

## 2 Grundlagen der Umweltbewertung und Produktentwicklung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration von ökologischen Lebenswegbewertungen in Fahrzeugentwicklungsprozesse (siehe Unterkapitel 1.2). Im ersten Schritt werden die in diesem Kontext elementaren Begrifflichkeiten definiert. Dies umfasst insbesondere die Begriffe Produkt und Fahrzeug, die Umweltbewertung im Allgemeinen sowie den Lebensweg eines Produkts. Darauf folgt eine detaillierte Vorstellung der Grundlagen der lebenswegorientierten Umweltbewertung und der Fahrzeugentwicklung.

### 2.1 Definitionen

#### 2.1.1 Produkte und deren Entwicklung

Der grundlegendste Begriff dieser Arbeit ist das Produkt. Eine Eingrenzung des Begriffs wird vor allem notwendig, da hierunter alle Güter zusammengefasst werden, die folgende Eigenschaft aufweisen:

*„Ergebnis der Produktion und Sachziel einer Unternehmung oder auch Mittel der Bedürfnisbefriedigung.“ (Voigt, Möhrle, Specht 2016)*

Auch wenn der allgemeine Produktbegriff sowohl materielle (Sachgüter) als auch immaterielle Güter (Dienstleistungen) umfasst (Voigt, Möhrle, Specht 2016), werden in dieser Arbeit nur materielle Produkte berücksichtigt. Der Begriff Produkt wird weitergehend im Sinne eines Produktexemplars verstanden, dass für die Erfüllung einer Funktion benötigt wird (DIN EN ISO 14040, S. 36). Das hier betrachtete Produkt ist schließlich das Kraftfahrzeug (KFZ). Synonym werden dazu die Begriffe Fahrzeug, Personenkraftwagen (PKW) und Automobil verwendet. Die zu erfüllende Funktion eines Kraftfahrzeugs ist hier zum Beispiel der Transport einer Person von Ort A zu Ort B. Eine detaillierte Festlegung dieser Funktion wird in Unterabschnitt 2.2.1.1 vorgenommen.

Die Generierung eines Produkts aus Ideen wird dementsprechend als Produktentwicklung bezeichnet. Dies umfasst den Prozess von der Idee über die Konstruktion bis zum Start der Produktion. (Dyckhoff, Gießler 1998, S. 171) Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen ist die Fahrzeugentwicklung (Gusig, Kruse 2010, S. 12). Die Prozesse und die Akteure, sowie Methoden der Produkt- beziehungsweise der Fahrzeugentwicklung werden im Detail in Unterkapitel 2.3 erläutert.

#### 2.1.2 Umweltbewertung

Mit einer ökologischen Bewertung beziehungsweise einer Umweltbewertung werden die Umweltbeeinflussungen und dessen Wirkungen auf die Umwelt durch Technologien oder andere menschliche, anthropogene, Einflüsse beurteilt. In diesem Fall ist dieser Einfluss das Produkt Fahrzeug. Eine Bewertung wird hier notwendig, da zwar viele Umwelteigenschaften

ten und -größen gemessen werden können, aber hierdurch die Wirkung und genaue Beeinflussung auf die Umwelt noch nicht vollumfänglich deutlich wird. Hinzu kommt, dass durch die Abhängigkeit vom betrachteten System, den verglichenen Alternativen und des fokussierten Umweltproblems (siehe dazu Unterabschnitt 2.2.1.3) oft keine generelle und eindeutige Aussage über die Wertung eines Einflusses möglich ist und es zu Zielkonflikten kommen kann. Daher gibt eine große Anzahl an Umweltbewertungsmethoden, mit denen je nach Anwendungsfall und Zielsetzung eine Wertung möglich wird. (Kaltschmitt, Schebek 2015a, S. 4ff)

In der Einleitung wurde bereits die Relevanz einer ganzheitlichen, auf den gesamten Lebensweg eines Produktes bezogenen, Umweltbewertung aufgezeigt. In Unterkapitel 2.2 werden daher die Grundlagen der lebenswegorientierten Umweltbewertungen detailliert beschrieben. Hier wird auch die hohe Relevanz der Ökobilanz (Life Cycle Assessment – LCA, auch Umweltbilanz) als das quantitative Analysewerkzeug von Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg erläutert. Weitere lebenswegbezogene Umweltbewertungsmethoden, die zum großen Teil der Ökobilanz entlehnt sind, werden in Unterkapitel 3.2 verglichen und bewertet. Darauf aufbauend erfolgt die Auswahl der Umweltbewertungsmethodik zur Integration von ökologischen Lebenswegbewertungen in Fahrzeugentwicklungsprozesse.

### *2.1.3 Produktlebensweg*

Da der Begriff Lebensweg sowohl im Bereich der Produktentwicklung, als auch im Bereich der Umweltbewertung eine wichtige Rolle spielt, aber jeweils einen anderen Schwerpunkt bildet, wird dieser im Folgenden spezifiziert. Dazu sind eine Reihe von Lebensweg-, Lebensphasen- oder Lebenszykluskonzepten bekannt, die technische, wirtschaftliche und beziehungsweise ökologische Aspekte umfassen. Eine umfangreiche Kategorisierung von Lebenswegkonzepten hat etwa HERRMANN (Herrmann 2010, S. 63ff) vorgenommen.

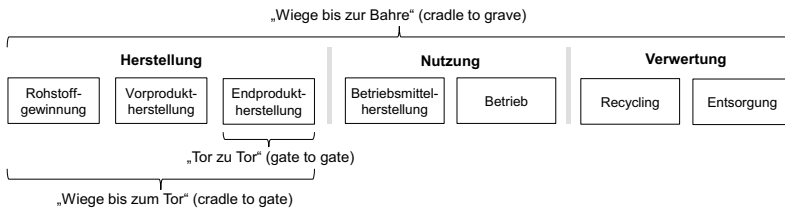
Sowohl in der Produktentwicklung als auch in der lebenswegbasierten Umweltbewertung besteht ein Produktleben neben der tatsächlichen Nutzung des Produkts aus weiteren Lebenswegphasen. Im Folgenden werden die Lebenswegkonzepte dieser beiden Disziplinen in den Vordergrund gestellt und schließlich ein gemeinsames Lebenswegkonzept für diese Arbeit abgeleitet.

#### *2.1.3.1 Ökologischer Produktlebensweg*

Der Produktlebensweg ist bei der Bewertung der Umwelteigenschaften eines Produkts besonders wichtig. Nur so können die Umweltlasten über alle Phasen gesenkt werden, statt die Lasten zwischen den Phasen zu verschieben. Es müssen also aus Sicht der Umweltbewertung alle Lebenswegphasen berücksichtigt werden. (Klöpffer 2003)

Der ökologische Produktlebensweg besteht dabei aus drei Hauptphasen, der Herstellung, der Nutzung und der Verwertung. Der Lebensweg wird in diesem Zusammenhang auch als der Weg von der „Wiege zur Bahre“ (cradle to grave) bezeichnet. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 2f; Kara, Mannek, Herrmann 2010) Dies bezeichnet gleichzeitig den Bilanzrahmen beziehungsweise Bilanzraum einer Umweltbewertung. So gehört zur Phase der Herstellung neben der Hauptproduktherstellung auch die gesamte Vorprodukteherstellung, von der Roh-

stoffgewinnung über die Werkstoffherstellung und Bauteilherstellung bis hin zum Zusammenbau des Produkts. Die Nutzungsphase bezieht alle Umwelteigenschaften ein, die beim Betrieb des Produkts entstehen, sowie auch die Betriebsmittelherstellung. Zum Lebensende des Produkts steht die Verwertung mitsamt den Aufwendungen für Recycling und Entsorgungen. (Eyerer 1996, S. 13f; Klöpffer, Grahl 2009, S. 3) Die Elemente des ökologischen Produktlebenswegs und dessen verschiedene Betrachtungsrahmen werden in Abbildung 3 aufgezeigt.



**Abbildung 3** Der ökologische Produktlebensweg; in Anlehnung an (Klöpffer, Grahl 2009, S. 3) und (Europäische Kommission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2010, S. 96)

Weitere Rahmen sind die „Tor zu Tor“-Betrachtungen (gate to gate) und die „Wiege bis zum Tor“-Betrachtung (cradle to gate). Hierbei wird jedoch nur ein Teil des gesamten Lebenswegs in die Bewertung einbezogen. Von „Tor zu Tor“ steht für eine Umweltbewertung der Herstellungsprozesse des Hauptprodukts im Herstellerwerk ohne Berücksichtigung der Rohstoffgewinnung und der Vorproduktherstellung. In der „Wiege bis zum Tor“-Bewertung wird zwar die gesamte Herstellung einbezogen, aber es wird die Nutzung und Verwertung abgeschnitten. (DIN EN ISO 14040, S. 36)

Auch zyklische Elemente können im Lebensweg aufgenommen werden. Beim ökologischen Produktlebensweg handelt es sich dabei meist um die Abbildung einer Produktwiederverwendung oder Teilen dessen im Zuge von Recycling. Wenn der Abfall eines Produkts nach dessen Entsorgung wieder zur Herstellung desselben Produkts genutzt wird, wird dieser Rahmen als „Wiege bis zur Wiege“ (cradle to cradle) bezeichnet. Aber auch kleine Zyklen wie die direkte Wiederverwendung von Produktionsverschnitten werden so abgebildet. (McDonough, Braungart 2002; Braungart, McDonough, Bollinger 2007)

### 2.1.3.2 Technisch-wirtschaftlicher Produktlebensweg

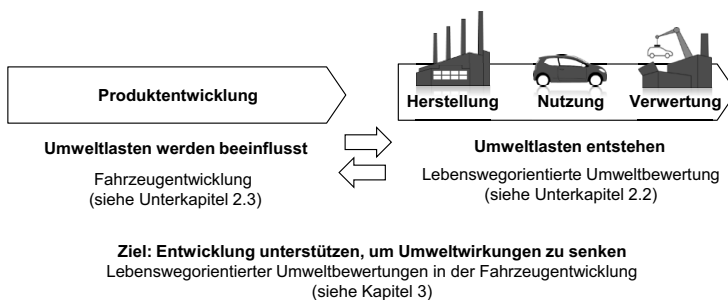
Die ökonomischen Lebenswegkonzepte haben einen starken Bezug auf die Betrachtung von Kostenkennzahlen und Absatz während der Marktpresenz eines Produkts, dem Marktzyklus. (Höft 1992, S. 17ff, 53) Dies dient insbesondere der strategischen und operativen Produktplanung. (Mateika 2005, S. 7) In der Automobilindustrie werden zum Beispiel über sogenannte Cycle-Pläne die Zyklen einzelner Modellreihen in der Portfolioplanung aufeinander abgestimmt sowie Absatzpotenziale und Herstellungskapazitäten geplant. (Xu u. a. 2009; Hill, Szakaly, Edwards 07.2007, S. 8) Im Gegensatz zum ökologischen Lebensweg

wird hier also nicht der Lebensweg eines einzelnen Produktexemplars betrachtet. Stattdessen wird die Marktpräsenz der gesamten Produktart, beziehungsweise einer Produktreihe, betrachtet. (Kölscheid 1999, S. 23)

Bei integrierten Lebenswegkonzepten, die die technische und wirtschaftliche Sichtweise vereinen, werden dagegen vergleichbare Phasen wie beim ökologischen Produktlebensweg betrachtet. Ergänzt wird dabei die Produktentstehung vor der Produktherstellung. (Dyckhoff, Gießler 1998, S. 171) Bei FELDHOSEN (Feldhusen u. a. 2013b, S. 297) wird dieser Lebenszyklusbegriff als intrinsisch bezeichnet – es wird die „Biographie des Produkts“ abgebildet. Weiterhin unterscheiden sich die Detailierungsgrade und die Schwerpunkte der einzelnen Phasen im Vergleich zum ökologischen Lebensweg. So wird etwa die Produktion von Vorprodukten in der Regel nicht differenziert. Dafür wird die Nutzungsphase, oder auch Marktpräsenzphase im Detail, etwa nach Marktphasen wie bei FRITZ (Fritz, Oelsnitz 2006, S. 174), unterteilt. Die Entsorgung wird dagegen bei vielen Konzepten nicht gesondert berücksichtigt.

### 2.1.3.3 Lebenswegkonzept und Bezugsrahmen dieser Arbeit

Für diese Arbeit werden Elemente des ökologischen Produktlebenswegs mit dem technisch-wirtschaftlichen Produktlebensweg kombiniert. Dies geschieht vor allem vor dem Hintergrund, dass zwar in der Produktentwicklung im Vergleich zur Herstellung und Nutzung eines Produkts kaum Umweltlasten entstehen, aber über die Eigenschaften des Produkts die Umweltlasten in den nachfolgenden Lebenswegphasen bestimmt werden. Nach ULLMANN ist die Produktentwicklung nicht nur für die Geburt des Produkts verantwortlich, sondern auch für dessen Leben und Tod (Ullmann 2010, S. 12). Davon abgeleitet wird in Abbildung 4 der für diese Arbeit abgedeckte Umfang des Lebenswegs vereinfacht illustriert. Hier ist die Produktentwicklung als Phase aus dem technisch-wirtschaftlichen Produktlebensweg dem ökologischen Produktlebensweg, mit den Phasen Herstellung, Nutzung und Verwertung, vorgeschaltet.



**Abbildung 4** Zusammenführung des ökologischen und technisch-wirtschaftlichen Produktlebenswegs; in Anlehnung an (Ullmann 2010, S. 11)

Gleichzeitig bildet dies den Rahmen für die folgenden Unterkapitel. Dieser wird zum Beispiel in Abbildung 27 in Abschnitt 3.1.5 wieder aufgegriffen. Nach einer Einführung in die Grundlagen der lebenswegorientierten Umweltbewertung und der Fahrzeugentwicklung

werden in Kapitel 3 die Chancen und Herausforderung der Kombination beider Disziplinen aufgezeigt. Dies geschieht unter Berücksichtigung des Ziels dieser Arbeit: der Integration von Umweltbewertungen in Entscheidungen während des Fahrzeugentwicklungsprozesses, um über den gesamten Lebenszyklus die Umweltlasten von Fahrzeugen zu senken.

## 2.2 Grundlagen der lebenswegorientierten Umweltbewertung

Das Ziel der lebenswegorientierten Umweltbewertung ist die Analyse aller relevanten Umweltlasten unter Berücksichtigung des gesamten ökologischen Lebenswegs. Diese Anforderung kann eine Kombination von Energie- und Materialflussanalysen mit dem Lebenswegdenken (Life Cycle Thinking) abdecken. (Schmidt 1995; Frankl, Rubik 2000, S. 20) Die methodische Grundlage der lebenswegorientierten Umweltbewertung ist die Ökobilanz. Die Ökobilanz ist dabei ein quantitatives Analysewerkzeug von Umweltwirkungen. (Kaltschmitt, Schebek 2015b).

Wie in der Zielsetzung schon formuliert, werden in dieser Arbeit die ökologischen Wirkungen eines Produkts fokussiert. Daher werden Ansätze wie die Lebenswegkostenrechnung (Life Cycle Costing – LCC) und der sozialen Lebenswegbilanz (Social Life Cycle Assessments – S-LCA) nicht betrachtet. Zudem werden Ansätze zur ökologischen Bilanzierung von Volkswirtschaften, Branchen (zum Beispiel Input-output Modelle) oder Unternehmen (zum Beispiel: Betriebsökobilanzen, Organisational LCA – O-LCA) nicht betrachtet, da die Arbeit die Bewertung von Einzelprodukten zum Ziel hat und somit Produktökobilanzen die geeignete Ausprägung darstellen.

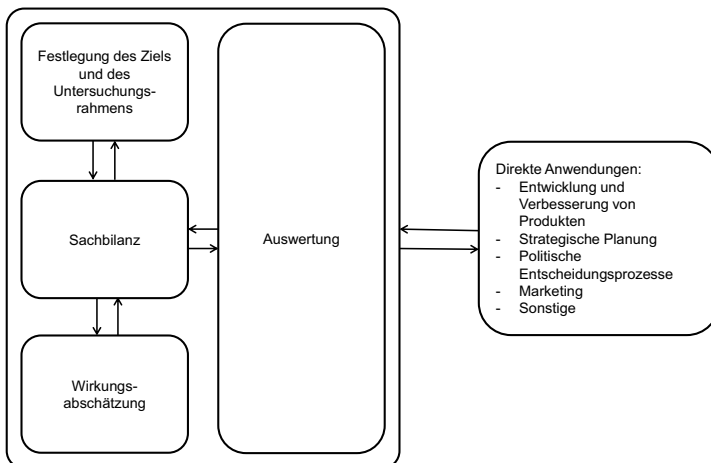
Die Ökobilanz ist insbesondere in den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 beschrieben und standardisiert. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044) Somit ist die Ökobilanz „die einzige international genormte Methode zur umweltorientierten Analyse von Produktsystemen“. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 387) Weiterhin spricht für diese Methodik, dass diese innerhalb der Automobilindustrie, sowohl bei Herstellern als auch bei Zulieferern, weit verbreitet und etabliert ist. (Eyerer 1996, S. 23f; Hamm u. a. 2013, S. 1098ff; Chanaron 2007) Die Audi AG, Daimler AG („Umweltzertifikate“) und Volkswagen AG („Umweltprädi-kate“) veröffentlichen zum Beispiel regelmäßig Ökobilanzen ihrer Produkte (Audi AG 2015; Daimler AG 2012a; Volkswagen AG 2014a; Volkswagen AG 04.09.2013). Toyota und Renault veröffentlichen ebenfalls einzelne Ökobilanzen ausgewählter Fahrzeuge und Technologien (Toyota Motor Corporation 10.06.2015; Renault Group 2011). Zudem hat sich die Ökobilanzierung offensichtlich auch langfristig in der Anwendung bewährt. So werden beispielsweise bei Volkswagen schon seit Beginn der 1990er-Jahre Ökobilanzen durchgeführt. (Warsen, Krinke 2013) Ökobilanzen sind zudem bei vielen Herstellern sowohl in der Nachhaltigkeitsstrategie (BMW Group 2015, S. 47; Daimler AG 2015, S. 58; Hyundai Motor Company 2015, S. 67; Jaguar Land Rover, S. 4; Toyota Motor Corporation 2014, S. 84; Volkswagen AG 05.05.2015, S. 94) als auch in der Fahrzeugentwicklung (Ruhland u. a. 2011; Warsen, Krinke 2013; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bundesverband der Deutschen Industrie e. V., Umweltbundesamt 2014, S. 61) verankert. Zu erwähnen ist dabei, dass die genannten Unternehmen zwar normgerechte Ökobilanzen durchführen, aber eine Vergleichbarkeit dieser Studien dadurch noch nicht gegeben ist. So bietet die Norm ISO 14040 Leitlinien zur Ökobilanzierung, die aber für den Anwender zum Beispiel bei der Wahl von Allokationsschlüsseln und

der Auswahl von Wirkungskategorien (siehe dazu Abschnitt 2.2.1) Gestaltungsspielräume lassen. Ansätze die Durchführung der Ökobilanz zu vereinheitlichen und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern, werden von der Europäischen Kommission in ausgewählten Branchen im Rahmen von Pilotprojekten erprobt. (Europäische Kommission 26.05.2014)

Insgesamt sprechen die umfassende Standardisierung und die starke Verbreitung und Anwendung in der Automobilindustrie für die Ökobilanzierung. Daher wird im folgenden Abschnitt die Methodik der Ökobilanzierung im Detail vorgestellt.

### 2.2.1 Methodik der Ökobilanzierung

Der Rahmen einer Ökobilanz umfasst in den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 vier Phasen. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044) Diese Phasen umfassen das Ziel und den Rahmen der Untersuchung, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung. Wie in Abbildung 5 zu sehen, sind die Phasen nicht konsekutiv, sondern explizit mit Rückkopplungen versehen. In der Regel werden die Phasen der Ökobilanzierung nämlich iterativ durchlaufen, um insgesamt die Daten- und Ergebnisqualität der Ökobilanzstudie zu verbessern. Dies wird dadurch erreicht, dass etwa zunächst über generische Daten die ökologischen Schwerpunkte eines Produkts identifiziert werden, um dann diese in der Folge über detailliertere und spezifischere Daten besser abbilden zu können. Dieses Vorgehen wird dann solange fortgeführt, wie der Aufwand im Verhältnis zu einer Ergebnisverbesserung gerechtfertigt scheint. (Del Duce u. a. 31.03.2013, S. 13; Europäische Kommission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2010, S. 25)



**Abbildung 5** Phasen einer Ökobilanz; nach (DIN EN ISO 14040:2009), wiedergegeben mit Erlaubnis von DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Am DIN Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Im Folgenden werden diese Phasen kurz erläutert und die für diese Arbeit grundsätzlich geltenden Annahmen und Festlegungen innerhalb der Ökobilanzierung diskutiert.

### 2.2.1.1 Festlegung des Ziels und des Rahmens in der Ökobilanzierung

Bei der Erstellung einer Ökobilanz werden im ersten Schritt das Ziel und der Rahmen dieser festgelegt. Laut Norm sind bei der Zielstellung für eine Ökobilanz der Anwendungsbereich, die Veranlassung, die Zielgruppe und die Veröffentlichungsintention zu klären. Der Anwendungsbereich beschreibt etwa das zu betrachtende Produkt. Handelt es sich dabei zum Beispiel um ein einzelnes Bauteil, um ein gesamtes Fahrzeug oder die gesamte Fahrzeugflotte eines Unternehmens. Mit der Veranlassung ist die Motivation beziehungsweise das „Erkenntnisinteresse“ gemeint. Sollen Verbesserungspotenziale eines bestehenden Produkts identifiziert werden, soll bei der Entwicklung eines neuen Produkts eine Entscheidungsunterstützung gegeben werden, oder sollen zwei Produkte miteinander verglichen werden? Abhängig von der Zielgruppe der Ökobilanz ist nicht nur die Ergebnisdarstellung, sondern auch der Rahmen der Studie. Je nach Empfänger muss das gesamte Unternehmen bilanziert (Betriebsökobilanz) werden, oder auch nur ein einzelner Herstellungsprozess (Prozessökobilanz). Davon ist auch abhängig, ob eine Veröffentlichung der Studie angestrebt wird oder ob die Studie nur für unternehmensinterne Zwecke verwendet wird. (DIN EN ISO 14044; Klöpffer, Grahl 2009)

Die Beantwortung dieser Fragen unterstützt bei der Festlegung des zu untersuchenden Rahmens. Der Rahmen einer Ökobilanz wird über den Untersuchungsrahmen und die Systemgrenzen beschrieben und muss so definiert werden, dass alle relevanten Prozesse abgedeckt werden. Wie schon in Abschnitt 2.1.3.1 und Abbildung 3 auf Seite 8 gezeigt, ist zu entscheiden, ob eine Bilanz von Tor-zu-Tor oder von der Wiege-zur-Bahre durchgeführt werden soll. Zudem werden die zu betrachtenden Wirkungsindikatoren festgelegt. (DIN EN ISO 14040)

Ein wichtiger Begriff innerhalb der Ökobilanz bei der Festlegung des Rahmens ist die funktionelle Einheit. Diese beschreibt die Funktion, auf deren Basis Produkte verglichen werden. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 37f) Bei Automobilen ist die folgende Definition der funktionellen Einheit üblich:

*„Personentransport über eine festgelegte Gesamtdistanz von 150.000 Kilometern im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bei vergleichbaren Gebrauchseigenschaften (z.B. Fahrleistungen)“ (Volkswagen AG 04.09.2013)*

In aktuellen Ökobilanzen bei Volkswagen (hier „Umweltprädikate“ genannt) wird dagegen eine Gesamtdistanz von 200.000 km herangezogen. (Volkswagen AG 2014b) Dieser Wert wird ebenso von DAIMLER (Daimler AG 2012b) und AUDI (Audi AG 2015) genutzt. Auch EHRENBERGER ET. AL. (Ehrenberger u. a. 2013) gehen von einer Kilometerleistung zwischen 150.000 km und 200.000 km aus. Die genannten Werte basieren allerdings auf Annahmen, Festlegungen oder Expertenabschätzungen. Durch die statistische Auswertung von Automobil-Zulassungsdaten konnten jedoch WEYMAR UND FINKBEINER (Weymar, Finkbeiner 2016) auch empirisch belegen, dass je nach Fahrzeugsegment und Antriebsart eine Kilometerleistung zwischen 150.000 km (Ottomotor, Kleinst- und Kleinwagen, Klassen A00 und A0) und 240.000 km (Dieselmotor, Wagen der oberen Mittelklasse, Klasse C) vorliegt. Zur Verwendung in der Ökobilanzierung wird von WEYMAR UND FINKBEINER

(Weymar, Finkbeiner 2016) zudem eine Laufleistung von 200.000 km als segmentunspezifischer Durchschnittswert vorgeschlagen. Dieser Wert entspricht auch der vorgeschlagenen spezifischen Laufleistung eines Kompakt- oder Mittelklassewagens (Klassen A und B).

Im engen Zusammenhang zur funktionellen Einheit steht der Referenzfluss einer Ökobilanz, der die Produktmenge quantifiziert, um die genannten Funktion zu erfüllen. Beim Vergleich von zwei Automobilen einer Fahrzeugklasse wird dieselbe Produktmenge die geforderte Funktion erfüllen. Dies entspricht dann einer Produktmenge von eins und damit einem Referenzfluss mit der Wertigkeit eins. Beim Vergleich eines Busses zu einem PKW müsste jedoch über den Referenzfluss berücksichtigt werden, dass für die gleiche Funktionserfüllung eines Busses mehrere PKW benötigt werden.

Weitere Festlegungen betreffen die Abschneide- und Allokationsregeln. Hiermit wird festgelegt, ob und wann untergeordneten Prozesse und Stoffe abgeschnitten werden oder wie etwa mit der Herstellung von Kuppelprodukten umgegangen werden soll. Wenn in einer Herstellung mehrere Produkte nebeneinander hergestellt werden (Kuppelproduktion), dann sind ebenso die Umweltlasten auf diese Produkte zu allokieren. Dies geschieht üblicherweise anhand der Masse oder des ökonomischen Werts der Produkte. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 94ff)

Allgemein ist hierbei auch festzulegen, welchen geographischen und zeitlichen Rahmen die Studie abdeckt. Je nach Region differieren etwa die Herstellverfahren und deren Effizienz oder auch die typische Zusammensetzung der Energieträger zur Erzeugung elektrischen Stroms. (Egede 2017, S. 59ff) Aus zeitlicher Perspektive kann eine Ökobilanz dazu retrospektiv, also zurückblickend, oder prospektiv, also vorausschauend, durchgeführt werden. (Ekvall, Tillman, Molander 2005) Die meisten veröffentlichten Ökobilanzen, wie die Umweltprädikate von Volkswagen, bilden den Zustand allerdings rückblickend auf ein bestehendes Produkt ab. Dies liegt vor allem daran, dass diese Publikationen üblicherweise zur Produkt- und Unternehmenskommunikation nach Abschluss der Produktentwicklung verwendet werden. (Tropschuh u. a. 2013) Für eine Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung ist aber eine prospektive Sichtweise in Bezug auf das marktreife Produkt zu bevorzugen. Nur so kann bereits im Laufe der Entwicklung die Produktwirkung auf die Umwelt zum Zeitpunkt der Markteinführung abgeschätzt werden. Zudem kann so noch rechtzeitig auf die Entwicklung Einfluss genommen werden. Siehe dazu auch Unterkapitel 3.1.

An diesem Punkt sollte auch die Ausrichtung der Ökobilanz festgelegt werden. Hierbei werden Ökobilanzen nach „attributional“-Ansätzen (~unmittelbar) und „consequential“-Ansätzen (~mittelbar) unterschieden. Dabei ist entscheidend, ob unmittelbar ein Zustand beziehungsweise die bestehenden Attribute oder ob mittelbar die Auswirkung beziehungsweise die Konsequenz einer Zustandsveränderung bilanziert werden soll. (Siehe Tabelle 1)

Je nach vorliegendem Ziel und Betrachtungsrahmen der Studie ist der „attributional“-Ansatz oder der „consequential“-Ansatz zu wählen. Letztgenannter Ansatz ist allerdings nur für weitreichende strategische Entscheidungen auf makroökonomischer Ebene vollständig und sinnvoll umsetzbar. Dies liegt an dem hohen Aufwand und der Unsicherheit bei der Abschätzung von zukünftigen Konsequenzen auch auf benachbarte Produktsysteme.



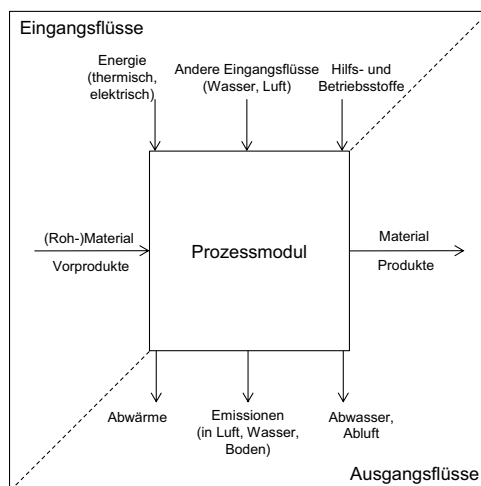
**Tabelle 1** Konzepte der Ökobilanzierung; in Anlehnung an (Ekvall, Tillman, Molander 2005; Frischknecht 04.09.2002; Europäische Kommission 2010, S. 13)

	<b>Retrospektiv</b>	<b>Prospektiv</b>
<b>Attributional</b>	Wie war der Zustand in der Vergangenheit?	Wie wird der Zustand in der Zukunft sein?
<b>Consequential</b>	Wie hat eine Entscheidung in der Vergangenheit den Zustand verändert?	Wie wird eine Entscheidung in der Zukunft den Zustand verändern?

Im Umfeld von eher kurzfristigen Entscheidungen in der Produktentwicklung wiegen diese Nachteile die möglicherweise bessere Abbildung der Zukunft nicht auf. Der erst genannte Ansatz bildet daher für Entscheidungen im betrieblichen Umfeld den zu bevorzugenden Ansatz ab. Hiermit sollte jedoch Zukunftsszenarien berücksichtigt werden, um auch längerfristige Konsequenzen abschätzen zu können. (Baitz 2011; Europäische Kommission 2010, S. 13)

### 2.2.1.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz (Life Cycle Inventory – LCI) bildet in einer Ökobilanz die Stoff- und Energieflüsse eines Systems innerhalb des betrachteten Rahmens ab. Dazu werden alle (relevanten) Eingangsflüsse und Ausgangsflüsse des Systems aufgenommen. Das System besteht in der Regel aus mehreren Prozessmodulen, die zum Beispiel die unterschiedlichen Herstellungsprozesse eines Produkts abbilden. Ebenso wird auch die Nutzung und Verwertung als Prozess mitsamt Eingangs- und Ausgangsflüssen (In- und Outputs) modelliert (vgl. Abbildung 6). (DIN EN ISO 14040)

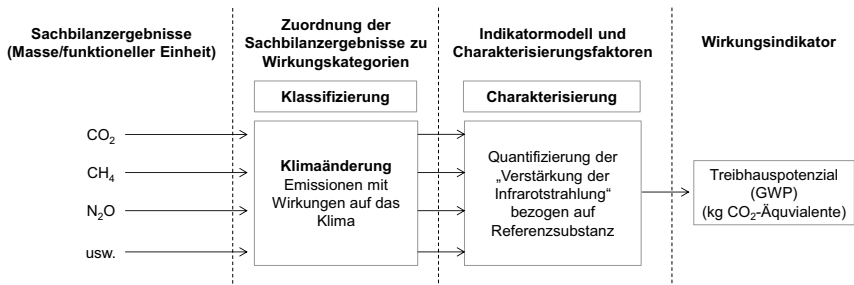


**Abbildung 6** Prozessmodul mit Eingangs- und Ausgangsflüssen; nach (Klöpffer, Grahl 2009, S. 67)

Zu den Eingangsflüssen gehören neben den eigentlichen Rohstoffen und Vorprodukten zur Herstellung des Ausgangsprodukts auch die dazu benötigten Energien (elektrisch, thermisch) und Medien (Wasser, Luft, Betriebsmittel). Bei der Umwandlung dieser Eingangsflüsse in das Ausgangsprodukt entstehen zumeist Emissionen, Abwärme oder andere Abfälle. Dies sind die Ausgangsflüsse. Die Verkettung aller Prozessmodule und die Summe aller Eingangs- und Ausgangsflüsse entspricht dann der Sachbilanz des gesamten Produktsystems. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 67)

### 2.2.1.3 Wirkungsabschätzung

Über die Verknüpfung der Sachbilanz mit der funktionellen Einheit wird in der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Inventory Assessment – LCIA) die Auswirkung des betrachteten Produktsystems auf die Umwelt bewertet (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7** Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung am Beispiel des Treibhauspotenzials; nach (Klöpffer, Grahl 2009, S. 206)

Dazu werden die einzelnen Sachbilanzeinträge über die Klassifizierung einer Wirkungskategorie zugeordnet. Für das Treibhauspotenzial wird die Masse aller Emissionen je funktioneller Einheit, die eine Wirkung auf das Klima haben, erfasst. Da jedoch die einzelnen Emissionen eine unterschiedlich starke Wirkung auf einen Wirkungsindikator haben, ist eine Charakterisierung der Emissionen notwendig. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 202ff.; DIN EN ISO 14044, S. 33ff) Im vorliegenden Beispiel in Abbildung 7 erfolgt dies anhand der „Quantifizierung der Verstärkung der Infrarotstrahlung bezogen auf [die] Referenzsubstanz.“ (Klöpffer, Grahl 2009, S. 206) Die Referenzsubstanz ist beim Treibhauspotenzial Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). So ist etwa die Wirkung von 1 kg Methan ( $\text{CH}_4$ ) auf das Treibhauspotenzial für Zeithorizont von 100 Jahren ( $\text{GWP}_{100}$ ) 28-fach höher als von 1 kg  $\text{CO}_2$ , und ein Kilogramm Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$  – Lachgas) hat sogar die 265-fache Wirkung von  $\text{CO}_2$ . (Myhre u. a. 2013) Nach der Charakterisierung werden alle Substanzen gemäß der Wirkung in den Wirkungsindikator überführt. Der Wirkungsindikator ist dann zum Beispiel das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP), mit der Einheit kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalente. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 206)

Neben dem der Klimaänderung und dem Treibhauspotenzial gibt es schließlich eine Reihe von weiteren Wirkungskategorien und -indikatoren. Da die Auswahl nicht Kern der Arbeit

sein soll, werden in der Automobilindustrie übliche Wirkungsindikatoren verwendet. In Tabelle 2 sind exemplarisch die verwendeten Wirkungsindikatoren der Daimler AG und der Volkswagen AG sowie des europäischen Automobilherstellerverbands (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles – ACEA) aufgezählt.

**Tabelle 2** Verwendete Wirkungsindikatoren in der Automobilindustrie

<b>Wirkungsindikatoren</b>	<b>Daimler AG<sup>3</sup></b>	<b>Volkswagen AG<sup>4</sup></b>	<b>ACEA<sup>5</sup></b>	<b>PEFCR Metal Sheets<sup>6</sup></b>
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP)	Ja	Nein	- <sup>7</sup>	Nein
Treibhauspotenzial (GWP)	Ja	Ja	Ja	Ja
Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	Ja	Ja	- <sup>8</sup>	Ja
Ozonabbaupotenzial (ODP)	Nein	Ja	Ja	Ja
Eutrophierungspotenzial (EP)	Ja	Ja	- <sup>8</sup>	Ja
Versauerungspotenzial (AP)	Ja	Ja	- <sup>8</sup>	Ja
Toxizität (Human- und Öko-)	Nein	Nein	Nein	Nein
Weitere Indikatoren	Nein	Ja, kumulierter Energieverbrauch	- <sup>8</sup>	Ja, diverse

Ergänzt wird die Auflistung um die Einschätzung eines EU-Pilotprojekts zur Definition eines Regelkatalogs zur Erstellung eines Umwelt-Produktfußabdrucks für Metallbleche. (Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for “Metal Sheets for various applications”) Dies ist für den vorliegenden Fall relevant, da Metallbleche einen großen Anteil am Materialmix eines Fahrzeugs ausmachen. Hierbei wird insbesondere auf die Schwächen der Toxizitätsbewertung (USEtox) und des Ressourcenverbrauchs (Abiotic Resource Depletion – ADP) eingegangen. Beide Ansätze werden hierbei als nicht robust ein-

<sup>3</sup> Daimler AG 2012a

<sup>4</sup> Volkswagen AG 2010

<sup>5</sup> Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 18.01.2012

<sup>6</sup> Bollen u. a. 29.04.2015

<sup>7</sup> Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 18.01.2012 Keine explizite Aussage zu diesem Indikator. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass nur global akzeptierte Indikatoren für die Wirkungsabschätzung zu verwenden sind.

geschätzt und können durch die hohe Unsicherheit der Ergebnisse möglicherweise zu missverständlichen Aussagen führen. (Bollen u. a. 29.04.2015) Die genannten Gründe sollen hier ausreichen, um diese Wirkungsindikatoren an dieser Stelle zu vernachlässigen. Eine Methode, die selbst auf wissenschaftlicher Ebene kontrovers diskutiert wird, kann nicht als Entscheidungskriterium dienen. Sobald die Methoden gereift sind und die erforderliche Robustheit und Akzeptanz erlangt haben, kann eine Aufnahme aber sinnvoll sein.

Somit werden die Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential - POCP), Ozonabbau-potenzial (Ozone Depletion Potential - ODP), Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential - EP) und das Versauerungspotenzial (Acidification Potential - AP) betrachtet. Ein Überblick zu den genannten Wirkungsindikatoren wird in Tabelle 3 gegeben.

**Tabelle 3** Ausgewählte Wirkungsindikatoren im Überblick; in Anlehnung an (Klöpffer, Grahl 2009, S. 195ff; Goedkoop u. a. 06.01.2009; Guinée u. a. 2002)

Wirkungsindikator	Referenzeinheit	Wirkungskategorie	Ausgewählte beeinflussende Substanzen
Treibhauspotenzial (GWP)	kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (CO <sub>2</sub> )	Klimaänderung	Treibhausgase: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub>
Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	kg Ethen-Äquivalente (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Sommersmogbildung	Kohlenwasserstoffe
Ozonabbau-potenzial (ODP)	kg R11-Äquivalente (FCKW 11)	Stratosphärischer Ozonabbau	Halone, perhalogenierte Kohlenstoffverbindungen
Eutrophierungspotenzial (EP)	kg Phosphat-Äquivalente (PO <sub>4</sub> )	Eutrophierung/ Nährstoffeintrag	Phosphor- und Stickstoffhaltige: NO <sub>x</sub> , NH <sub>4</sub> , P
Versauerungspotenzial (AP)	kg Schwefeldioxid-Äquivalente (SO <sub>2</sub> )	Versauerung	Säurebildende: SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl

An einer Referenzeinheit, die in der Regel willkürlich auf eins gesetzt ist, orientieren sich die übrigen Substanzen. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 195ff) Die Liste der beeinflussenden Substanzen hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und bildet nur einen Ausschnitt aller Substanzen ab. Weitergehende Beschreibungen der Wirkungsindikatoren, der Charakterisierung und alternative Methoden der Wirkungsabschätzung sind zum Beispiel KLÖPFFER (Klöpffer, Grahl 2009, S. 195ff), GOEDKOOP (Goedkoop u. a. 06.01.2009, S. 23ff) und FRISCHKNECHT (Frischknecht 2009, S. 72ff) zu entnehmen.

In Übereinstimmung mit den Normen DIN EN ISO 14040/44 (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044) wird die Wirkungsabschätzung nach der vom CML (Centrum voor Milieukunde der Universität Leiden) entwickelten Methode verfolgt. Die beschriebenen Wirkungskategorien sind problemorientierte- beziehungsweise midpoint-Kategorien. Das heißt, dass hier die unmittelbaren Wirkungen (Primär- und Sekundärwirkungen) in der Charakterisierung betrachtet werden. Diese sind entweder gut messbar (zum Beispiel die Primärwirkung von Treibhausgasen in Form der Verstärkung der Infrarotstrahlung in der Atmosphäre) oder über Annahmen gut beschreibbar (zum Beispiel die Sekundärwirkung von

Treibhausgasen in Form der Temperaturänderung in der Troposphäre). Die tertiäre Wirkung, zum Beispiel das Abschmelzen von arktischem Eis in Folge des Treibhauseffekts, ist dagegen nur sehr unsicher zu quantifizieren, unter anderem auch, da nicht alle Endpunktwirkungen bisher bekannt sind. (Klöpffer, Grahl 2009, S. 206ff; Intergovernmental Panel on Climate Change 2013, S. 1455) Zudem ist der konkrete Zusammenhang von einem Produkt auf solche Wirkungen sowohl schwer herstellbar als auch für eine Entscheidung schwer vermittelbar, da eine Vielzahl an Einflüssen sich auf die Indikatorergebnisse auswirkt. Somit ist der Zusammenhang zwischen der Ursache und der Wirkung nicht unmittelbar und daher auf der Ebene von Unternehmensentscheidungen schwer steuerbar. Deshalb wird auf eine Zusammenfassung der Wirkungskategorien in schadensorientierte- beziehungsweise endpoint-Kategorien verzichtet.

#### *2.2.1.4 Auswertung in der Ökobilanzierung*

Grundsätzlich liegt es nahe, dass im Sinne der Norm 14040 die Auswertung mit den formulierten Zielen und Rahmensetzungen harmonisieren muss. (DIN EN ISO 14040) Konkret werden in der Norm 14044 folgende Schritte zur Auswertung vorgegeben: die Identifikation relevanter und signifikanter Einflussfaktoren (Parameter) auf Basis der Ergebnisse, eine Beurteilung der Vollständigkeit, Sensitivität<sup>8</sup> und Konsistenz, sowie das Bilden einer Schlussfolgerung inklusive Einschränkungen und Empfehlungen. Dies umfasst somit auch eine nochmalige kritische Prüfung aller in Unterabschnitt 2.2.1.1 genannten Entscheidungspunkte. (DIN EN ISO 14044; Klöpffer, Grahl 2009, S. 357f) Ein weiterer zu nennender Aspekt der Auswertung ist die kritische Prüfung der Ökobilanz durch unbeteiligte Dritte. Dies können sowohl interne oder externe Ökobilanz-Experten sein. (DIN EN ISO 14040)

#### *2.2.2 Der ökologische Lebensweg eines Automobils*

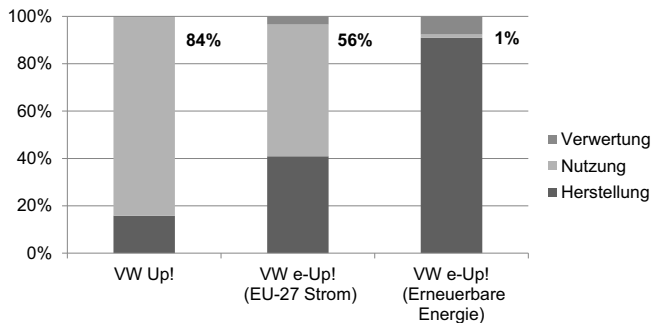
Um ein besseres Verständnis vom ökologischen Lebensweg des Automobils zu bekommen, werden im Folgenden die drei schon in Abschnitt 2.1.3.1 vorgestellten Lebenswegphasen Herstellung, Nutzung und Verwertung in Bezug auf das Automobil detailliert erläutert (siehe auch Abbildung 3). Einen besonders umfangreichen Überblick zu diesem Lebensweg ist bei KEOLEIAN (Keoleian u. a. 1997, S. 6f) zu finden.

Da in dieser Arbeit kein Schwerpunkt auf eine methodische Entwicklung der Wirkungsabschätzung gelegt wird, werden methodische Fragen der jeweiligen Lebenswegphasen nicht voll umfänglich behandelt. Eine detaillierte Ausführung von Modellierungsmethodiken für Automobile sind bei EBERLE (Eberle 2000) oder DEL DUCE (Del Duce u. a. 31.03.2013) nachzulesen.

---

<sup>8</sup> Einfluss auf das Ökobilanzergebnis durch die Änderung eines Eingangsparameters. Die Sensitivität ist insbesondere bei der Unsicherheit von Parametern zu überprüfen. Schmitz, Paulini 1999, S. 24f

Die Relevanz der einzelnen Lebenswegphasen hängt in erster Linie von der Energiequelle des Fahrzeugs ab. Konventionell angetriebene Fahrzeuge werden von fossilen Treibstoffen, wie Diesel und Benzin, angetrieben. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge beziehen ihre Energie aus elektrischem Strom, der in Traktionsbatterien gespeichert wird. Wie sich dies auf den Anteil der Treibhausemissionen je Lebenswegphase auswirkt, ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8** Anteil der Nutzungsphase bezogen auf die CO<sub>2</sub>-Äqv.-Emissionen des Volkswagen Up! und e-Up!; nach (Volkswagen AG 04.09.2013)

Die Nutzungsphase hat bei konventionellen Kraftfahrzeugen den größten Anteil an den meisten Umweltwirkungskategorien über den gesamten Lebenszyklus. Vergleichbare Ergebnisse sind auch in weiteren Studien ermittelt worden. (Hawkins u. a. 2013; Nealer, Hendrickson 2015) Bei einem Volkswagen Up! mit Benzinmotor macht die Nutzung zum Beispiel rund 84 % der Treibhausgaswirkung aus. Bei einem elektrifizierten Fahrzeug, das mit regenerativem Strom betrieben wird, senkt sich dieser Anteil auf rund 1%. Bereits bei Nutzung des europäischen Strommix sinkt der Anteil der Nutzungsphase auf 56%. Es wurde jeweils eine Distanz von 150.000 km in der Nutzungsphase zugrunde gelegt. (Volkswagen AG 04.09.2013) Dagegen nimmt die relative Wichtigkeit der Herstellungsphase bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen stark zu. Neben der Reduzierung der Gesamtemissionen wirkt sich hier auch der erhöhte Aufwand zur Herstellung der Traktionsbatterie und der Leistungselektronik von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen aus. (Helms u. a. 2016; Fritz u. a. 2016)

PKW in Europa werden mittelfristig noch zum größten Teil Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben sein. Die Nutzungsphase wird daher noch längere Zeit dominieren. Der Anteil an Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen lag etwa 2015 bei rund 1,2% (bezogen auf die Zulassungszahlen der ersten drei Quartale 2015 in Europa vgl. Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 16.10.2015; Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 29.10.2015).

### 2.2.2.1 Herstellung

Die Herstellungsphase eines Automobils wird in der Regel in die Vorkette und die Fertigung und Montage unterteilt. Die Vorkette beginnt bei der Rohstoffgewinnung, zum Beispiel in Minen und im Tagebau. Darauf folgen je nach Material mehrere Weiterverarbeitungsschritte hin zum Halbzeug oder Bauteil. Für jeden Schritt werden neben den aufgewendeten Rohstoffen und Materialien auch die benötigten Energien (zum Beispiel Wärme, und elektrischer Strom) berücksichtigt. Üblicherweise werden in der Automobilindustrie diese Arbeitsschritte nicht durch den Automobilhersteller selbst, sondern durch Lieferanten abgeleitet. Aus Sicht eines Automobilherstellers zählen aber auch die Komponenten und Baugruppenherstellung bei direkten Lieferanten zur Vorkette. Wenn Bauteile jedoch vom Automobilhersteller selbst hergestellt werden, werden auch diese Herstellprozesse der direkten Fahrzeugfertigung zugeordnet. Dies trifft insbesondere auf Karosseriebleche sowie Teile in den Aggregaten und im Fahrwerk zu. Nach der Komponentenherstellung wird aus diesen Einzelteilen über den Karosseriebau und die Endmontage das Gesamtprodukt Automobil gefertigt. Zur Automobilfertigung zählt aber auch die Lackierung der Karosserie. Somit wird die gesamte Lieferkette der Herstellung über alle Lieferanten abgedeckt. (Del Duce u. a. 31.03.2013, S. 45; Kara, Mannek, Herrmann 2010; Keoleian u. a. 1997)

In einem Mittelklassefahrzeug machen die Materialgruppen Stahl (60%), Kunststoffe (15%) und Leichtmetall (13%) bezogen auf das Gewicht fast 90% der Materialzusammensetzung aus. (Weitze, Berger 2013, S. 120) Durch zunehmenden Leichtbau in der Automobilindustrie verschiebt sich jedoch der Einsatz hin zu besonders festen Stahlsorten, einem verstärkten Einsatz von Leichtmetallen, wie Aluminium und Magnesium, und dem Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen, wie Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (Carbonfaserverstärkter Kunststoff - CFK). Der energetische Aufwand zur Herstellung von Leichtbaumaterialien ist jedoch in der Regel je Masseinheit höher als bei konventionellen Materialien. (Rommel u. a. 2012) Siehe dazu auch Abbildung 44 auf Seite 94. Hier ist die Bandbreite des Treibhauspotenzial der Herstellung von den genannten Leichtbaumaterialien dargestellt. Erst durch die Gewichtsreduzierung und der damit verbundenen Reduzierung des Materialbedarfs für die Herstellung- sowie der Reduzierung des Energiebedarfs im Betrieb des Fahrzeugs können auch über den Lebensweg hier Vorteile bezüglich der Umweltwirkung erzielt werden. Hierzu wird im Detail im folgenden Unterabschnitt 2.2.2.2 eingegangen.

Neben der beschriebenen Nutzung von primären Rohstoffen können auch wiederverwertete Rohstoffe oder Materialien eingesetzt werden. Diese werden als Sekundärrohstoffe oder -materialien bezeichnet. Quellen solcher Sekundärrohstoffe können zum einen aus der Verwertung von alten Produkten stammen (Altschrott) oder direkt aus Produktionsabfällen gewonnen werden (Neuschrott). Im Vergleich zu Primärherstellung ist der energetische Aufwand für die Sekundärherstellung in der Regel deutlich niedriger. So muss etwa Aluminiumneuschrott zwar noch eingeschmolzen werden, aber die aufwändige Elektrolyse zur Primäraluminiumgewinnung fällt weg. (Eberle 2000, S. 78ff)

Die Modellierung der Herstellung in einer Ökobilanz stellt aufgrund der großen Teilevielfalt eine besondere Herausforderung dar. Daher werden insbesondere die Prozesse der Vorkette über generische Daten (Sekundärdaten) aus Ökobilanzdatenbanken (siehe Unterabschnitt 2.2.3.2) abgebildet. Diese Prozesse werden dem hintergründigen System (Back-

ground System) zugeordnet. Je näher der Produktionsprozess beim Automobilhersteller angesiedelt ist, desto eher sind auch spezifische, gemessene Daten (Primärdaten) für die Modellierung verfügbar. Dieser Teil der Herstellung wird dann in der Ökobilanz als vordergründiges System bezeichnet. Insgesamt ist darauf zu achten, dass insbesondere die Schwerpunkte der Umweltwirkungen innerhalb der Prozesskette mit möglichst detaillierten und spezifischen Daten hinterlegt ist. (Europäische Kommission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2010, S. 96ff) Daher ist die enge Zusammenarbeit mit Lieferanten an dieser Stelle von Vorteil.

#### 2.2.2.2 Nutzung

Die Nutzungsphase eines Fahrzeugs umfasst sowohl die eigentliche Nutzung des Fahrzeugs und die damit verbundenen Emissionen (tank-to-wheel) als auch die Emissionen, die bei der Herstellung des Kraftstoffes entstehen (well-to-tank). Daher werden die Emissionen in der Nutzungsphase bei ganzheitlicher Betrachtung auch well-to-wheel-Emissionen genannt. (Edwards, Larivé, Beziat 2011, S. 13) Insgesamt haben der Kraftstoffverbrauch, die Schadstoffklasse, der verwendete Treibstoff und die angenommene Laufleistung eines konventionellen Fahrzeugs einen besonders hohen Einfluss auf die Nutzungsphase. Bei einem elektrifizierten Fahrzeug sind dies äquivalent der Energieverbrauch<sup>9</sup> des Antriebs, die Energiequelle und gegebenenfalls der Austausch von Batteriezellen nach einer gewissen Nutzungsdauer. (Del Duce u. a. 31.03.2013, S. 73ff; Anair, Mahmassani 06.2012)

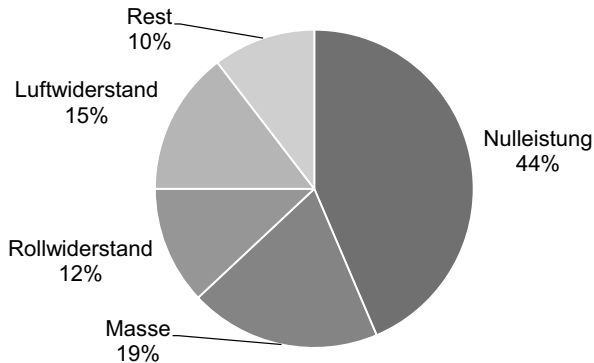
Der Kraftstoff- und Energieverbrauch eines Fahrzeugs, und damit die resultierenden Schadstoffemissionen, hängen in hohem Maße von den Fahrwiderständen ab. Dieser wird über die Summe des Rollwiderstands, des Luftwiderstands, des Antriebswiderstands, des Beschleunigungswiderstands und des Steigungswiderstands berechnet. (Ayoubi u. a. 2013) Die Fahrzeugmasse hat dabei zum Beispiel einen großen Einzeleinfluss, da einen Einfluss auf den Rollwiderstand, den Beschleunigungswiderstand und den Steigungswiderstand hat. Somit hat die Masse etwa 20% Anteil am Verbrauch eines Fahrzeugs und ist damit der größte Einzelanteil der Fahrwiderstände im Prüfzyklus des Neuen Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) (Rat der Europäischen Union 1991). Weiterhin hat der Nullleistungsverbrauch, also der Leerlauf-Verbrauch des Motors und die fahrwiderstandsfreien Anteile des Verbrauchs, noch einen sehr großen Anteil am Gesamtverbrauch von knapp 44%. Unter „Rest“ werden die elektrischen Verbraucher und Verluste im Getriebe und Antriebsstrang zusammengefasst. (Rohde-Brandenburger 2014a, S. 231ff) Alle Verbrauchsanteile eines Fahrzeugs mit Ottomotor werden in Abbildung 9 gezeigt.

Je nach betrachtetem Fahrzyklus ist bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen der Energieverbrauch der elektrischen Nebenverbraucher (Klimatisierung, Beleuchtung und Infotainment) während der Nutzung von höherer Relevanz. (Del Duce u. a. 31.03.2013, S. 84ff)

---

<sup>9</sup> Aus thermodynamischer Sicht handelt es sich um einen Exergieverbrauch. Dies ist die Transformation des Anteils der Energie, die in Arbeit umgewandelt werden kann (Exergie), in Energie, die nicht mehr in Arbeit umgewandelt werden kann (Anergie). (Baehr, Kabelac 2012, S. 150ff)

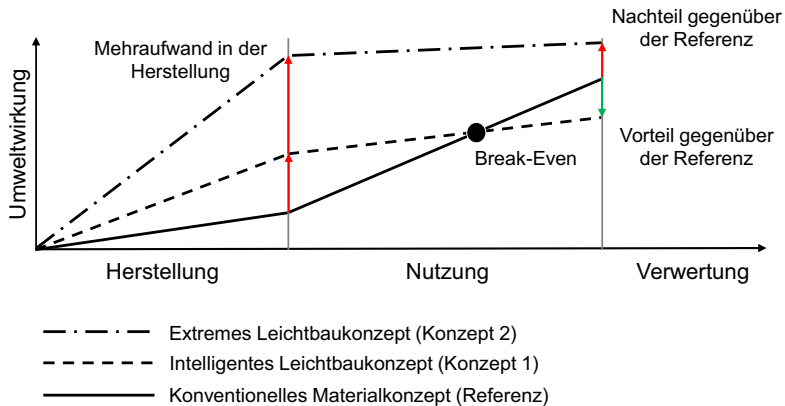




**Abbildung 9** Verbrauchsanteile der Fahrwiderstände für ein Fahrzeug mit 1,4l Ottomotor; nach (Rohde-Brandenburger 2014a, S. 233)

Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und den damit zusammenhängenden Umweltwirkungen in der Nutzungsphase von Fahrzeugen sind grundsätzlich zwei Herangehensweisen üblich. Beim ersten Vorgehen sind die offiziellen Typprüfwerte eines Fahrzeugs die Grundlage zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs. Im gesetzlich vorgeschriebenen Prüfzyklus wird der offizielle Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs ermittelt. In normierten Prüfzyklen, wie dem NEFZ und dem Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC), kann auch der Einfluss des Fahrers und der Fahrstrecke ausgeschlossen werden. Dieser hätte sonst auch einen hohen Einfluss auf das Emissionsverhalten. (Rohde-Brandenburger 2014b) Da das erste Vorgehen die absoluten Verbrauchswerte des gesamten Fahrzeugs zu Basis hat, wird dieser im weiteren Verlauf als Absolutansatz bezeichnet.

Das zweite Vorgehen geht stärker auf die einzelnen Fahrwiderstände ein und bemisst die Auswirkungen einer Widerstandsänderung auf den Kraftstoffverbrauch. Besonders relevant ist die Betrachtung einer Verbrauchskennzahl für die Masse. Neben dem großen Einzeleinfluss bei den Fahrwiderständen spricht auch der Einfluss jedes Bauteils im Fahrzeug auf diesen Widerstand für eine intensive Betrachtung. Denn die Masse jedes einzelnen Bauteils im Fahrzeug wirkt sich so auch auf den Energiebedarf aus. Bei den anderen Fahrwiderständen beeinflussen dagegen nur einige wenige Bauteile alleine den Verbrauch. Der Rollwiderstand wird im großen Maße von den Reifen und der Luftwiderstand von den aerodynamisch wirkenden Bauteilen beeinflusst. Ein weiterer Grund für die Konzentration auf den masseabhängigen Kraftstoffverbrauch ist die hohe Relevanz von Leichtbaumaßnahmen für die Ökobilanz. Durch die potenziell höheren Umweltwirkungen von Leichtbaumaterialien in der Herstellung (siehe Unterabschnitt 2.2.2.1) ist hier besonders zu prüfen, ob die Reduzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase dies kompensieren kann. In Abbildung 10 wird die exemplarische Umweltwirkung von zwei Leichtbaukonzepten im Vergleich eines konventionellen Konzepts aufgezeigt.



**Abbildung 10** Umweltwirkung von Leichtbau-Fahrzeugkonzepten in der Lebenswegbetrachtung; in Anlehnung an (Audi AG 2011; Warsen, Krinke 2012)

Sowohl das extreme, als auch das intelligente Leichtbaukonzept weisen hier einen deutlichen Mehraufwand beziehungsweise erhöhte Emissionen in der Herstellung auf. In der Nutzungsphase wird jedoch durch ein verringertes Gewicht jeweils eine Reduzierung der Umweltlast erreicht. Allerdings wird nur im ersten Konzept der erhöhte Herstelleraufwand über die Nutzungsdauer kompensiert. Ab diesem Punkt (Break-Even) ist dieses Konzept im Vorteil gegenüber der Referenz. Das zweite Konzept erreicht diesen Punkt nicht und ist daher nach der Nutzung nicht im Vorteil gegenüber der Referenz. Im Folgenden wird daher beschrieben, wie sich die Fahrzeugmasse auf den Verbrauch eines Fahrzeugs auswirkt. Auf die Phase der Verwertung wird im folgenden Unterabschnitt 2.2.2.3 eingegangen.

Die zu betrachtende Kennzahl ist daher der massebezogene Kraftstoffverbrauchsminderungsfaktor (Fuel Reduction Value –  $FRV_m$ ). Hiermit wird die Wirkung auf den Kraftstoffverbrauch über eine Strecke von 100 km betrachtet, die von einer Gewichtsreduzierung um 100 kg ausgeht. (Rohde-Brandenburger 2014a; Koffler, Rohde-Brandenburger 2010) Dabei ist zu beachten, dass nur ein Minderungsfaktor angegeben wird. Dies bedeutet, dass nur das Potenzial für eine absolute Verbrauchsminderung bei einer Gewichtsreduzierung im Vergleich zu einer Referenz angegeben wird, ohne den absoluten Verbrauch der Referenz zu kennen. (Stichling, Hasenberg 30.03.2010) Dieser Ansatz wird daher im weiteren Verlauf auch als Deltaansatz bezeichnet. Für typische Motoren wurden von ROHDE-BRANDENBURGER (Rohde-Brandenburger 2014a, S. 224) folgende Verbrauchsminderungsfaktoren ermittelt (siehe Tabelle 4).

Bei den Werten ohne Anpassung des Antriebsstrangs wird davon ausgegangen, dass die Veränderung der Masse keine signifikante Auswirkung auf das Fahrverhalten hat. Wenn sich die Masseänderung jedoch stark auf das Fahrverhalten auswirkt, werden in der Regel Anpassungen am Antriebsstrang durchgeführt. Dies kann zum Beispiel eine Veränderung der Getriebeübersetzung oder die Vergrößerung des Hubraums sein. (Rohde-Brandenburger 2014a, S. 223) Diese Anpassung können jedoch auch bei einer Massereduktion in umgekehrter Weise durchgeführt werden.

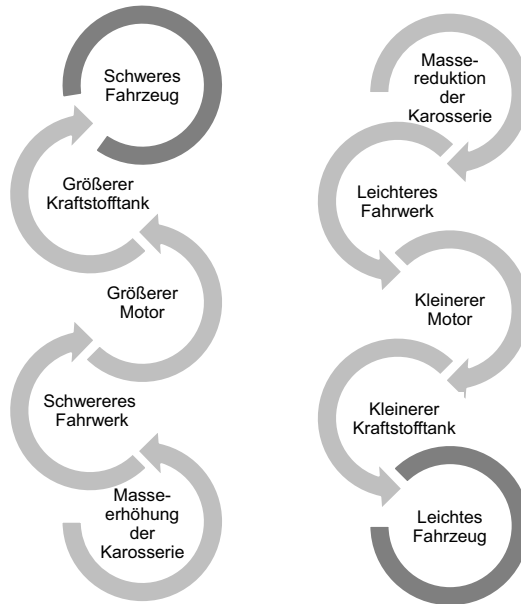
**Tabelle 4** Wertebereiche des FRV im NEFZ für eine Gewichtsreduzierung um 100 kg; nach (Rohde-Brandenburger 2014a, S. 224)

<b>Für den NEFZ:</b>	<b>l/100 km</b>	<b>g CO<sub>2</sub>/km (Tank-to-wheel)</b>
Otto, aufgeladen, ohne Anpassungen	0,146	3,4
Otto, aufgeladen, mit angepasstem Antriebsstrang	0,350	8,2
Diesel, aufgeladen, ohne Anpassungen	0,121	3,2
Diesel, aufgeladen, mit angepasstem Antriebsstrang	0,280	7,4

Somit besteht beim Leichtbau das Potenzial nicht nur das Gewicht und die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch der betrachteten Bauteile zu reduzieren, sondern über Sekundäreffekte weitere Verbrauchsminderungen zu generieren. Dieses Verhalten wird auch in der sogenannten Gewichtsspirale beschrieben. (Gänsicke, Goede 2013, S. 40f) Zwei Beispiele, wie die Gewichtsspirale wirken kann, sind in Abbildung 11 gegeben.

Eine Liste weiterer Kraftstoffverbrauchsminderungsfaktoren aus der Literatur hat etwa KIM (Kim, Wallington 2013a) zusammengestellt. Diese liegen in einem Wertebereich zwischen 0,20 und 0,48l/100 km bei einer Massereduktion um 100 kg. Die ermittelten Minderverbrauchsfaktoren bei (Eberle 2000, S. 71) basieren auf einer Simulation 16 spezifischer Fahrzeugmodelle. Die Werte liegen ohne Anpassungen der Übersetzung in einem Bereich zwischen 0,05 und 0,14 l pro 100 kg und 100 km. Mit Anpassungen des Antriebsstrangs steigen die Werte auf 0,29 bis 0,48 l pro 100 kg und 100 km. Somit können die in Tabelle 4 aufgeführten Werte zum einen den konservativen Fall einer Masseänderung ohne Anpassung des Antriebstrangs abbilden und zum anderen auch die Potenziale eines umfassenden Leichtbaufahrzeugs abbilden, ohne die Potenziale zu überschätzen.

Für voll- oder teilweise elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind solche Faktoren bisher nicht veröffentlicht (Kim, Wallington 2013b, S. 6095) und auch zum Zeitpunkt der Recherche (April 2016) konnten vom Autor keine Quellen hierzu identifiziert werden. Diese sind aber in der gleichen Vorgehensweise, wie die Ermittlung der Faktoren für Verbrennungsmotoren, bestimmbar. Ein ergänzender Einflussfaktor ist dabei aber der Umgang mit der elektrischen Reichweite. Auf der einen Seite können durch eine Massereduktion im Fahrzeug und der Annahme, dass die Reichweite konstant gehalten wird, besondere Sekundäreffekte aktiviert werden. Dies liegt daran, dass ein leichteres Fahrzeug potenziell weniger schwere Batteriezellen benötigt, um dieselbe Reichweite zu erreichen. Auf der anderen Seite wirkt sich ein geringes Gesamtgewicht des Fahrzeugs unter Umständen negativ auf die Fähigkeiten zur Rekuperation (Bremsenergie-Rückgewinnung) aus. (Ellenrieder u. a. 2013, S. 106ff)



**Abbildung 11** Wirkweise der Gewichtsspirale. Links: Aufwärtsspirale durch eine Masseerhöhung; Rechts Abwärtsspirale durch den Einsatz von Leichtbau; in Anlehnung an (Gänsicke, Goede 2013, S. 41)

Auf Basis des massebezogenen Verbrauchsminderungsfaktors ( $FRV_m$ ) kann schließlich auch der massebezogene Umweltwirkungs-minderungsfaktor ( $UWMF_m$ ) gebildet werden:

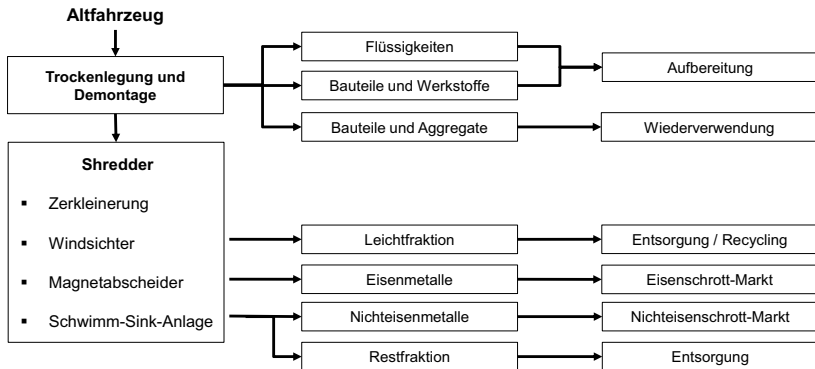
$$UWMF_m = FRV_m * UW_{spez.} \quad (2.1)$$

Hierbei wird der Verbrauchsminderungsfaktor mit der spezifischen Umweltwirkung ( $UW_{spez.}$ ) bezogen auf die jeweils genutzte Energiemenge beziehungsweise mit einem Emissionsfaktormultipliziert. Bei Kraftstoffen wird hierbei in der Regel die Umweltwirkung je Liter genutztem Kraftstoff (zum Beispiel kg CO<sub>2</sub> pro 1 Liter Kraftstoff) anstatt der der Umweltwirkung je Energiemenge (zum Beispiel kg CO<sub>2</sub> pro MJ) verwendet. Die Umrechnung geschieht dabei über die Energiedichte des jeweiligen Kraftstoffes.

### 2.2.2.3 Verwertung

Die Verwertung umfasst alle Aspekte nach Ende der Fahrzeugnutzung. Dazu zählen sowohl Prozesse zur Aufbereitung von genutzten Produkten, als auch deren Verwertung und Beseitigung. Dabei werden zum einen die Umweltwirkungen zur Durchführung dieser Prozesse berücksichtigt und zum anderen die Wirkungen der Reststoffe auf die Umwelt betrachtet. Aus einem Altfahrzeug werden typischerweise zunächst alle flüssigen Betriebsstoffe (zum Beispiel Motor- und Getriebeöl) und wertvolle sowie gut demontierbare Anbauteile (zum Beispiel der Katalysator oder die Starterbatterie) entfernt und aufbereitet. Die

restlichen Fahrzeugumfänge werden dann geschreddert und in die einzelnen Materialarten per Sortierung unterteilt. (Ehrenberger u. a. 2013, S. 736; Krinke, Boßdorf-Zimmer, Goldmann 06.2015; Stichling, Hasenberg 30.03.2010) Der Ablauf dazu ist in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12** Prozess der Altautoverwertung; nach (Ehrenberger u. a. 2013, S. 736)

Allerdings ist im Vergleich zur Herstellungs- und Nutzungsphase die Verwertung für den automobilen Lebensweg kaum von Bedeutung, wenn diese geordnet nach dem oben genannten Prozess erfolgt. So umfassen laut dem europäischen Automobilverband ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) 18.01.2012) die Umweltwirkungen der Verwertung weniger als 1 % der gesamten Umweltwirkungen. Dies spiegelt sich auch in der Verteilung des Treibhauspotenzials über die Lebenswegphasen eines Volkswagen Up! und e-Up! wieder (vgl. Abbildung 8 auf Seite 20). Die Verwertungsphase gewinnt hier beim elektrisch angetriebenen e-Up! nur relativ an Relevanz, da das gesamte Treibhauspotenzial geringer ist als beim konventionell angetriebenen Up!.

Ein zu berücksichtigender Aspekt dieser Lebenswegphase sind die unterschiedlichen methodischen Ansätze zur Allokation der Umweltlasten in der Verwertung. Hierbei ist insbesondere die Berücksichtigung von Gutschriften relevant. Gutschriften sind dabei negative Umweltlasten, also eine Verringerung der Umweltwirkung. In der Verwertungsphase kann dies zum Beispiel dadurch zustande kommen, indem die Wiederverwendung eines Bauteils oder eines Materials in einem anderen Produktsystem dem ursprünglichen Produktsystem positiv angerechnet wird. Dies kann wiederum die Relevanz der Verwertungsphase vergrößern. (Wötzel 2007)

Allerdings ist dieses Vorgehen vor allem in der Automobilindustrie nicht verantwortungsbeziehungswise verursachergerecht. So liegt es nur bedingt im Einflussbereich eines Automobilherstellers, was mit bei der Verwertung gewonnenen Materialien eines Altfahrzeugs geschieht. Dazu kommt, dass die Altfahrzeugverwertung in der Regel weit in der Zukunft liegt und somit zukünftige Verwertungsverfahren und neue abnehmende Industrien und

Zielprodukte schlecht vorhersehbar sind. Es ist daher schwierig eine Gutschrift seriös abschätzen zu können. Dieser Konflikt wird mit der Allokationsmethodik nach dem Prinzip der ersten Verantwortung vermieden. Hierbei werden keine Gutschriften für die Zurückgewinnung von Materialien in der Verwertung gegeben. Erst die aktive Wiederverwendung eines Materials im Fahrzeug oder Bauteil durch den Automobilhersteller wird honoriert. Hier kann die Verantwortung nicht in eine unbestimmte Zukunft verschoben werden. Stattdessen werden Schwachstellen bereits für das zur Bewertung vorliegende Fahrzeug deutlich und können durch aktive Entscheidungen (zum Beispiel der Einsatz von Sekundäraluminium) in der Fahrzeugentwicklung möglichst positiv beeinflusst werden. (Wötzel 2007, S. 27ff; Lattore 01.07.2015, S. 17f)

Daher wird in der vorliegenden Arbeit die Allokationsmethodik nach dem Prinzip der ersten Verantwortung zu Grunde gelegt. Damit bleibt die Relevanz der Verwertungsphase vernachlässigbar gering. Der Fokus der Arbeit liegt daher besonders auf der Herstellungs- und Nutzungsphase des Automobils.

### *2.2.3 Werkzeuge und Datenbanken zur Ökobilanzierung*

Auf Softwareebene gibt es zwei wichtige Komponenten, die für die Berechnung einer Ökobilanz notwendig sind. Auf der einen Seite ist dies das Werkzeug zur Modellierung der Zusammenhänge auf Basis der Sachbilanz und der anschließenden Wirkungsabschätzung. Auf der anderen Seite sind auch Datenbanken mit generischen Sachbilanzen für typische Rohstoffe, Materialien und Herstellungsprozesse wichtige Elemente der Ökobilanzierung. Insbesondere da die Vorkette in der Automobilherstellung eine relativ hohe Relevanz aufweist (siehe Unterabschnitt 2.2.2.1). Die Datenbanken bilden hier die Grundlage für die Modellierung des hintergründigen Systems. Auch Primärdaten können in den Datenbanken hinterlegt werden, sodass diese Daten nicht für jede Studie einzeln und erneut erhoben werden müssen.

#### *2.2.3.1 Werkzeuge zur Wirkungsabschätzung und Nomenklatur*

Die Menge der Werkzeuge ist sowohl groß als auch im kontinuierlichen Wandel. Neue Werkzeuge werden entwickelt, wohingegen bestehende Werkzeuge nicht mehr weiter gepflegt werden. Untern allen Werkzeugen haben insbesondere die folgenden Produkte eine gewisse Kontinuität bewiesen und auch eine große Verbreitung erhalten.

- openLCA<sup>10</sup>
- IFU Umberto NXT LCA<sup>11</sup>
- SimaPro 8<sup>12</sup>
- Thinkstep GaBi 7<sup>13</sup>

---

<sup>10</sup> Siehe <http://www.openlca.org/>

<sup>11</sup> Siehe <http://www.umberto.de/de/versionen/umberto-nxt-lca/>

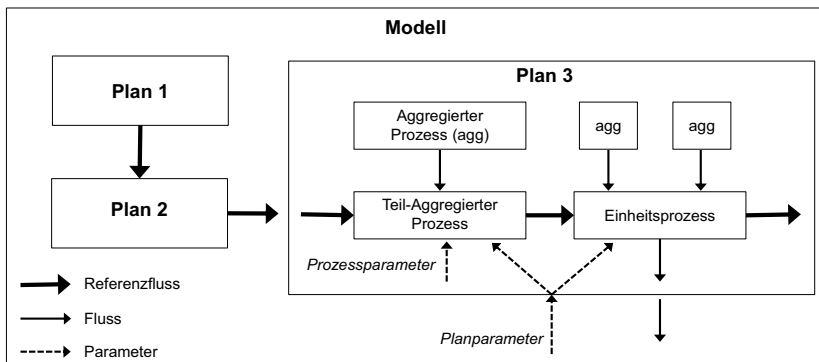
<sup>12</sup> Siehe <https://www.pre-sustainability.com/simapro>

<sup>13</sup> Siehe <http://www.gabi-software.com/>

Ein Vergleich dieser Softwarelösungen ist bei LÜDEMANN UND FEIG zu finden. (Lüdemann, Feig 2014) Ergebnis des Vergleichs ist hier, dass alle Softwarewerkzeuge hinsichtlich Bedienbarkeit und Funktionsumfang ausreichend zur Erstellung einer normgerechten Ökobilanz geeignet sind. Die Auswahl sollte daher je nach Kenntnisstand der Nutzer und geplanten Anwendungsbereich erfolgen. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Ökobilanzstudien, die mit verschiedenen Werkzeugen erstellt wurden, ist nicht immer gegeben. Ein Vergleich oder die Kombination der Ergebnisse sollte daher nur nach einer umfassenden Überprüfung erfolgen. (Speck u. a. 2016).

Um im weiteren Verlauf der Arbeit eine einheitliche und verständliche Begriffsverwendung von Elementen der Ökobilanzwerkzeuge zu haben, werden die relevanten Begrifflichkeiten in Anlehnung an die Software Thinkstep GaBi 7 verwendet. Diese Software wurde auch für alle Ökobilanzierungen in dieser Arbeit verwendet.

In Abbildung 13 sind die wichtigsten Begriffe und deren Zusammenspiel in der Anwendung dargestellt. Die Stoff- und Energieströme bilden das Basiselement der Ökobilanzsoftware. Die Quantität dieser Stoff- und Energieströme wird durch einen „Fluss“ beschrieben, die Art des Stroms durch eine „Größe“. Der Fluss, der der funktionellen Einheit zuzuordnen ist, ist der Referenzfluss. Über Flüsse werden die einzelnen Prozesse (entspricht dem Prozessmodul aus Abbildung 6) verbunden. Ein Prozess kann dabei sowohl einen technischen Prozess abbilden als auch einen virtuellen Prozess, der nur aus Modellierungsgründen verwendet wird. Prozesse stammen aus einer Datenbank oder werden auf Basis von eigenen Daten erstellt. (PE International AG 2012)



**Abbildung 13** Graphische Darstellung der Begrifflichkeiten in der Ökobilanzsoftware GaBi 7; in Anlehnung an (Baitz u. a. 11.2014, S. 14)

Es gibt zudem unterschiedliche Prozesstypen beziehungsweise Prozessmodule. Besonders gebräuchlich sind aggregierte Prozesse (agg), teilweise aggregierte Prozesse (t-agg) und einfache Einheitsprozesse (e-ep) verwendet. Bei einem aggregierten Prozess ist die Sachbilanz einer Produktherstellung vollständig bis zu einem definierten Punkt im Lebensweg abgebildet (cradle-to-gate). Beim teilweise aggregierten Prozess sind dagegen einzelne Ein-

gangsflüsse beziehungsweise Vorprodukte nicht im Datensatz inkludiert und müssen separat modelliert werden. Somit kann zum Beispiel der herangezogene Energiemix in der Modellierung noch variiert werden. Der Einheitsprozess bezieht dagegen nur die Daten eines Prozesses innerhalb der gesamten Herstellungsphase (gate-to-gate). Es sind also nur die Quantitäten der Eingangs- und Ausgangsflüsse hinterlegt, die eigentliche Vorkette oder auch die nachfolgenden Prozesse müssen ergänzt werden, um den gesamten Lebensweg abbilden zu können. (PE International AG 2012)

Die beiden letztgenannten Prozesstypen können zudem parametrisiert werden. Das bedeutet, dass das Verhalten des Prozesses in Abhängigkeit eines Parameters gesteuert werden kann. Bei SCHMIDT werden die Parameter auch als lineare Prozesskoeffizienten bezeichnet. Im Gegensatz zur Verwendung des Begriffs „Parameter“ in anderen Disziplinen, wird in der Ökobilanzierung bei Verwendung der Software GaBi, ein Parameter nicht zur Modellierung von dynamischen Prozessen verwendet. (Schmidt, Hedemann, Kreissig 06.2007, S. 13) Der Parameter wird vor einer Berechnung fixiert und entspricht eher einem Schalter, der einen Prozess (Prozessparameter) oder einen Plan (Plan- oder Modellparameter) konfiguriert.

Hiermit kann zum Beispiel ein allgemeines Modell für die jeweilige Situation spezifiziert werden. Weitere Anwendungsfälle sind vor allem experimenteller Natur. So können die Auswirkungen einer Parametervariation auf die Ökobilanzergebnisse analysiert werden. Übliche Verfahren sind die Sensitivitätsanalyse, die Monte-Carlo-Simulation oder eben die Parametervariation. (Schmidt, Hedemann, Kreissig 06.2007, S. 5f)

Ein üblicher Prozessparameter ist etwa das Bauteilgewicht, mit dem Prozessschritte skaliert werden können. Hierbei werden über funktionale Zusammenhänge zum Beispiel die energetischen Verbräuche in Abhängigkeit zur Masse modelliert. Ein Planparameter kann dagegen sowohl zur Auswahl von alternativen Prozessrouten („Schalter“) als auch zur übergeordneten Konfiguration eines Prozesses oder mehrerer Prozesse verwendet werden. Bei einer solchen Variation kann zum Beispiel die Quantität der Prozessflüsse variiert werden, oder Flüsse komplett aktiviert beziehungsweise deaktiviert werden. Solche Sachbilanzparameter stehen so im engen Zusammenhang mit technischen Parametern und sind von diesen abhängig.

Der schon erwähnte Plan liegt also eine Ebene über dem Prozess und umfasst diese. Bei sehr komplexen Modellierungen können Pläne auch über mehrere Ebenen ineinander verschachtelt und voneinander abhängig sein. Der übergeordnete Begriff ist das Modell, das alle relevanten Stoff- und Energieströme und Prozesse innerhalb des definierten Bilanzrahmens umschließt. Technisch betrachtet ist ein Modell also auch ein Plan, der alle weiteren Pläne, Prozesse und Flüsse beinhaltet.

### *2.2.3.2 Ökobilanzdatenbanken für Sachbilanzen*

Generische Sachbilanzen, etwa auf Basis von gemittelten Verbandsdaten oder von typischen Prozessrouten, werden für die einfache Nutzung in der Ökobilanz in Datenbanken zusammengefasst.



Folgende Datenbanken sind im europäischen Raum besonders bekannt und gebräuchlich:

- European Life Cycle Database – ELCD 3.2<sup>14</sup>
- ecoinvent Version 3<sup>15</sup>
- GaBi Professional 6<sup>16</sup>

Damit das Modell möglichst nah an der Realität liegt, sollten jedoch spezifische Datensätze den generischen Datensätzen vorgezogen werden, falls diese vorhanden sind. Mit der Zeit werden daher immer mehr spezifische Datensätze auf Basis von eigenen Messwerten oder direkt von Lieferanten in der Modellierung als Ergänzung zu den generischen Daten verwendet.

Nach der Vorstellung der Grundlagen der lebenswegorientierten Umweltbewertung und insbesondere der Ökobilanzierung, stehen im nächsten Unterkapitel die Grundlagen der Fahrzeugentwicklung im Vordergrund.

## 2.3 Grundlagen der Fahrzeugentwicklung

Ziel dieses Unterkapitels ist, zum einen die grundsätzlichen Konzepte zur Organisation einer Produktentwicklung vorzustellen, um daraus die unterschiedlichen Phasen einer Entwicklung zu identifizieren. Zusätzlich zu dieser generischen Betrachtung soll die Produktentstehung am Beispiel der Fahrzeugherstellung aus Sicht des Erstausrüsters (Original Equipment Manufacturer - OEM) betrachtet werden. Zum anderen ist von Interesse, welche Verantwortlichkeiten und Dokumente über den Verlauf der Automobilentwicklung vorliegen. Zum Schluss wird zudem auf Methoden der Produktentwicklung eingegangen, die für das Verständnis der Arbeit bekannt sein sollten. Auf Basis dieser Informationen können in Kapitel 4 der geeignete Zeitraum und die geeigneten Adressaten für eine umweltorientierte Produktentwicklung identifiziert werden.

### 2.3.1 Produktentwicklungsmodelle und -prozesse

Allgemein wird der Begriff Produktentwicklung verwendet. Der Fokus dieser Arbeit liegt aber auf der Entwicklung von Automobilen, der Automobil- beziehungsweise der Fahrzeugentwicklung. Die Komplexität und Vielfalt eines Automobils stellt eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung dar. Die Herausforderungen bestehen darin, dass die Anzahl der Einzelteile, die Diversität der Anforderungen und die Tiefe der Wertschöpfungskette vergleichsweise groß sind. Zudem umfasst ein modernes Fahrzeug viele Systeme unterschiedlicher Disziplinen, die miteinander kombiniert funktionieren müssen. (Braess u. a. 2013, S. 1134; Clark, Fujimoto 1991, S. 10f) Trotzdem unterscheidet sich das Vorgehen in der Fahrzeugentwicklung nicht grundsätzlich von der Entwicklung anderer komplexer Produkte des Maschinenbaus oder der Elektronik. Aus diesem Grund wird auch die Sichtweise der allgemeinen Produktentwicklung mit in die Ausführungen einfließen.

---

<sup>14</sup> Siehe <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>

<sup>15</sup> Siehe <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/ecoinvent-version-3.html>

<sup>16</sup> Siehe <http://www.gabi-software.com/deutsch/databases/>

Allgemein werden zudem verschiedene Entwicklungsarten je nach Umfang der Neuerung der Konstruktion unterschieden. Der Aufwand und die Unsicherheiten sind bei einer Neukonstruktion so deutlich größer als bei einer Anpassungs- oder Variantenkonstruktion. Bei den letztgenannten Arten wird eine bestehende Konstruktion an neue Gegebenheiten angepasst (Anpassung) oder bestehende Module werden neu kombiniert und angeordnet (Variante). (Feldhusen, Grote 2013, S. 293; VDI 2222) Durch die starke Modularisierung in der Automobilindustrie sind vollständige Neuentwicklungen selten geworden. (Albers, Bursac, Wintergest 2015) So unterliegen diese Module zum Teil eigenständigen Entwicklungen und können in mehrere Fahrzeuge integriert werden. Solche Module können zum Beispiel das Aggregat, die Plattform oder das Infotainment-System eines Fahrzeugs sein. (Lemke 12.11.2013; Braess u. a. 2013, S. 1136; Deloitte & Touche GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft 2014)

Um trotz der genannten Komplexität bei der Entwicklung eines Fahrzeugs die drei Zieldimensionen, Zeit, Kosten und Qualität, nebeneinander in einem akzeptablen Rahmen zu halten, werden Modelle und Pläne für den Ablauf einer Entwicklung erstellt. Dieser Prozess wird Produktentstehungsprozess (PEP) genannt. Der Produktentstehungsprozess basiert auf Produktentwicklungsmodellen, auch Vorgehensmodelle genannt, von denen es eine sehr große Menge an Varianten gibt. LINDEMANN fasst diese Modelle daher in vier Kategorien zusammen. Die Kategorien werden nach dem Detailgrad der Modelle und dem Untersuchungsrahmen unterschieden. Von sehr detaillierten, aber sehr spezifischen Handlungsabläufen („Mikrologik“) bis hin zu aggregierten Modellen, die einen Überblick verschaffen („Makrologik“). (Lindemann 2009, S. 38)

Hinsichtlich der formulierten Ziele für dieses Unterkapitel und hinsichtlich der Komplexität der Fahrzeugentwicklung ist eine Analyse auf Mikro-Ebene nicht zielführend. Eine Analyse auf Ebene der Gesamtentwicklung reicht dabei aus. Daher wird an dieser Stelle auf die phasenbasierten und meilensteinbasierten Produktentwicklungsmodelle der Makro-Ebene eingegangen.

Zu den phasen-orientierten Modellen gehören unter anderem die VDI-Richtlinien 2206 („Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, auch „V-Modell“) und 2221 („Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“). In diese Richtlinien sind die Erkenntnisse aus einer Reihe von Modellen eingeflossen. (Feldhusen, Grote 2013, S. 16) Einen sehr umfangreichen Überblick zu diesen weiteren Produktentwicklungsmodellen gibt SHARAFI (Sharafi u. a. 2010).

Gemeinsam haben die beiden Richtlinien den Startpunkt einer Aufgabe oder Anforderung und den Endpunkt, das fertig entwickelte (Teil-)Produkt. Zudem ist in beiden Modellen ein iteratives Vorgehen vorgesehen. Der aktuelle Entwicklungsstand wird kontinuierlich beziehungsweise nach jedem Arbeitsschritt mit den gestellten Anforderungen abgeglichen. (VDI 2206; VDI 2221)

Die Phasen des Makromodells der VDI 2206 sind der Systementwurf, der Entwurf der Teilsysteme der einzelnen Disziplinen und schließlich die Systemintegration. (VDI 2206) Die Phasen der VDI 2221 beziehen sich dagegen detaillierter auf die spezifischen Arbeitsschritte. Die Entstehung des Produkts verläuft von der Klärung der Aufgabe (Planen), über das Konzipieren von Lösungsprinzipien (Konzipieren) und den ersten Entwürfen (Entwerfen) hin zur Ausarbeitung der gefundenen Lösung (Ausarbeiten). (VDI 2221; Gusig, Kruse

2010, S. 12) Insgesamt bedeutet der Übergang von einer in die nächste Phase, dass eine Entscheidung bezüglich der Produkteigenschaften oder dem weiteren Prozessverlauf getroffen wird und dass über den Verlauf die Betrachtungen und Entwicklungen immer detaillierter und feingliedriger werden. (Holzbaur 2007, S. 51f)

Ein weiteres Konzept zur Beschreibung und Steuerung von Entwicklungsprozessen sind meilensteinbasierten Modelle. Grundlage ist die Meilensteinplanung aus dem Projekt- und Qualitätsmanagement, wie zum Beispiel in der DIN-Norm 69900 dargelegt. (DIN 69900; Graner 2015, S. 11) In den Produktentwicklungsmodellen steht jedoch nicht nur das Erreichen von zeitlichen Zielen im Vordergrund. Es wird dagegen der Reifegrad einer Entwicklung, zum Beispiel bezogen auf die umgesetzten Produkteigenschaften, die Herstellbarkeit oder den finanziellen Status, über den zeitlichen Verlauf an Meilensteinen oder Toren bewertet. Nur wenn der Ist-Stand der Entwicklung dem erwarteten Ergebnis entspricht, wird die nächste Phase der Entwicklung begonnen. Die Tore können aber auch als Filter dienen. (Danzer 2015, S. 85ff) Ein solches Konzept ist zum Beispiel das Stage-Gate-Modell von COOPER (Cooper 1990).

Insgesamt gibt es nicht ein Entwicklungsmodell, das alle Unternehmen der Automobilindustrie anwenden. Aber die meisten Fahrzeughersteller nutzen einen meilensteinbasierten Produktentstehungsprozess. (Braess u. a. 2013, S. 1137) Dieser ist auf die individuelle Organisationsstruktur des Unternehmens zugeschnitten. Die Meilensteine sind aber Bestandteil der Phasen der Fahrzeugentwicklung. Die Einteilung des PEP in Phasen soll auch genutzt werden, um die Eigenschaften dieser zu differenzieren.

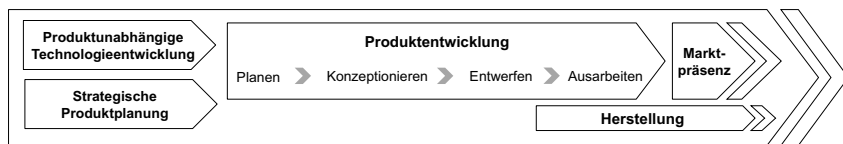
### 2.3.2 Charakterisierung der Fahrzeugentwicklung

Zur Charakterisierung der Fahrzeugentwicklung wird ein generischer Produktentstehungsprozess beschrieben, da die spezifischen Prozesse der Automobilhersteller nicht im Detail veröffentlicht sind. Dazu werden Informationen aus allgemeinen Entwicklungsprozessen und die veröffentlichten Bestandteile der realen Fahrzeugentwicklungsprozesse zusammengeführt.

Die Fahrzeugentwicklung wird in verschiedene Phasen gegliedert, die jeweils unterschiedliche Ausrichtungen aufweisen und den zeitlichen Verlauf der Entwicklung repräsentieren. Diese Phasen sollen hier in erster Linie dazu genutzt werden, den Fokus dieser Arbeit zu bestimmen. Im Laufe der Arbeit sollen schließlich die Entwicklungsphasen identifiziert werden, zu denen eine Ökobilanz im besten Fall durchgeführt werden soll (siehe Abschnitte 3.1.2 und 4.2.1).

Die schon beschriebenen Phasen aus der VDI-Richtlinie 2221 werden hier als Grundlage für die Einteilung der Produktentwicklung in Phasen genutzt. In Abbildung 14 wird der zeitliche Verlauf der Phasen in Form einer Meilensteindarstellung verdeutlicht.

Allerdings werden in der Richtlinie die vorgelagerten Prozesse der Produktentwicklung nicht berücksichtigt. Aus strategischer Sicht sind aber die Marktbewertung (Produktplanung) und die Technologiebewertung (Technologieentwicklung) wichtige und zu berücksichtigende Vorphasen. (Wheelwright, Clark 1992, S. 35) Daher werden diese hier zusätzlich vorgeschaltet. Die Technologieentwicklung wird dabei als produktabhängig benannt, da Technologien meist zuerst entwickelt und erprobt werden, bevor diese einem Produkt beziehungsweise spezifischen Fahrzeugprojekt fest zugeordnet werden.



**Abbildung 14** Einordnung der Produktentwicklung im technischen Produktlebensweg; in Anlehnung an (VDI 2221; Weber 2009, S. 8; Wheelwright, Clark 1992, S. 35)

Nach der Vorphase beginnt der Kern der Entwicklung mit den Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten, wie schon im vorherigen Unterkapitel beschrieben. (VDI 2221) Zum Ende der Entwicklung wird zunächst auch die Herstellung des Produkts geplant und dann kontinuierlich hochgefahren. Es folgt der Markteintritt und die folgende Marktpräsenzphase des Produkts.

Im nächsten Schritt werden diese Phase der Produktentwicklung weiter differenziert und an die Gegebenheiten in der Automobilindustrie angepasst und an die bestehenden Entwicklungsprozesse dieser angelehnt. Somit soll ein möglichst typischer Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie synthetisiert werden.

### 2.3.2.1 Forschungs- und Entwicklungsumgebung eines Automobilunternehmens

Bei der Betrachtung der gesamten Forschungs- und Entwicklungsumgebung (F&E) eines Automobilherstellers wird der PEP um die schon beschriebenen vorgelagerten Prozesse der Produktstrategie erweitert. Der Gesamtprozess, als Produktprozess bezeichnet, reicht also von der ersten Forschung bis hin zum Ende der Marktpräsenz eines Produkts. Dies entspricht grundsätzlich dem in Abschnitt 2.1.3.2 vorgestellten technisch-wirtschaftlichen Lebenszyklus.

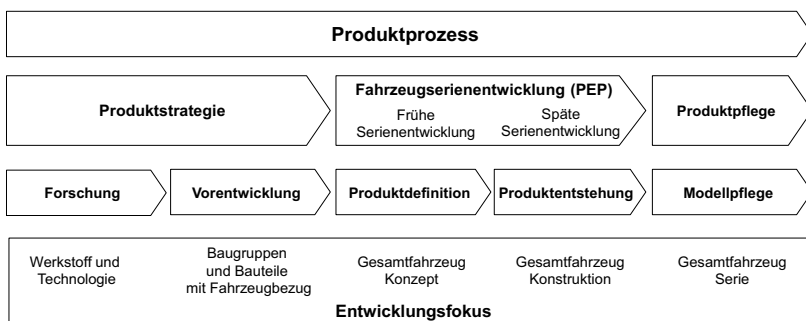
Über den Verlauf des PEP werden sowohl das Design, die technischen Umfänge als auch die Lieferanten des Fahrzeugprojekts festgelegt. Die technischen Umfänge werden mit zunehmendem Detailgrad beschrieben. Zu bestimmten Meilensteinen findet jeweils eine Bewertung des Reifegrads hinsichtlich Produkt und Prozess statt. (Decker u. a. 2013; Gusig, Kruse 2010, S. 17ff)

Eine umfangreiche Übersicht der Struktur der Forschung und Entwicklung in Automobilunternehmen gibt SPECHT (Specht, Beckmann, Amelingmeyer 2002, S. 15). Vor der eigentlichen Produktentwicklung (PEP) werden die Forschung, Technologieentwicklung und Vorentwicklung (auch Vorausentwicklung) durchlaufen. Dieser Teil der Entwicklung wird auch als Produktstrategie beschrieben. Weitere hier nicht weiter beschriebene parallele Aktivitäten sind zum Beispiel die Markt- und Kundenanalyse oder auch die übergeordnete Produktportfolioplanung. (Braess u. a. 2013, S. 1134f; Walsh, Deseniss, Kilian 2013, S. 123ff; Weber 2009, S. 17ff)

Der Oberbegriff Forschung wird von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD) zudem in Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung untergliedert. Nach

dieser Differenzierung wäre die Grundlagenforschung hauptsächlich dem universitären Bereich zuzuordnen, da Automobilunternehmen in der Regel keine physikalische oder chemische Grundlagenforschung betreiben. Dagegen gibt es eine anwendungsorientierte Forschung bei vielen Automobilherstellern. Diese Art der Forschung wird zum Teil auch Synonym als Technologieentwicklung bezeichnet. Im Folgenden wird allgemein der Begriff Forschung für diese Ausprägung verwendet. Dabei ist anzumerken, dass nicht alle Automobilmarken eine eigene Forschungsabteilung betreiben. Bei den deutschen Fahrzeugkonzernen BMW, Daimler und Volkswagen wird zum Beispiel jeweils eine zentrale Forschung für alle Konzernmarken betrieben. Es steht die Nutzung von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung für konkrete Anwendungen, also Produkte oder Prozesse, im Mittelpunkt. (Specht, Beckmann, Amelingmeyer 2002, S. 15; Organisation for Economic Co-Operation and Development - OECD 2002, S. 30)

In der Vorentwicklung wird der nächste Schritt in Richtung Gesamtfahrzeug getan. Es wird der Serieneinsatz von Materialien und Prozessen zum Beispiel in Form von Bauteilkonzepten erprobt. (Specht, Beckmann, Amelingmeyer 2002, S. 16) Dies geschieht in der Regel in einer konkreten Fahrzeugumgebung, also in Bezug auf ein Fahrzeugmodell oder eine Fahrzeugbaureihe. Neben der technischen Eignung werden auch ökonomische Aspekte berücksichtigt und die Kosten für einen Serieneinsatz abgeschätzt. Dies ist insbesondere für Komponenten notwendig, deren Erprobung nicht innerhalb der knappen Zeit der Serienentwicklung geschehen kann. (Braess u. a. 2013, S. 1141f) Insgesamt werden die dem PEP vorgelegten Prozesse der Produktstrategie zugeordnet. In Abbildung 15 wird wiederum der zeitliche Zusammenhang der Phasen innerhalb des Produktprozesses aufgezeigt.



**Abbildung 15** Typischer Produktprozess in der Automobilindustrie und Darstellung des Entwicklungsfokus; in Anlehnung an (Braess u. a. 2013, S. 1135; Broch, Krinke, Herrmann 2015; Specht, Beckmann, Amelingmeyer 2002, S. 15; Form 10.08.2012)

Über den Verlauf des PEPs sollen Meilensteine die Erreichung des angestrebten Reifegrads absichern. Fixiert ist dabei, wann welche Inhalte zu prüfen sind und welchen Abstand die Meilensteine zueinander haben. Darüber ergibt sich auch die geplante Entwicklungszeit. Der erste Meilenstein ist der Entwicklungsstart zu Beginn der Serienentwicklung. Innerhalb der Produktdefinition (auch Produktplanung) gibt es zudem einen Meilenstein, an dem die

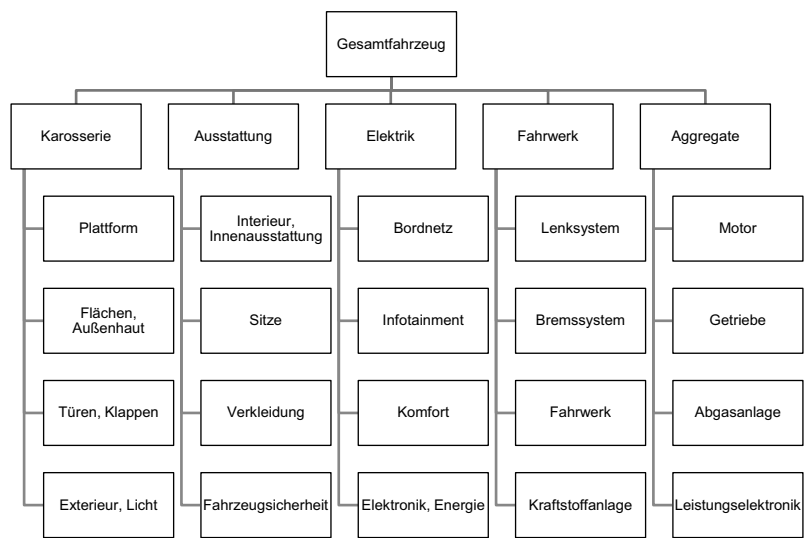
Fahrzeugeigenschaften und -ziele festgelegt werden. Dies markiert dann zusätzlich zu den oben gezeigten Phasen den Übergang von der Projektinitiierung in die Konzeptphase. Weiterhin ist der Übergang von der Produktdefinition zur Produktentstehung der Meilenstein, an dem das grundsätzliche Fahrzeugkonzept entschieden wird. Dieser Übergang wird im Folgenden als der Übergang von der frühen Serienentwicklung (auch frühe Phasen) hin zur späten Serienentwicklung (auch späte Phasen) definiert. Dies ist der Zeitpunkt, an dem die wichtigsten Rahmenbedingungen festgesetzt sind und die Detailkonstruktion und Erprobung des Fahrzeugs startet. Im Schnitt drei bis fünf Jahre nach dem Entwicklungsstart steht der Beginn der Produktion an (Start of Production - SOP) (Weber 2009, S. 32). Wenig später wird das Produkt im Markt eingeführt, und die Fahrzeugserienentwicklung geht in die Produktpflege über, die bis zum Ende der Produktion (End of Production – EOP) das Fahrzeug begleitet. (Braess u. a. 2013, S. 1135; Broch, Krinke, Herrmann 2015; Schaaf 1999, S. 26; Weber 2009, S. 9) Eine umfassende Beschreibung der Inhalte des Produktprozesses ist zum Beispiel bei BRAESS (Braess u. a. 2013, S. 1135) und bei WEBER (Weber 2009) zu finden. Eine Beispieldarstellung eines Produktentstehungsprozesses im Automobilbereich ist bei DECKER (Decker u. a. 2013) zu finden.

Nachdem nun der zeitliche Ablauf der Fahrzeugentwicklung anhand eines generischen PEP deutlich geworden ist, werden im nächsten Schritt die Organisationsstruktur und die Akteure der Fahrzeugentwicklung vorgestellt.

#### *2.3.2.2 Organisationsstruktur und Akteure der Fahrzeugentwicklung*

Eine Herausforderung bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen ist die große Komplexität des Produkts. Es handelt sich um gleichzeitig um ein Massenprodukt und ein Produkt mit großer Variantenvielfalt. (Schneider, Rieck 2012) Zudem werden in einem Fahrzeug Technologien aus etlichen Disziplinen vereint und es muss eine große Anzahl unterschiedlicher Anforderungen, etwa von Seiten der Kunden, des Gesetzgebers und der Gesellschaft, erfüllen. (Gusig, Kruse 2010) Unter anderem führt diese hohe Komplexität dazu, dass die Fahrzeugentwicklung meist in einer Matrixorganisation strukturiert ist. Dies bedeutet konkret, dass es sowohl eine Koordination hinsichtlich der Fahrzeugprojekte und -modelle gibt (horizontal; Produktmanagement) als auch eine Koordination von Seiten der technischen Fachgruppen (vertikal). (Braess u. a. 2013, S. 1137) Diese Fachgruppen sind äquivalent zur Struktur eines Fahrzeugs aufgeteilt und decken alle Bereiche des Fahrzeugs ab (siehe Abbildung 16).

In Simultaneous Engineering Teams (SET) sind dagegen auch Mitarbeiter vertreten, die nicht direkt den Entwicklungsabteilungen zugeordnet sind. Es werden beispielsweise frühzeitig Vertreter aus der Produktion, Beschaffung, Qualitätssicherung und Finanz mit eingebunden. Die Arbeitsweise des Simultaneous- oder des Concurrent-Engineerings (deutsch: gleichzeitige Entwicklung) ermöglicht das parallele Bearbeiten von unterschiedlichen Fahrzeugmodulen unter Berücksichtigung einer koordinierten Abstimmung über SET- und Fachgruppensprecher. Somit können Entwicklungszeiten deutlich reduziert werden und die komplexen Anforderungen an ein Fahrzeugprojekt erfüllt werden. (Braess u. a. 2013, S. 1137; Specht, Beckmann, Amelingmeyer 2002, S. 146)



**Abbildung 16** Fachgruppen in der Fahrzeugentwicklung; in Anlehnung an (Schaaf 1999, S. 115)

Entscheidungen innerhalb der Fahrzeugentwicklung werden in der Regel nicht von Einzelpersonen getroffen, sondern von Gremien. Es werden technisch-fachlich geprägte Gremien (Arbeitsebene) und Gremien mit finanziellen Entscheidungsbefugnissen (Entscheidungsebene) unterschieden. Je nachdem, ob und wie stark eine Entscheidung Auswirkungen auf die Kosten des Fahrzeugprojekts hat, werden diese von der Arbeits- oder von der Entscheidungsebene getroffen. (Broch, Krinke, Herrmann 2015; Born 2008, S. 58)

Zur Dokumentation und Verfolgung von Beschlüssen gibt es eine Reihe von Dokumenten, die über den Entstehungsprozess geführt und bestätigt werden müssen. Diese sind häufig an die schon genannten Meilensteine im PEP gekoppelt. Einige wichtige Dokumente und Entscheidungspunkte sind in Tabelle 5 bezeichnet.

**Tabelle 5** Ausgewählte Dokumente und Entscheidungspunkte je PEP-Phase; in Anlehnung an (Schaaf 1999, S. 26; Schuh, Stölzle, Straube 2008, S. 113f)

Produktdefinition			Produktentstehung		
Planungsauftrag	Rahmenheft	Lastenheft	Konzeptbestätigung	Beschaffungsfreigabe	Prozesssicherheit

In der Phase der Produktdefinition umfassen die genannten Dokumente hauptsächlich die geforderten Eigenschaften des zu entwickelnden Fahrzeugs und der Entscheidung dieser Eigenschaften. Mit dem zeitlichen Fortschreiten der Entwicklung werden die Anforderungen zunehmend detailliert beschrieben und münden in einem Dazu gehören etwa der Planungsauftrag, das Rahmenheft und das Lastenheft. Auf dieser Basis werden in der Phase

der Produktentstehung erste Fahrzeugkonzepte entwickelt. In der Konzeptbestätigung wird die prinzipielle aber schon konkrete Ausführung des Fahrzeugs entschieden. Die Fahrzeugabmessungen (Package) und auch das Design werden in diesem Zeitraum größtenteils festgelegt. Es folgen unter anderem die Auswahl von Lieferanten (Beschaffungsfreigabe) und die Bestätigung der Fertigungsprozesse (Prozesssicherheit). (Eberle 2000, S. 104ff; Schaaf 1999, S. 31ff; Schuh, Stölzle, Straube 2008, S. 113f)

### 2.3.2.3 Methoden und Hilfsmittel in der Produktentwicklung

Im Folgenden wird abschließend eine Auswahl an Methoden und Hilfsmitteln aus der Entwicklung (Tabelle 6) vorgestellt, die für das weitere Verständnis der Arbeit bekannt sein sollten.

**Tabelle 6** Methoden und Hilfsmittel der Entwicklung; nach (Graner 2015, S. 34; Herrmann 2010, S. 122; Gusig, Kruse 2010, S. 84)

Methoden/Hilfsmittel	Kurzbeschreibung
Simultaneous/ Concurrent Engineering	Siehe 2.3.2.2
Design for X	Ansatz zur Berücksichtigung zunächst entwicklungs-fremder Anforderungen bereits in der Entwicklung, zum Beispiel herstellungsgerecht (Design for Manufacturing), montagegerecht (Design for Assembly) und umweltgerecht (Design for Environment)
Computer-aided Engineering/Manufacturing/Design (CAE/CAM/CAD)	Computergestützte Konstruktion und Berechnung in der Produktentwicklung
Produktlebenszyklusmanagement/-datenmanagement (PLM/PDM)	System zum Management von Informationen und Wissen über den technisch-wirtschaftlichen Lebenszyklus eines Produkts
Quality Function Deployment (QFD)/House of Quality	Vorgehen zum Transfer von Kundenanforderungen in technische Funktionen des Produkts
Standardisierung/Nutzung von Modulbaukästen	Vereinheitlichung von Teilen über die Verwendung von Normteilen oder Modulen, siehe auch Abschnitt 2.3.1
Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)	Analyse möglicher Fehlerquellen und Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit dieser, zur Identifikation und Vermeidung von Produktfehlern, bevor diese auftreten.

Insbesondere die Methode Design for X mit der Ausprägung „umweltgerecht“ – Design for Environment, wird im folgenden Kapitel noch näher beschrieben. Auch die Methoden CAD, PDM, QFD und FMEA finden in diesem Umfeld noch einmal Erwähnung. Im folgenden Kapitel steht schließlich die Kombination der lebenswegorientierten Umweltbewertung mit der Fahrzeugentwicklung im Vordergrund.



Integration von ökologischen Lebenswegbewertungen  
in Fahrzeugentwicklungsprozesse

Broch, F.

2017, XXVII, 208 S. 89 Abb., 13 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-18217-5