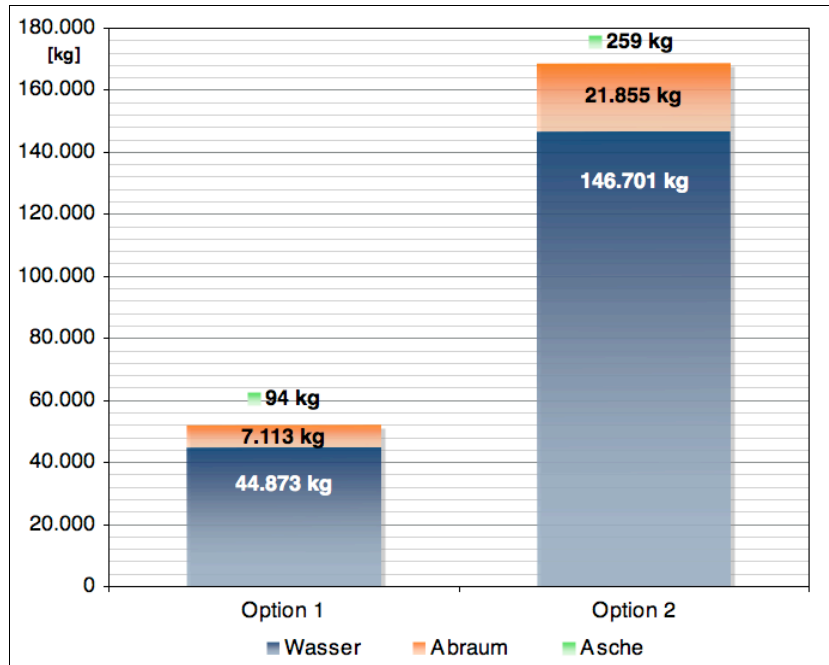
ihres Ressourcenverbrauchs miteinander vergleichen zu können, bleiben deshalb die positiven Auswirkungen der Wiederverwertung unbeachtet. Hierbei ist anzunehmen, dass unter Berücksichtigung möglicher Gutschriften für das Recycling der Fahrzeuge der zweiten Halteoption, die Summe der verbrauchten Rohstoffe gesenkt und folglich der Abstand zur ersten Option verringert werden könnte.

Entsprechend der dargelegten Einschränkungen und Festlegungen zeigt sich der eindeutige Vorteil der ersten Halteoption bezogen auf den Rohstoffbedarf, da hier nur ein Fahrzeug hergestellt wird, vgl. Abbildung 2-23.



**Abbildung 2-23 – Vergleich Rohstoffbedarf der Fahrzeugproduktion in den beiden Optionen [eigene Darstellung]**

Entsprechend des Rohstoffbedarfs verhalten sich auch die damit eng zusammenhängende Abraummenge sowie der Wasserverbrauch. Auch hier können die während der Fahrzeugproduktion entstehenden Mengen durch Einsparungen in der Nutzungsphase nicht kompensiert werden, siehe Abbildung 2-24.



**Abbildung 2-24 – Vergleich Abraum und Wasserverbrauch durch Fahrzeugproduktion in den beiden Optionen [eigene Darstellung]**

Im Zuge der durchgeführten Sachbilanz-Studie mit abschließender Auswertung hat sich gezeigt, dass keine klare Empfehlung hinsichtlich geringerer ökologischer Auswirkungen der entsprechenden Halteoption getroffen werden kann. Eine solche hängt sehr stark von der Gewichtung der jeweiligen ermittelten Werte ab. Diese Bewertung der einzelnen Aspekte der Untersuchung hängt auch immer vom Standpunkt des Beobachters ab, da hier ein großer Interpretationsspielraum existiert. Derzeit ist das Thema Schadstoffemission, insbesondere der CO<sub>2</sub>-Ausstoß, im Fokus der Öffentlichkeit, wodurch hierbei eine Empfehlung für die zweite Option auszusprechen wäre. Wird das Hauptaugenmerk jedoch auf den Ressourcenverbrauch gelegt, so ist die erste Option klar im Vorteil.

Die Wahl alternativer Fahrzeugtypen mit abweichender Materialzusammensetzung, sowie anderem Verhalten im Laufe der Nutzung, kann zu einem völlig divergierenden Ergebnis führen. Dementsprechend gelten die aus dieser Sachbilanz-Studie abgeleiteten Schlussfolgerungen nur für die untersuchte Fahrzeugkonstellation.

Für eine abschließende Bewertung hinsichtlich einer langfristigen Fahrzeugnutzung ist neben den ökologischen Auswirkungen auch die Fahrzeugsicherheit von entscheidender Bedeutung.

## 3 Fahrzeugsicherheit

### 3.1 Begriffserklärungen

Im Allgemeinen bezeichnet der Begriff *Sicherheit* die Abwesenheit von Gefahren für Leib und Leben. Bei der Bedienung eines technischen Gerätes ist sie gegeben, wenn die Möglichkeit der Entstehung eines Schadens für den Menschen während dessen Betrieb ausgeschlossen ist [1, S.56].

Die Sicherheit im Straßenverkehr ist auf die Verkehrsteilnehmer, sowohl in den Fahrzeugen wie auch als Fußgänger und Radfahrer, auf die Verkehrsmittel und Verkehrswege ausgerichtet [15, S.711]. In diesem Zusammenhang gilt, je mehr die Sicherheit erhöht werden soll, desto geringer darf das Risiko zu Schaden zu kommen nur sein. Die Zunahme der Sicherheit erfolgt daher durch die Herabsetzung des Risikos. Dies kann entweder durch die Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines zum Schaden führenden Ereignisses, also durch die Unfallvermeidung, oder durch die Reduzierung des Schadensausmaßes, auch Unfallfolgenminderung genannt, geschehen [41, S.2]. Diese Bereiche werden der passiven sowie der aktiven Sicherheit zugeordnet.

Abbildung 3-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die drei Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit.

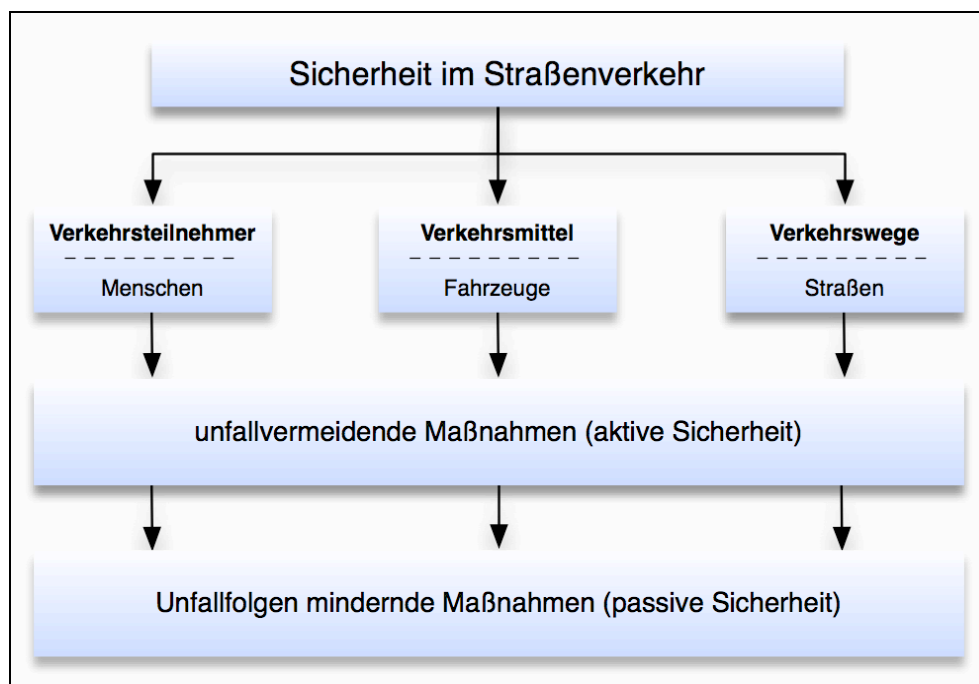


Abbildung 3-1 – Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit [modif. nach 41, S.3]

### 3.1.1 Aktive Sicherheit

Als aktive Sicherheit werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die helfen Unfälle abzuwenden bzw. zu vermeiden. Sie wirken demzufolge in der so genannten „PreCrash“ Phase, das heißt bevor es zu einem Kontakt zwischen den Unfallbeteiligten kommt, was auch die englische Bezeichnung „primary safety“ passend umschreibt [15, S.711], [41, S.143].

Der Zeitbereich der „PreCrash“ Phase beginnt mit dem Erkennen der kritischen Situation und dauert bis zum ersten Kontakt mit dem Kollisionskontrahenten an [15, S.712]. Mit Hilfe der verschiedenen Elemente der aktiven Sicherheit wird versucht, den Kontakt mit dem Unfallgegner zu vermeiden. Diese Maßnahmen betreffen alle drei in Abbildung 3-1 genannten Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit. Auf den Bereich der Verkehrsteilnehmer wird durch Verkehrspädagogik und -psychologie sowie Rechtssicherheit Einfluss genommen. In das Feld der Verkehrsmittel fallen die Fahr-, Bedien-, Wahrnehmungs- sowie die Konditionssicherheit. Die Sicherheit der Verkehrswege wird über Verkehrsflusssteuerung, Straßenführung und -bau sowie über das Verkehrsrecht beeinflusst [15, S.711].

Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf den Bereich der Verkehrsmittel, demzufolge der Fahrzeuge. In diesem Fall ist der Erwartungshorizont darauf ausgerichtet den Fahrer bei kritischen Situationen zu unterstützen, um somit Unfälle zu vermeiden [15, S.712]. Hierbei wird zwischen Fahr- und Fahrerassistenzsystemen unterschieden [15, S.289].

#### 3.1.1.1 Fahrassistenzsysteme

In verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass ein großer Teil der Unfälle vermieden bzw. die Unfallschwere deutlich gemindert werden könnte, wenn die Fahrer die notwendigen Fahrmanöver nur rund eine Sekunde früher einleiten würden [8, S.163]. An diesem Punkt wirken die Fahrassistenzsysteme, indem sie mit Hilfe von unterschiedlichen Sensoren die Bewegungen des Fahrzeugs überwachen. Weichen die dabei gemessenen Werte vom Soll ab, so greifen die Systeme aktiv in die Steuerung des Fahrzeugs ein, um dieses zurück in die Sollparameter zu bringen [65, S.289].

Zu den Fahrassistenzsystemen gehören unter anderem ABS (Anti-Blockier-System), ASR (Anti-Schlupf-Regelung), ESP (Elektronisches-Stabilitätsprogramm) sowie der Bremsassistent [70, S.23].

Die Hauptaufgabe des **ABS** liegt in dem Verhindern von blockierten Rädern beim Bremsvorgang. Dadurch kann der optimale Reibwert für das Abbremsen ausgenutzt werden [65, S.256].

Mit Hilfe der **ASR** kann das Durchdrehen der Antriebsräder beim starken Beschleunigen auf schlechten Straßen unterbunden und somit ein optimales Traktionsverhalten erzielt werden [65, S.257].

Aus vielen alltäglichen Fahrsituationen können sich kritische Fahrzustände entwickeln. Dies kann auch durch reine Lenkvorgänge ohne Beschleunigungen des Fahrzeugs geschehen. Das **ESP** oder auch FDR (Fahrtdynamikregelung) genannt, sorgt dabei über Eingriffe in die Fahrzeugdynamik z.B. durch radselektive Bremsvorgänge oder auch durch Limitierung der Antriebskräfte für eine Stabilisierung des Fahrzeugs [88, S.259], [88, S.406].

Der **Bremsassistent** sorgt für eine Verkürzung des Anhalteweges in dem er in kritischen Situation, sofern der Fahrer sehr schnell das Bremspedal tritt, sofort den maximalen Bremsdruck aufbaut, auch wenn das Pedal nicht voll durchgetreten wird [65, S.258].

### 3.1.1.2 Fahrerassistenzsysteme

Der Fahrer wird von diesen Systemen bei seiner Fahraufgabe unterstützt. Sie greifen zwar in die Fahrzeugdynamik ein, können jedoch im Gegensatz zu den Fahrerassistenzsystemen vom Fahrer jederzeit überstimmt werden. Im Allgemeinen unterstützen die Fahrerassistenzsysteme den Fahrer bei der Bewältigung von permanenten und ermüdenden Aufgaben [65, S.289].

Eine gängige Unterteilung wird in autonome und warnende Systeme sowie Komfort- und Informationssysteme vorgenommen [8, S.164]. Dabei wird deutlich, dass sich dieser Bereich über die aktive Sicherheit hinaus erstreckt, wobei der Übergang fließend ist und eine klare Trennung nicht vorgenommen werden kann. Ein bekanntes Beispiel für solche Systeme ist die **ACC** (Adaptive Cruise Control). Dabei handelt es sich um eine aktive Abstandsregelung, die den Fahrer beim Konstanthalten der Geschwindigkeit sowie beim Einhalten des Abstandes unterstützt [65, S.293]. Bei einer Verringerung der Geschwindigkeit des Vorfahrenden bremst das System selbstständig ab. Sollte die für das System begrenzte Bremskraft nicht ausreichen, wird der Fahrer durch optische oder akustische Hinweise zum Eingreifen aufgefordert. Einen zusätzlichen Beitrag leistet die ACC für das so genannte „PreCrash“ System. Durch die vorhandene Abstandssensorik kann die Sicherheitselektronik einen drohenden Unfall erkennen und geeignete Maßnahmen, wie z.B. einen frühzeitigen Druckaufbau im Bremssystem, einleiten [65, S.293f]. Am Bei-

spiel dieses Systems zeigt sich auch die Entwicklung von der reinen Komforteinrichtung, in diesem Fall der Tempomat, zum Fahrerassistenzsystem mit Sicherheitsfunktionen [88, S.425].

Weitere, zu diesem Feld gehörende, Einrichtungen sind die **LDW** (Lane Departure Warning) sowie die **LKS** (Lane Keeping Support) Systeme [15, S.712]. Sie warnen den Fahrer beim unbeabsichtigten Verlassen der Fahrspur bzw. ergreifen geeignete Gegenmaßnahmen, um dem entgegen zu wirken. Auch die Sensoren dieser Applikationen können für das „PreCrash“ System genutzt werden, um somit die Sicherheitssysteme des Fahrzeugs früher und präziser ansteuern zu können [15, S.713].

Zu den Fahrerassistenzsystemen zählen des Weiteren auch Funktionalitäten am Fahrzeug, welche die Einschätzbarkeit des Fahrzeugverhaltens für anderer Verkehrsteilnehmer verbessern. Dazu gehören unter anderem der Fahrtrichtungsanzeiger, das mehrstufige Bremslicht und auch das Tagfahrlicht [70, S.23].

### 3.1.2 Passive Sicherheit

Bei der passiven Sicherheit handelt es sich um Maßnahmen, welche die Unfallfolgen mindern sollen [15, S.711]. Diese Phase reicht dabei vom ersten Kontakt mit dem Kollisionspartner bis zum Stillstand des Fahrzeugs und der abschließenden Ruhelage aller Betroffenen. Sie enthält mindestens eine Kontakt- und eine Auslaufphase [15, S.712]. Somit beinhaltet die passive Sicherheit alle nach dem Erstkontakt während des Unfalls ablaufenden Phasen, woraus sich der englische Begriff, „secondary safety“, ableitet [15, S.711].

Im Zuge der passiven Sicherheit wird versucht, die Wirkungen eines nicht mehr abzuwendenden Unfalls auf die Beteiligten unter maximaler Nutzung der physikalischen Spielräume zu minimieren [70, S.21]. Die dabei angewendeten Schutzmaßnahmen sollen Verletzungen bei den am Unfall beteiligten Personen, sowohl Fahrzeuginsassen als auch äußere Verkehrsteilnehmer, vermeiden bzw. helfen die Unfallfolgen zu vermindern [41, S.143]. Basis für die Entwicklung neuer Systeme bilden die Erkenntnisse aus der Unfallforschung. Sie setzt sich aus der Unfalldatenerhebung und -statistik sowie der Unfallrekonstruktion und -analyse zusammen [41, S.7].

Bezogen auf die in Abbildung 3-1 genannten Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit beziehen sich die Maßnahmen der passiven Sicherheit in der Gruppe der Verkehrsteilnehmer auf die Motivation zur Benutzung von Schutzeinrichtungen, die Erste-Hilfe-Ausbildung sowie den Versicherungsschutz. Auf den Bereich der Verkehrsmittel wird durch den Selbst- und Kontrahentenschutz Einfluss genommen [15, S.712]. Der Selbst-

schutz umfasst dabei Einrichtungen, die dem Sicherheitsbedürfnis des Fahrzeugs und dessen Insassen dienen. Hingegen ist der Kontrahentenschutz auf das Sicherheitsbedürfnis des Unfall-„Partners“, also des Kollisionskontrahenten, ausgerichtet, um dessen Verletzungsrisiko zu minimieren [41, S.144]. Bezogen auf die Verkehrswege umfasst die passive Sicherheit die Straßenrand-Entschärfung, die Sicherung der Unfallstelle und das Rettungswesen [15, S.712].

Wie auch bei der aktiven Sicherheit beziehen sich die folgenden Ausführungen größtenteils auf den Bereich der Verkehrsmittel, somit der Fahrzeugsicherheit.

### **Schutzsysteme**

Das wesentliche Element der passiven Sicherheit und der integrale Bestandteil eines Fahrzeugs ist die Karosserie. Diese besitzt Schnittstellen zu allen übrigen Sicherheitskomponenten des Fahrzeugs und muss zeitgleich eine Vielzahl an kundenrelevanten Eigenschaften, wie z.B. Korrosionsschutz, Betriebsfestigkeit oder auch Schwingungskomfort erfüllen [41, S.389].

Die nach außen wirkenden Sicherheitskomponenten beinhalten die Gestaltung der Außenflächen und der Bauform sowie das Deformationsverhalten der Kontaktstruktur. Die **Deformationsstruktur** übernimmt dabei nicht nur die Funktion des Selbstschutzes sondern auch die des Kontrahentenschutzes. Sie wirkt sich somit sowohl auf die äußere als auch auf die innere Sicherheit aus [41, S.144f]. Unter dieser passiven Maßnahme sind konstruktive Merkmale des Fahrzeugs zu verstehen, zu denen u.a. der Vorderbau inklusive Stoßfänger und die Motorhaube gehören [65, S.274]. Sie wandeln die kinetische Energie des Aufpralls in Deformationsarbeit um [41, S.166].

Der wichtigste Vertreter der passiven Sicherheit ist der **Gurt**. Keine andere Einzelmaßnahme hatte bislang eine derart hohe Effizienz hinsichtlich der Verbesserung der Fahrzeugsicherheit zur Folge [41, S.170]. Seine Aufgabe ist es, die Insassen im Falle eines Aufpralls im Sitz zurückzuhalten, wodurch sie frühzeitig an die Verzögerung des Fahrzeugs gekoppelt werden. Plötzliche Belastungsspitzen durch extrem hohe Verzögerungswerte, welche zu schweren Verletzungen führen können, werden somit vermieden. Unabhängig davon verhindert der Gurt den ungebremsten Aufschlag der Insassen auf die Innenverkleidung des Fahrzeugs [88, S.357].

Ein weiteres bedeutendes Element des Insassenschutzes ist der **Airbag**. Mit dessen Hilfe wird der Insasse durch einen sich im Falle eines Aufpralls aufblasenden Luftsack am Kontakt mit der Innenausstattung des Fahrzeugs gehindert und „sanft“ verzögert [41, S.187]. Die klassischen Vertreter sind die Frontairbags für Fahrer und Beifahrer, welche

hauptsächlich für den Schutz bei Frontalkollisionen verantwortlich sind. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl anderer Airbagarten, wie z.B. Seiten-, Kopf- und Knieairbags. Diese erhöhen nicht nur weiter die Schutzwirkung bei Frontalunfällen, sondern bieten z.B. auch zusätzliche Sicherheit beim Seitenaufprall [41, S.190], [88, S.358]. Die Auslösung der verschiedenen Airbags wird im Allgemeinen durch ein zentrales Steuergerät kontrolliert. Es beinhaltet verschiedene Beschleunigungssensoren und kann durch weitere externe Signalaufnehmer zur genaueren Detektierung der Deformationen noch erweitert werden. Registrieren diese Sensoren eine für einen Aufprall typische Verzögerung, so werden durch die Steuerelektronik die entsprechenden Airbags ausgelöst [65, S.263ff], [88, S.358].

In modernen Fahrzeugen bilden die Gurte und Airbags ein sorgfältig aufeinander abgestimmtes Insassenschutzsystem mit dessen Hilfe das Verletzungsrisiko der Fahrzeuginsassen bei unterschiedlichsten Aufprallarten minimiert werden kann [41, S.188], [88, S.360].

Weitere besonders bei Front- und Heckunfällen sehr wichtige Schutzeinrichtungen sind die Kopfstützen. Sie bilden ein wirksames Sicherheitselement zur Vermeidung von Halswirbelsäulenverletzungen [41, S.203].

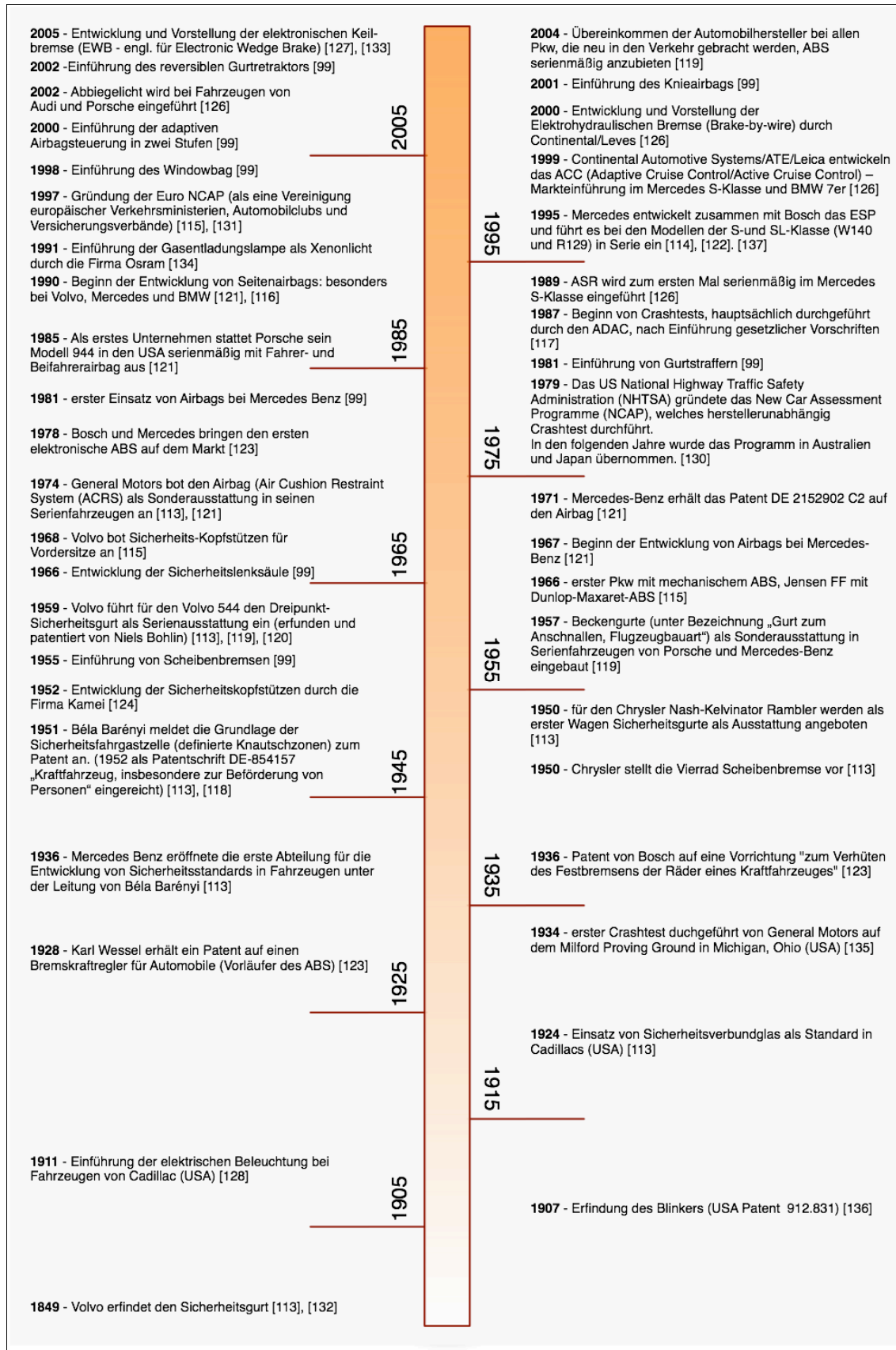
### **3.2 Meilensteine der Fahrzeugsicherheit bis 2008**

Die ersten Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit reichen zurück bis zu den Anfängen des Automobils. Durch die geringe Verkehrsdichte, die niedrigen gefahrenen Geschwindigkeiten und nicht zuletzt die noch geringe Verbreitung des Automobils gab es nur wenig Verlangen nach mehr Sicherheit im Bereich der Verkehrsmittel und -wege. Dennoch kam es zu immer mehr Unfällen in Verbindung mit Kraftfahrzeugen. Um diesem Trend entgegen zu wirken, kam es zu ersten Überlegungen hinsichtlich neuer Vorschriften im Bereich der Verkehrsteilnehmer. Diese mündeten 1910 in der Einführung der allgemeinen Führerscheinplicht und einer damit verbundenen obligatorischen Prüfung der Fähigkeiten zum Führen eines Kraftfahrzeugs [54], [46]. Durch die hohen Preise der damaligen Fahrzeuge sowie durch die beiden Weltkriege und die Weltwirtschaftskrise kam es zunächst zu keiner größeren Verbreitung des Automobils.

Erst mit der zunehmenden Motorisierung breiter Bevölkerungsschichten in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden zunehmend Fortschritte durch beginnende Forschungen im Bereich der Verkehrsmittel erzielt. Mit der Weiterentwicklung der Fahrzeuge und deren steigender Leistung wurden immer höhere Geschwindigkeiten möglich. Die öffentliche Diskussion in den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts führte zu ersten

gesetzlichen Vorschriften hinsichtlich der Sicherheitsausstattung der Fahrzeuge. Zu diesem Zeitpunkt begannen die Automobilhersteller zu verstehen, dass eine steigende Sicherheit der Fahrzeuge nicht nur Kosten in Entwicklung und Produktion verursacht, sondern vielmehr auch als verkaufsfördernde Maßnahme angesehen werden kann, da die Kunden immer mehr Wert darauf legen.

Bis zum heutigen Tag wird sowohl die aktive als auch die passive Sicherheit ständig weiterentwickelt. Die Abbildung 3-2 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugsicherheit bis zum heutigen Tag, beginnend mit den Anfängen des Automobils.



**Abbildung 3-2 – Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit [eigene Darstellung nach 99 und 141 – 165]**

### 3.3 Entwicklung der Verkehrsunfälle und deren Folgen bis 2008

Die Anzahl der Verkehrsunfälle und deren Auswirkungen haben sich im Laufe der Automobilgeschichte stark verändert. Vor allem die Zahl der getöteten Menschen unterlag hohen Schwankungen, welche nicht nur auf einzelne Ursachen zurückgeführt werden können. Die Gründe hierfür sind vielmehr sehr vielschichtig und haben nicht nur mit der reinen Fahrzeugsicherheit zu tun. Der folgende Abschnitt gibt eine kurze Zusammenfassung dieser Entwicklung und zeigt auf, wodurch letztendlich die positive Entwicklung hervorgerufen wurde.

#### 3.3.1 Statistik

Im Jahre 1953 wurde mit der zentralen statistischen Erfassung der Unfälle im Straßenverkehr sowie deren Auswirkungen begonnen [15, S.711]. Die Statistik dokumentiert einen starken Anstieg der Unfallzahlen, welche im Jahre 1970 mit 21.233 Verkehrstoten ihren Höhepunkt erreichte [42, S.7], [22, S.6]. Von diesem Zeitpunkt an sind die Zahlen der bei Verkehrsunfällen getöteten Personen konstant gesunken, bis zu dem heutigen Wert von 4958 Menschen im Jahre 2007. Dies entspricht einer Abnahme der im Straßenverkehr getöteten Menschen seit 1970 um ca. 69 Prozent [42, S.7]. Der Rückgang der tödlichen Unfallfolgen vollzog sich trotz einer gleichzeitigen rasanten Zunahme des Fahrzeugbestandes von 4.764.775, 1953 über 20.816.802, 1970 bis auf aktuell 57.441.559 Kraftfahrzeuge im Jahre 2007 [73, S.20f]. Die allgemeine Verkehrssicherheitslage hat sich demzufolge trotz wachsender Mobilisierung im längerfristigen Trend deutlich verbessert [42, S.7]. Nach Untersuchungen des Statistischen Bundesamtes von 1994 handelt es sich bei 48 Prozent der Getöteten nicht um Fahrzeuginsassen [47, S.796], [65, S.274].

Die Zahlen für die Unfalltoten und den Fahrzeugbestand beziehen sich dabei auf das gesamte Deutschland, wobei vor 1990 die jeweiligen Werte aus dem Ost- und Westteil des Landes zusammengerechnet wurden.

Abbildung 3-3 zeigt den grafischen Verlauf dieser Entwicklungen. Zudem werden die Einführungen der wichtigsten gesetzlichen Vorschriften mit der Entwicklung der Unfalltotenzahl in Verbindung gebracht. Auf dieser Abbildung nicht vermerkt sind die Gesamtanzahl der polizeilich gemeldeten Unfälle sowie die Menge der dabei verletzten Personen. Die erfassten Zusammenstöße mit Personenschaden gingen seit 1979 nur leicht, um 20 Prozent, auf 338.800 Ereignisse 2004 zurück [35, S.36], [42, S.7]. Diese stellen jedoch nur 15% der gesamten in diesem Jahr erfassten Unfälle dar [35, S.36].

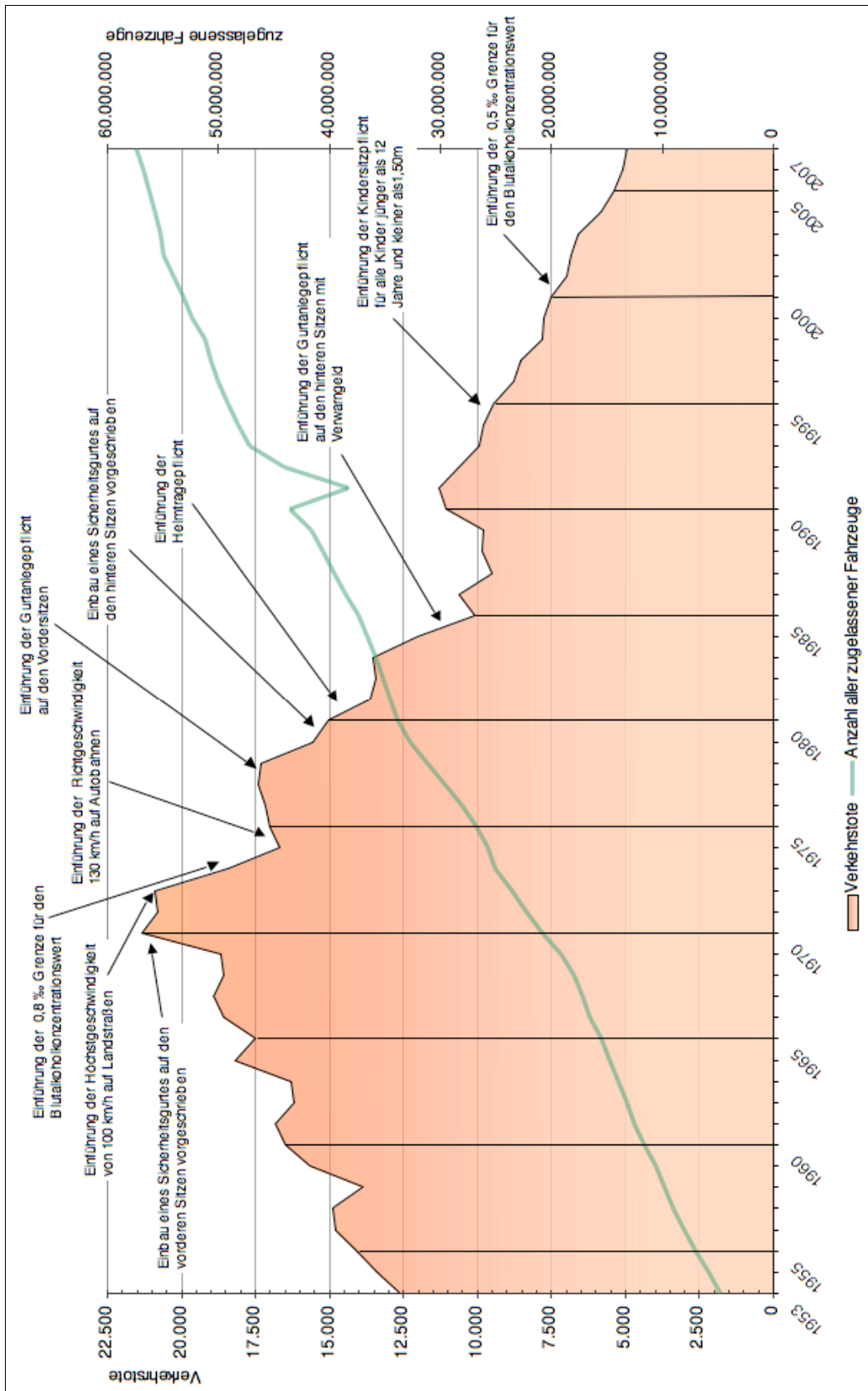


Abbildung 3-3 – Entwicklung Verkehrstote und Fahrzeugbestand in Deutschland von 1953 bis 2007 [modif. nach 73, S.6 und 73, S.20f]

### 3.3.2 Gründe der positiven Entwicklung

Im Bereich der Fahrzeugsicherheit wurden erhebliche Fortschritte erreicht. Wichtige Schritte umfassen u.a. die Weiterentwicklungen der passiven Sicherheit, wie des Gurtes, der Knautschzone mit stabiler Fahrgastzelle, des Airbags sowie besonders in den letzten Jahren die der elektronischen Einrichtungen der aktiven Sicherheit, wie ABS und ESP [35, S.37], [47, S.796].

Die Entwicklung des Gurtes ist die bislang wichtigste Sicherheitsmaßnahme im Fahrzeugbau. Schätzungen zufolge hat die Einführung des Sicherheitsgurtes in Europa über 1.000.000 Menschenleben gerettet [70, S.21], [41, S.170]. In Verbindung mit dem Airbag für Fahrer und Beifahrer wurde die mögliche Verletzungsschwere der Insassen im Kopf-, Hals- sowie Thoraxbereich weiter deutlich reduziert [47, S.797]. Bezogen auf die Einrichtungen der aktiven Sicherheit haben Untersuchungen gezeigt, dass die Häufigkeit von Fahrnfällen, d.h. der Fahrer verliert die Kontrolle, bei den mit ESP ausgerüsteten Fahrzeugen signifikant gesunken ist [88, S.406].

Die Gründe für den Rückgang der im Straßenverkehr getöteten Personen sind jedoch vielfältig und beschränken sich nicht nur auf die Fortschritte im Bereich der Verkehrsmittel. Auch die beiden anderen in Abbildung 3-1 dargestellten Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit haben einen großen Einfluss auf diese positive Entwicklung. Vor allem die Verbesserungen im Umfeld des Straßenbaus sowie die Einführung gesetzlicher Vorschriften, wie Höchstgeschwindigkeiten und Gurtanlegepflicht haben zu den entscheidenden Fortschritten beigetragen. Hinzu kommt die Verdichtung der Rettungskette mit einer einhergehenden Weiterentwicklung der Notfallmedizin sowie die erfolgreiche Verkehrserziehung und Aufklärungsarbeit [35, S.37], [42, S.7], [70, S.19]. Der Fahrer ist und bleibt der wichtigste Akteur, da sein Verhalten für die Fahrzeugsicherheit essentiell ist. Aus diesem Grund wird auf ihn vor allem durch Ausbildung und gesetzliche Vorschriften Einfluss genommen [35, S.39]. Die in Abbildung 3-3 dargestellte Entwicklung der Verkehrstoten zeigt deutlich das Resultat dieser Einflussnahme.

### 3.4 Zukünftige Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit

Die Weiterentwicklung der Fahrzeugsicherheit ist ein stetiger Prozess. Nicht zuletzt sorgen immer strengere gesetzliche Anforderungen sowie die hohe Kundensensibilität in dieser Thematik für einen andauernden Innovationsdruck auf die Automobilhersteller [15, S.712], [41, S.401]. Dabei ist zu beobachten, dass zunehmend die aktiven und passiven Systeme miteinander verknüpft werden, wie z.B. bei Mercedes Benz' „Pre-Safe“ [88, S.406]. In diesem Fall sorgt ein stetiger Informationsfluss zwischen den beiden Bereichen in der „PreCrash“ Phase und die damit möglich werdende frühzeitige Adaption der Sicherheitseinrichtungen an die Gefahrensituation für eine Minimierung der Unfallfolgen [15, S.712].

Obwohl die Grenzen zwischen den Systemen der aktiven und passiven Sicherheit immer mehr verwischen, werden die zu den jeweiligen Bereichen zählenden Sicherheitseinrichtungen auch separat konsequent weiterentwickelt.

Auf dem Gebiet der **aktiven Sicherheit** unterliegen besonders die Fahr- und Fahrerassistenzsysteme einem ständigen Fortschritt. Bei ihnen ist eine zunehmende Verbreitung im Automobilssektor in den nächsten Jahren zu erwarten. Auf deren Weiterentwicklung basiert auch die Einführung des ersten vollständig autonomen Fahrzeugs, welches für das Jahr 2018 von General Motors geplant ist [9]. Wenn auch das autonome Fahrzeug in den nächsten 30 Jahren ein Sonderfall bleiben wird, so zeigt es doch, wie leistungsfähig die Assistenzsysteme sein werden. Mit ihrer Hilfe wird das Autofahren in Zukunft einfacher, durch die Entlastung des Fahrers von Routinetätigkeiten, und vor allem sicherer, durch die Vielzahl an elektronischen Sicherheitssystemen.

Auch innerhalb der **passiven Sicherheit** ist eine zunehmende Verknüpfung der einzelnen Komponenten untereinander zu erwarten. Dadurch wird eine für jeden Insassen individuelle und ideale Schutzwirkung erzielt, da Größe sowie Gewicht und Statur erfasst und bei der Auslösung der Schutzeinrichtungen Beachtung finden [41, S.200], [88, S.360], [88, S.389]. Des Weiteren wird durch den Einsatz präziserer Sensoren eine exakt auf den entsprechenden Aufprall abgestimmte Schutzwirkung der verschiedenen Airbags möglich [65, S.263], [88, S.359].

Die **Verknüpfung der aktiven und passiven Sicherheit** basiert auf der Fähigkeit des Fahrzeugs seine Umwelt wahrzunehmen und zu interpretieren. Dadurch kann es selbstständig die Entstehung gefährlicher Fahrzustände erkennen, den Fahrer bei deren Bewältigung unterstützen sowie, falls das Eingreifen erfolglos bleibt, die Schutzeinrichtungen des Fahrzeugs aktivieren [70, S.21], [88, S.407]. Grundlage für diese Fähigkeiten

sind sowohl leistungsfähige Sensoren, die ein schnelles Erkennen der Umwelt ermöglichen, als auch schnelle Steuergeräte, welche die eingehenden Daten in Bruchteilen von Sekunden auswerten und entsprechende Reaktion auslösen können [70, S.21] [8, S.167]. Bisher sind diesbezügliche Bemühungen an der fehlenden Robustheit und Verlässlichkeit der Erkennungsleistung gehemmt worden, jedoch ist deren Tauglichkeit für den Serieneinsatz in den nächsten Jahren zu erwarten [8, S.166].

Die von den Bordsensoren gesammelten Daten werden auch über die Fahrzeuggrenzen hinweg, in der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander, Verwendung finden. [70, S.25]. In Kombination mit den Telematikdiensten können diese Informationen genutzt werden, um z.B. dem Fahrer die zu erwartenden Straßenverhältnisse entlang seiner gewählten Route in Echtzeit darzustellen, und ihn vor eventuellen Gefahren zu warnen. Hierfür senden die Fahrzeuge frei verfügbar permanent Daten zu ihrer aktuellen Fahrsituation und den Straßenverhältnissen. Diese werden von anderen Fahrzeugen empfangen und für den Fahrer entsprechend aufbereitet. [72, S.5].

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der **Fußgängerschutz**, dessen Verbesserung vor allem durch eine vom europäischen Parlament erlassene Richtlinie gefordert wird [65, S.274], [88, S.367]. Diesbezüglich befinden sich derzeit verschiedene Konzepte in der Entwicklung. Sie reichen von der Anhebung der Motorhaube bei Kontakt, zur Vergrößerung des Deformationsweges, über den Einsatz von speziellen Polsterelementen aus Schaumstoff unter der Motorhaube bis zur Aktivierung eines zusätzlichen Airbags im Außenbereich des Fahrzeugs [41, S.190], [65, S.274], [88, S.367]. Im Moment ist zu erwarten, dass sich das System zur Vergrößerung des Deformationsweges durchsetzen wird, da dessen Verwirklichung in einem vertretbaren konstruktiven und finanziellen Rahmen möglich ist.

### **3.5 Auswirkung der Sicherheit auf die Langzeitnutzung von Fahrzeugen**

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass die Verbesserungen im Bereich der Sicherheit nicht nur auf den Weiterentwicklungen der Fahrzeuge beruhen. Dennoch wurden speziell in den letzten 36 Jahren, d.h. im Laufe des Untersuchungsrahmens der Sachbilanz-Studie, erhebliche Fortschritte erzielt. Dazu zählen vor allem der automatische Sicherheitsgurt, inklusive Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer, die verschiedenen Airbags, die stabile Fahrgastzelle mit definierter Knautschzone sowie die elektronischen Systeme wie ABS und ESP [15, S.712]. Viele der in diesem Zeitraum entwickelten Bauteile sind für die Sicherheit der heutigen Fahrzeuge essentiell und standardmäßig in fast

allen Neufahrzeugen zu finden. Ihre positiven Auswirkungen auf das Unfallgeschehen sind eindeutig zu erkennen, siehe Abbildung 3-3.

Verglichen mit einem 36 Jahre alten Fahrzeug, wie der Citroën DS, bieten aktuelle eine erheblich verbesserte Fahrzeugsicherheit. Die Wahrscheinlichkeit, in dem alten Fahrzeug im Falle eines Unfalls verletzt oder gar getötet zu werden, ist ungleich höher. Wird, bezogen auf den Untersuchungszeitraum der Sachbilanz-Studie, davon ausgegangen, dass es seit dem Kauf der Citroën DS keine Verbesserungen im Bereich der Fahrzeugsicherheit mehr gegeben hat, so würde die heutige Anzahl, der bei Verkehrsunfällen getöteten bzw. verletzten Personen, deutlich über den ermittelten Werten liegen. Zu einer, wenn auch deutlich geringeren, Abnahme wäre es dennoch durch die positiven Entwicklungen im Bereich der Verkehrsteilnehmer und -wege gekommen. Aufgrund fehlender Zahlen hinsichtlich der genauen jeweiligen Auswirkung der drei Teilbereiche der Fahrzeugsicherheit auf das Unfallgeschehen, kann nur eine solch relativ unpräzise Annahme getroffen werden.

Bezogen auf die Haltedauer von 36 Jahren fällt es in diesem Zusammenhang schwer, eine Gewichtung zwischen der relativ schlechten Sicherheit und der in der Sachbilanz-Studie erwiesenen Ressourcenschonung des alten Fahrzeugs vorzunehmen. Gesetzliche Vorschriften und die steigende Sensibilität der Kunden im Bereich der Fahrzeugsicherheit haben jedoch gezeigt, dass für weitere Verbesserungen der Sicherheit auch negative Auswirkungen, wie z.B. ein erhöhter Ressourcenverbrauch sowie die damit einhergehenden höheren Kosten, durch die Kunden in Kauf genommen werden [41, 402], [84, S.206], [26, S.02ff]. Somit kann der Fahrzeugsicherheit im Vergleich zur Ressourcenschonung eine größere Gewichtung beigemessen werden.

Die gezeigten negativen Auswirkungen der untersuchten Langzeitnutzung hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf das neue Fahrzeugkonzept anwenden. Vor allem im Bereich der passiven Sicherheit sind in den nächsten Jahren keine großen Entwicklungssprünge, sondern vielmehr Weiterentwicklungen zu erwarten. Hierbei sind die Verbesserungsmöglichkeiten, vor allem bei Kopf- und Rumpfverletzungen weitestgehend ausgeschöpft [47, S.797]. Der bei dem weiteren Fortschritt zu erwartende Sicherheitsgewinn wird, verglichen mit den Entwicklungen im Untersuchungszeitraum, signifikant kleiner.

Größere Neuerungen und Verbesserungen sind in den nächsten Jahren vor allem auf dem Gebiet der elektronischen Steuerungselemente der aktiven Sicherheit zu erwarten. Um trotz einer Langzeitnutzung von diesen laufenden Entwicklungen profitieren zu können, muss das neue Fahrzeugkonzept in Form eines modularen Aufbaus so ausgelegt

---

sein, dass neue Entwicklungen im Nachhinein in das Fahrzeug, durch den unkomplizierten Austausch einzelner Module und Bauteile, eingebaut werden können. Dieses nachträgliche „Upgrade“ der Sicherheitsmaßnahmen bezieht sich jedoch hauptsächlich auf die aktive Sicherheit. Die passive wird im vornherein durch die tragende Karosseriestruktur mit ihren definierten Deformationselementen festgelegt, wodurch nachträgliche Änderungen erschwert und durch die zu erwartenden hohen Einbaukosten kaum in Frage kommen werden. Im Innenraum besteht jedoch die Möglichkeit, Elemente der passiven Sicherheit, wie z.B. Airbags, nachträglich durch Weiterentwicklungen zu ersetzen.

Im folgenden vierten Kapitel wird das neue Fahrzeugkonzept mit seiner Sicherheitsausstattung detailliert beschrieben.

## 4 Entwicklung des Fahrzeugkonzepts

### 4.1 Derzeitige Entwicklungen und zukünftige Trends in der Fahrzeugtechnik

Schon heute lässt sich absehen, dass auch in Zukunft das Automobil die Bedürfnisse der Menschen in den Industriestaaten nach Individualität, Flexibilität und Freiheit erfüllen wird [72, S.5]. Obwohl die Nachfrage nach Neufahrzeugen langsam stagniert, nimmt der Wunsch der Kunden nach individuellen Fahrzeugen immer weiter zu [63, S.1]. Durch die Besetzung auch kleinerer Nischen werden die immer spezielleren Wünsche der Kunden erfüllt sowie neuer Bedarf geweckt und somit Wachstumspotentiale erschlossen [63, S.19]. Die Erhöhung der Modell- und Ausstattungsvielfalt führt auf der Herstellerseite gleichzeitig zu einer Verringerung der Losgrößen und zu höheren Wechselkosten in der Produktion [63, S.19f]. Zur Gewährleistung der steigenden Vielfalt basieren die Fahrzeuge zunehmend auf Produktplattformen bzw. austauschbaren Modulen [45, S.2]. Dies führt bei einer immer größer werdenden Modellvielfalt zu einer gleichzeitigen Kostensparnis, da Gleichteile bei verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt und untereinander ausgetauscht werden können, womit die Wechselkosten in der Produktion minimiert werden. Durch die sich laufend verändernden und weiter wachsenden Kundenansprüche an die zukünftigen Fahrzeuge nimmt die Dynamik der Entwicklung im Automobilbereich im Gegensatz zu vielen anderen Technologiebereichen immer weiter zu [72, S.40]. Diese Kundenansprüche beziehen sich neben dem Verlangen nach individueller werdenden Fahrzeugen im Wesentlichen auf den Komfort und die Sicherheit, welche in einer vereinfachten Fahrzeughandhabung resultieren, sowie die Leistung und den Verbrauch der Fahrzeuge [72, S.5].

Der zunehmende Einsatz der Fahrer unterstützender Fahrzeugsysteme geht auch mit der Veränderung der Altersstruktur einher. In Deutschland werden im Jahre 2030 rund 28 Millionen Menschen leben, die älter als 60 Jahre alt sind [72, S.6]. Auch diese Altersgruppe möchte mobil bleiben und der zunehmende Einsatz von **Assistenz- und Sicherheitssystemen** gibt ihnen die Möglichkeit dazu. Sie kompensieren die im Alter nachlassenden visuellen sowie motorischen Fähigkeiten, geben Unterstützung in vielen Fahrsituationen, erkennen frühzeitig Hindernisse bzw. Gefahrenmomente und können entsprechend darauf reagieren [72, S.28]. Diese Entwicklung wird zukünftig in dem so genannten „mitdenkenden“ Fahrzeug münden, wenngleich es in den nächsten 30 Jahren noch nicht zum Einsatz kommen wird [72, S.28].

Ein weiteres Feld der Fahrzeugelektronik, welches durch die Kunden immer mehr gefordert wird und dadurch ebenfalls im Fokus der Fahrzeugentwicklung steht, ist der Bereich **Multimedia**, **Komfortelektronik** sowie die **Telematikdienste** [38, S.25]. Der Bereich Multimedia wird dabei auch als Infotainment bezeichnet, welche nicht nur die Unterhaltung der Fahrzeuginsassen durch Audio- und Videoinhalte, sondern auch die Information in Form von Kommunikationsmöglichkeiten und Office-Anwendungen umfasst [88, S.478]. Bei der Komfortelektronik geht der Trend in Richtung Sprachbedienung des Fahrzeugs, mobiler Internetzugang und auch elektronische schlüssellose Zugangssysteme [38, S.25]. Das Feld der Telematik umfasst dabei verschiedene fahrer- und fahrerbezogene Anwendungen. Im Bereich fahrerbezogene Telematik ist das Navigationssystem zu nennen, welches im Wesentlichen drei Aufgaben erfüllt. Es bestimmt den derzeitigen Standort, berechnet anhand dieser Information die Route zu einem gewünschten Zielort und führt den Fahrer mit Hilfe akustischer und visueller Hinweise dort hin [88, S.463]. Der Bereich fahrerbezogene Telematik umfasst Techniken, die dem Fahrzeug direkt dienen. Dazu zählt zum Beispiel ein automatischer Notruf bei einem Unfall oder die Möglichkeit eines automatischen Updates der Fahrzeugsysteme [88, S.457]. Neben dem weiter fortschreitenden Einsatz von Elektronik im Fahrzeug rückt vor allem der **Umweltschutz** in den Fokus der Verbraucher und somit auch der Fahrzeughersteller. Dieses Thema umfasst den Klimaschutz inklusive Reduzierung der Schadstoffemissionen sowie die Ressourcenschonung, welche die Minderung des Kraftstoffverbrauchs einschließt [72, S.40]. Mit der Kraftstoffersparnis einher geht notwendigerweise der Fahrzeugleichtbau, bei dem eine Substitution von schweren durch leichte Werkstoffe durchgeführt wird. Zudem geht die Entwicklung hin zu kleineren Fahrzeugen und somit auch zu geringer dimensionierten Motoren, was ebenfalls zu vermindertem Verbrauch führt [1, S.175].

Die Entwicklungen im Bereich Umweltschutz gehen in verschiedene Richtungen, von denen nicht klar abzusehen ist, welche sich letztendlich durchsetzen wird. Zum einen werden die heutigen Technologien fortlaufend weiterentwickelt, z.B. effizientere Verbrennungsverfahren und Gewichtsreduktion durch Materialsubstitution, zum anderen befinden sich neue Technologien in der Entwicklung, z.B. Hybrid-Antriebe, Elektroantriebe, Brennstoffzellen und auch neuartige Werkstoffe. Der kommerzielle Erfolg von neuen Entwicklungen hängt nicht nur von deren technischen Eigenschaften ab, sondern in großem Maße von der Kundenakzeptanz. Wenn diese nicht gegeben ist, kann eine neue Technologie nicht erfolgreich am Markt eingeführt werden [72, S.9]. Die Kundenakzeptanz basiert jedoch nicht nur auf dem Marketing der Hersteller bzw. den Testergebnissen der Produk-

te in der Fachpresse, sondern vor allem auf der vorherrschenden allgemeinen Stimmung in der Bevölkerung. Als Beispiel sind hier Maßnahmen und neue Technologien zur Verminderung des Benzinverbrauchs der Fahrzeuge zu nennen. Schon Anfang der 1990er Jahre verfügte die deutsche Automobilindustrie über verschiedene technische Lösungen zur Erreichung dieses Ziels, z.B. Start-Stopp-Automatik beim Volkswagen Golf III „Ecomatic“, kleine Motoren mit verminderter Leistung oder auch den Hybrid Antrieb wie z.B. beim Audi „Duo“ [87, S.23], [48], [51]. Zu diesem Zeitpunkt fehlte jedoch die Kundenakzeptanz solcher Produkte, wodurch sich diese Innovationen nicht am Markt durchsetzen konnten und deren Entwicklung nicht weiter verfolgt wurde. Heute, 15 Jahre später, gibt es jedoch, hervorgerufen durch geänderte Rahmenbedingungen, wie z.B. steigende Kraftstoffpreise, eine erhöhte Nachfrage nach solchen Technologien. Diese kann allerdings von den deutschen Automobilherstellern nur unzureichend befriedigt werden. Die zuvor eingestellte Weiterentwicklung muss nun unter hohem finanziellem Aufwand in kurzer Zeit nachgeholt werden. Dieses Beispiel macht deutlich wie wichtig es ist, Weiterentwicklungen und neue Produkte entsprechend der Nachfrage auf den Markt zu bringen. Um den richtigen Zeitpunkt dafür zu ermitteln, müssen zukünftige Trends und Entwicklungen der Kundenwünsche frühzeitig erkannt und dementsprechend darauf reagiert werden.

#### 4.1.1 Zielkonflikte der Fahrzeugentwicklung

Während der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs treten eine Vielzahl von Zielkonflikten auf, welche die Automobilhersteller zu lösen versuchen müssen. Diese Bemühungen münden in einem bestmöglichen Mittelweg aus Anforderungen an das Fahrzeug und den technischen Lösungen.

Bei der Entwicklung muss somit ein sowohl für die Hersteller als auch für die Kunden befriedigender Kompromiss zwischen **Ökonomie**, **Technologie** sowie der immer wichtiger werdenden **Ökologie** gefunden werden, vgl. Abbildung 4-1.

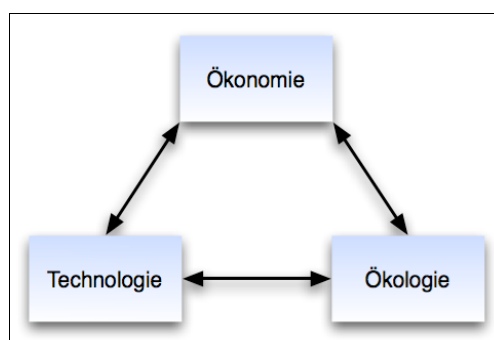


Abbildung 4-1 – Zielkonflikt in der Fahrzeugentwicklung [eigene Darstellung]

Die **Ökonomie** beinhaltet dabei die Verkürzung der Entwicklungszeiten, die kostenoptimierte Produktgestaltung und Fertigung sowie die kostenbewusste Werkstoffauswahl [63, S.70], [1, S.118]. Die Automobilhersteller reduzieren ihre Kosten zusätzlich durch eine zunehmende Konzentration auf das Kerngeschäft. In Kombination mit einer Verringerung der Fertigungstiefe und Auslagerung von Entwicklungs- und Produktionstätigkeiten hin zu Zulieferern werden zusätzliche Einsparungen erzielt [1, S.119].

Der Bereich der **Technologie** umfasst dabei weniger die Entwicklung neuer Technologien als vielmehr die Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Verfahren [1, S.118].

Im Bereich der **Ökologie** geht es um die Verminderung negativer Einflüsse des Automobils auf die Umwelt durch Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen sowie durch einen vermehrten Einsatz sekundärer Rohstoffe in der Produktion [20, S.13].

Bei der Erfüllung divergierender Anforderungen an das neue Automobil stehen diese Teilaspekte in einem Konfliktverhältnis zueinander. So gibt es z.B. im Bereich Ökologie einen Konflikt zwischen Fahrzeugsicherheit bzw. -komfort und der Verminderung des Kraftstoffverbrauchs. Zur Erfüllung dieses Ziels muss das Fahrzeuggewicht reduziert werden. Wie die Entwicklung der letzten Jahre gezeigt hat, ist das durchschnittliche Fahrzeuggewicht jedoch gestiegen, was mit den steigenden Anforderungen an die aktive und passive Sicherheit sowie den Komfort der Fahrzeuginsassen zusammenhängt [90, S.17]. Die Fahrzeughersteller müssen demzufolge versuchen, durch multikriterielle Entscheidungen eine für beide Seiten akzeptable Lösung zu finden [1, S.51]. Bei der Kompromissfindung hilft eine Gewichtung der einzelnen Anforderungen an das Fahrzeug entsprechend ihrer Relevanz. So wird auf dieses Beispiel bezogen für eine steigende Sicherheit ein hohes Gewicht in Kauf genommen. Bei der Gewichtung der einzelnen Punkte ist die Ökonomie von großer Bedeutung, da steigende Kostenbelastungen kaum an die Kunden weitergereicht werden können, wodurch Einsparungen im Unternehmen durchgeführt werden müssen [6, S.164].

#### **4.1.2 Integrierter Umweltschutz während Entwicklung und Produktion**

Das größer werdende Bewusstsein bei den Verbraucher sowie den Automobilherstellern für ökologische Aspekte, von der Begrenztheit der Ressourcen bis hin zu globalen Umweltbelastungen, verändert zunehmend die ökologische Sichtweise auf den Lebenszyklus des Automobils [1, S.64]. Es zeigt sich, dass keine der einzelnen Produktlebensphasen für sich allein betrachtet werden darf, es ist vielmehr nötig am Anfang der Entste-

hung eines Automobils mit der Betrachtung der Umweltwirkungen zu beginnen, und dann die Wechselwirkungen der einzelnen Phasen untereinander zu betrachten. In der Entwicklungsphase wird der Grundstein für die weiteren Umweltwirkungen des Fahrzeugs über seine gesamte Lebensdauer gelegt. Aus diesem Grund muss hier bereits mit dem Umweltschutz begonnen werden, da bei einem relativ geringen Aufwand ein beachtliches Ergebnis erzielt werden kann.

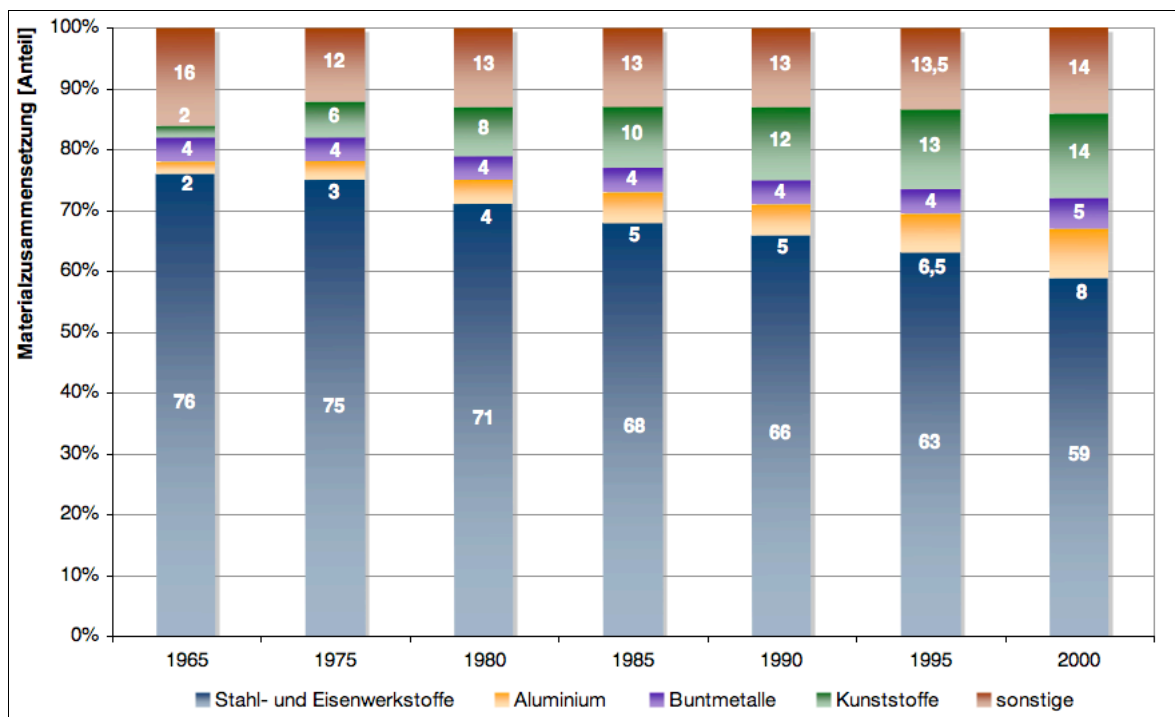
Das Ziel des integrierten Umweltschutzes ist somit in erster Linie die Vorsorge und Vermeidung anstatt Nachsorge. Er umfasst die Integration ökologischer Aspekte in die Phasen der Entwicklung sowie der Produktion mit allen Vor- und Folgestufen [69, S.19], [69, S.67]. Dabei ist auch der Zeitpunkt der Integration der Umweltgesichtspunkte in den Entwicklungsprozess von Bedeutung. Je früher dieser Prozess, auch „Design for Environment“ genannt, in die Entwicklung eingebunden wird, desto bessere Resultate lassen sich hinsichtlich der Umweltwirkungen des fertig gestellten Produktes erzielen [121, S.44].

Mit Hilfe von Ökobilanz- bzw. Sachbilanz-Studien können bereits während der Entwicklungsphase Produkte bzw. Lösungsansätze mit ähnlichem Grundnutzen miteinander verglichen werden, z.B. unterschiedliche Werkstoffe bei einem gleichen Bauteil. Auf Basis von relevanten Eigenschaften, wie Ressourcenverbrauch bzw. Emissionen, können die passenden Varianten und Werkstoffe ausgewählt werden [69, S.21], [91, S.18]. Durch diese Untersuchungen kann die Produkt- und Materialauswahl unter dem Blickwinkel der Umweltbelastung und somit der Kreislauffähigkeit optimal aufeinander abgestimmt werden [1, S.66].

Bei diesen Studien zeigt sich auch die informative Verknüpfung der Produktzyklusphasen Design und Konstruktion mit den Phasen der Nutzung sowie Entsorgung. In der Design- und Konstruktionsphase werden die Werkstoffe und Bauweisen der Produkte festgelegt und somit deren ökologisches Verhalten in der Nutzungs- und Verwertungsphase bestimmt [44, S.12f]. Umgekehrt können auch Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Verwertung von Altprodukten in die Entwicklung mit einfließen [44, S.13]. Durch spezielle Werkstoffauswahl bzw. -kombinationen oder auch angepasste Fügetechniken kann das Recyclingpotential eines Fahrzeugs deutlich erhöht werden [44, S.39]. Ein bekanntes Stichwort hierfür ist die demontage- sowie recyclinggerechte Konstruktion [1, S.175]. Dies führt zu einer Verringerung der Gesamtumweltbelastungen, da ein größerer Teil der eingesetzten Werkstoffe durch das Recycling zurückgewonnen und dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden kann.

## 4.2 Ressourcen und Werkstoffe im Fahrzeugbau

Das anhaltende Wachstum der Weltbevölkerung, die steigende weltweite Produktion sowie die damit zusammenhängenden anhaltenden Preissteigerungen auf den Energie- und Rohstoffmärkten sorgen für einen andauernden Anpassungsdruck [83, S.8]. Der Wandel zeigt sich auch in den Materialzusammensetzungen der Fahrzeuge. Diese haben sich in den letzten 36 Jahren stark verändert und diese Entwicklung hält weiter an [1, S.126]. Abbildung 4-2 zeigt die durchschnittliche Materialzusammensetzung von Pkws unabhängig von der Fahrzeugklasse.



**Abbildung 4-2 – Durchschnittliche Fahrzeugzusammensetzung 1965 - 2000 [eigene Darstellung nach 83, S.14 und 1, S.168]**

Grundsätzlich ist der prozentuale Anteil von Leichtmetallen an einem Oberklassefahrzeug wie der Mercedes S-Klasse deutlich höher als bei einem Fahrzeug der unteren Mittelklasse wie dem Volkswagen Golf V [85, S.21], [121, S.12]. Der Anteil von Stahl- und Eisenwerkstoffen am Gesamtgewicht verhält sich dabei entgegengesetzt. Trotz dieser fehlenden Unterscheidung nach Fahrzeugklassen, lässt sich eine allgemeine Entwicklung hinsichtlich der Werkstoffverteilung erkennen. Der Trend geht hin zum Einsatz leichter und zugleich stabilerer Werkstoffe, um das Fahrzeuggewicht zu verringern ohne die Sicherheit und den Komfort zu vernachlässigen.

Für die Erarbeitung des neuen Fahrzeugkonzeptes im weiteren Verlauf der Arbeit, ist eine Übersicht der derzeit im Fahrzeugbau am häufigsten eingesetzten Werkstoffe unabdingbar. Zugleich wird untersucht, inwiefern sich die jeweiligen Werkstoffe in Hinblick auf Gewichtsreduktion und Sicherheit für das neue Konzept eignen. Dabei ist auch die Umweltbelastung durch den Energie- und Ressourcenverbrauch in der Gewinnungs-, Verarbeitungs- und Recyclingphase von hoher Bedeutung.

Der folgende Teil der Arbeit gibt eine kurze Übersicht über die am häufigsten derzeit im Fahrzeugbau eingesetzten Werkstoffe. Die Ausführungen beinhalten Informationen zu deren allgemeinen Eigenschaften sowie deren Herstellung, Weiterverarbeitung und Recyclingmöglichkeiten. Im Hinblick auf das neu zu entwickelnde Fahrzeugkonzept wird zudem auf die Möglichkeiten des Leichtbaus eingegangen.

#### **4.2.1 Stahl- und Eisenwerkstoffe**

Seit den Anfängen des Automobils ist Stahl der prozentual am häufigsten verwendete Werkstoff im Fahrzeugbau [71, S.24]. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat der Anteil von Stahlwerkstoffen am Fahrzeuggesamtgewicht jedoch immer weiter abgenommen [34, S.10]. So ist zwischen 1985 und 1995 der durchschnittliche Anteil von 65 Prozent auf 60 Prozent gesunken [1, S.126]. Dieser Trend hält bis heute an und wird sich auch in Zukunft fortsetzen. Stahl kann jedoch nicht vollständig ersetzt werden, da ein bestimmter Anteil im Fahrzeug verbleiben muss [83, S.50].

#### **Leichtbau**

Besonders im Rahmen des immer weiter voranschreitenden Leichtbaus wird Stahl zunehmend durch andere Metalle bzw. spezielle Kunststoffe ersetzt. Diese Substitution führt zu einer Verringerung des Fahrzeuggewichts und somit des Verbrauchs und Schadstoffausstoßes [83, S.60].

Stahl selbst bietet an sich ebenfalls eine Vielzahl an Möglichkeiten der Gewichtseinsparung. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf dem Einsatz von hoch- und höchstfesten Stählen, die durch ihre geringen Wandstärken Gewicht einsparen und dennoch ein gutes Crashverhalten zeigen [19, S. 53], [1, S.133]. Die höherfesten Bleche werden vor allem im Karosserie- und Fahrwerksbereich eingesetzt [1, S. 126].

#### **Gewinnung, Herstellung und Recycling**

Das Element Eisen ist mit 4,2 Prozent das zweithäufigste Metall nach Aluminium im Erdmantel [67, S.188]. Es kommt nur selten gediegen in Form von Basalten vor. Meist findet es sich in chemischen Verbindungen zusammen mit Verunreinigungen wie Ton und Sand. Im Laufe der Aufbereitung der Eisenerze werden diese von den Verunreini-

gungen getrennt und für den Transport zum Stahlwerk aufbereitet [67, S. 189]. Im Hochofen wird das Erz in verschiedene nacheinander ablaufenden Prozessen eingeschmolzen und Roheisen gewonnen. Durch weitere Schmelzvorgänge wird aus dem Roheisen Stahl gewonnen. Stahl ist dabei eine Bezeichnung für alle ohne Nachbehandlung schmiedbaren Eisenwerkstoffe [67, S.200]. Bei der Weiterverarbeitung des Roheisens können durch Zugabe von verschiedenen Metallen spezielle Stahllegierungen hergestellt werden. Die entsprechend den Anforderungen hergestellten legierten Stähle werden gewalzt und zu Blechen oder Trägern weiterverarbeitet. Die Bleche können zu Karosserieteilen gepresst werden, welche in modernen Fahrzeugkarosserien Verwendung finden [19, S.52].

Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa 80 Prozent des im Automobilbau eingesetzten Stahls aus der Oxygenstahlproduktion, aus Roheisen, und 20 Prozent aus der Elektrostahlproduktion, aus recyceltem Eisen, stammen [83, S.20], [71, S.31].

Nach dem Ende der Nutzungsphase des Fahrzeugs kann ein Grossteil des eingesetzten Stahlwerkstofflich wieder verwendet werden [44, S.39]. Der so gewonnene Sekundärrohstoff wird jedoch größtenteils in anderen Stahlbranchen verwendet [71, S.31].

#### **4.2.2 Aluminiumwerkstoffe**

Der Werkstoff Aluminium gewinnt im Automobilbau immer mehr an Bedeutung [86, S.20]. Der durchschnittliche Anteil am Gesamtgewicht ist von zwei Prozent 1965 über 4,5 Prozent 1985 auf 6,5 Prozent 1995 angestiegen [1, S.168]. Besonders in Anbetracht des immer wichtiger werdenden Leichtbaus wird sein Anteil am Fahrzeuggewicht auch zukünftig weiter zunehmen.

Die positiven Eigenschaften von Aluminium sind das hohe spezifische Energieaufnahmevermögen, die guten spezifischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte sowie die hohe Korrosionsbeständigkeit [61, S.1], [67, S.136]. Zu den negativen Eigenschaften zählen die Abnahme der Zugfestigkeit, Dehngrenze und Härte sowie die Zunahme der Bruchdehnung und Brucheinschnürung bei hohen Temperaturen [67, S.136].

In Bezug auf die Verarbeitung von Aluminium wird zwischen Knet- und Gusslegierungen unterschieden [67, S.132]. Die Knetlegierungen kommen größtenteils bei Karosserieteilen zum Einsatz wo hingegen Gusslegierungen bei Motor-, Getriebe- und Fahrwerksteilen Verwendung finden.

#### **Leichtbau**

Aufgrund der niedrigen spezifischen Dichte und des damit verbundenen geringen Gewichts findet Aluminium in Bezug auf den Leichtbau immer häufiger Verwendung [1,

S.126], [83, S.40]. Es wird häufig zur Substitution von Stahl im Automobilbau eingesetzt. Ein grober Richtwert lautet, dass ein Kilogramm Aluminium ca. zwei Kilogramm Stahl ersetzen kann [83, S.36]. Ein Anwendungsgebiet ist der Einsatz von Aluminiumgusswerkstoffen anstatt von Grauguss für die Herstellung des Kurbelgehäuses des Motors bzw. der Getriebegehäuses [83, S.40], [1, S.126]. Auch bei anderen Komponenten des Fahrzeugs, z.B. im Fahrwerksbereich, bei Anbauteilen der Karosserie, Felgen und Teilen der Sitze, findet Aluminium zunehmend Verwendung und führt damit zu einer Reduktion des Fahrzeuggewichts [3, S. 49], [1, S.126], [1, S.133]. Die Verringerung der ungefederten Massen im Fahrwerksbereich tragen neben der eigentlichen Gewichtsreduzierung auch zur Erhöhung der Sicherheit und des Komforts bei [1, S. 126]. Neben der Substitution verschiedener Stahlbauteile können auch komplette Karosserien, wie z.B. der Audi „Space-Frame“, aus Aluminium gefertigt werden. Dadurch kann bei hoher Steifigkeit das Gewicht der Rohkarosserie um ca. 43 Prozent gesenkt werden [3, S.49]. Aus wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten ist es jedoch nicht immer sinnvoll reine Aluminiumstrukturen einzusetzen. Vielmehr liegt der Schlüssel zur erfolgreichen Gewichtsreduktion in der Mischung verschiedener Werkstoffe [3, S. 51].

### **Gewinnung, Herstellung und Recycling**

Primäraluminium wird aus Bauxit, welches aus Aluminiumoxid mit chemisch gebundenem Wasser besteht, durch Elektrolyse gewonnen [67, S.131]. Unter energetischen Gesichtspunkten ist die Herstellung von Primäraluminium bedeutend energieintensiver als die von Stahl [83, S.36]. Diese Art findet besonders in Knetlegierungen Verwendung. Durch die sehr energieintensive Herstellung des Primäraluminiums aus Bauxit sind auch die Abfälle der Energieerzeugung für die Ermittlung der Gesamtumweltwirkungen von Bedeutung [34, S. 11].

Der nach Ende der Nutzungsphase anfallende Aluminiumschrott des Fahrzeugs wird eingeschmolzen und zu Sekundäraluminium weiterverarbeitet [91, S.72]. Die Gewinnung von Flüssigsekundäraluminium aus Schrott ist energetisch sehr günstig und benötigt nur fünf Prozent der Energie, die für die Herstellung von Primäraluminium verbraucht wird [67, S.131]. Aufgrund der niedrigeren Schmelztemperatur wird beim Herstellen von Sekundäraluminium weniger Energie benötigt als beim Einschmelzen von Eisenschrott [71, S.31].

Ein Problem bei der Herstellung von Sekundäraluminium liegt allerdings in der sauberen Trennung von Knet- und Gusslegierungen vor dem Einschmelzen, da diese häufig im Fahrzeugbau kombiniert eingesetzt werden [91, S.72]. Das Recycling von Knetlegierun-

gen ist durch ihre relativ niedrigen zulässigen Anteile an Begleit- und Störelementen schwierig und kostspielig. Die Grundvoraussetzung dafür ist, dass das rücklaufende Material sauber nach Legierungen getrennt wird [91, S.72]. Da in den Verwertungsbetrieben die Fahrzeuge geshreddert und erst danach nach Werkstoffen sortiert werden, ist eine sortenreine Trennung von Knet- und Gusslegierungen kaum möglich. Aus diesem Grund werden aus Sekundäraluminium lediglich Gusslegierungen hergestellt [1, S.175].

Auf die Verwendung von Primäraluminium für die Herstellung von Knetlegierung kann demzufolge nicht verzichtet werden. Dennoch spricht unter Nachhaltigkeitsaspekten, vor allem im Hinblick auf mögliche Gewichtseinsparungen beim Fahrzeug sowie die energetisch günstige Herstellung von Sekundäraluminium, sehr viel für den Einsatz von Aluminium in Automobilbau.

### **4.2.3 Magnesiumwerkstoffe**

Durch das hohe Leichtbaupotential von Magnesium ist in Zukunft ein verstärkter Einsatz dieses Materials zu erwarten [67, S.128]. Die Vorteile liegen in der hohen Dichte und der Einsetzbarkeit für dünnwandige Spritzgussteile. Die Nachteile liegen in der schnellen Oxidation bei Kontakt mit einem edleren Metall sowie in der aufwändigen Formbarkeit durch walzen oder pressen, welche nur bei Temperaturen über 200°C gelingt. Zudem ist der Werkstoff relativ weich, wodurch sich Verschraubungen unter Belastung und bei über 100°C lösen können [13, S.40].

#### **Leichtbau**

Ein Karosseriebauteil aus Magnesium ist im Durchschnitt 50 Prozent leichter als eines aus Stahl und 25 Prozent leichter als eines aus Aluminium [13, S.39]. Magnesium wird neben der Verwendung für Karosseriebauteile und Profile auch für Gussteile, wie. z.B. Getriebegehäuse, Lenkräder sowie Sitzkomponenten, eingesetzt [67, S.138].

#### **Gewinnung, Herstellung und Recycling**

Der Rohstoff Magnesium ist in Mineralien, wie Magnesit, Dolomit oder auch in Salzen wie Karnallit enthalten. Die Gewinnung erfolgt elektrolytisch mittels Abscheidung aus einer Schmelze von Karnallit mit Flußspat bei ca. 700°C [67, S.137].

Die Verwertung der im Fahrzeugbau eingesetzten Knet- und Gusslegierungen gestaltet sich wie bei Aluminium als schwierig. Der Großteil der Magnesiumschrotte fällt nach dem Shreddern des Fahrzeugs an [1, S.175]. Aufgrund der sehr ähnlichen Eigenschaften, wie Dichte oder auch elektrische Leitfähigkeit, können die einzelnen Legierungen nach dem heutigen Stand der Technik nur schwer in sortenreine Einzelfractionen getrennt werden [91, S. 74].

#### 4.2.4 Weitere Leicht-, Bunt- und Sondermetalle

##### Zink

Im Fahrzeugbau findet Zink hauptsächlich in Form von Stahlblechverzinkung als Korrosionsschutz Verwendung. Durch sein ausgezeichnetes Formfüllungsvermögen eignet sich Zink auch für Druckgussteile [91, S.77].

Die Rückgewinnung aus verzinkten Stahlblechen wird hauptsächlich beim Einschmelzen des Stahlschrottes durchgeführt. Dabei verdampft das Zink fast vollständig und schlägt sich in oxidierter Form im Flugstaub nieder [91, S77].

##### Titan

Dieser Werkstoff zeichnet sich durch seine hohe Festigkeit aus. Zudem ist er leichter als Stahl und hitzebeständiger als Aluminium. Die Nachteile liegen in der bedeutend schwierigeren Bearbeitung sowie dem deutlich höheren Preis als Stahl oder Aluminium [83, S.49].

Titan wird aus einer Natrium-Titanchloridschmelze unter Schutzgas elektrisch abgeschieden [67, S.138]. Das Warmumformen durch Schmieden, Pressen oder Ziehen ist nur bei 700°C bis 1000°C bei entsprechend hohem Energieaufwand für die Erwärmung möglich. [67, S.139].

##### Platin

Die Platingruppenmetalle finden hauptsächlich in den Katalysatoren Verwendung. Dort sind sie auf den keramischen Katalysatorträger aufgebracht [91, S. 99].

Der Aufwand für die Herstellung von Primärplatin ist extrem hoch. Zur Gewinnung einer Tonne Platin müssen über 450.000 Tonnen Roherz abgebaut und in verschiedenen Anreicherungsverfahren verarbeitet werden [34, S.11]. Heutzutage sind 70 Prozent des im Fahrzeug eingesetzten Platins Sekundärplatin. Selbst unter Beachtung dieser hohen Recyclingquote werden für eine Tonne Platin, welche nur 30 Prozent Primärplatin enthält, ca. 140.000 Tonnen Roherz benötigt. Bezogen auf einen durchschnittlichen Platingehalt von 3,5 Gramm je Fahrzeug fallen allein bei der Verarbeitung 490 Kilogramm Abfall, noch ohne die Auswirkungen der Energiegewinnung und des Transports, an [34, S.11]. Hierdurch wird die hohe Bedeutung des Recyclings bei diesem seltenen Metall besonders deutlich.

##### Kupfer

Durch die meist nur geringe Konzentration von Kupfer im Gestein ergeben sich großen Abraummengen bei dessen Gewinnung [34, S.11].

Kupfer wird hauptsächlich in Form von elektrischen Leitungen und als Teil von elektrischen Motoren im Fahrzeug verbaut. Dies erschwert das Recycling des Werkstoffes, da er erst vom Isoliermaterial des Kabels getrennt werden muss [91, S.107]. Im Durchschnitt liegt die Rückgewinnungsquote bei ca. 30 – 50 Prozent [1, S.175].

#### 4.2.5 Kunststoffe

Ebenso wie die Leichtmetalle finden auch die Kunststoffe eine immer größer werdende Verwendung im Fahrzeugbau. Ihr durchschnittlicher Anteil am Gesamtgewicht stieg von ca. neun Prozent 1985 auf ca. 12 Prozent 1995 [1, S.128]. Diese Entwicklung hält bis zum heutigen Tag an und der Anteil der verschiedenen Kunststoffe wird weiter zunehmen.

Im Allgemeinen wird unter Polymerwerkstoffen, also Kunststoffen, ein aus monomeren Verbindungen hergestellter hochmolekularer Werkstoff mit mehr als 1000 Atomen je Molekül verstanden [67, S.153]. Die verschiedenen Arten werden nach ihrem mechanischen und thermischen Verhalten in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere eingeteilt [91, S.108], [121, S.15]. Bei Erwärmung gehen Thermoplaste in einen breiigen und zum Teil flüssigen Zustand über, wo hingegen die Duroplaste nach Durchlaufen eines plastischen Bereichs irreversibel aushärten [67, S.153].

Hauptsächlich werden die verschiedenen Kunststoffe beim Automobil im Bereich der Karosserie, z.B. Stoßfänger, Kühlergrill, Scheinwerfer, Unterbodenverkleidungen, im Bereich des Motors, z.B. Saugrohr und Zylinderkopphaube, sowie im Innenraum, z.B. Instrumententafel, Verkleidungen, Armlehnen und Sitzteile, eingesetzt [1, S.128f], [1, S.133]. Derzeitige Entwicklungen beschäftigen sich mit dem verstärkten Einsatz von Kunststoff im Bereich der Karosserie bei Fronthaube, Heckklappe und Kotflügel, bis hin zu einer Vollkunststoffkarosserie [1, S.129], [27, S.34].

Eine weitere Art ist der faserverstärkte Kunststoff. Dessen Einsatz in heutigen Fahrzeugen der Großproduktion beschränkt sich jedoch vorwiegend auf Kleinteile und nichtstrukturtragende Teile [66, S.10]. In Oberklassefahrzeugen und im Sportwagenbereich hingegen nimmt der Anteil dieser Kunststoffarten, wie z.B. Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe, insbesondere für hochbelastete Bauteile weiter zu [27, S.34].

Für den vermehrten Einsatz von Kunststoffen spricht die deutliche Gewichtsreduktion im Vergleich zu Metallbauteilen. Sie bieten zudem eine große Designfreiheit, wodurch auch spezielle Oberflächenformen möglich werden. Außerdem entsprechen sie den heutigen Sicherheitsanforderungen [66, S.11]. Hemmnisse für die zunehmende Verwendung von Kunststoffen liegen hauptsächlich an den Problemen während der Herstellung. Dazu

zählen unter anderem die teure Umstellung der Produktionsprozesse, technische Probleme bei Generierung einer Serienproduktion und Probleme bei der Beherrschung des Produktionsprozesses. Auch der noch fehlende Recyclingprozess zur Erfüllung der heute geltenden Verwertungsquote von 95 Prozent des Fahrzeuggewichts ist dem vermehrten Einsatz von Kunststoffen abträglich [91, S.13].

### **Leichtbau**

Bei der für die Gewichtreduktion notwendigen Substitution von Metallwerkstoffen durch leichtere Materialien werden beim Einsatz von Kunststoffen größtenteils Faserverbundwerkstoffe verwendet. Diese bezeichnen sowohl glasfaserverstärkte als auch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe [83, S.45]. Verglichen mit Aluminium zeichnen sich die Verbundwerkstoffe durch eine geringere Dichte bei höherer Festigkeit aus. Zudem fallen während der Produktion weniger Abfälle als bei den Metallwerkstoffen an [83, S.45]. Wohlwollende Schätzungen gehen von Gewichteinsparungen von bis zu 70 Prozent im Bereich der Karosserie, des Innenraums und des Fahrwerks durch den Einsatz von verschiedenen Kunststoffen aus [83, S.46]. Dennoch kann dieser Werkstoff Metalle nicht vollständig ersetzen, da bestimmte Teile des Fahrzeugs nicht aus Kunststoff gefertigt werden können, wie z.B. der Motor und die Abgasanlage [83, S.46]. In anderen, als realistischer anzusehenden Schätzungen, wird das bestehende technische Potential der faserverstärkten Kunststoffe im Großserieneinsatz auf Basis serienmäßig produzierbarer Teile auf bis zu 18 Prozent des Gesamtgewichts geschätzt. In Zukunft könnte sich dieser Anteil in der Großserie auf bis zu 25 Prozent erhöhen und damit einen großen Beitrag zur Treibstoffersparnis leisten [66, S.11].

### **Gewinnung, Herstellung und Recycling**

Kunststoffe werden im Allgemeinen durch eine schrittweise Verkettung von Monomeren zu langen Molekülgruppen, den Polymeren, hergestellt [67, S.153]. Bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen bildet eine dem zukünftigen Aussehen entsprechenden Form die Grundlage für den weiteren Herstellungsprozess. Darin werden als verstärkendes Element Kohlenstoff- oder Glasfasern in einen Grundwerkstoff, z.B. Duroplaste, eingebettet und unter hohem Druck und Temperatur miteinander verbunden [13, S.38].

Für die Verwertung von Kunststoffen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Sie kann werkstofflich, rohstofflich oder energetisch erfolgen [91, S.109]. Für die ersten beiden Varianten ist eine vorgeschaltete Sortierung und Aufbereitung der Kunststoffabfälle nötig. Dabei wird der Kunststoff wieder verwendet, wo hingegen er bei der energetischen Verwertung verbrannt wird. Obwohl das derzeitige Sekundärrohstoffaufkommen aus Altfahrzeugen

gering ist, gewinnt dieser Punkt durch den vermehrten Einsatz von Kunststoff im Fahrzeugbau im Rahmen der Altfahrzeugverwertung zunehmend an Bedeutung [44, S.43], [1, S.120].

#### **4.2.6 Weitere nichtmetallische Werkstoffe**

##### **Glas**

Das im Fahrzeug eingesetzte Glas wird in zwei Bereiche aufgeteilt, das Hohl- sowie Flachglas [91, S.116]. Je nach Anwendung kommt Einscheibensicherheitsglas im Bereich der Seitenscheiben sowie Verbundsicherheitsglas für Front- und Heckscheibe zum Einsatz [91, S.117]. Das Verbundsicherheitsglas besteht aus zwei Scheiben, die in der Mittellage durch eine spezielle Kunststofffolie verbunden sind und somit das Durchschlagen und Splintern der Scheibe verhindern sollen. Im Durchschnitt wiegen die in einem Fahrzeug verbauten Scheiben ca. 40 Kilogramm [1, S.174].

Aufgrund der hohen optischen Anforderungen an Autoscheiben werden diese nicht aus Glasrecyklat hergestellt, sondern nur aus Primärrohstoffen [91, S.117]. Der erneute Einsatz der recycelten Autoglasscheiben bietet sich daher nur für minderwertige Produkte außerhalb des Automobilbereichs an [1, S.174].

##### **Naturfasern**

Im Allgemeinen werden die Naturfasern, in Form von Holz- oder Baumwollfasern, nicht in reiner Form sondern in Verbindung mit anderen Komponenten wie Kunststoffen verarbeitet [6, S.175]. Die Anwendung dieser Verbundwerkstoffe beschränkt sich hauptsächlich auf den Innenraum in Form von Verkleidungsteilen, Hutablage, Sonnenblende, Sitzpolsterung, Formhimmel oder auch Kofferraumauskleidung. Zusätzlich findet dieser Werkstoff vermehrt im Außenbereich, z.B. Radlaufverkleidung und Geräuschkapselungsdämmmaterial, Verwendung [3, S.54], [121, S.41].

Das Recycling dieser Verbundwerkstoffe ist derzeit noch sehr aufwändig und energieintensiv, was sich negativ auf die ansonsten positive Ökobilanz auswirkt [6, S.175].

#### **4.3 Modul- und Plattformbauweise**

In heutigen Automobilen nimmt die Teilevielfalt in Folge der zahlen Modelle und Varianten immer weiter zu, vgl. Kapitel 4.1. Durch mangelnde Übertragung bereits bestehender Teile in neue Fahrzeugmodelle wird ein Großteil der benötigten Bauteile neu konstruiert. Dies geschieht, obwohl funktionsgleiche Komponenten bereits in anderen Modellen eingesetzt werden und häufig nur einer geringfügigen Anpassung an das neue Fahrzeug bedürfen [63, S.24].

Ein möglicher komplexitätsreduzierender Ansatz ist die Vereinfachung des Aufbaus von Automobilen durch eine zunehmende Modularisierung bzw. der Einsatz modellübergreifender Fahrzeugplattformen [63, S.30]. Diese Methoden erlangen im Hinblick auf die laufend kürzer werdenden Entwicklungszyklen eine immer größere Bedeutung. Dort, wo nach neuen Modellvarianten und einer zunehmenden Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte verlangt wird, die schnell und zudem kostengünstig entwickelt und produziert werden sollen, wird zunehmend auf die se Bauweisen zurückgegriffen [27, S.32], [45, S.1]. Sie dienen in erster Linie der Senkung der Kosten für Fahrzeugderivate sowie der Verkürzung der Entwicklungszeiten neuer Automobile, durch den Einsatz von identischen Modulen und Plattformen für unterschiedliche Fahrzeuge [27, S.34], [43, S.928]. Nachfolgend werden jeweiligen Eigenschaften der Modul- sowie der Plattformbauweise erläutert. Resultierend aus den Anforderungen an das neu zu entwickelnde Fahrzeugkonzept, werden diese Bauweisen darin Verwendung finden.

#### **4.3.1 Fahrzeugmodul und -system**

Als Modul wird eine nach Montageaspekten abgrenzbare und einbaufertige Einheit bezeichnet, deren Bausteine physisch miteinander verbunden sind [63, S.39]. Eine grundlegende Eigenschaft ist die lokale Abgeschlossenheit was mit der Unabhängigkeit der einzelnen Module untereinander einher geht [63, S.39]. Dabei reicht die Definition von Fahrzeugmodulen je nach Blickwinkel von Kleinteilen bis hin zu komplexen Baugruppen [45, S.2]. Die Module verfügen notwendigerweise über eine Systemarchitektur, die durch gegenseitige Kompatibilität eine zuvor definierte Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten offen lässt [101, S.39].

Unter einem Fahrzeugsystem wird im Allgemeinen die Integration verschiedener Module zu einer funktionalen Einheit verstanden. Deren Elementen hängen, wie z.B. beim Klimasystem, nicht physisch zusammen [63, S.39].

Bei der Gestaltung modular aufgebauter Fahrzeuge, ist auf die Schaffung einer möglichst einfachen Produktstruktur zu achten. Sie ermöglicht eine unkomplizierte Anpassung an die geforderte Variantenvielfalt sowie den Abbau der Komplexität [63, S.74]. Die Definition eindeutiger äußerer Regeln während der Modulentwicklung hinsichtlich der Schnittstellen ermöglicht die Kombination der einzelnen Bauteile und Module zu einem Gesamtprodukt [63, S.82].

Durch Modularisierung können somit die Vorteile der Variantenvielfalt mit denen der Standardisierung kombiniert werden [63, S.79].

### **Vorteile**

Die Fahrzeugmodule müssen nicht für jedes Automobil neu entwickelt und konstruiert werden. Ihre standardisierte Gestaltung erlaubt es, dass sie in mehreren unterschiedlichen Fahrzeugbaukästen zum Einsatz kommen können. Dies gelingt durch eine eindeutige Definition der Schnittstellen, so dass sich die Module in die jeweilige Architektur des Fahrzeugs problemlos einfügen [63, S.75]. In der Endmontage der Fahrzeuge ergeben sich ebenfalls Vorteile. Die Module werden vormontiert an das Fließband geliefert, wodurch die Endmontage vereinfacht und die Montagezeit verkürzt wird [63, S.77]. Weitere Pluspunkte des zunehmenden Einsatzes von Modulen ergeben sich ebenfalls in der Nutzungsphase der Automobile. Durch sie ist eine Beschleunigung der Wartung und Reparatur erzielbar, da bei einem Defekt einzelne Module komplett getauscht werden und damit auf die langwierige Fehlersuche verzichtet werden kann [63, S.79]. Bei den ausgebauten Modulen besteht die Möglichkeit sie nach einer Reparatur bzw. Aufarbeitung wieder in andere Fahrzeuge einzubauen.

Im Hinblick auf das neu zu entwickelnde Fahrzeugkonzept ergeben sich ebenfalls Vorteile durch den Einsatz von Fahrzeugmodulen. Diese ermöglichen einen Austausch einzelner Bauteile entsprechend ihrer Lebensdauer, ohne die gesamte Gestaltung des Fahrzeugs zu ändern [63, S.76]. So kann z.B. nach einem bestimmten Zeitraum das gesamte Motormodul gegen ein neues ausgetauscht werden und somit auch ein neues Motorkonzept zur Anwendung kommen. Die äußere Gestaltung des Fahrzeugs sowie die anderen Module bleiben von diesem Austausch unberührt. Des Weiteren hat der Kunde im Laufe der Nutzungsphase die Möglichkeit zur weiteren Individualisierung seines Fahrzeugs durch den Austausch weiterer Module, wie z.B. der Instrumenteneinheit im Fahrzeuginnenraum [63, S.79].

### **Nachteile**

Durch die in der Entwicklung der Module festgelegten Schnittstellen untereinander, ist eine starre Architektur vorgegeben. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der Einführung von Innovationen führen, da diese Neuerungen nur im Rahmen der zuvor festgelegten Modulgrenzen und Schnittstellen erfolgen können. Im Bezug auf die Gesamtproduktleistung kann es durch die zunehmende Modularisierung ebenfalls zu Nachteilen kommen, da sie deren Optimierung entgegensteht. Jedes Modul, welches in verschiedene Fahrzeuge eingebaut werden kann, ist immer entsprechend der höchsten anzunehmenden Belastung dimensioniert. Wenn diese hohen Belastungen bei einem Fahrzeug jedoch nicht

auftreten ist das Modul überdimensioniert, was zu unnötigen Kosten sowie Gewicht führt [63, S.82].

### **4.3.2 Fahrzeug- und Produktplattform**

Die Fahrzeug- bzw. Produktplattform bezeichnet eine Kombination aus zusammengehörigen Komponenten oder Teilen welche eine gemeinsame Struktur formen. Sie bildet die Basis für die Entwicklung und Produktion unterschiedlicher Erzeugnisse. Die Plattform ist dabei ein Basismodul, welches für alle Varianten eines auf ihr basierenden Produktes gleich ist. Zudem kann dieses Basismodul produktübergreifend Verwendung finden und somit einen wesentlichen Bestandteil aller Mitglieder einer auf ihr basierenden Produktfamilie bilden [63, S.64]. Dabei ist zwischen einer Plattform und Produkten zu unterscheiden, die wegen der Teilestandardisierung bzw. Gleichteilstrategie eine Anzahl von Komponenten gemeinsam haben [63, S.66].

Im Bereich der Automobilindustrie wird die Bezeichnung Plattform im Allgemeinen für eine Kombination aus Bodengruppe, Fahrwerk, Antriebsstrang, Getriebe und anderen wichtigen Subsystemen verwendet. Die Fahrzeugplattformen werden so konstruiert, dass sie modellübergreifend in mehreren Fahrzeugvarianten und -arten eingesetzt werden können. Sie dienen dabei in erster Hinsicht der Vereinfachung des Produktportfolios und der Reduktion der internen Komplexität des jeweiligen Automobilherstellers [63, S.67].

#### **Vorteile**

Die Bestandteile einer Fahrzeugplattform müssen nur einmal entwickelt und danach nur an die jeweiligen Fahrzeugtypen angepasst werden. Insbesondere die kosten- und investitionsintensiven Module wie Antriebsstrang und Fahrwerk können nach einer einmaligen Entwicklung in mehrere Fahrzeuge integriert werden [63, S.71]. Des Weiteren sind die Lieferantenverbindungen schon etabliert und der Produktionsprozess zur Erstellung der Bestandteile ist bereits eingerichtet [63, S.68]. Die Produktplattformen erlauben dabei eine hohe Varietät hinsichtlich unterschiedlicher auf ihr basierenden Fahrzeuge, ohne dabei einen gleichzeitigen Anstieg der Komplexität oder auch der Kosten in Kauf nehmen zu müssen, da auf einer Plattform unterschiedliche Produkte basieren können [63, S.70]. Dies erweist sich besonders bei der Erweiterung der traditionellen Produktportfolios hin zu Nischenmodellen von Vorteil.

#### **Nachteile**

Weniger ein Nachteil als eine Schwierigkeit in der Entwicklung ist die Differenzierung der unterschiedlichen auf einer gemeinsamen Produktplattform aufbauenden Fahrzeuge. Der

Kunde muss trotz der gleichen Basis die verschiedenen Fahrzeuge in ihrem Fahrverhalten unterscheiden können [63, S.72].

#### **4.4 Wege zur Kraftstoffersparnis und Verringerung der Schadstoffemissionen**

Die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs gerät immer weiter in den Fokus der aktuellen Fahrzeugentwicklung. In den letzten Jahren hat das Bewusstsein in der Bevölkerung hinsichtlich der schädlichen Einflüsse des Automobilverkehrs auf das globale Klima immer weiter zugenommen. Den Ausschlag für eine steigende Nachfrage nach verbrauchsreduzierten Fahrzeugen gaben jedoch weniger die umweltpolitischen Einstellungen der Kunden als vielmehr die in den letzten Jahren anhaltend rasant gestiegenen Rohstoffpreise [30]. Durch die daraus resultierenden und für jeden Autofahrer direkt spürbaren Auswirkungen werden zunehmend Maßnahmen zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von den Automobilherstellern gefordert. Diese Forderungen zeigen sich zum einen im direkten Kaufverhalten der Kunden, als auch in den gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich des Schadstoffausstoßes [68, S.77], [25].

Die derzeitige Entwicklung hin zu einem zunehmenden Umweltbewusstsein wird hauptsächlich durch die jeweiligen persönlichen finanziellen Auswirkungen des steigenden weltweiten Rohstoffbedarfs bei den Verbrauchern hervorgerufen. Dieser Prozess gibt starke Impulse zu der Entwicklung von Fahrzeugen mit verringertem Verbrauch. Damit einher geht auch eine zunehmende Akzeptanz von kleineren und leichteren Fahrzeugen, welche über einen geringeren Verbrauch verfügen. Besonders deutlich wird dies z.B. am Einbruch der Verkaufszahlen von großen SUVs und Pick-Ups in den USA im ersten Halbjahr 2008 [52]. Auch in Deutschland ist ein zunehmender Trend zu kleineren Fahrzeugen bzw. kleineren Motorisierungen zu erkennen, wenngleich diese Entwicklung erst seit dem starken Preisanstieg für Benzin und Diesel begonnen hat [21]. Die laufende Tendenz bietet zudem ein Potential für den Erfolg neuer Fahrzeugkonzepte, die beispielsweise einen geringen Verbrauch mit einem angemessenen Raumangebot bei einem akzeptablen Preis zu verbinden wissen. Diese Anforderungen soll auch, das im weiteren Verlauf der Arbeit zu entwickelnde, neue Fahrzeugkonzept erfüllen.

Die technischen Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion umfassen Verbesserungen der Motorentechnik sowie der Fahrwerks- und Karosserietechnik hinsichtlich des Fahrzeuggewichts und der Fahrwiderstände [72, S.34], [68, S.50].

### **Gründe für den Kraftstoffverbrauch**

Zum Betrieb eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor wird Kraftstoff benötigt, wodurch der Verbrauch in die Nutzungsphase fällt. Wie schon im Rahmen der Sachbilanz-Studie erläutert, liegt dieser Bereich im Großen und Ganzen außerhalb der Einflussnahme des Fahrzeugherstellers, vgl. Kapitel 2.2.4. Durch technische Maßnahmen zur Reduktion des benötigten Kraftstoffs kann der Produzent nur die Voraussetzungen für einen niedrigen Verbrauch liefern. Der reale Kraftstoffverbrauch und der damit verbundene Schadstoffausstoß hängen stark von der Fahrweise des Nutzers sowie den konkreten Einsatzbedingungen wie Wetter und Fahrbedingungen ab und können vom Fahrer positiv wie auch negativ beeinflusst werden [71, S.23], [72, S.34]. Neben den im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläuterten fahrzeugspezifischen Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion ist demzufolge auch die Nutzungsweise des Fahrzeugs von entscheidender Bedeutung. Diese kann mitunter mehr bewirken, als die mit hohem finanziellen Aufwand entwickelten und bereitgestellten technischen Maßnahmen. Für die meisten Kunden ist die mit der Kraftstoffersparnis einhergehende Senkung des Rohstoffverbrauchs und die Reduzierung der Schadstoffemissionen eher ein positiver „Nebeneffekt“. Für die globale Umwelt hingegen ist dieser „Nebeneffekt“ von sehr großer Bedeutung, da unter anderem aus Gründen des Klimaschutzes eine deutliche Belastungsminderung erforderlich ist [68, S.8].

### **Emissionen und gesetzliche Vorgaben**

Die Senkung des spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes steht derzeit im Brennpunkt der Aufmerksamkeit der Bevölkerung und wird zudem zunehmend durch den Gesetzgeber reglementiert [25]. Da sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fahrzeugs direkt aus seinem Kraftstoffverbrauch ergeben, kann der Ausstoß durch eine Senkung des Verbrauches reduziert werden [83, S.26], [83, S.61]. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz CO<sub>2</sub>-armer Kraftstoffe, bei deren Verbrennung weniger CO<sub>2</sub> freigesetzt und somit der Ausstoß zusätzlich reduziert wird [68, S.9].

In den letzten Jahren hat der technische Fortschritt an den Fahrzeugen sowie Verbesserungen an der Kraftstoffzusammensetzung, hervorgerufen durch die verschärften gesetzlichen Anforderungen, zu einer erheblichen Reduktion der spezifischen Emissionen von Kraftfahrzeugen geführt [35, S.150]. Mittlerweile konnten die limitierten Abgasbestandteile, wie z.B. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und NM VOC, durch den hohen Entwicklungsstand der Abgasreinigung soweit reduziert werden, dass sich die Summe dieser Emissionen auf nur 0,6 Prozent der gesamten CO<sub>2</sub>-Masse im Abgas addieren [71, S.32]. Diese Entwicklung wird

auch in den nächsten Jahren, wenn auch mit verminderter Geschwindigkeit, weiter anhalten [35, S.150].

Bei den gesetzlichen Regelungen ist zwischen der Limitierung der Luftschadstoffe, wie z.B. CO, HC oder auch NO<sub>x</sub>, im Rahmen der „EURO Normen“ [53] und der zukünftigen Festlegung des maximalen Flottenverbrauches pro Hersteller über den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu unterscheiden. Die Flottenemissionen pro Fahrzeughersteller bei Neufahrzeugen sollen von durchschnittlich 162 g CO<sub>2</sub>/km im Jahre 2004 auf 120 g CO<sub>2</sub>/km im Jahre 2012 sinken. [36, S.2]. Hierbei entfallen 130 g CO<sub>2</sub>/km auf die Automobilhersteller und weitere 10 g CO<sub>2</sub>/km sollen durch bessere Reifen, effizientere Aggregate sowie Treibstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen eingespart werden [89].

Im folgenden Teil des Kapitels werden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs beschrieben. Diese Erläuterungen bilden eine Entscheidungsgrundlage für die Bauweise und das Antriebskonzept des neu zu entwickelnden Fahrzeugs.

#### **4.4.1 Motor und Antrieb**

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen beim Automobil ist eine Weiterentwicklung der Motorentechnik sowie der Abgasreinigung. Aufgrund des Funktionsprinzips sowie unabdingbarer, konstruktiver Merkmale moderner Otto- und Dieselmotoren ist eine komplett schadstofffreie Verbrennung nicht möglich [35, S.154]. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines Motors wird aus dem Verbrauch errechnet und richtet sich zudem nach dem verwendeten Kraftstoff. Die Verbrennung von einem Liter Dieselmotorkraftstoff bei einem Lambdawert von eins erzeugt 2.650 g CO<sub>2</sub> wo hingegen ein Liter Ottomotorkraftstoff in 2.370 g CO<sub>2</sub> resultiert [20, S.11]. Der Lambdawert kennzeichnet hierbei das Verhältnis von Luft zu Kraftstoff im Verbrennungsraum, welches im Normalfall 14,7 Kilogramm Luft zu einem Kilogramm Kraftstoff beträgt.

Zur Verminderung der ausgestoßenen Schadstoffe finden bei modernen Fahrzeugen hoch entwickelte Abgasreinigungssysteme in Verbindung mit innermotorischen Maßnahmen Verwendung [35, S.154]. Die ungereinigten Abgase des Motors enthalten Rückstände der unvollständigen Verbrennung, CO, HC, NO<sub>x</sub> sowie Partikel, die in Folge hoher Verbrennungstemperaturen entstehen [35, S.154]. Der Gesetzgeber gibt durch immer strenger werdende Auflagen für Neufahrzeuge die maximal zulässigen Mengen dieser unerwünschten Verbrennungsprodukte vor [53], vgl. Tabelle 2-3. Durch eine Koppelung dieser Vorgaben an die Höhe der Kraftfahrzeugsteuern, werden die Kunden angehalten ein schadstoffarmes Fahrzeug zu kaufen und die weitere Entwicklung solcher Pkws wird beschleunigt. Der zunehmende Einsatz von Abgasreinigungssystemen führt jedoch auch

zu einem unerwünschten Nebeneffekt, indem der Kraftstoffverbrauch ansteigt. Der Einbau eines Partikelfilters für Dieselmotoren führt zu einem durchschnittlichen Mehrverbrauch von 0,6 Prozent. Wird zudem noch ein NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator verbaut, steigt der Verbrauch nochmals um durchschnittliche zwei Prozent [35, S.160]. Diese negativen Auswirkungen werden durch den Gesetzgeber in Kauf genommen, da für ihn die Reduktion der Schadstoffemissionen von höherer Bedeutung ist, als die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

Durch Weiterentwicklungen in der Motorentechnik und den Einsatz neuer bzw. veränderter Kraftstoffe wird versucht, den Verbrauch zu senken.

#### **4.4.1.1 Motorentwicklungen und -konzepte**

Trotz der anhaltenden Motorentwicklungen sind auch in Zukunft weitere Effizienzsteigerungen zu erwarten. Im Gegensatz zum Dieselmotor sind insbesondere beim Ottomotor durch eine verbesserte Verbrennungsführung zusätzliche Optimierungen möglich [68, S.10]. Dieselmotoren hingegen weisen grundsätzlich eine bessere Kraftstoffausnutzung auf, welche mit ca. 20 Prozent geringeren CO-Emissionen verbunden ist. Dieser Motortyp bedarf jedoch besonderen Maßnahmen zur Verringerung der Schadstoffemissionen [1, S.122]. Die Reduktion des Schadstoffausstoßes wird auch weiterhin im Schwerpunkt der innermotorischen Weiterentwicklung liegen, wo hingegen beim Ottomotor die Verbrauchssenkung im Mittelpunkt der Entwicklungen liegt [35, S.155]. Erreicht werden kann diese Kraftstoffersparnis durch eine Effizienzsteigerung im Teillastbereich [20, S.19]. Dazu wird beim Ottomotor zunehmend eine strahlgeführte Benzindirekteinspritzung mit einem so genannten Schichtladebetrieb und variabler Ventilsteuerung eingesetzt [35, S.155].

Schon seit mehreren Jahren wird beim Diesel- als auch beim Ottomotor zunehmend das Prinzip des „Downsizings“, also der Verkleinerung des Motors, angewandt [68, S.9]. Dabei kann durch weiterentwickelte Einspritztechniken kombiniert mit Turboladern und Kompressoren der Hubraum eines Motors bei gleichbleibender oder sogar steigender Leistung verringert werden [20, S.19]. Zudem wird durch die Verkleinerung des Motors sowohl Gewicht als auch Bauraum eingespart. Gegenüber 1990 werden bei neu entwickelten Motoren durch eine höhere Effizienz aus einem Liter Kraftstoff knapp 60 Prozent mehr Leistung gewonnen [20, S.13].

Weitere Motoroptimierungen umfassen z.B. den Einsatz einer voll variablen, piezoelektrischen Ventilsteuerung zur Reduzierung der Verluste im Ventiltrieb und Einsparung der komplizierten Mechanik [72, S.41].

Neben der Weiterentwicklung der derzeit verwendeten Motorarten befinden sich auch neue Konzepte in der Entwicklung, welche weitere Einsparpotentiale eröffnen. Besonders das viel versprechende HCCI (Homogeneous Combines Compression Ignition) Verfahren befindet sich derzeit in der Entwicklung bei vielen Automobilherstellern, unter anderen bei Volkswagen als CCS-Motor (Combined Combustion System). Die Technik basiert auf einer Kombination von Diesel- und Ottomotor. Dabei werden die Emissionswerte moderner Ottomotoren mit dem geringen Kraftstoffverbrauch und hohen Drehmoment von Dieselaggregaten verbunden [20, S.33]. Der Kraftstoff wird dabei vollständig verdampft, vorgemischt und zusammen mit Luft gasförmig in den Brennraum eingeleitet. Im Teillastbetrieb entzündet sich das homogene Luft-Kraftstoffgemisch durch die zunehmende Verdichtung selbstständig mit deutlich geringeren Spitzentemperaturen als bei gewöhnlichen Dieselmotoren. Dies resultiert in merklich gesenkten  $\text{NO}_x$ -Werten und verringertem Russausstoß [17, S.41], [56]. Nur beim Start und im Volllastbereich wird das Luft-Kraftstoffgemisch noch per Zündkerze angefacht [20, S.33].

#### 4.4.1.2 Antriebskonzepte

Im Zentrum der Entwicklung neuer Antriebskonzepte steht der Hybridantrieb. Dieses System verspricht signifikante Kraftstoffeinsparungen vor allem in der Stadt mit ihrem häufigen Stop-and-go-Verkehr, wobei diese Antriebsart deutliche Vorteile gegenüber reinen Verbrennungsmotoren hat [20, S.23], [72, S.42].

Bei diesem Antriebskonzept handelt es sich um einen gemischten Antrieb, bei dem ein Verbrennungs- sowie ein Elektromotor mittels verschiedener Techniken miteinander verbunden werden. Entsprechend der jeweiligen Fahrsituation sorgen sie einzeln oder kombiniert für den Antrieb des Fahrzeugs [20, S.23]. Beim **Parallelhybrid** kann der Elektromotor beispielsweise während des Anfahrens den gesamten Antrieb des Fahrzeugs übernehmen, wodurch der Verbrennungsmotor zu diesem Zeitpunkt abgeschaltet sein kann. Das Fahrzeug bewegt sich demnach völlig emissionsfrei [90, S.12]. Erst wenn mehr Leistung gefordert wird bzw. die Traktionsbatterie erschöpft ist, wird der Benzin- oder Dieselmotor wieder zugeschaltet und übernimmt den Vortrieb. Zudem kann der Elektromotor das Absinken des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors bei Teillast ausgleichen [78, S.258]. Es besteht auch die Möglichkeit, wie beim so genannten **Serienhybrid**, den Verbrennungsmotor mechanisch vom Antrieb zu entkoppeln, und ihn nur noch zum Laden der Traktionsbatterien zu verwenden. Dadurch kann der Motor unabhängig vom Antrieb und somit in seinem idealen Betriebspunkt verwendet werden [78, S.258].

Die Vorteile der verschiedenen Arten des Hybridantriebs dürfen jedoch nicht über dessen Nachteile hinweg täuschen. Beispielsweise steigt das Fahrzeuggewicht durch zusätzliche Bauteile wie der Antrieb, die Verkabelung und vor allem die Traktionsbatterie stark an. Während des reinen Betriebs des Verbrennungsmotors bei einer Überlandfahrt muss dieser die Energie für die Bewegung des zusätzlichen Gewichts allein aufbringen, wodurch der Verbrauch und die Abgasemissionen ansteigen. Des Weiteren werden für die Herstellung der Traktionsbatterie eine Vielzahl an seltenen und nur unter hoher Umweltbelastung zu gewinnenden Rohstoffen benötigt [21].

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung wird deutlich, dass dieser Antrieb nur für bestimmte Einsatzzwecke geeignet ist und nicht ein „Allheilmittel“ zur Verbrauchsreduktion darstellt. Dieses Konzept eignet sich besonders für Kleinwagen oder auch Lieferfahrzeuge im reinen Stadtbetrieb [78, S.260]. Für Fahrzeuge, die auch im Überland- bzw. Langstreckenbetrieb eingesetzt werden, ist er demnach derzeit ungeeignet.

#### **4.4.1.3 Kraftstoffe**

##### **Benzin und Diesel**

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass auch in absehbarer Zukunft der Verbrennungsmotor die dominierende Antriebsart für Kraftfahrzeuge bleiben wird [90, S.12]. Benzin und Diesel werden dabei die am häufigsten verwendeten Kraftstoffe bleiben [68, S.9], [68, S.52]. Die Gründe dafür liegen zum einen in der Kundenakzeptanz dieser etablierten Antriebsformen und zum anderen an der vorhandenen Verteilungsinfrastruktur, die nur mit hohem finanziellen Aufwand für andere Kraftstoffe erweitert werden kann [72, S.9]. Der zunehmende Einsatz neuer Antriebskonzepte wird zu einer Abnahme des Verbrauchs der klassischen Kraftstoffe führen, jedoch diese nicht ersetzen können [90, S.13]. Im Allgemeinen geht der Trend hin zu einer Diversifizierung der Energieträger, wobei sich die klassischen und alternativen Kraftstoffe gegenseitig ergänzen [3, S.64]. Dabei werden Benzin und Diesel weiterentwickelt sowie zunehmend Beimischungen von alternativen Kraftstoffen enthalten [90, S.13].

##### **Erdgas**

Die Verwendung von Erdgas verspricht im Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasen im Automobilssektor nennenswerte Potentiale, da es der kohlenstoffärmste fossile Energieträger ist [68, S.52]. Zudem ist die Bereitstellung von Erdgas im Gegensatz zu Erdöl energetisch effizienter und verursacht aufgrund dessen weniger Emissionen. Die Einsparungen über die gesamte Prozesskette von der Gewinnung über den Transport bis zur Distribution liegen bei ca. 30 Prozent gegenüber Benzin [78, S.270]. Gleichwohl kann die

Ausgabe dieses Kraftstoffs nur an speziellen Gastankstellen erfolgen und benötigt somit zusätzliche Investitionen in die Verteilinfrastruktur.

Erdgas in komprimierter oder verflüssigter Form eignet sich besonders für Ottomotoren. Diese Antriebe erreichen durch eine verbesserte Klopfestigkeit das Verbrauchsniveau eines Dieselmotors bei einer gleichzeitigen CO<sub>2</sub>-Reduktion von etwa 20 Prozent [78, S.270].

Ein Problem bei der Anwendung von Ergasantrieben liegt in der Speicherung im Fahrzeug. Das komprimierte Erdgas, CNG (Compressed Natural Gas), wird in einem Druckbehälter bei 200 bar gelagert. Dieses meist aus Stahl hergestellte Behältnis sorgt für ein steigendes Fahrzeuggewicht. Zudem beansprucht Erdgas das 4,5-fache Volumen von Benzin bei gleicher Energiemenge, was zu einem notwendigerweise hohen Volumen des Druckbehälters führt [68, S.53], [78, S.270].

Trotz der erwähnten Hemmnisse für eine schnelle Verbreitung von Erdgas wird dessen Marktanteil Schätzungen zu weiter konstant steigen [68, S.23].

### **Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe**

Die Verbreitung der zum größten Teil aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellten Biokraftstoffarten erhöht sich zurzeit. Ein Grund dafür liegt in der vermeintlichen CO<sub>2</sub>-Neutralität, da theoretisch bei dessen Verbrennung im Motor nur soviel CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, wie von der Pflanze zuvor gespeichert wurde. Des Weiteren kann durch deren Einsatz die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen verringert werden [68, S.55], [3, S.22].

Bei der CO<sub>2</sub>-Bilanz dieser Treibstoffe darf jedoch nicht der Aufwand für dessen Gewinnung und Weiterverarbeitung außer Acht gelassen werden, wodurch sich die zuvor sehr positive Bilanz eintrübt [90, S.15].

Die zunehmende Verbreitung wird zudem durch die begrenzten Angebotspotentiale und die bestehenden Nutzungskonkurrenten der Pflanzen behindert [68, S.55]. Auch hat sich die Kraftstoffproduktion ohne die Unterstützung des Gesetzgebers bislang als nicht wirtschaftlich erwiesen [90, S.13]. Weitere Probleme liegen in der mit dem Ausbau der Biomasseproduktion einhergehenden notwendigen Vergrößerung der Anbauflächen für die Nutzpflanzen bei gleichzeitigem hohen Düngemittleinsatz und Wasserverbrauch, sowie der zunehmenden Verwendung von Nahrungsmitteln für die Treibstoffproduktion [78, S.264].

Auch in nächster Zukunft werden diese Kraftstoffarten keinen großen Anteil am Gesamtkraftstoffverbrauch haben, vielmehr werden sie als Ergänzung Benzin und Diesel beige-mischt [72, S.9], [78, S.263].

## **Wasserstoff**

Die Vorteile von Wasserstoff liegen in dessen Einsatzmöglichkeiten als Energielieferant für Brennstoffzellen, wodurch ein völlig emissions- und schadstofffreier Antrieb von Fahrzeugen möglich wird [68, S.56]. Die derzeitige Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas beziehungsweise mit Hilfe von Strom aus fossilen Energieträgern führt allerdings noch zu hohen Emissionen und Kosten [72, S.9]. Es wird daher davon ausgegangen, dass erst in einigen Jahrzehnten eine CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion von Wasserstoff wettbewerbsfähig möglich ist und es zu einer zunehmenden Verbreitung dieses Energieträgers im Automobilbereich kommt [72, S.9], [68, S.56].

### **4.4.2 Leichtbau**

In der Vergangenheit wurde der Leichtbau hauptsächlich im Bereich sportlicher Automobile angewandt [27, S.32]. Im Zuge der Entwicklungen der letzten Jahre hinsichtlich des zunehmenden Umweltbewusstseins in der Bevölkerung stellt die Reduzierung des Fahrzeuggewichts eine immer häufiger wahrgenommene Möglichkeit zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs dar [72, S.41]. Der durch die Gewichtseinsparungen sinkende Verbrauch führt wiederum zu verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen [13, S.39]. Die mit dem verringerten Verbrauch für den Fahrzeugnutzer einhergehenden sinkenden Unterhaltskosten während der Nutzungsphase sind dabei, neben den strenger werdenden Anforderungen des Gesetzgebers, einer der Hauptgründe für diese anhaltende Entwicklung [83, S.35].

Durch die Reduzierung des Gewichts werden zudem weitere bauliche Veränderungen am Fahrzeug möglich, dazu zählt z.B. der Einsatz kleinerer und leichter Motoren, die bei geringerer Leistung äquivalente Fahrleistungen ermöglichen [90, S.17]. Des Weiteren können durch die Reduzierung der Fahrzeugmasse auch die damit zusammenhängenden Beschleunigungs-, Roll- und Steigungswiderstände reduziert werden [27, S.33].

### **Technische Maßnahmen**

Zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dabei werden entweder die vorhandenen Materialien beibehalten und modifiziert, oder es kommen neue Werkstoffe zum Einsatz.

Beim ersten Verfahren, welches sich auf die Veränderung der Konstruktion des Fahrzeugs bezieht, wird die Geometrie einzelner Teile entsprechend ihrer Belastung angepasst ohne den Werkstoff auszutauschen [90, S.17]. Die durch diese Maßnahmen verringerten Querschnitte bzw. Wanddicken führen zu einem geringeren Gewicht.

Eine weitere Methode ist die Substitution schwerer Materialien durch leichtere bei gleichbleibenden oder sogar besser werdenden Eigenschaften. Um die Voraussetzungen für den Einsatz solcher leichteren Werkstoffe zu schaffen, sind Materialien mit einem geringen spezifischen Gewicht und hoher Festigkeit derzeit in Entwicklung [1, S.71]. Für den Leichtbau kommen verschiedene Materialien in Betracht, dazu zählen unter anderem Leichtmetalle, wie Aluminium und Magnesium, Kunststoffe bzw. Verbundwerkstoffe oder auch höherfeste Stähle, vgl. Kapitel 4.2 [83, S35], [1, S.133], [1, S.175].

Im Allgemeinen führt keine dieser Maßnahmen bzw. kein einzelner Werkstoff zu einem nachhaltigen Erfolg, vielmehr ist eine Multimaterialbauweise der richtige Weg [43, S.932]. Dabei wird jeder Werkstoff an der entsprechend seiner spezifischen Eigenschaften passenden Stelle im Fahrzeug verbaut. Dieser Ansatz der Synthese verschiedener Bauweisen und Werkstoffe befindet sich im Zentrum der derzeitigen Fahrzeugentwicklungen [27, S.32].

In der Fachliteratur wird dargelegt, dass die Einsparung von 100 Kilogramm Gewicht bei einem Fahrzeug zu einer durchschnittlichen Verbrauchsreduktion von 0,35 Liter auf 100 Kilometer führt [3, S.48], [13, S.40], [83, S.38]. Durch eine Kombination von Gewichtsreduktion und Downsizing des Motors kann eine Verbrauchsminderung um bis zu 0,45 Liter auf 100 Kilometer erreicht werden [90, S.17]. Diese Angaben bezeichnen jedoch nur Durchschnittswerte für alle Fahrzeugklassen. Bei großen und schweren Fahrzeugen ist mit größeren Einsparungen, als bei von vorn herein vergleichsweise leichten Pkws zu rechnen. Dennoch bieten diese Daten einen ungefähren Anhaltspunkt für die Auswirkungen des Leichtbaus im Fahrzeugbau.

### **Probleme bei der Gewichtsreduktion**

Trotz der Bemühungen zur Gewichtsreduktion seitens der Automobilhersteller ist das durchschnittliche Fahrzeuggewicht in den letzten Jahren über alle Fahrzeugklassen hinweg gestiegen [83, S.13]. Gründe für die Gewichtszunahme liegen in der immer umfangreicheren Komfort- und Sicherheitsausstattung. Zudem nehmen die mittleren Fahrzeuggrößen und die technische Ausstattung der Fahrzeuge immer weiter zu [66, S.10]. Die steigenden Kundenanforderungen an die Fahrzeugeigenschaften beschleunigen diese Entwicklung weiterhin. Durch den gezielten Einsatz leichterer Werkstoffe und die Einführung neuer Bauweisen versuchen die Automobilhersteller dem Gewichtstrend entgegen zu wirken [1, S.132]. Um auch in Zukunft eine ökologisch verträgliche individuelle Mobilität zu gewährleisten, ist eine weitere Reduzierung des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts notwendig [1, S.130].

### 4.4.3 Sonstige Maßnahmen

Neben den zuvor erläuterten Wegen zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs im Bereich der Motorentechnik, der Kraftstoffe und der Gewichtsreduktion gibt es noch weitere Möglichkeiten, die in Kombination zu einer signifikanten Einsparung führen können.

Ein Beispiel hierfür ist die **Verringerung des Luft- und Rollwiderstandes**. Der Luftwiderstand entsteht durch Druck und Reibungskräfte, die während der Bewegung des Fahrzeugs auf dieses übertragen werden. Durch die Gestaltung der äußeren Form und Größe des Automobils kann darauf Einfluss genommen werden. Jedoch sind hierbei weitere Verbesserungen nur in kleinen Schritten zu erwarten [90, S.18]. Unter dem Rollwiderstand wird die Energie verstanden, die von einem Reifen pro zurückgelegter Einheit abgeleitet wird. Dessen Verringerung hängt in großem Umfang von der Weiterentwicklung der Reifentechnologie ab. Die Schwierigkeit besteht darin, dass die Reduzierung des Rollwiderstandes die Sicherheitsleistung sowie das Fahrverhalten und die Komforteigenschaften des Reifens nicht beeinträchtigen darf [90, S.18].

Das weite Feld der **Fahrzeugelektronik** darf in diesem Zusammenhang ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Dessen zunehmender Einsatz in Kraftfahrzeugen führt zu einem immer weiter ansteigenden Stromverbrauch, der wiederum in einem erhöhten Kraftstoffverbrauch resultiert. Im Zuge der fortschreitenden Ausstattung der Fahrzeuge mit Komfort- und Sicherheitselektronik tritt der durch diese Nebenverbraucher hervorgerufene Energieverbrauch zunehmend in den Fokus der Komponentenentwicklung [68, S.9]. Die elektrischen Systeme in heutigen Fahrzeugen gelangen trotz der Optimierung der Bauteile und der Erhöhung des jeweiligen Wirkungsgrades an ihre Leistungsgrenze. Durch eine sorgsame Auswahl der Zusatzeinrichtungen und eine Verbesserung ihrer Gestaltung eröffnen sich nur begrenzt neue Potentiale in Bezug auf die Energieeinsparung [68, S.9]

Eine Abhilfe kann hier die Einführung eines 42 Volt anstatt des bislang üblichen 12 Volt Bordnetzes schaffen. Hierbei werden bei gleicher Leistung die Ströme auf ein Drittel reduziert, wodurch die Übertragungsverluste verringert und die Leitungsquerschnitte verkleinert werden können. Durch die Wirkungsgradsteigerung sowie die intelligente Steuerung von Spannungsversorgungssystemen der elektrischen Nebenaggregate wie Klimakompressor und Lenkhilfepumpe, kommt es zu Einsparungspotentialen von bis zu 0,3 Liter auf 100 Kilometer [88, S.302]. Diese Einsparung entspricht annähernd der Treibstoffersparnis bei einer Gewichtsreduktion von 100 Kilogramm [83, S.51].

#### **4.4.4 Zusammenfassung**

Die Darlegung hat gezeigt, dass für die Höhe des Kraftstoffverbrauchs und damit der Umweltauswirkungen eines Fahrzeugs sowohl der Fahrer mit seiner Fahrweise als auch die technischen Eigenschaften, wie die Antriebstechnik mit einem hohen Wirkungsgrad, das verringerte Gewicht durch Einsatz neuer Materialien, die Aerodynamik durch neuartige Fahrzeugformen, der verringerte Rollwiderstand sowie das günstige Energiemanagement, verantwortlich sind [20, S.45], [90, S.12]. Durch die Kombination dieser Maßnahmen kann die Umweltverträglichkeit von Fahrzeugen in absehbarer Zukunft weiter erhöht werden [90, S.12].

Die Entwicklungen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, dass z.B. Fortschritte in der Gewichtsreduktion durch eine umfangreichere Komfort- und Sicherheitsausstattung größtenteils negiert wurden. Auch die in der Motorentechnik erreichten Effizienzverbesserungen haben sich durch eine gleichzeitige Erweiterung des durchschnittlichen Leistungsspektrums nur in geringem Umfang positiv auf den Verbrauch ausgewirkt.

Der Konflikt zwischen den Kundenanforderungen hinsichtlich Sicherheit, Komfort und Leistung auf der einen Seite sowie dem Verlangen nach Fahrzeugen mit einem geringen Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß wird die Automobilhersteller auch in Zukunft beschäftigen.

Dabei ist abzusehen, dass es keine allgemein gültige „Patentlösung“ für alle Fahrzeuge geben wird. Für jeden unterschiedlichen Typ müssen individuelle Lösungen gefunden werden, die auf den gewünschten Einsatzzweck abgestimmt sind. Durch eine klare Definition dieser Anforderungen an das neue Fahrzeug schon in der Konzeptphase, können bereits zu Beginn der Entwicklung die passende Bauweise, Antriebsart sowie sonstige technische Sicherheits- und Komfortausstattungen festgelegt werden, um den wachsenden Anforderungen an die Umweltverträglichkeit gerecht zu werden.

### **4.5 Einbeziehung der Erkenntnisse der durchgeführten**

#### **Sachbilanz-Studie**

Wenngleich die Ergebnisse der durchgeführten Sachbilanz-Studie nur für die untersuchte Fahrzeugkonstellation gelten, so lassen sich doch daraus Empfehlungen hinsichtlich des neuen, auf eine Langzeitnutzung von mindestens 30 Jahren ausgelegten, Fahrzeugkonzepts ableiten.

Durch die Sachbilanz-Studie traten hinsichtlich des Energieverbrauchs sowie der Schadstoffemissionen deutliche Unterschiede zwischen Produktions- und Nutzungsphase zu

Tage, vgl. Kapitel 2.4.3. Je länger in diesem Zusammenhang die Nutzung andauert, desto geringer werden die Auswirkungen der Herstellung. Folglich kann durchaus die Verwendung gewichtsoptimierter Werkstoffe mit zugleich energieintensiver Herstellung in Betracht gezogen werden, da die daraus resultierende Verringerung des Kraftstoffverbrauchs den höheren Produktionsaufwand über die Jahre amortisiert. Dem Einsatz solcher Werkstoffe sind jedoch nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten Grenzen gesetzt, da mit dem höheren Aufwand für die Gewinnung und Weiterverarbeitung auch ein steigender Preis einhergeht. Ferner muss unter Umweltgesichtspunkten abgewogen werden, ob die Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch den zum Teil sehr hohen Aufwand für die Rohstoffgewinnung und -weiterverarbeitung rechtfertigen. Aus diesem Grund kann auch hier keine allgemein gültige Aussage getroffen werden, da für jeden eingesetzten Werkstoff eine individuelle Entscheidung nötig ist.

Da zur Zeit das Hauptaugenmerk des öffentlichen Interesses auf der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sowie der Schadstoffemissionen liegt, wird der unter Umständen mit den neuen und leichteren Werkstoffen einhergehende erhöhte Rohstoffaufwand für deren Herstellung eher in Kauf genommen.

Die Nachteile der ersten Halteoption beruhen vor allem auf dem hohen Kraftstoffverbrauch der darin untersuchten Citroën DS, auf den wegen des starren Fahrzeugkonzepts keinen Einfluss genommen werden konnte. Über den Untersuchungszeitraum von 36 Jahren hinweg, ist der Verbrauch konstant hoch geblieben. Hingegen ist bei der zweiten Option, durch den Einsatz neuer verbrauchsreduzierter Fahrzeuge, die Summe des Gesamtverbrauchs weniger stark gestiegen. Diese divergierende Entwicklung ist unter anderem Abbildung 2-19 zu entnehmen.

Somit wird deutlich, dass besonders bei der Gestaltung eines für eine langfristige Nutzung vorgesehenen Fahrzeugkonzepts darauf geachtet werden muss, zukünftige technische Entwicklungen durch eine modulare Bauweise in das Fahrzeug nachträglich implementieren zu können. Mit Hilfe eines solchen Konzepts können die Vorteile beider Optionen miteinander verbunden werden. Zum einen muss das Fahrzeug, abgesehen von den nachträglich austauschbaren Modulen, nur einmal produziert werden, was eine Reduktion des Ressourcen- sowie Energieverbrauchs bewirkt. Zum anderen profitiert das Konzept von den stetigen Weiterentwicklungen im Automobilbereich, da entsprechend den Innovationszyklen neue Teile eingebaut bzw. alte, nicht mehr zeitgemäße, ausgetauscht werden können. Hierbei sind z.B. neue Antriebstechniken oder Weiterentwicklungen im Bereich der Kraftübertragung zu nennen. Somit kann das Fahrzeug über seine gesamte Lebensdauer auf einem technisch aktuellen Stand gehalten werden. Der Zeitraum für

den Austausch der einzelnen Module hängt dabei von der Verfügbarkeit neuer Entwicklungen in Verbindung mit dem Einsatzzweck des Fahrzeugs ab und kann vom Besitzer bestimmt werden.

Nur mit Hilfe einer Modulbauweise ist ein nachträglicher Austausch und somit ein „Upgrade“ einzelner Bauteile ohne großen Aufwand durchführbar. Entsprechend den Modellzyklen in der Automobilindustrie ist ein Fahrzeug nach maximal zehn Jahren technisch obsolet. Die Nachteile bei der Verwendung eines Fahrzeugs ohne Anpassung an die laufende technische Entwicklung haben sich in der ersten Halteoption gezeigt. Deren Rückstand zur zweiten Option sich mit jeder neuen Fahrzeuggeneration weiter erhöht hat, da keine Anpassungen an neue Technologien vorgenommen werden konnten.

Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Wartung des Fahrzeugs, da bei einer langen Nutzungsdauer ein Austausch von Verschleißteilen unumgänglich ist. Zum einen müssen viel beanspruchte Bauteile entsprechend stärker ausgelegt sein, was insbesondere den Korrosionsschutz an schlecht zugänglichen Stellen mit einschließt. Zum anderen muss ein einfacher Zugang und Austausch der zu wechselnden Teile möglich sein. Zusätzliche positive Auswirkungen auf die Gesamtumweltwirkung des Fahrzeugs bietet die Aufarbeitung einzelner Verschleißteile statt des Einsatzes neu produzierter.

Bedingt durch eine lange Nutzungsphase vermindern sich neben der Produktion auch die Auswirkungen des Recyclings. Dennoch kann durch eine Rückgewinnung der im Fahrzeug eingesetzten Werkstoffe die Gesamtbilanz weiter verbessert werden. Wichtig ist dabei die Möglichkeit zur sortenreinen Trennung der Werkstoffe, was deren Wiederverwendung erheblich vereinfacht.

## 4.6 Fahrzeugkonzept zur Langzeitnutzung

Bei jedem neu zu entwickelnden Fahrzeug werden die Bauweisen- und Werkstoffkonzepte von unterschiedlichen Anforderungen aus der Politik wie auch von den Kunden beeinflusst. Der Zielkonflikt des Automobilherstellers besteht darin, die zum Teil stark divergierenden Erwartungen an das neue Produkt, wie z.B. Kraftstoffverbrauch, Gebrauchsnutzen, Emissionsverhalten und Recycling, bestmöglich zu vereinen [27, S.34], vgl. Kapitel 4.1.1.

Die Beschreibung eines Fahrzeugkonzepts enthält dabei Angaben zu den technischen Eigenschaften sowie den einzelnen Komponenten. Hinzu kommen weitere Ausführungen hinsichtlich des Designs, der Herstellbarkeit sowie der Vermarktung [63, S.58].

Bei der Entwicklung eines eigenständigen Konzepts bietet sich zudem, durch die Anwendung des integrierten Umweltschutzes, die Möglichkeit schon im Zuge der Entwick-

lung auf die ökologischen Eigenschaften des späteren Fahrzeugs während dessen Nutzung und Verwertung Einfluss zu nehmen, vgl. Kapitel 4.1.2. Hierzu stellt besonders die durchgeführte Sachbilanz-Studie eine fundierte Informationsbasis hinsichtlich der verschiedenen Werkstoffe sowie deren Auswirkung auf die Fahrzeugeigenschaften bereit.

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften des neuen Fahrzeugkonzepts beschrieben, welche neben den Erkenntnissen der Sachbilanz-Studie auch auf der Untersuchung der Fahrzeugsicherheit beruhen. Hinzu kommen die hinsichtlich der Werkstoffe im Fahrzeugbau sowie der Verbrauchsreduktion recherchierten theoretischen Grundlagen.

#### **4.6.1 Anforderungen und Vorgaben**

Das Fahrzeug ist für den Transport von mindestens vier Personen vorgesehen. Dabei werden alle Arten von Strecken zurückgelegt, sowohl in der Stadt als auch außerhalb. Des Weiteren müssen vier Türen sowie genügend Raum im Kofferraum für das Gepäck der vier Personen vorhanden sein.

Eine weitere Hauptanforderung liegt in der verlängerten Nutzungsdauer von mindestens 30 Jahren. Damit einhergehend gewinnen dessen Umweltwirkungen während der Nutzungsphase stark an Bedeutung, was insbesondere den Kraftstoffverbrauch mit einschließt. Dementsprechend muss das Konzept so ausgelegt sein, dass es einerseits über diesen langen Zeitraum eingesetzt werden kann und andererseits die Möglichkeit dazu besteht, neue technische Entwicklungen in das bestehende Fahrzeug nachträglich zu integrieren bzw. veraltete Bauteile zu ersetzen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Austauschbarkeit des Antriebs sowie aller damit zusammenhängender Elemente, da davon auszugehen ist, dass z.B. der Motor im Laufe der Nutzungsphase aufgearbeitet bzw. ausgewechselt werden muss, vgl. Kapitel 2.4. Bedingt durch die lange Nutzungsdauer ist neben dem reinen Austausch von Bauteilen auch deren Aufarbeitung vorgesehen. Zudem kann angenommen werden, dass seitens der Kunden der Wunsch dazu besteht, einzelne Teile des Innenraums oder auch der Karosserie dem aktuellen Geschmack anzupassen, vorhandene Multimedia- bzw. Telematikgeräte aufzurüsten oder auch verschlissene Teile auszutauschen.

Da das Konzept für einen langen Einsatzzeitraum vorgesehen ist, fällt der Sicherheit eine besondere Stellung zu, vgl. Kapitel 3. Um das Fahrzeug aus sicherheitstechnischer Sicht möglichst lange auf einem aktuellen Stand zu halten, müssen die derzeit neuesten Einrichtungen aus diesem Bereich verbaut werden. Speziell die passive Sicherheit ist von großer Bedeutung, da diese nur schwer aufgerüstet werden kann, vgl. Kapitel 3.5. Im

Bereich der aktiven Sicherheit muss die Möglichkeit geschaffen werden, Neuentwicklungen in das bestehende Fahrzeug so weit wie möglich zu integrieren.

Mithilfe einer intelligenten Multimaterialbauweise soll das neue Konzept zukunftssicher und langlebig aber dennoch binnen kurzer Zeit realisierbar sein. Somit finden darin nur technische Entwicklungen Verwendung, die zum heutigen Zeitpunkt bzw. in naher Zukunft im Rahmen der Massenproduktion herstellbar sind. Dies betrifft sowohl die einzelnen Bauteile des Automobils, vom Karosseriebau über die Antriebstechnik bis hin zur Elektronik als auch die Produktionstechnik. Das Ziel ist eine mit vertretbaren Anpassungsarbeiten mögliche Herstellung auf den vorhandenen Produktionsanlagen.

Zwangsläufig muss das Fahrzeug auch die derzeitigen gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich Crashverhalten und Fußgängerschutz sowie Abgaszusammensetzung und Recycling erfüllen.

#### **4.6.2 Layout**

Die Entscheidung hinsichtlich des zu verwendenden Layouts wird auf Basis zum Teil divergierender Vorgaben getroffen. Eine der wichtigsten besteht in dem Bestreben ein evolutionäres Fahrzeug zu entwickeln, das mit verfügbaren Technologien, Werkstoffen sowie Produktionsmethoden umsetzbar ist, aber nicht eine Revolution im Fahrzeugbau darstellt, was erhebliche Veränderungen in vielen Bereichen erfordern würde.

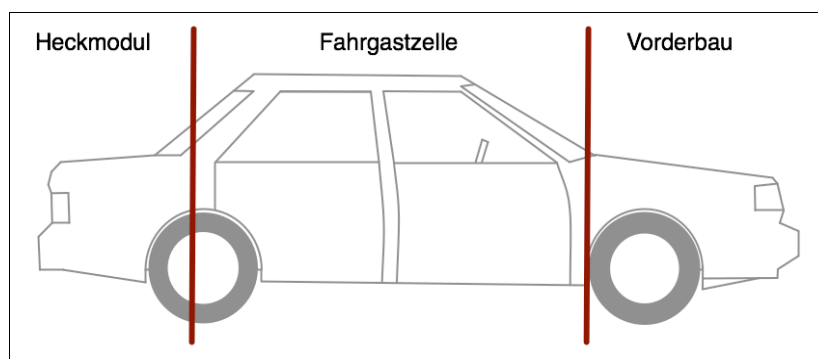
Die äußere Form entspricht der einer klassischen Limousine, dabei stehen jedoch sowohl eine Fließheck- als auch ein Stufenheckversion zur Auswahl. Zur Realisierung der in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Anforderungen verfügt das neue Fahrzeug über eine Modulbauweise. Vor allem im Hinblick auf die Langzeitnutzung bietet diese Bauweise viele Vorteile, so können z.B. die Module unabhängig voneinander und vom Gesamtlebenszyklus des Fahrzeugs entwickelt werden, wodurch neue Teiltechnologien sehr schnell in die Serie einfließen [45, S.5]. Eine zusammenfassende Auflistung der Vorteile der Modulbauweise ist Kapitel 4.3.1 zu entnehmen. Bei sich ändernden gesellschaftlichen oder auch politischen Rahmenbedingungen können die Fahrzeugeigenschaften dementsprechend angepasst werden. Des Weiteren bietet diese Bauweise Vorteile im Bereich der Wartung und Reparatur, da Module im Ganzen getauscht und ersetzt werden. Anschließend werden diese aufgearbeitet und stehen wiederum zum Einbau in anderen Fahrzeugen zur Verfügung.

Die Nachteile der Modulbauweise, besonders in Bezug auf die starre Architektur durch die festgelegten Schnittstellen untereinander, müssen in Kauf genommen werden. Nur auf diese Weise kann die Anforderung erfüllt werden, ein Fahrzeug zu entwickeln, das

einerseits über eine lange Nutzungsdauer verfügt, aber andererseits auch gleichzeitig über den gesamten Zeitraum auf einem aktuellen technischen Entwicklungsstand gehalten werden kann.

Aufgrund der Vorgabe, das Fahrzeug auf heutigen Produktionsanlagen herstellen zu können, entspricht das Layout dem aktueller frontgetriebener Fahrzeuge. Die Vorderräder werden demnach durch einen Frontmotor angetrieben und es kommt somit kein doppelter Fahrzeugboden bzw. Unterflurtechnik zum Einsatz.

Die Gestaltung des Konzepts orientiert sich an dem von der DaimlerChrysler AG im Jahre 2001 veröffentlichten „MoCar“ Prinzip [45, S.1ff]. Im Gegensatz zum genannten Konzept liegt das Hauptaugenmerk bei dem neuen Fahrzeug nicht auf der kostengünstigen Realisierung von Nischenprodukten, sondern auf der Gewährleistung einer langen Nutzungsdauer. Der Grundgedanke besteht darin, das Fahrzeug in drei Grundmodule aufzuteilen, welche unabhängig voneinander nach Kundenwünschen produziert werden können. Die drei Module des Fahrzeugrohbaus beinhalten den Vorderbau inklusive Motor- und Getriebeeinheit sowie Vorderachse, die Fahrgastzelle mit kompletter Innenausstattung sowie das Heckmodul einschließlich des Tanks, siehe Abbildung 4-3.



**Abbildung 4-3 – Hauptmodule des neuen Fahrzeugkonzepts [eigene Darstellung]**

Auch innerhalb dieser drei Hauptmodule findet eine weitere Gruppierung der Bauteile statt. So bildet beispielsweise der Motor ein einzelnes Modul innerhalb des Vorderbaus, welches bei Bedarf leicht getauscht werden kann. Die weiter zuvor schon erwähnten Module betreffen den Kraftstofftank sowie auch das Armaturenbrett, vgl. Kapitel 4.5.

### 4.6.3 Aggregate

#### Motor

Entsprechend der in Kapitel 4.4.1 durchgeführten Bewertung der verschiedenen Antriebs- sowie Kraftstoffarten wird ein für das neue Konzept passender Motor mit entsprechendem Verbrennungsverfahren gewählt.

Aufgrund der zunehmenden Verschärfung der Abgasgesetzgebung und der damit zusammenhängenden aufwendigen Nachbehandlung bei Dieselmotoren zur Einhaltung der Vorschriften ist dieser Typ für das neue Fahrzeug ungeeignet. Vielmehr bietet sich der Benzinmotor für den Einsatz an, da dieser die Vorgaben mit geringeren technischen Anstrengungen erfüllt. Zur weiteren Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Motor für den bivalenten Betrieb mit Erdgas ausgelegt, siehe Kapitel 4.4.1.3. Im Zuge der aktuellen Entwicklung wird auch bei dem zu verwendenden Motor das „Downsizing“ angewendet, d.h. der Hubraum wird bei gleichzeitiger Aufladung mittels Turbolader und Kompressor reduziert. Infolge dessen sinkt der Verbrauch zum einen durch die effizientere Verbrennung und zum anderen durch die Reduktion des Motorgewichts. Ein weiterer positiver Nebeneffekt ist das geringere Gewicht an der Vorderachse, was den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs zuträglich ist. Im Zuge dessen besteht der Motor aus Aluminium, wodurch das Gewicht zusätzlich verringert wird. Die Tanks für Benzin und Erdgas (CNG) befinden sich als austauschbares Modul im Heck des Fahrzeugs unterhalb des Kofferraums, wobei der Kraftstofftank aus Kunststoff und der Gasbehälter aus Stahl bestehen.

Aufgrund der Vorgabe, Techniken zu verwenden, welche jetzt oder in naher Zukunft verfügbar sind, finden neue Verbrennungsarten, wie z.B. HCCI, zum Zeitpunkt der Erstausrüstung keine Verwendung, vgl. Kapitel 4.4.1.1. Ähnlich verhält es sich mit der Hybridtechnik. Obwohl dieses Verfahren derzeit schon im Serieneinsatz ist, so hängt dessen Nutzen stark vom Einsatzzweck des Fahrzeugs ab. Bei Fahrzeugen im reinen Stadtbetrieb ist dieses Konzept durchaus von Vorteil, da der Elektromotor unterstützend bei geringen Geschwindigkeiten eingreift. Sobald jedoch längere Strecken über Land bzw. auf der Autobahn zurückgelegt werden, muss das zusätzliche Gewicht dieses Antriebs transportiert werden, was zu einem unnötig steigenden Kraftstoffverbrauch führt, siehe Kapitel 4.4.1.2.

#### Getriebe

Für die Kraftübertragung wird ein Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe gewählt, welches zugkraftunterbrechungsfreie Schaltvorgänge ermöglicht. Durch die große Spreizung

der Übersetzung kann der Motor nahe dem idealen Betriebspunkt betrieben werden. Im Automatikmodus schaltet das Getriebe zum einen bedeutend schneller, als es mit einem manuellen möglich wäre und zum anderen wird automatisch der Gang mit der jeweils Kraftstoff sparendsten Motordrehzahl gewählt. Weitere Vorteile, im Vergleich zu einem konventionellen Automatikgetriebe mit Drehmomentwandler, liegen im geringeren Gewicht sowie dem höheren Wirkungsgrad. Zwecks einer weiteren Gewichtsreduktion ist das Getriebegehäuse aus Magnesium gefertigt.

Durch den Einsatz eines Start-Stopp-Systems ist es möglich den Kraftstoffverbrauch, insbesondere im Stop-and-Go Verkehr, noch weiter zu verringern. Mit Hilfe eines mit der Kurbelwelle verbundenen Startergenerators kann der Motor im Stand, z.B. an einer roten Ampel, automatisch ausgeschaltet und zum Anfahren verschleißfrei wieder gestartet werden. Zudem bietet dessen Einsatz die Voraussetzung den konventionellen Motorstarter, welcher normalem Verschleiß unterliegt, einzusparen.

### **Zusammenfassung**

Die zuvor beschriebenen Eigenschaften gelten jedoch nur für die Erstausrüstung des Fahrzeugs. Bedingt durch die lange Nutzungsdauer ist noch nicht mit Sicherheit abzusehen, welche neuen Konzepte hinsichtlich Motor und Getriebe im Laufe der Nutzung aktuell sein werden. Mit Hilfe des modularen Aufbaus der Antriebseinheit bleibt somit die Möglichkeit, auf zukünftige Entwicklungen zu reagieren. Als Beispiel hierfür ist der Hybridantrieb zu nennen. Sollte sich der Antrieb und vor allem die Batterietechnik in den nächsten Jahren weiterverbessern, so kann das vorhandene Motormodul mit einer Kombination aus Elektro- und Verbrennungsmotor ersetzt sowie die einer der vorhandenen Tanks unterhalb des Kofferraums gegen die Traktionsbatterie ausgetauscht werden.

## **4.6.4 Fahrwerk**

### **Aufhängung**

Besonders beim Fahrwerk ist auf eine, über die gesamte Nutzungsdauer betriebsfeste Auslegung der Bauteile zu achten. Zudem wird eine möglichst lange Haltbarkeit angestrebt. Aus diesem Grund kommt ein konventionelles Fahrwerk mit Stahlfedern und Stoßdämpfern zum Einsatz. Dieses ist direkt mit dem Rahmen der Karosserie verbunden. Zur Reduzierung der ungefederten Massen, was auch dem Fahrkomfort zugute kommt, bestehen die Fahrwerksteile aus Aluminium. Als Option kann dem Kunden ein elektronisches Fahrwerk angeboten werden, bei dem die Härte und somit das Verhalten der Stoßdämpfer vom Fahrer individuell bestimmt werden kann. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Stoßdämpfer nicht über den gesamten Einsatzzeitraum eingesetzt

werden können, da sie einem stetigen Verschleiß unterliegen. Im Zuge des Austausches besteht die Möglichkeit Stoßdämpfer mit anderen Federungseigenschaften zu verbauen.

### **Bremsen**

Für die Bremsen, sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse, ist ein so genanntes elektrohydraulisches „Brake-by-Wire“ Bremssystem vorgesehen, bei dem keine mechanische Verbindung zwischen Bremspedal und Radbremsen besteht. Der Bremswunsch des Fahrers wird vom Pedal in elektrische Impulse umgewandelt, welche wiederum mit Hilfe eines elektrohydraulischen Wandlers zur Betätigung der Bremse führen. Damit einher geht der Einsatz einer elektronischen Parkbremse, wodurch auf einen klassischen Handbremshebel sowie auf den dazugehörigen Bowdenzug verzichtet werden kann. Ein entscheidender Vorteil liegt in dem Einsatz von Standardkomponenten im Bereich der Bremseinrichtung. Jedoch bietet ein solches System durch die elektrische Ansteuerung auch Raum für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Bremsentechnik und vor allem der Fahrassistenzsysteme.

#### **4.6.5 Karosserie**

Die Bauweise des Konzepts orientiert sich an der Aufteilung des Fahrzeugs in die drei Hauptmodule, von denen jedes individuell vorproduziert werden kann. Durch den langen Einsatzzeitraum liegt die Schwierigkeit in der Festlegung einer Karosseriestruktur, die für die entsprechende Lebensdauer ausgelegt ist, demgegenüber aber auch in Zukunft noch aktuell bleiben wird. Dies betrifft zum einen die Eigenschaften des Aufbaus hinsichtlich Steifigkeit, Sicherheit und vor allem Gewicht sowie zum anderen ebenso die Möglichkeit zum Austausch und somit „Upgrade“ einzelner Elemente.

Die Wahl der eingesetzten Werkstoffe ist hier von besonderer Bedeutung, da die Karosserie mit ihren Einbauteilen einen Großteil des Fahrzeuggewichts ausmacht. Im Zuge der durchgeführten Sachbilanz-Studie hat sich gezeigt, wie entscheidend der Kraftstoffverbrauch bei einer langfristigen Nutzung ist, vgl. Kapitel 2.4. Dadurch liegt der Fokus der neuen Karosserie auf einem möglichst geringen Eigengewicht, was zu einem niedrigen Verbrauch beiträgt. Trotz des Einsatzes verschiedener Leichtbaumaßnahmen soll versucht werden, das Spannungsfeld aus Gewichtsreduktion auf der einen, sowie Steifigkeit und Sicherheit auf der anderen Seite zu lösen. Hierbei ist ein weiteres Ziel, soweit wie möglich auf besonders „exotische“ Werkstoffe zu verzichten. Gründe dafür sind zum einen die geforderte Herstellbarkeit in den derzeitigen Produktionsanlagen und zum anderen der zum Teil sehr hohe Aufwand für die Gewinnung und Weiterverarbeitung der entsprechenden Rohstoffe. Durch die Zusammenstellung der verschiedenen in Frage kom-

menden Materialien in Kapitel 4.2 wurde deutlich, dass es keinen alleinigen idealen Werkstoff im Fahrzeugbau gibt. Vielmehr müssen die jeweiligen Vorteile in Form einer Multimaterialbauweise miteinander kombiniert werden.

### **Tragende Karosseriestruktur**

Obwohl sich gezeigt hat, dass auch Stahl über noch unerschlossene Leichtbaupotentiale verfügt, liegt dessen Gewicht dennoch deutlich über dem einer vergleichbaren Aluminiumstruktur. Aus diesem Grund wird Aluminium als Werkstoff für die tragende Karosseriestruktur verwendet, welche mit der von Audi eingeführten „Space-Frame“ Technologie vergleichbar ist [30, S.48]. Wie in Kapitel 4.2.2 deutlich wurde, kann dadurch das Eigengewicht der Rohkarosse bei gleichbleibender Steifigkeit und Sicherheit deutlich gesenkt werden. Die Karosserie des Fahrgastzellenmoduls besteht, analog zum Audi „Space-Frame“, aus einer stabilen Rahmenstruktur aus Strangpressprofilen und Druckgussmultifunktionsbauteilen in die große Bleche mittragend integriert sind [3, S.49]. Aus der Begrenzung auf wenige große Druckgussteile mit präziser Geometrie und hoher Steifigkeit resultieren eine geringe Anzahl einzelner Bauteile und eine hohe statische Torsionssteifigkeit [3, S.50]. Die tragende Struktur des Vorderbaus sowie des Heckmoduls sind ebenfalls aus Aluminiumprofilen in Verbindung mit Gussteilen hergestellt. Zum Ende der Produktion werden sie durch wenige Verbindungsstellen mit dem Fahrgastzellenmodul zusammengefügt und bilden somit die gemeinsame Fahrzeugkarosserie. Durch diese einfachen Verbindungen wird gleichermaßen die Reparatur nach einem Unfall erleichtert, da z.B. der gesamte Vorderbau auf einmal ausgetauscht werden kann.

Die Türrahmen sowie der darin verbaute Seitenaufprallschutz sind aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff hergestellt, wodurch eine maximale Sicherheit beim Seitenaufprall erzielt und zugleich Gewicht gespart wird. Ein großflächiger Einsatz dieses Werkstoffs, z.B. im Bereich der Karosserieverkleidung, wird vor allem durch sein komplexes Herstellungsverfahren und den damit einhergehenden hohen Preis verhindert.

### **Karosserieverkleidung**

Die aus den drei Hauptmodulen zusammengesetzte Rohkarosse wird mit einer Außenhaut aus Kunststoff versehen. Aufgrund der geringen Belastungen kann auf eine Verstärkung mit Kohle- oder Glasfasern verzichtet werden. Diese Technologie ist derzeit schon verfügbar und wird zudem immer häufiger bei heutigen Fahrzeugen verwendet, vgl. Kapitel 4.2.5. Kunststoff bietet neben dem geringen Eigengewicht vor allem auch den Vorteil einer großen gestalterischen Freiheit der Oberflächenformen. Hierbei können z.B.

komplexe Formen verwirklicht oder auch Zierelemente in die Bauteile integriert werden, was mit der konventionellen Metallbauweise nicht möglich ist [75, S.29].

Eine weitere Stärke dieses Werkstoffs liegt, speziell in Bezug auf die lange Nutzungsdauer, in dessen Korrosionsbeständigkeit. Zudem vereinfacht die Verschraubung der Außenhaut mit der tragenden Karosseriestruktur ein späteres Austauschen einzelner Elemente, was der Wartung zugute kommt. Auch im Falle eines leichten Unfalls können Elemente separat und ohne großen Aufwand ausgewechselt werden. Die einfache Demontage der Außenhaut vereinfacht zudem das Recycling, da hierdurch eine sortenreine Trennung der Werkstoffe im Zuge der Fahrzeugverwertung erleichtert wird.

Neben der Außenhaut sind auch der Unterboden sowie Innenradhäuser mit Kunststoffmaterialien verkleidet. Im Falle des Unterbodens wird aufgrund aerodynamischer Vorteile diese Verkleidung eingesetzt.

### **Lackierung**

Im Rahmen der Bemühungen ein Fahrzeug mit langer Lebensdauer aber zugleich möglichst geringer Umweltbelastungen zu entwickeln, darf auch die Lackierung nicht außer Acht gelassen werden. Obwohl die schädlichen Auswirkungen durch den Einsatz neuer Verfahren, wie z.B. wasserlöslicher Lacke mit geringem Lösungsmittelanteil, in den letzten Jahren reduziert werden konnten, so ist der Lackiervorgang dennoch durch einen großen Energieverbrauch gekennzeichnet [3, S.84f]. Des Weiteren ist abzusehen, dass trotz der fortschrittlichen Technologien in diesem Bereich die Lackierung der Fahrzeugoberfläche nicht über den gesamten Lebenszeitraum hinweg den Kundenansprüchen genügen wird. Dadurch ist davon auszugehen, dass das Fahrzeug mindestens einmal neu lackiert werden muss.

Diese genannten negativen Auswirkungen sollen mit einer so genannten Folienlackierung verhindert werden, wobei die Kunststoffaußenhaut mit einer, durch den Kunden frei wählbaren, Folie beklebt wird. Im Falle eines Unfalls erleichtert der schnelle Austausch der Folie die Reparatur der beschädigten Stelle. Zudem kann der Kunde nach einem individuellen Zeitraum eine andere Außenfarbe wählen. Mit einem, im Vergleich zur normalen Lackierung, deutlich geringeren finanziellen Aufwand kann somit das Erscheinungsbild des Fahrzeugs geändert werden.

Im Bereich der tragenden Karosseriestruktur kann eine solche Folie aufgrund der schlechten Zugänglichkeit nicht verwendet werden. Zudem bietet sie keinen Korrosionsschutz für die Metallbauteile. Aus diesem Grund ist hier eine konventionelle Lackierung unumgänglich.

#### **4.6.6 Interieur**

Auch auf den Bereich der Innenraumgestaltung hat die vorgesehene Nutzungsdauer einen erheblichen Einfluss, da zum Zeitpunkt der Erstausstattung nicht abzusehen ist, wie sich die individuellen Anforderungen der Nutzer an das Fahrzeug im Laufe der Zeit entwickeln werden. Selbstverständlich kann nicht für jede Eventualität eine Lösung vorgehalten werden, dennoch soll ein variables Innenraumdesign eine Vielzahl an Anforderungen abdecken. Die sich ändernden Kundenwünsche gehen auch mit der alternden Bevölkerungsstruktur einher, wodurch spezielle Erwartungen an das Fahrzeug hervorgehoben werden. Gleichwohl werden der Variabilität durch die Karosserieform Grenzen gesetzt, da es sich hierbei um ein Fahrzeug mit klassischen Limousinenproportionen handelt.

##### **Sitze**

Die Vielseitigkeit des Innenraums basiert vor allem auf den Eigenschaften der Sitze, bei denen es sich um zwei Einzelsitze vorn sowie eine durchgehende Sitzbank hinten handelt. Die Vordersitze können seitlich gedreht werden, um den Einstieg bzw. Ausstieg zu erleichtern. Des Weiteren kann die Rückenlehne des Beifahrersitzes nach vorn geklappt werden, um somit den Transport von langen und sperrigen Gütern zu vereinfachen. Die Sitzfläche der Rücksitze kann, analog zu denen im aktuellen Honda Civic, nach oben geklappt werden, wodurch beispielsweise ein Fahrrad mit ausgebautem Vorderrad quer eingeladen werden kann [29]. Zudem wird das Beladen mit schweren Gegenständen erleichtert, da diese nicht über die hohe Ladekante des Kofferraums gehoben werden müssen. Serienmäßig sind der Beifahrer- sowie die hinteren Sitze mit Isofix Kindersitzbefestigungen ausgestattet.

Im Zuge der Gewichtsreduktion sind die Sitzkonstruktionen sowie -schienen aus Magnesium gefertigt. Auf diese sind verschiedene Schaumstoffe sowie eine textile Deckschicht aufgebracht. Die Stoffverkleidung der Sitze kann im Falle eines erhöhten Verschleißes leicht abgenommen und ausgetauscht werden. Vom Einsatz von Leder als Obermaterial für die Sitze wird Abstand genommen, da moderne Textilien, insbesondere im Hinblick auf die lange Nutzungsdauer, bedeutend robuster und langlebiger sind.

##### **Armaturenbrett**

Das Armaturenbrett bildet ein einzelnes Modul, welches komplett vormontiert in das Fahrzeug eingebaut werden kann. Auf ihm sind alle zur Bedienung des Fahrzeugs notwendigen Funktionen vereint, dazu zählen auch der Automatikwahlhebel sowie der Knopf für elektronische Parkbremse. Durch die Vielzahl an Verbindungsstellen dieses Bauteils

mit dem Fahrzeug, z.B. Kabel und Klimatisierung, ist ein späterer Austausch als ganzes Modul nicht vorgesehen. Um den Kundenwunsch nach einer individuellen Gestaltung dennoch gerecht zu werden, kann die Kunststoffoberfläche ausgewechselt werden, wofür verschiedene Oberflächenstrukturen sowie Farben zur Auswahl stehen.

Die Träger des Armaturenbretts, welche mit der Karosserie verschraubt werden, bestehen ebenso wie bei den Sitzen aus Magnesium. Die Verkleidung erfolgt durch Kunststoffteile.

### **Innenraumverkleidungen**

Speziell die für den Nutzer sichtbaren Innenraumteile unterliegen einer verstärkten Abnutzung, sofern diese für den täglichen Gebrauch des Fahrzeugs angefasst werden müssen. Als Beispiel sind hier die Türverkleidungen oder auch der Gangwahlhebel zu nennen. Um dennoch über den langen Nutzungszeitraum eine angenehme Haptik dieser Teile zu gewährleisten, können diese leicht gegen neue ausgetauscht werden. Aufgrund dessen sind die Verbindungen zum entsprechenden Trägermaterial so gewählt, dass der Austausch ohne großen Aufwand vorgenommen werden kann.

Der hauptsächlich eingesetzte Werkstoff im Innenraum ist Kunststoff. Im Bereich des Dachhimmels und der Seitenverkleidungen kommen zudem Textilien zum Einsatz. Im Hinblick auf eine ökologische Produktgestaltung spielt der Einsatz von Naturmaterialien eine große Rolle, siehe Kapitel 4.2.6. Zum einen werden sie im Bereich der Textilien und zum anderen im Zusammenspiel mit Kunststoffen in Form von Verbundwerkstoffen für Türverkleidungen und die Hutablage verwendet. Für die Geräuschdämmung kommen sowohl Naturmaterialien als auch recycelte Textilien zum Einsatz.

Auch das Lenkrad verfügt zwecks Gewichtsreduktion bei gleichbleibend hoher Stabilität über einen Kern aus Magnesium, der mit Kunststoff umschäumt ist.

### **4.6.7 Elektrik und Elektronik**

#### **Bordspannung**

Die Bemühungen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs nehmen auch Einfluss auf den Bereich der Fahrzeugelektrik. Selbst ohne Verringerung des Gewichts kann durch ein optimales Leistungsmanagement Energie gespart werden, was sich wiederum positiv auf den Verbrauch auswirkt. Die alleinige Optimierung der einzelnen Komponenten reicht in diesem Zusammenhang jedoch nicht aus, wodurch der Einsatz eines mit höherer Spannung betriebenen Bordnetzes infrage kommt. Die Ausführungen in Kapitel 4.4.3 haben gezeigt, dass mit Hilfe einer Bordspannung von 42 Volt und einer entsprechenden intelli-

genten Ansteuerung einzelner Aggregate bis zu 0,3 Liter Kraftstoff auf 100 Kilometer eingespart werden können.

Aus diesem Grund kommt bei dem neuen Konzept eine Bordspannung von 42 Volt zum Einsatz. Jedoch werden damit nur die großen Verbraucher wie Heckscheibenheizung, Klimakompressor und auch Lenkhilfepumpe betrieben, wodurch diese bedarfsgerecht gesteuert werden können und somit eine Energieeinsparung möglich wird. Die sonstigen Verbraucher wie Licht, Motorsteuerung und Komfort- sowie Sicherheitselektronik werden weiterhin mit 12 Volt betrieben. Andernfalls wäre eine umfassende Neuentwicklung dieser elektronischen Bauteile auf Basis einer Spannung von 42 Volt nötig.

### **Vernetzung, Telematik, Multimedia**

In dem Bereich der Elektronik ist mit einer Vielzahl an Innovationen im Laufe der Fahrzeuglebensdauer zu rechnen. In Kapitel 4.1 sind einige der derzeitigen und zukünftigen Trends in diesem Bereich beschrieben. Bei der Konzeptfindung besteht die Schwierigkeit darin, die Integration möglichst vieler Neuerungen in das bestehende Fahrzeug zu ermöglichen. Dennoch müssen Restriktionen in Kauf genommen werden, da, auf Grund der kurzen Innovationszyklen in der Elektronikbranche, die zukünftigen Entwicklungen nur beschränkt vorhersehbar sind.

Schon in Erstausstattung verfügt das Fahrzeug daher über eine Vielzahl elektronischer Geräte, die, soweit es im Moment absehbar ist, zu einem späteren Zeitpunkt weiter aufgerüstet werden können. Dazu zählen unter anderem ein mit den DIN Abmessungen konformes Autoradio mit Navigationsoption und Einbindung des TMC Datendienstes zur Stauumfahrung, wie auch die mit einem zentral eingebauten Verstärker verbundenen Boxen. Durch entsprechende Anschlüsse in der Mittelkonsole kann zudem ein Unterhaltungssystem mit separaten Bildschirmen für die hinteren Sitzplätze nachgerüstet werden. Im Fahrzeug sind zwei Datenübertragungssysteme vorhanden, zum einen der CAN Bus, über den fahrzeugrelevante Daten übertragen werden, und zum anderen der MOST Bus, der für die Kommunikation der Multimediageräte zuständig ist. Mit Hilfe eines über die Tachoeinheit abrufbaren Bordcomputers sind die über den CAN Bus übertragenen Statusinformationen für den Fahrer verfügbar. Zudem kann dieser auch zur Übertragung sicherheitsrelevanter Informationen verwendet werden.

Die elektronischen Geräte werden über eine, aufgrund der besseren Gewichtsverteilung im Heck des Fahrzeugs verbauten, Batterie gespeist. Da diese mit 42 Volt betrieben wird, ist ein Spannungswandler zwischengeschaltet.

#### **4.6.8 Sicherheit**

Im Laufe des dritten Kapitels wurde der Zielkonflikt zwischen langer Fahrzeugnutzung auf der einen und gleichzeitig hoher Fahrzeugsicherheit auf der anderen Seite deutlich. Wenn ein Fahrzeug über einen langen Zeitraum genutzt wird, wie die Citroën DS in der Sachbilanz-Studie, so ist es hinsichtlich des Entwicklungsstandes der Sicherheit gegenüber einem Neueren klar im Nachteil. Diese eindeutige Aussage lässt sich jedoch nur für den in der Studie untersuchten Zeitraum festlegen. Vom heutigen Zeitpunkt aus, im Ausblick auf die zukünftige Entwicklung, sind andere Rahmenbedingungen vorhanden.

##### **Passive Sicherheit**

Vor allem im Bereich der passiven Sicherheit ist davon auszugehen, dass viele entscheidende Entwicklungen in den vergangenen Jahren durchgeführt wurden, womit größere Entwicklungssprünge in der nahen Zukunft unwahrscheinlich sind, vgl. Kapitel 3.5. Aus diesem Grund wird das neue Fahrzeugkonzept, welches über die derzeit aktuellen Sicherheitseinrichtungen verfügt, über einen langen Zeitraum den Sicherheitsanforderungen genügen.

Bei der Karosserie sind definierte Deformationszonen im Bereich des Vorderbaus sowie des Heckmoduls vorgesehen. Der Seitenaufprallschutz wird durch die aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff bestehenden Türen gewährleistet. In den jeweiligen Deformationszonen sind zudem Sensoren verbaut, die in Kombination mit einem zentralen Steuergerät die präzise Ansteuerung der für die Aufprallart passenden Airbags ermöglichen. Das Fahrzeug verfügt über Fahrer- und Beifahrerairbag, Seiten-, Kopfairbag vorne wie hinten, sowie Knieairbags für die Frontinsassen. Weitere Sicherheitseinrichtungen im Innenraum sind der Gurtstraffer sowie Gurtkraftbegrenzer. Zur Reduzierung möglicher Folgen eines Heckaufpralls verfügen die vorderen Sitze über aktive Kopfstützen, die bei einem Unfall den Abstand zwischen Kopf und Kopfstütze verringern, um so Verletzungen an der Halswirbelsäule vorzubeugen.

Zur Erfüllung der immer strenger werdenden Auflagen hinsichtlich des Fußgängerschutzes sind im Bereich der Frontschürze spezielle Sensoren verbaut, die in der Lage sind einen Fußgängerprall zu detektieren. Ist dies der Fall, werden die hinteren Scharniere geöffnet und die Motorhaube durch eine pyrotechnische Ladung in Richtung des Fußgängers bewegt. Durch die Vergrößerung des Deformationsweges verringert sich das Verletzungsrisiko des Unfallgegners.

### **Aktive Sicherheit**

Die Fortschritte der Fahrzeugsicherheit verlagern sich immer mehr von der passiven in Richtung aktiver Sicherheit, so dass in diesem Bereich in den nächsten Jahren noch eine Vielzahl an Innovation zu erwarten sind, vgl. Kapitel 3.4. Diese Tatsache erschwert die Entwicklung eines neuen Konzepts, welches über seine Lebensdauer hinweg über weitestgehend aktuelle Einrichtungen der aktiven Sicherheit verfügt. Wie auch bei der passiven Sicherheit bildet auch hier ein Fahrzeug mit einer, zum Zeitpunkt der Erstausrüstung, sehr aktuellen aktiven Sicherheitsausstattung die besten Voraussetzungen auch über einen langen Zeitraum hinweg den Anforderungen zu entsprechen.

Zu den eingesetzten Fahrassistenzsystemen zählen unter anderem ABS, ASR, ESP sowie ein Bremsassistent. Deren Wirkungsweise wird in Kapitel 3.1.1.1 erläutert. Des Weiteren verfügt das Fahrzeug über eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen, die einerseits die allgemeine Fahrsicherheit erhöhen und andererseits das Führen des Fahrzeugs auch unter schwierigen Bedingungen erleichtern, vgl. Kapitel 3.1.1.2. Dabei handelt es sich um eine adaptive Abstandsregelung (ACC) sowie ein Spurhaltesystem, welches vor dem Verlassen der Spur warnt und in der Folge auch eingreifend tätig wird. Zusätzlich wird ein System verbaut, welches den toten Winkel permanent überwacht und bei einem unachtsamen Spurwechsel den Fahrer vor einem drohenden Zusammenstoß warnt.

Spätere Entwicklungen in diesem Bereich können problemlos in das Fahrzeug eingebaut werden, sofern sie existierende Sensoren für ihre Datenerfassung verwenden. Sobald neue Erfassungssysteme nötig werden, ist das spätere Aufrüsten ungleich schwerer und mit erheblich höherem finanziellen Aufwand verbunden.

### **Vernetzung**

Ein sich derzeit in der Entwicklung befindender Trend, ist die zunehmende Vernetzung verschiedener Sicherheitssysteme untereinander. Hierbei werden beispielsweise die Sensoren des ACC dazu verwendet einen drohenden Aufprall zu erfassen. Sollte dieser unausweichlich sein, werden die verschiedenen aktiven und passiven Sicherheitssysteme auf den Aufprall vorbereitet, wodurch sie schneller und gezielter darauf reagieren können, vgl. Kapitel 3.4.

Auch das neue Fahrzeug verfügt ebenfalls über ein solches „PreCrash“ System. Die Grundvoraussetzung dafür ist eine komplette Sicherheitsausstattung im Bereich der Fahrerassistenzsysteme, da die Unfallfrüherkennung auf deren Sensoren aufbaut. Auch hier können zu einem späteren Zeitpunkt neue Sicherheitseinrichtungen mit geringem Aufwand nachgerüstet werden, sofern sie die vorhandenen Sensoren zur Datenerfassung

verwenden. Die Aufrüstung mit neuen Systemen, die eine andere Kommunikationsarchitektur benötigen, ist ungleich schwerer. Aus diesem Grund muss im Voraus der zu erwartende Nutzen gegenüber dem Einbauaufwand individuell abgewogen werden.

#### **4.6.9 Zusammenfassung**

In Tabelle 4-1 sind abschließend die wichtigsten Eigenschaften des neuen Fahrzeugkonzepts zusammengefasst dargestellt. Die Einteilung orientiert sich am Ablauf der Konzeptbeschreibung in Kapitel 4.6.

Tabelle 4-1 – Eigenschaften des Fahrzeugkonzeptes zur Langzeitnutzung [eigene Darstellung]

<b>Layout</b>	klassische Limousinenproportionen
	Anwendung einer Modulbauweise
	Einsatz leichter Werkstoffe zur Gewichtsreduktion
	drei Hauptmodule (Vorderbau, Fahrgastzelle, Heckbereich)
	weitere Untermodule (u.a. Motor, Tank, Teile der Innenausstattung)
<b>Aggregate</b>	<i>Motor</i>
	bivalente Kraftstoffversorgung mit Benzin und Erdgas
	kleiner Hubraum bei gleichzeitiger Aufladung durch Abgasturbolader und Kompressor
	Motorblock und Zylinderkopf aus Aluminium
	beide Tanks als jeweils ein Modul unter dem Kofferraumboden
	Aufarbeitung einzelner Motorbauteile vorgesehen
	<i>Getriebe</i>
Siebengang-Doppelkupplungsgetriebe mit Gehäuse aus Magnesium	
Start-Stopp-System mittels eines mit der Kurbelwelle verbundenen Startergenerators	
<b>Fahrwerk</b>	<i>Aufhängung</i>
	Einzelradaufhängung vorn und hinten aus Aluminium
	konventionelle Stahlfedern und Stoßdämpfer
	optional elektronisches Fahrwerk mit regelbaren Stoßdämpfern
	<i>Bremsen</i>
elektrohydraulisches "Brake-by-Wire" System	
elektronische Parkbremse	
<b>Karosserie</b>	<i>tragende Karosseriestruktur</i>
	Fahrgastzellenmodul aus selbsttragender Vollaluminiumstruktur
	tragende Struktur des Forderbaus und Heckmoduls aus Aluminiumprofilen
	Zusammenfügen der drei Hauptmodule über Schraub- und Steckverbindungen
	Türrahmen und Seitenaufprallschutz aus Kohlefaserverbundwerkstoffen
	<i>Karosserieverkleidung</i>
	Verkleidung der Karosseriestruktur mit Kunststoffelementen
<i>Lackierung</i>	
konventionelle Lackierung der tragenden Karosserie für Korrosionsschutz	
Einsatz einer Lackfolie in beliebiger Farbe auf Karosserie	
<b>Interieur</b>	<i>Sitze</i>
	zwei seitlich drehbare Einzelsitze vorn sowie eine durchgehende Sitzbank hinten
	Rückenlehne des Beifahrersitzes nach vorn sowie Sitzfläche der Rücksitze nach oben klappbar
	tragende Struktur aus Magnesium, Polsterung auf Schaumstoff sowie Oberflächen aus Textilien
	<i>Armaturenbrett</i>
	separates Modul bei dem die Oberfläche nach Wunsch gewechselt werden kann
tragende Struktur aus Magnesium sowie Verkleidung aus Kunststoff	
<i>Innenraumverkleidung</i>	
verstärktem Verschleiß unterliegende Teile leicht austauschbar	
Verkleidungen aus Kunststoff bzw. aus Verbundwerkstoffen mit Naturfasern	
<b>Elektrik und Elektronik</b>	<i>Bordspannung</i>
	42 Volt Spannung für alle großen Verbraucher (u.a. Lenkhilfepumpe, Klimakompressor)
	12 Volt Spannung für alle sonstigen Verbraucher
	Batterie im Heck untergebracht
	<i>Vernetzung, Telematik, Multimedia</i>
CAN sowie MOST Datenbus vorhanden	
Radio und Navigationseinheit mit Stauumfahrung	
<b>Sicherheit</b>	<i>passive Sicherheit</i>
	Karosserie mit definierten Deformationszonen vorn und hinten
	spezielle Sensoren zur frühzeitigen Aufprallerkennung sowie zur Detektierung dessen Stärke
	Front-, Seiten-, Kopf- und Knieairbags
	aktive Kopfstützen vorn
	Fußgängerschutz durch spezielle Motorhaube
	<i>aktive Sicherheit</i>
Fahrassistenzsystem: ABS, ASR, ESP und Bremsassistent	
Fahrerassistenzsysteme: Abstandsregeltempomat, Spurhaltesystem	
<i>Vernetzung</i>	
„PreCrash" System zur frühzeitigen Aktivierung der Sicherheitssysteme bei einem Unfall	

## 5 Schlussbetrachtung

Durch den Vergleich der beiden Halteoptionen im Rahmen der durchgeführten Sachbilanz-Studie wurde deutlich, dass Aussagen hinsichtlich der Umweltwirkungen ausgewählter Fahrzeuge über einen festgelegten Zeitraum nicht pauschal getroffen werden können. Die Vielzahl an Automobilen, welche jeweils über heterogene technische Eigenschaften verfügen, führt zu erheblichen Schwankungen bei den Untersuchungsergebnissen. Aus diesem Grund gelten die im Zuge der durchgeführten Sachbilanz-Studie ermittelten Werte und Schlussfolgerungen nur für die darin verwendeten Fahrzeuge. In Folge dessen kann keine sinnvolle Verallgemeinerung hinsichtlich des Vorteils einer Option vorgenommen werden, auch wenn dies im Rahmen aktueller Diskussionen häufig geschieht. Die darin präferierte Halteoption korreliert häufig mit der jeweiligen dahinter stehenden Interessengruppe. Ein Grund für die divergierenden Schlussfolgerungen liegt in der unterschiedlichen Gewichtung der einzelnen Umweltwirkungen. Die Frage hierbei ist, ob dem Energieverbrauch und Schadstoffausstoß oder dem Ressourcenverbrauch eine höhere Bedeutung beigemessen. Nur entsprechend dieser Festlegung kann eine Präferenz ausgesprochen werden, jedoch nur für die untersuchte Fahrzeugkonstellation.

Für die durchgeführte Sachbilanz-Studie gilt aufgrund der höheren Gewichtung der Nutzungsphase, dass es sich, rückwirkend betrachtet und im Hinblick auf die Gesamtwelteinflüsse, durchaus lohnt, alle 12 Jahre ein neues Fahrzeug zu kaufen. Durch die verbesserten technischen Eigenschaften der neuen Fahrzeuge in der zweiten Halteoption, konnten die negativen Auswirkungen der Produktion im Zuge Nutzung kompensiert werden.

Zugleich bleibt die Fahrzeugsicherheit in dieser ökologischen Betrachtungsweise unbeachtet, obwohl in den Ausführungen des dritten Kapitels die erheblichen Fortschritte im Laufe des Untersuchungszeitraums deutlich wurden. Diese haben gezeigt, in welchem Umfang die Anzahl der im Straßenverkehr Getöteten, bei einem gleichzeitigen Anstieg der zugelassenen Fahrzeuge, zurückgegangen ist. Eine Gewichtung zwischen ökologischen Gesichtspunkten und der Fahrzeugsicherheit kann in diesem Zusammenhang nur individuell vorgenommen werden. Anhand dieser kann eine Empfehlung für eine Halteoption ausgesprochen werden. Im Fall der bei der Sachbilanz-Studie untersuchten Fahrzeugkonstellation ist die zweite Halteoption im Vorteil, da mit jedem neuen Fahrzeug neben den besseren Umweltwirkungen auch die Sicherheit zunimmt.

Mit dem Ziel, ein neues Fahrzeugkonzept zur Langzeitnutzung zu entwickeln, wurden die zuvor gewonnenen Informationen genutzt. Insbesondere die Ergebnisse der Sachbilanz-Studie hatten großen Einfluss auf dessen Gestaltung. Durch den Vergleich der beiden Halteoptionen wurde deutlich, welche Eigenschaften das neue Fahrzeug haben muss, um über den gewünschten Einsatzzeitraum hinweg auf einem aktuellen technischen Stand zu bleiben.

Die Entscheidung für ein modular aufgebautes Konzept, bei dem der Austausch und somit das „Upgrade“ einzelner Module möglich ist, beruhte sowohl auf den Ergebnissen der durchgeführten Sachbilanz-Studie als auch auf den Untersuchungen der Fahrzeugsicherheit. Weiteren Einfluss hatten die Ausführungen im vierten Kapitel hinsichtlich der am häufigsten im Automobilbau eingesetzten Werkstoffe sowie der verschiedenen Methoden zur Gewichts- und somit Verbrauchsreduktion. Insbesondere die Auswirkungen bestimmter Werkstoffzusammensetzungen auf den Energieverbrauch und Schadstoffausstoß im Zuge der Rohstoffgewinnung und Weiterarbeitung sowie der Fahrzeugproduktion flossen in die Konzeptfindung mit ein. Speziell die Wirkung des Kraftstoffverbrauchs auf den Gesamtenergieverbrauch sowie -schadstoffausstoß während der Nutzung hat verdeutlicht, welchen Effekt diese Parameter auf die späteren Gesamtwirkungen des neuen Konzepts haben.

Für ein Fahrzeug zur Langzeitnutzung sind jedoch nicht nur dessen Auswirkungen auf die Umwelt sondern auch die, im Rahmen der Umweltbilanzierung fast immer vernachlässigte, Fahrzeugsicherheit von Bedeutung. Durch die Untersuchung der vorangegangenen und zukünftigen Entwicklungen auf diesem Gebiet ist davon auszugehen, dass ein solches Konzept durchaus nicht in Konflikt mit der Sicherheit stehen muss. Durch eine intelligente Festlegung auf bestimmte Sicherheitseinrichtungen kann das Fahrzeug über einen langen Zeitraum den Anforderungen entsprechen.

Die Arbeit hat gezeigt, welche Punkte besonders beachtet werden müssen, um ein Fahrzeug zur Langzeitnutzung zu entwickeln. Hierbei ist speziell die Phase der Nutzung, in Bezug auf den Energieverbrauch und den Schadstoffausstoß, gegenüber der Herstellungsphase von erhöhter Bedeutung. Im Zuge dessen wurden die Werkstoffe so gewählt, dass sie ein möglichst geringes Gewicht aufweisen, um so die Voraussetzungen für einen niedrigen Kraftstoffverbrauch zu erfüllen. Des weitern wurden die Voraussetzungen geschaffen, durch die Bauweise des Fahrzeugs nachträglich einzelne Elemente austauschen bzw. erweitern zu können. Damit einher geht auch die Sicherheitsausstattung, die zum einen auf dem aktuellsten Stand ist und zum anderen nachträglich erweitert werden kann.

Durch die Berücksichtigung dieser Punkte kann das neue Fahrzeugkonzept erfolgreich sein. Mit ihm können, durch die Ausrichtung auf eine langfristige Nutzung, natürliche Ressourcen gespart werden, ohne auf zukünftige Entwicklungen der Fahrzeugtechnik verzichten zu müssen.

## 6 Literatur

1. Arbeitsgruppe Neue Materialien Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien. Perspektiven in der Verkehrstechnik, Endbericht zum Vorprojekt. In: Graue Reihe; Nr. 4; Bad Neuenahr-Ahrweiler: Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH; 1997
2. Atelier Automobile Restaurierung einer Citroën DS 21 von 1968. <http://atelier-automobile.de/content/view/24/17/>; Stand 2007; gesehen am 24.08.2008
3. Audi Umweltbericht 2005, Zwischenbilanz, Verantwortliches Handeln bei Audi. Ingolstadt; 2005
4. Auto Motor und Sport Test Citroën DS 21. [www.chapron.de/pdf/ams6603.pdf](http://www.chapron.de/pdf/ams6603.pdf); Stand 03.1966; gesehen am 26.08.2008
5. Bangemann, C. ECE-Verbrauch: Rollen-Spiele. [http://www.auto-motor-und-sport.de/tests/technik/hxcms\\_article\\_507615\\_13987.hbs](http://www.auto-motor-und-sport.de/tests/technik/hxcms_article_507615_13987.hbs); Stand 09.11.2007; gesehen am 24.08.2008
6. Baum, H. G. et al. Umwelt- und Ressourcenschutz als Unternehmensziel: Steigerung des Unternehmenswerts durch Ressourcenmanagement; 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; 2007
7. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Klima schützen - Kosten senken, Energie sparen bei der Lackierung. [http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/co2\\_minderung/doc/lackierung.pdf](http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/co2_minderung/doc/lackierung.pdf); Stand 2006; gesehen am 26.08.2008
8. Berns, K. und Luksch, T. Autonome Mobile Systeme 2007: 20. Fachgespräch, Kaiserslautern, 18./19. Oktober 2007; 1. Ed. Berlin: Springer; 2007
9. Bolduan, G. Fahrassistenzsysteme sollen den Weg zum selbstständigen Auto ebnen. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/108362>; Stand 23.05.2008; gesehen am 25.08.2008
10. Bubeck, D. Life Cycle Costing (LCC) im Automobilbau; Hamburg: Verlag Dr. Kovac; 2002
11. Bundesamt für Straßenwesen Straßenverkehrsunfälle. [http://www.bast.de/nn\\_39814/DE/Statistik/Unfalldaten/downloads/Strassenverkehrsunaefelle.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/Strassenverkehrsunaefelle.pdf](http://www.bast.de/nn_39814/DE/Statistik/Unfalldaten/downloads/Strassenverkehrsunaefelle.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/Strassenverkehrsunaefelle.pdf); Stand 09.2007; gesehen am 26.08.2008
12. Bundesamt für Straßenwesen Verkehrs- und Unfalldaten, Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland. Bergisch Gladbach; 2007
13. Bundesministerium für Bildung und Forschung Werkstoffwelten, Entdeckungen im Kosmos der Stoffe. Berlin, Bonn; 2005

14. Bundesministerium Wirtschaft und Technologie  
Bruttostromerzeugungskapazitäten und Bruttostromerzeugung nach Energieträgern Deutschland. [http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energietraeger10-stromerzeugung.property=blob,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls](http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energietraeger10-stromerzeugungskapazitaetenbruttostromerzeugung.property=blob,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls); Stand 29.01.2008; gesehen am 26.08.2008
15. Burg, H. und Moser, A. (Hrsg.)  
Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation; 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2007
16. Citroën  
Reparaturhandbuch MAN 005831, CX Fahrzeuge. Köln
17. Citroën  
Reparaturhandbuch Nr. 583 Band 1, Fahrzeug D, Technische Daten Einstellungen Kontrollen. Köln
18. Cohrs, A.  
Reif für den Fortschritt. [http://www.autobild.de/artikel/klassiker-der-moderne-citroen-ds\\_596995.html](http://www.autobild.de/artikel/klassiker-der-moderne-citroen-ds_596995.html); Stand 10.04.2008; gesehen am 24.08.2008
19. Daimler  
Daimler HighTechReport, Formen für morgen. In: Faszination Technologie (2008); Nr.1; S.1-68
20. Daimler  
Der Weg zur nachhaltigen Mobilität: Innovationen für Antriebs- und Fahrzeugtechnik. Stuttgart; 2008
21. Demorro, C.  
Prius Outdoes Hummer in Environmental Damage. [http://clubs.ccsu.edu/recorder/editorial/editorial\\_item.asp?NewsID=188](http://clubs.ccsu.edu/recorder/editorial/editorial_item.asp?NewsID=188); Stand 07.03.2007; gesehen am 24.08.2008
22. DIN 14040  
Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen; 11/06; Berlin: Beuth
23. Dirk Sassen  
Unsere Leistungen. <http://www.ds-sassen.de/ctrl.htm>; Stand 2003; gesehen am 24.08.2008
24. Etzold, H.R.  
Bd. 91. Ford Mondeo: Limousine/Fließheck/Turnier - Benziner, Diesel [ab 11/92]; 3. Aufl. 1998.
25. Europäische Kommission  
Reducing CO2 emissions from light-duty vehicles. [http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2\\_home.htm](http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_home.htm); Stand 13.08.2008; gesehen am 24.08.2008
26. Faerber, E.  
Fortentwicklung der Crash-Gesetze und Vorschriften. [http://www.aachener-kolloquium.de/pdf/Vortr\\_Nachger/Faerber.pdf](http://www.aachener-kolloquium.de/pdf/Vortr_Nachger/Faerber.pdf); Stand 06.10.2005; gesehen am 26.08.2008
27. Fridrich, H. E. et al.  
Neue Werkstoffe und Bauweisen für neuartige Fahrzeugkonzepte. In: Themenheft Forschung, Leichtbau (2007); Nr. 3; S.32-37
28. Hausberger, S.  
Emissionen, Nachfrage-Simulation, Szenarien. [www.ifz.tugraz.at/index\\_en.php/filemanager/download/80/VortragHausberger.pdf](http://www.ifz.tugraz.at/index_en.php/filemanager/download/80/VortragHausberger.pdf); Stand 12.11.2003; gesehen am 26.08.2008
29. Honda  
Eigenschaften Honda Civic. [http://www.honda.de/content/automobile/modelle\\_civic\\_ausstattungsdaten.php?mv=866](http://www.honda.de/content/automobile/modelle_civic_ausstattungsdaten.php?mv=866); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008

- 
30. IHK Dresden Übersicht ausgewählter Rohstoffpreisentwicklungen. [http://www.dresden.ihk.de/servlet/link\\_file?link\\_id=16261&ref\\_knoten\\_id=20667&ref\\_detail=portal&ref\\_sprache=deu](http://www.dresden.ihk.de/servlet/link_file?link_id=16261&ref_knoten_id=20667&ref_detail=portal&ref_sprache=deu); Stand o.J.; gesehen am 26.08.2008
31. IZU Bayern Berechnung CO2 Emissionen. [www.izu.bayern.de/download/xls/Berechnung\\_CO2\\_Emissionen\\_Stand\\_070530.xls](http://www.izu.bayern.de/download/xls/Berechnung_CO2_Emissionen_Stand_070530.xls); Stand 30.05.2007; gesehen am 26.08.2008
32. Keller, M. und Zbinden, R. Luftschadstoff Emissionen des Strassenverkehrs 1980-2030. In: Schriftreihe Umwelt Nr. 355 Luft. Hrsg. v. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL; Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Dokumentation; 2004
33. Klausmeyer, S. Ford Mondeo (Modell 1996). <http://www.fordfan.de/www/techdaten/9/index.htm>; Stand 2008; gesehen am 24.08.2008
34. Knisch, H. Müll von Anfang an, Auch das Abfallaufkommen bei der Auto-Produktion muß zum öffentlichen Thema werden. In: Müllmagazin - Fachzeitschrift für ökologische Abfallwirtschaft (1991); Nr.1; S.10-12
35. Koch, H.-J. et al. Umwelt und Straßenverkehr, Hohe Mobilität - Umweltverträglicher Verkehr, Sondergutachten; Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen; 2005
36. Kommission der Europäischen Gemeinschaften Begleitdokument zur Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament - Ergebnisse der Überprüfung der Strategie der Gemeinschaft zur Minderung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen - Zusammenfassung der Folgenabschätzung. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SEC:2007:0061:FIN:DE:HTML>; Stand 07.02.2007; gesehen am 26.08.2008
37. König, W. Ford Mondeo 1.8 GT. [http://www.auto-motor-und-sport.de/tests/einzeltests/hxcms\\_article\\_55298\\_13987.hbs](http://www.auto-motor-und-sport.de/tests/einzeltests/hxcms_article_55298_13987.hbs); Stand 02.04.1996; gesehen am 24.08.2008
38. Konigorski, U. und Schürr, A. Das Automobil im neuen Jahrtausend: Software auf Rädern. In: Thema Forschung (2007); Nr.2; S.24-31
39. Koplín, J. Nachhaltigkeit im Beschaffungsmanagement: ein Konzept zur Integration von Umwelt- und Sozialstandards; 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; 2006
40. Kraftfahrt-Bundesamt Statistische Mitteilungen Fahrzeugzulassungen, Löschungen, Alter der Fahrzeuge, Jahr 2006; Flensburg; 2007
41. Kramer, F. Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik - Simulation - Sicherheit im Entwicklungsprozess; 2. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2006
42. Krampe, A. Straßenverkehrssicherheit in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der Altersgruppe der 18- bis 24-jährigen Fahrer. Expertise; Institut für angewandte Familien-, Kindheits- und Jugendforschung an der Universität Potsdam; 2004

- 
43. Krusche, T. et al. Bewertung von Modularisierungsstrategien für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte am Beispiel des Vorderwagens. In: ATZ 106 (2004); Nr.10; S.928-938
44. Lander, S. Strategische Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen; Dissertation; Technische Universität Berlin; 2004
45. Langner, J. und Truckenbrodt, A. MoCar - Die Modularisierung von Produkt und Produktion. [www.videoweb.ethz.ch/streaming/SCGA110701/7/Langner-Referat.pdf](http://www.videoweb.ethz.ch/streaming/SCGA110701/7/Langner-Referat.pdf); Stand 11.07.2001; gesehen am 26.08.2008
46. Lutteroth, J. 120 Jahre Führerschein. [http://einestages.spiegel.de/static/authoralbubackground/2471/der\\_lappen\\_der\\_die\\_welt\\_bedeutet.html](http://einestages.spiegel.de/static/authoralbubackground/2471/der_lappen_der_die_welt_bedeutet.html); Stand 31.07.2008; gesehen am 24.08.2008
47. Miltner, E. Derzeitiger Stand und Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit von Pkw. In: Der Unfallchirurg (1998); Nr.10; S.796-798
48. N.N. Audi Hybrid. <http://www.hybrid-autos.info/Audi-Duo-1997.html>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
49. N.N. Datenblatt Citroën DS 21. <http://dsclub.de/tech/daten/s046.gif>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
50. N.N. Der Lebenslauf des Citroën CX 1969-1991. <http://citroen-cx.info/cx-geschichte.html>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
51. N.N. Der Maßstab: Öko-Polo; <http://www.berlinonline.de/berliner-zeitung/archiv/.bin/dump.fcgi/1994/1108/autoundstrae/0090/index.html>; Stand 08.11.1994; gesehen am 24.08.2008
52. N.N. Deutsche Autohersteller trotz dem Abwärtstrend. [http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/us-automarkt-deutsche-autohersteller-trotzen-dem-abwaertstrend\\_aid\\_306283.html](http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/us-automarkt-deutsche-autohersteller-trotzen-dem-abwaertstrend_aid_306283.html); Stand 04.06.2008; gesehen am 24.08.2008
53. N.N. Emission Standards. <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>; Stand 07.2007; gesehen am 24.08.2008
54. N.N. Geschichte des Führerscheins. [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_des\\_Führerscheins](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_des_Führerscheins); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
55. N.N. Heizwert. <http://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
56. N.N. Mit HCCI zum sauberen Motor. [http://www.science-at-home.de/news/innovation/innovation\\_det\\_20060227122857.php](http://www.science-at-home.de/news/innovation/innovation_det_20060227122857.php); Stand 27.02.2006; gesehen am 24.08.2008
57. N.N. Neu auf den Strassen: Citroën DS 21. <http://www.zeit.de/1966/19/Citroen-DS-21?page=all>; Stand 06.05.1966; gesehen am 24.08.2008
58. N.N. Technische Daten. <http://www.mondeo-freunde-westerwald.de/Technik/Daten.htm>; Stand o.J.; gesehen am 26.08.2008
59. Nijman, J. Citroën DS - technische Informationen. <http://www.citroen-ds-id.com/>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008

- 
60. Öko Institut      Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme. <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>; Stand 25.07.2008; gesehen am 24.08.2008
61. Paulus, A.      Ökonomische und ökologische Effekte der Nutzung des Werkstoffs Aluminium - Ein Beitrag zur Berücksichtigung der Nutzungsphase in der modellgestützten Stoffstromanalyse; Dissertation; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; 2005
62. PE International      Das GaBi 4 Software System. <http://www.gabi-software.com/deutsch/gabi/gabi-4/>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
63. Piller, F. T. und Waringer, D.      Modularisierung in der Automobilindustrie: neue Formen und Prinzipien, modular sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements; Aachen: Shaker; 1999
64. Probst, T.      Ressourcenschonung durch Abfallverwertung; Bonn, Berlin: Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
65. Reif, K.      Automobilelektronik: eine Einführung für Ingenieure; 2. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2007
66. Rigassi, R. et al.      Technologie-Monitoring, Weitere Bereiche - Vertiefungen, Zusammenfassung; Bern: Bundesamt für Energie BFE; 2004
67. Ruge, J. und Wohlfahrt, H.      Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz; 8. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2007
68. Schallaböck, K.O. et al.      Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien; Wuppertal: Wuppertal-Inst. für Klima, Umwelt, Energie; 2006
69. Schimmelpfeng, L. und Lück, P.      Ökologische Produktgestaltung: Stoffstromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung; Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer; 1999
70. Schindler, V.      Fahrerassistenzsysteme der Zukunft. In: Fahrzeugsicherheit 2007: innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz; 6. internationale Tagung Berlin, 18. und 19. Oktober 2007; VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik; Düsseldorf: VDI-Verl.; S.19-31
71. Schweimer, G.W. und Levin, M.      Sachbilanz des Golf A4; Wolfsburg: Volkswagen; 2000
72. Shell Deutschland Oil      Shell Pkw-Szenarien bis 2030 Flexibilität bestimmt Motorisierung. Hamburg; 2004
73. Statistisches Bundesamt      Unfallgeschehen im Strassenverkehr 2005. Wiesbaden; 2006
74. Statistisches Bundesamt      Unfallgeschehen im Strassenverkehr 2007. Wiesbaden; 2008
75. Stauber, R.      Den richtigen Werkstoff auswählen. In: Kunststoffe Automotive (2004); Nr.1; S.28-29

- 
76. Stemmer, C. Citroën DS - technische Informationen. <http://www.id20.de/>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
77. Steven, H. Untersuchungen für eine Änderung der EU Direktive 93/116/EC (Messung des Kraftstoffverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emission); Würselen: TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität; 2005
78. Tiefel, T. (Hrsg.) Strategische Aktionsfelder des Patentmanagements; 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; 2006
79. Tietjen, D. Die Luft ist raus. <http://www.autobild.de/artikel/ford-mondeo-i-1993-2000-35064.html>; Stand 25.02.2002; gesehen am 24.08.2008
80. Umweltbundesamt Abgasgrenzwerte für Pkw und für leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t Gesamtgewicht. <http://www.umweltdaten.de/verkehr/downloads/gwpkwlnfz.pdf>; Stand 02.2008; gesehen am 28.06.2008
81. Umweltbundesamt Hintergrundpapier "Handreichung Bewertung in Ökobilanzen", Dessau-Roßlau, 2000
82. Umweltbundesamt PROBAS Datenbank. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
83. van de Sand, I. et al Abschätzung von Potentialen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Automobilsektor; Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH; 2007
84. VDA Auto Jahresbericht 2008. Frankfurt am Main; 2008
85. Volkswagen Der Golf, Umweltprädikat - Hintergrundbericht. Wolfsburg; 2007
86. Volkswagen Der Passat, Umweltprädikat - Hintergrundbericht. Wolfsburg 2007
87. Volkswagen Der Umweltbericht von Volkswagen. Wolfsburg; 1995
88. Wallentowitz, H. und Reif, K. (Hrsg.) Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen; 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg; 2005
89. Weiland, H.J. Brüssel macht Ernst mit den CO<sub>2</sub>-Vorgaben. [http://www.automobilrevue.ch/artikel\\_18738.html](http://www.automobilrevue.ch/artikel_18738.html); Stand 13.02.2007; gesehen am 24.08.2008
90. World Business Council for Sustainable Development Mobilität 2030: Die Herausforderung der Nachhaltigkeit meistern. Conches-Geneva; 2004
91. Wötzel, K. Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik; Dissertation; Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; 2007
92. Ziegeldorf, H. Berechnungsgrundlagen. <http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/joule.htm>; Stand 27.03.2006; gesehen am 24.08.2008

**Literatur Energieverbrauch Automobilfabrik**

93. Audi Aktualisierte Umwelterklärung für den Audi Standort Ingolstadt, Stand April 2007. Ingolstadt; 2007
94. Audi Umwelterklärung 2004 für den Standort Neckarsulm. Neckarsulm; 2004
95. Audi Umwelterklärung 2006 für den Standort Ingolstadt. Ingolstadt; 2006
96. Audi Umwelterklärung 2006 für den Standort Neckarsulm. Neckarsulm; 2006
97. Audi Umwelterklärung 2007 für den Standort Neckarsulm. Neckarsulm; 2007
98. BMW Sustainable Value Report 2003/2004, Innovation, Leistung, Verantwortung. München; 2003
99. BMW Sustainable Value Report 2005/2006, Verantwortung wahrnehmen. München; 2005
100. BMW Sustainable Value Report 2007/2008. München; 2007
101. BMW Umwelt, Wirtschaft, Soziales: Wege der Zukunftsfähigkeit, Sustainable Value Report 2001/2002. München; 2001
102. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2008, Mercedes Benz Werk Bremen. Bremen; 2008
103. Daimler Umwelterklärung - Aktualisierung 2007, Mercedes Benz Werk Sindelfingen. Sindelfingen; 2007
104. Daimler Umwelterklärung 2008, Daimler AG Standort Untertürkheim. Stuttgart; 2008
105. Daimler Umwelt-Zertifikat A-Klasse. Stuttgart; 2008
106. Daimler Umwelt-Zertifikat B-Klasse. Stuttgart; 2008
107. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2002, Werk Bremen. Bremen; Chrysler 2003
108. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2003, Werk Bremen. Bremen; Chrysler 2003
109. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2004, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; Chrysler 2005
110. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2004, Werk Untertürkheim. Stuttgart; Chrysler 2004
111. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2005, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; Chrysler 2005
112. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2006, Werk Untertürkheim. Stuttgart; Chrysler 2006
113. Daimler Aktualisierte Umwelterklärung 2007, Werk Untertürkheim. Stuttgart; Chrysler 2007
114. Daimler Umwelterklärung 2000, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; Chrysler 2000

- 
115. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2001. Bremen; 2001
  116. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2002, Standort Untertürkheim. Stuttgart; 2002
  117. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2003, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; 2003
  118. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2005, Standort Untertürkheim. Stuttgart; 2005
  119. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2006, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; 2006
  120. Daimler Chrysler Umwelterklärung 2007, Werk Bremen. Bremen; 2007
  121. Daimler Chrysler Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz C-Klasse. Stuttgart, Auburn Hills; 2006
  122. Daimler Chrysler Vereinfachte Umwelterklärung 2001, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; 2003
  123. Daimler Chrysler Vereinfachte Umwelterklärung 2001, Werk Untertürkheim; Stuttgart; 2003
  124. Daimler Chrysler Vereinfachte Umwelterklärung 2002, Standort Sindelfingen. Sindelfingen; 2003
  125. Daimler Chrysler Vereinfachte Umwelterklärung 2003, Werk Untertürkheim. Stuttgart; 2003
  126. Magna Steyr Umwelterklärung 2001 / Standort Graz. Graz; 2002
  127. Magna Steyr Umwelterklärung 2004 / Standort Graz. Graz; 2004
  128. Magna Steyr Umwelterklärung 2005 / Standort Graz. Graz; 2005
  129. Magna Steyr Umwelterklärung 2006 / Standort Graz. Graz; 2006
  130. Magna Steyr Update Umwelterklärung 2002 / Standort Graz. Graz; 2003
  131. Magna Steyr Update Umwelterklärung 2003 / Standort Graz. Graz; 2004
  132. Skoda Sustainable Development. Mladá Bolesla; 2006
  133. Volkswagen Der Umweltbericht von Volkswagen 1997. 2. korr. Aufl. Wolfsburg; 1998
  134. Volkswagen Gemeinsame Umwelterklärung 2004, Volkswagen und Volkswagen Nutzfahrzeuge. Wolfsburg; 2005
  135. Volkswagen Gemeinsame Umwelterklärung 2006, Volkswagen und Volkswagen Nutzfahrzeuge. Wolfsburg; 2007
  136. Volkswagen Umwelterklärung 2001, Werk Emden. Wolfsburg, Emden; 2002
  137. Volkswagen Umwelterklärung 2001, Werk Wolfsburg. Wolfsburg; 2002
  138. Volkswagen Umwelterklärung 2002, Werk Wolfsburg. Wolfsburg; 2003
  139. Volkswagen Umwelterklärung 2003, Werk Wolfsburg. Wolfsburg; 2004
  140. Volkswagen Umwelterklärung 2005, Werk Wolfsburg. Wolfsburg; 2005

**Literatur Entwicklung Fahrzeugsicherheit**

141. ADAC Chronik "20 Jahre ADAC Crashtests".  
[http://www.adac.de/images/20Jahre\\_ADAC-Crash\\_tcm8-193334.pdf](http://www.adac.de/images/20Jahre_ADAC-Crash_tcm8-193334.pdf); Stand 08.2007; gesehen am 24.08.2008
142. Aschenbrenner, N. In elektronischer Keilbremse steckt ausgeklügelte Sensorik.  
[http://www.innovationsreport.de/html/berichte/automotive/elektronischer\\_keilbremse\\_steckt ausgekluegelte\\_49585.html](http://www.innovationsreport.de/html/berichte/automotive/elektronischer_keilbremse_steckt ausgekluegelte_49585.html); Stand 22.09.2005; gesehen am 24.08.2008
143. Bosch Innovationen für das Automobil.  
[http://www.bosch.de/start/content/language1/html/734\\_7322.htm](http://www.bosch.de/start/content/language1/html/734_7322.htm); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
144. Dellenback, S. Making Vehicles Intelligent.  
[http://www.dot.state.tx.us/ttf/images/Presentations/Innovations\\_Dellenback.pdf](http://www.dot.state.tx.us/ttf/images/Presentations/Innovations_Dellenback.pdf); Stand 2008; gesehen am 24.08.2008
145. Euro NCAP History Euro NCAP. <http://www.euroncap.com/history.aspx>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
146. Hoffman, G. The History of Car Safety. <http://autos.aol.com/article/safety/v2/a/history-of-car-safety/20071127160309990001>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
147. Ihle, T. ABS ASR. [http://www.thomas-ihle.de/Auto/ABS\\_ASR/abs\\_asr.html](http://www.thomas-ihle.de/Auto/ABS_ASR/abs_asr.html); Stand 30.01.2005; gesehen am 24.08.2008
148. Ihle, T. Erfindungen. <http://www.thomas-ihle.de/Auto/Erfindungen/erfindungen.html>; Stand 05.01.2006; gesehen am 24.08.2008
149. Ihle, T. Scheinwerfer. <http://www.thomas-ihle.de/Auto/Scheinwerfer/scheinwerfer.html>; Stand 05.01.2006; gesehen am 24.08.2008
150. Ihle, T. Verkehrssicherheit. <http://www.thomas-ihle.de/Auto/Verkehrssicherheit/verkehrssicherheit.html>; Stand 21.09.2005; gesehen am 24.08.2008
151. Kamei Chronik Kamei 1939 - 1952. [http://www.kamei.de/ww/de/pub/kamei/chronik/1939\\_1952.cfm](http://www.kamei.de/ww/de/pub/kamei/chronik/1939_1952.cfm); Stand 2008; gesehen am 24.08.2008
152. N.N. Airbag - Entwicklungen. [http://de.wikipedia.org/wiki/Airbag#Fr.C3.BCche\\_Entwicklungen](http://de.wikipedia.org/wiki/Airbag#Fr.C3.BCche_Entwicklungen); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
153. N.N. Antiblockiersystem - Geschichte.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Antiblockiersystem#Geschichte>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
154. N.N. Automotive lighting.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Center\\_High\\_Mounted\\_Stop\\_Lamp](http://en.wikipedia.org/wiki/Center_High_Mounted_Stop_Lamp); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
155. N.N. Béla Barényi. [http://de.wikipedia.org/wiki/Béla\\_Barényi](http://de.wikipedia.org/wiki/Béla_Barényi); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
156. N.N. Bremsleute. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bremslicht>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008

- 
157. N.N. Bohlin made driving safer.  
<http://www.autonews.com/files/euroauto/inductees/2006bohlin.htm>; Stand 2006; gesehen am 24.08.2008
158. N.N. Car Safety Timeline. <http://www.driverstechnology.co.uk/car-safety-timeline.htm>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
159. N.N. Car Safety: A History.  
<http://www.discoverychannelasia.com/car/safety/index.shtml>;  
Stand o.J.; gesehen am 22.07.2008
160. N.N. Elektronisches Stabilitätsprogramm - Geschichte und Ausblick.  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronisches\\_Stabilitätsprogramm#Geschichte\\_und\\_Ausblick](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronisches_Stabilitätsprogramm#Geschichte_und_Ausblick); Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
161. N.N. Euro NCAP - zeitliche Entwicklung.  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Euro\\_NCAP#Zeitliche\\_Entwicklung](http://de.wikipedia.org/wiki/Euro_NCAP#Zeitliche_Entwicklung);  
Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
162. N.N. Sicherheitsgurts - Geschichte.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Sicherheitsgurt#Geschichte>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008
163. N.N. Xenonlicht. <http://de.wikipedia.org/wiki/Xenonlicht>; Stand o.J.;  
gesehen am 24.08.2008
164. Sparkle, L.J. Vehicle Safety Past, Present and Future.  
<http://www.aesvn.org/resources/new-car-safety.pdf>; Stand 01.09.1999; gesehen am 24.08.2008
165. Volvo Sicherheit an erster Stelle.  
<http://www.volvocars.com/at/footer/about/Safety/Pages/SafetyFirst.aspx>; Stand o.J.; gesehen am 24.08.2008

## 7 Anhang

### 7.1 Eigenschaften der Vergleichsfahrzeuge

Tabelle 7-1 – Eigenschaften Vergleichsfahrzeuge [eigene Darstellung] <wird fortgesetzt>

	<b>Citroën DS 21</b>	<b>Citroën CX 20</b>	<b>Ford Mondeo 1.8i</b>
<b>Karosserieversion</b>	Limousine, 4-türig	Limousine, 4-türig	Limousine, 4-türig
<b>Antriebsart</b>	Frontantrieb	Frontantrieb	Frontantrieb
<b>Länge</b>	4874 mm	4659 mm	4556 mm
<b>Breite</b>	1803 mm	1760 mm	1751 mm
<b>Höhe</b>	1470 mm	1360 mm	1424 mm
<b>DIN Leergewicht</b>	1320 kg	1385 kg	1322 kg
<b>zul. Gesamtgewicht</b>	1800 kg	1885 kg	1780 kg
<b>Hubraum</b>	2175 cm <sup>3</sup>	1995 cm <sup>3</sup>	1796 cm <sup>3</sup>
<b>Zylinder</b>	4	4	4
<b>Kraftstoffart</b>	Benzin	Benzin	Benzin
<b>Nennleistung</b>	76 KW / 5.500 min <sup>-1</sup>	78 KW / 5500 min <sup>-1</sup>	85 KW / 5500 min <sup>-1</sup>
<b>Drehmoment</b>	170 Nm / 3500 min <sup>-1</sup>	159 Nm / 3250 min <sup>-1</sup>	158 Nm / 3750 min <sup>-1</sup>
<b>Getriebe</b>	5-Gang manuell	5-Gang manuell	5-Gang manuell
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>	175 km/h	176 km/h	195 km/h
<b>Verbrauch auf 100 km</b>	12,5 l	10,5 l	9,5 l
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	365 g/km	306,6 g/km	277,4 g/km
<b>serienmäßige Sicherheitsausstattung</b>			
	Statigurte vorn / hinten	3 Punkt-Sicherheitsgurte auf allen Plätzen (außer hinten Mitte)	3 Punkt-Sicherheitsgurte auf allen Plätzen (außer hinten Mitte), vorn höhenverstellbar
	-	-	Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer
	-	-	ABS
	-	-	Frontairbag Fahrer- / Beifahrer
	-	-	Seitenaufprallschutz
<b>serienmäßige Ausstattung (Grundausstattung der gewählte Motorisierung)</b>			
	Servolenkung	Servolenkung (DIRAVI - Direction a Rappel asservVI) selbstrückstellende, hydraulisch unterstützte Lenkung)	Servolenkung
	hydropneumatische Federung mit Niveauregulierung automatische Niveauregulierung der Scheinwerfer	hydropneumatische Federung mit Niveauregulierung	-
	Kurvenlicht der Fernscheinwerfer	-	-
	geteilt umklappbare Sitze	geteilt umklappbare Sitze	geteilt umklappbare Sitze

Tabelle 7-1 – Eigenschaften Vergleichsfahrzeuge [eigene Darstellung] &lt;Fortsetzung&gt;

<b>serienmäßige Ausstattung (Grundausrüstung der gewählte Motorisierung)</b>			
	-	Ölstandsanzeige am Armaturenbrett	-
	-	Econoscope (Anzeige für wirtschaftliches Fahren in der Tachoeinheit)	-
	-	elektrische Fensterheber vorn	elektrische Fensterheber vorn
	-	manuell höhenverstellbarer Fahrersitz	-
	-		Zentralverriegelung
	-	-	Lenksäule höhenverstellbar
	-	-	elektronische Wegfahrsperr
<b>sonstige technische Details</b>			
	innenliegende Scheibenbremsen vorn und Trommelbremsen hinten	Scheibenbremsen vorn (innenbelüftet) / hinten	Scheibenbremsen von (innenbelüftet), Trommelbremse hinten
	hydraulische Lenkung (bei Druck im System keine mechanische Verbindung zw. Lenkrad und Rädern)	hydraulische Lenkung (bei Druck im System keine mechanische Verbindung zw. Lenkrad und Rädern)	Einzelradaufhängung vorn an McPherson-Federbein
	Motorhaube und Kofferraumdeckel aus Aluminium	Ganzstahlkarosserie ruht mittels elastischer Zwischenelemente auf dem Achsrahmen	Seitenairbag ab 1997 lieferbar
	Kotflügel, Hauben, Türen und Dach sind nichttragend und spannungsfrei mit dem Rahmen verschraubt	Rahmenkonstruktion trägt vorne Antriebseinheit, Lenkung und Rad aufhängung, hinten die einzeln an Längslenkern geführten Räder	-
	Fahrzeugdach aus Plastik	Entkoppelung von Aufbau, Motor sowie Fahrwerkselementen sorgte für eine deutliche Reduzierung der Vibrationen, Geräusche und Stöße	-
	-	Katalysator ab 1985 lieferbar	-
	-	ABS ab 1985 lieferbar	-

## 7.2 Extrapolation Energieverbrauch Automobilproduktion

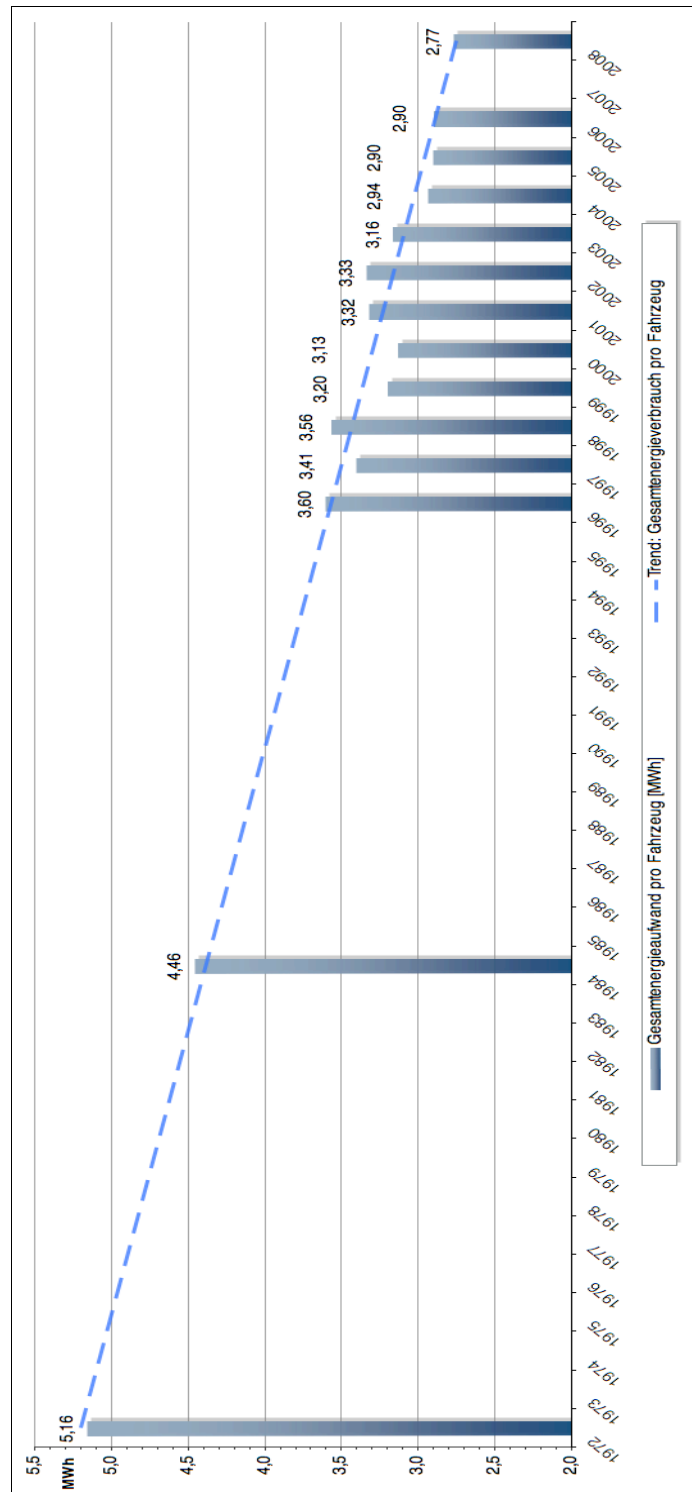


Abbildung 7-1 – Extrapolation des Gesamtenergieverbrauchs in der Automobilfabrik pro produziertem Fahrzeug [eigene Darstellung]

## 7.3 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf Citraën DS 21

Tabelle 7-2 – Werkstoffzusammensetzung Citroën DS [eigene Darstellung]

	Anteil in Prozent	Gewicht in kg
Stahl- und Eisenwerkstoffe	72,29	900,0
Leichtmetalle, Guss- und Knetlegierungen	2,73	34,0
Buntmetalle, Guss- und Knetlegierungen	0,96	12,0
Sondermetalle	0,08	1,0
Kunststoffe allg.	4,50	56,0
Gummi	5,82	72,5
Prozesspolymere	0,88	11,0
sonst. Werkstoffe	6,95	86,5
Elektronik / Elektrik	0,12	1,5
Betriebs- und Hilfsstoffe	5,62	70,0
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>100</b>	<b>1245</b>

Tabelle 7-3 – Rohstoffbedarf Citroën DS 21 [eigene Darstellung]

	Gewicht
Wasser	44.873,04 kg
Eisenerz	1.089,00 kg
Mineralien	544,85 kg
Eisenschrott	333,90 kg
Bauxit	157,08 kg
Erdöl	139,91 kg
Zink-Erz	8,08 kg
Kupferschrott	4,38 kg
Kupfererz	3,74 kg

## 7.4 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf Citroën CX 20

Tabelle 7-4 – Werkstoffzusammensetzung Citroën CX [eigene Darstellung]

	Anteil in Prozent	Gewicht in kg
Stahl- und Eisenwerkstoffe	68,78	901
Leichtmetalle, Guss- und Knetlegierungen	3,28	43
Buntmetalle, Guss- und Knetlegierungen	1,45	19
Sondermetalle	0,23	3
Kunststoffe allg.	6,11	80
Gummi	5,34	70
Prozesspolymere	0,92	12
sonst. Werkstoffe	7,63	100
Elektronik / Elektrik	0,15	2
Betriebs- und Hilfsstoffe	6,11	80
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>100</b>	<b>1310</b>

Tabelle 7-5 – Rohstoffbedarf Citroën CX 20 [eigene Darstellung]

	Gewicht
Wasser	48.559,500 kg
Eisenerz	1.090,210 kg
Mineralien	553,003 kg
Eisenschrott	334,271 kg
Bauxit	152,460 kg
Erdöl	162,255 kg
Zink-Erz	12,120 kg
Kupferschrott	7,665 kg
Kupfererz	0,660 kg
Aluminium	6,545 kg
Aluminiumschrott	11,000 kg

## 7.5 Werkstoffzusammensetzung und Rohstoffbedarf

### Ford Mondeo 1.8i

Tabelle 7-6 – Werkstoffzusammensetzung Ford Mondeo 1.8i [eigene Darstellung]

	Anteil in Prozent	Gewicht in kg
Stahl- und Eisenwerkstoffe	64,00	798
Leichtmetalle, Guss- und Knetlegierungen	8,00	100
Buntmetalle, Guss- und Knetlegierungen	1,80	22
Sondermetalle	0,20	2
Kunststoffe allg.	11,50	143
Gummi	5,00	62
Prozesspolymere	0,80	10
sonst. Werkstoffe	3,20	40
Elektronik / Elektrik	0,50	6
Betriebs- und Hilfsstoffe	5,00	62
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>100</b>	<b>1247</b>

Tabelle 7-7 – Rohstoffbedarf Ford Mondeo [eigene Darstellung]

	Gewicht
Wasser	53.268,660 kg
Eisenerz	965,580 kg
Mineralien	498,692 kg
Eisenschrott	296,058 kg
Bauxit	46,200 kg
Erdöl	236,772 kg
Zink-Erz	15,150 kg
Kupferschrott	7,665 kg
Kupfererz	6,545 kg
Aluminium	5,940 kg
Aluminiumschrott	99,000 kg
Magnesiumchlorid	3,304 kg

## 7.6 Berechnung des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase

Grundlage für die Berechnung des Energieverbrauchs bildet der Heizwert des Benzins, welcher für die folgende Berechnung mit 43,6 MJ pro Kilogramm festgelegt ist [55]. Zur Vereinfachung der späteren Kalkulation wird der Heizwert in MJ pro Liter umgerechnet, wobei die Dichte von Benzin 0,72 Kilogramm pro Liter beträgt. Mit Hilfe einer Verhältnisgleichung kann der gesuchte Wert ermittelt werden:

$$\frac{1kg}{43,6MJ} = \frac{0,72kg}{x} \quad \text{damit ist } x = 31,39 \quad \text{und somit } 1l = \underline{\underline{31,39MJ}} \quad (1)$$

Für die vorgelagerten Schritte der Kraftstoffbereitstellung sind 5,4 MJ pro Liter aufzuwenden, welche aufgrund des funktionalen Zusammenhangs dem reinen Energiegehalt des Benzins zugeschrieben werden [10, S.250]. Somit ergibt sich ein Energiegehalt für Benzin von ca. 36,79 MJ pro Liter.

Weiterhin ist festgelegt, dass 1kWh Energie umgerechnet 3,6 MJ entspricht. Damit kann der Wert für Benzin von 36,79 MJ pro Liter in MWh pro Liter umgerechnet werden [92]:

$$1kWh = 3,6MJ \quad \text{somit ist } 1MJ = 0,27778kWh \quad \text{oder auch } 1MJ = 0,00027778MWh$$

Dieses Ergebnis wird mit dem Heizwert pro Liter Benzin multipliziert:

$$1L = \frac{(36,79MJ \cdot 0,00027778MWh)}{1MJ} = \underline{\underline{0,01022MWh}} \quad (2)$$

Somit enthält 1Liter Benzin ungefähr 0,01022 MWh Energie.

Diese Kalkulation bildet den Ausgangspunkt für die Berechnung des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase. Gemeinsam mit dem Benzinverbrauch pro 100 Kilometer und der Jahresfahrleistung kann die verbrauchte Energie ermittelt werden.

Folgende Werte bilden die Grundlage für die Berechnungen hinsichtlich des Energieverbrauchs:

- Citroën DS 21: 12,5 l / 100km

- Citroën CX 20: 10,5 l / 100km
- Ford Mondeo: 9,5 l / 100km

Exemplarisch für alle untersuchten Fahrzeuge und Jahre wird Energieverbrauch der Citroën DS im Jahre 1972, mit einem Benzinverbrauch von 12,5 Liter auf 100 Kilometer und einer Jahresfahrleistung von 13586 Kilometer, errechnet.

Mit Hilfe einer Verhältnisgleichung wird die pro Jahr verbrauchte Menge an Benzin errechnet:

$$\frac{12,5 l}{100 km} = \frac{x}{13586 km} \quad \text{damit ist} \quad x = \underline{\underline{1698,25 l}} \quad (3)$$

Die ermittelte Benzinmenge von 1698,25 Liter wird nun im letzten Schritt für die Berechnung des Energieverbrauchs pro Jahr verwendet:

$$\text{Gesamtverbrauch} = \frac{(1698,25 L \cdot 0,01022 MWh)}{1 l} = \underline{\underline{17,356 MWh}} \quad (4)$$

Dadurch konnte für die Citroën DS ein Jahresenergieverbrauch von 17,356 MWh errechnet werden.

## 7.7 Berechnung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes während der Nutzungsphase

Die folgenden Berechnungen basieren auf den zuvor ermittelten CO<sub>2</sub>-Werten der Fahrzeuge, welche auf Grundlage des realen Kraftstoffverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Kraftstoffbereitstellung ermittelt wurden [31]. Dabei entspricht der, mit Hilfe der bereitgestellten Excel-Tabelle, errechnete Wert ungefähr 2,92 Kilogramm CO<sub>2</sub> pro Liter Benzin.

Die Berechnung wird exemplarisch anhand der Citroën DS durchgeführt. Diese gilt mit, entsprechend veränderten Verbrauchswerten, auch die beiden anderen Fahrzeugtypen. Analog zu den Berechnungen des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase, wird auch hier die Menge des verbrauchten Benzins pro Jahr ermittelt. Diese Summe wird im letzten Schritt mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Liter Benzin multipliziert:

$$\text{Gesamtausstoß} = \frac{(1698,25 L \cdot 2,92 \text{ kg } CO_2)}{1 l} = \underline{\underline{4958,89 \text{ kg } CO_2}} \quad (5)$$

Anschließend kann noch die gebräuchliche Mengenangabe von g CO<sub>2</sub> / km berechnet werden:

$$\frac{4958,89 \text{ kg } CO_2}{13586 \text{ km}} = \underline{\underline{0,365 \text{ kg } CO_2 / \text{km}}} \quad (6)$$

Somit emittiert das Fahrzeug 365 g CO<sub>2</sub> pro gefahrenem Kilometer, inklusive des Ausstoßes im Zuge der Kraftstoffbereitstellung.

