

1 Fahrzeugantriebskonzepte

1.1 Antriebskonzepte

In den letzten 100 Jahren haben Kraftfahrzeuge unser Leben verändert. Sie haben uns die Mobilität verliehen, die wir bei all unseren Geschäftsaktivitäten rund um den Globus nutzen. Zudem haben sie Millionen von uns neue Möglichkeiten gegeben, die erst mit dem Individualverkehr möglich wurden. Das Herzstück jedes Fahrzeugs ist das Antriebssystem. Die Technik des Antriebssystems stellt die treibende Kraft für die Mobilität bereit.

Der Kraftquellenantrieb – bis heute meist eine Verbrennungskraftmaschine – wird über ein System zur Kraftübertragung und den Antriebsstrang kontrolliert und wird als Zugkraft an die Räder abgegeben. Alle diese Komponenten, die zusammen auch als Antriebssystem oder kurz Antrieb bezeichnet werden, werden vom Fahrer kontrolliert. Anspruchsvolle Fahrer nehmen, so glaubt die Automobilindustrie, eine Reihe von Performance-Kriterien wahr. Beispielsweise sind Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch, Steigfähigkeit oder Anhängelast einige der augenscheinlicheren quantitativen Merkmale. Aber subjektive Kriterien wie Fahrverhalten, Fahrspaß, technische Ausgereiftheit und Fahrvergnügen spielen eine wichtige Rolle beim wirtschaftlichen Erfolg von Fahrzeugen. Andererseits fordert die Gesellschaft verschiedene Leistungsanforderungen ein – wovon in jüngerer Zeit Emissionswerte und CO₂-Ausstoß von Fahrzeugen im Vordergrund stehen. Die Regierungen gehen so weit, Herstellern sogar Gesamtemissionswerte für ihre Fahrzeugflotten vorzugeben.

Um all diese widersprüchlichen Anforderungen erfüllen zu können, müssen die Ingenieure das gesamte Antriebssystem beherrschen. Wenn es ein durchgehendes Thema in diesem Buch gibt, dann ist dies, dass das Gesamtsystem analysiert werden muss, bevor Fahrzeugmobilität wirklich verstanden werden kann – inklusive Fahrer, Motor, Kraftübertragung, Fahrzyklen usw. Ziel dieses Kapitels ist es, dieses Hintergrundwissen bereitzustellen.

1.1.1

Systemansatz

Das Kernthema dieses Buches besteht in der Vorgabe eines systematischen Lösungsansatzes für das Antriebskonzept eines Fahrzeugs. Einfach ausgedrückt geht es darum, alle Einzelkomponenten des Antriebsstrangs zu betrachten und zu analysieren, wie sie zusammen funktionieren und interagieren. Letztlich ist die Zielsetzung natürlich, das Gesamtverhalten des Fahrzeugs hinsichtlich Geschwindigkeit, Beschleunigung, Steigfähigkeit, Kraftstoffverbrauch usw. vorausberechnen zu können.

Zunächst wird das Verhalten der TriebstrangkompONENTEN analysiert – danach werden sie als Komplettsystem zusammen betrachtet, um den gesamten Triebstrang des Fahrzeugs zu erfassen, also von der Antriebsmaschine, die zu meist auch heute noch ein Verbrennungsmotor ist, über die Kraftübertragung – Kupplung, Getriebe, Differenzial usw. – bis hin zum Achsantrieb der Räder. Das Wichtige daran ist, dass der Fahrzeugkonstrukteur nur dann die gewünschten Leistungsmerkmale erreichen kann, wenn er den Antriebsstrang aus der Systemebene betrachtet. Beim Systemansatz für beliebige Systeme ist die Festlegung der Systemgrenzen die eigentlich problematische Aufgabe. Betrachtet man beispielsweise den Gesamtenergieverbrauch eines Pkw, sieht das System wie in Abb. 1.1 aus – wobei hier die Energie von der Primärenergiequelle bis zur Nutzung für den Vortrieb des Fahrzeugs bilanziert wird. Bei der Planung eines Antriebssystems ist dieser Zusammenhang von Bedeutung. Dieser wird häufig als Well-to-Wheel-Analyse des Energieverbrauchs bezeichnet.

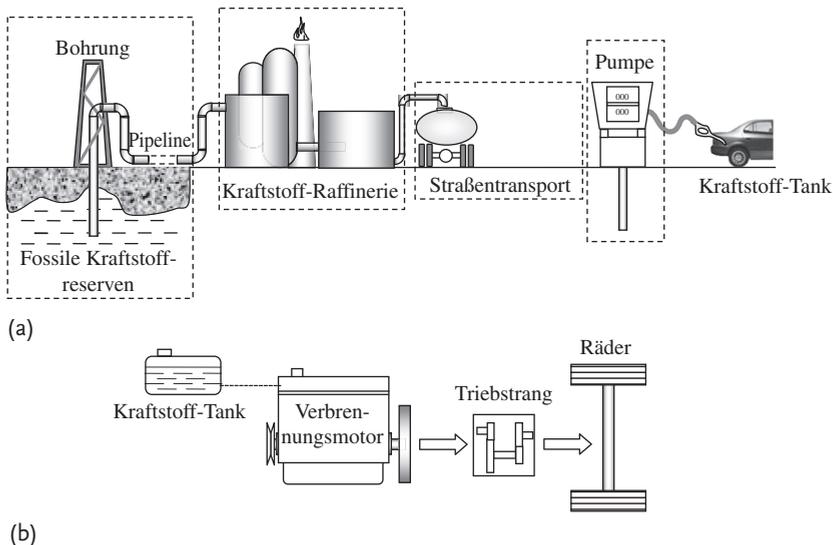


Abb. 1.1 Gesamtenergieerstellungsprozess im Kraftverkehr – Well-to-Wheel-Analyse (W2W-Analyse); (a) Bohrung bis Tank, (b) Tank bis Rad.

1.1.2

Geschichtliches

Es gibt Hunderte faszinierender Bücher, die sich mit der Entwicklungsgeschichte des Automobils befassen. Es ist nicht Ziel dieses Buches, über die Geschichte der Automobiltechnik nachzusinnen. Allerdings gibt es einige interessante Beobachtungen, die den Rahmen für unsere Analyse von Antriebssystemen stecken.

1997 veröffentlichte die SAE (Society of Automotive Engineers) anlässlich ihres hundertjährigen Bestehens ein informatives Buch [1] über die Geschichte des Automobils. Jedes Kapitel wurde von einem ausgewählten US-Experten geschrieben und alle Komponenten des Antriebs – Triebwerk (Motor), Kraftübertragung, Reifen usw. – wurden behandelt. Aus dem Blickwinkel der technischen Innovationen ist unzweifelhaft, dass Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts eine Fülle von innovativen Konstruktionen veröffentlicht wurden. Allerdings wurden sie erst viele Jahrzehnte später durch verbesserte Werkstoffeigenschaften und Massenfertigungsverfahren praktisch nutzbar. Beispielsweise gab es jede Menge ziemlich komplexer Konstruktionen, etwa Automatikgetriebe und stufenlose Automatikgetriebe, die in dieser Zeit patentiert wurden, aber erst einige Jahrzehnte später kommerziell genutzt werden konnten. Die historische Entwicklung der Fertigung, die Massenproduktion und das wirtschaftliche Umfeld der Automobiltechnik werden in einem exzellenten Buch von Eckman [2] beschrieben.

Die beiden wichtigsten Komponenten von Antriebssystemen – der Verbrennungsmotor und das Getriebe – wurden aus historischer Perspektive beleuchtet. Der Titel des Buches von Daniels „Driving Force“ [3] (Anm. d. Übersetzers: etwa „Treibende Kraft“) erklärt die Rolle des Verbrennungsmotors als dominante Kraftquelle für Kraftfahrzeuge im 20. Jahrhundert. Daniels gibt einen umfassenden Überblick über die detaillierte technische Entwicklung von Motorenkonstruktionen – von den ersten Anfängen 1876 mit dem stationären Ottomotor bis zu den modernen Motoren, die sich ebenso durch intelligente Steuerungssysteme wie durch mechanische Konstruktionen auszeichnen.

Aus der Sicht der Ingenieure waren die Entwicklungen des 20. Jahrhunderts im Bereich der Kraftübertragung ebenso wichtig. Aus Systemsicht muss man dem Argument zustimmen, denn der Verbrennungsmotor gibt nur über einen begrenzten Drehzahlbereich Leistung ab. Somit kommt dem Getriebe eine entscheidende Rolle bei der Leistungswandlung in eine an den Rädern nutzbare Form zu. Gott [4] verfolgt die Geschichte technischer Entwicklungen anhand der Getriebe – wenn auch mit einer Vorliebe für die in den USA bevorzugten Automatikgetriebe. Das stärkt allerdings den systematischen Ansatz, denn die Steuerung des Getriebes muss vollständig in der Motormanagementsteuerung integriert sein.

Dieser ganzheitliche Ansatz, bei dem alle beteiligten Komponenten des Antriebsstrangs in ihrem Zusammenwirken betrachtet werden, führt zu der Idee der Systemoptimierung. Beispielsweise ist es sehr wichtig, die Einzelkomponenten schon beim Entwurf optimal zu gestalten. Andererseits ist ebenso klar, dass das Ziel immer sein muss, alle Komponenten als Gesamtsystem optimal aufeinander abzustimmen.

1.1.3

Herkömmliche Antriebe

Dieses Buch beschreibt hauptsächlich sogenannte konventionelle Antriebe. Dabei treibt ein Verbrennungsmotor die Räder eines Fahrzeugs über eine Kraftübertragungseinheit an, zu der Getriebe und Achsantrieb gehören. In Abb. 1.2 ist ein typisches Fahrzeug mit Frontmotor und Heckantrieb dargestellt. Dazu sind die entsprechenden Buchkapitel aufgeführt. Die am häufigsten anzutreffende Pkw-Konstruktion ist die Variante mit Frontmotor und Vorderradantrieb (FWD, Front-Wheel Drive). Die Prinzipien, die bei der Analyse des Antriebs angewendet werden, sind aber dieselben wie beim Heckantrieb.

2009 wurde die Zahl der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge auf ca. 900 Millionen geschätzt, wobei in dem Jahr rund 61 Millionen neue Pkw/leichte Nutzfahrzeuge produziert wurden. Der überwiegende Teil dieser Fahrzeuge – über 99 % – nutzen die oben beschriebenen konventionellen Antriebssysteme. Daher ist klar, dass die Prinzipien zu Analyse und Verständnis der herkömmlichen Antriebssysteme, die in diesem Buch beschrieben werden, sicher noch mehrere Jahrzehnte von Interesse sein werden, trotz des seit ca. 2000 enorm gestiegenen Interesses an alternativen Antriebssystemen. Diese werden allgemein als „kohlenstoffarme Fahrzeuge“ (LCVs, Low Carbon Vehicles) bezeichnet.

1.1.4

Hybridantriebe

Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts begeisterten sich die Ingenieure an dem durch das Kraftfahrzeug möglich gewordenen Individualverkehr. Es waren drei Technologien, die als Triebwerke konkurrierten – Dampf, Elektrizität und Benzin. Jede hatte eigene Vor- und Nachteile, darum war damals keineswegs klar, welche Technik sich langfristig durchsetzen würde. Tatsächlich ergab eine Zählung

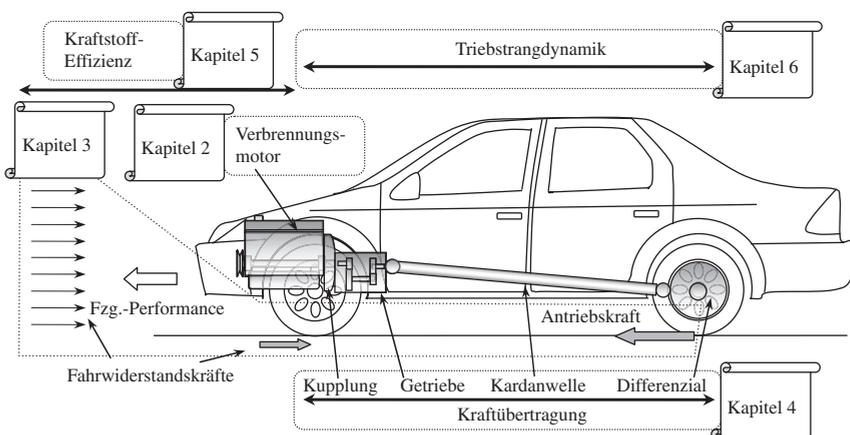


Abb. 1.2 Übersicht Antriebssystem und zugehörige Kapitel des Buches.

im Jahr 1900 in den Oststaaten der USA [5], dass jede Technologie zu rund einem Drittel vertreten war. Allerdings führten die Pferdekutschen zu der Zeit hinsichtlich der Gesamtzahl noch deutlich!

Die Dampfmaschine hatte damals eine längere technische Entwicklung hinter sich. Daher war sie hinsichtlich der installierten Leistung im Vorteil. Aber die Kraftstoffausbeute war gering. Zudem musste der Kessel vor der Fahrt auf Temperatur gebracht werden. Sowohl die Wasserbevorratung als auch der Gebrauch waren problematisch. Elektrische Fahrzeuge waren sehr vielversprechend – sie waren leise, sauber und erstaunlich einfach zu bedienen. Die limitierte Reichweite durch die geringe Speicherkapazität der Batterie war damals das Hauptproblem – es ist bis heute nicht gelöst. Benzinfahrzeuge waren in der damaligen Zeit noch nicht sehr weit entwickelt und schienen extrem störanfällig. Sie ließen sich zudem schwer anlassen. Wenn sie liefen, waren sie laut, schmutzig und recht unzuverlässig. Allerdings war ihr fundamentaler Vorteil – das wissen wir heute – die Energiedichte von Benzin. Sie war um den Faktor 300 höher als die der Blei-Säure-Batterie. Damit war es lohnenswert, in Ingenieursleistungen für benzingetriebene Antriebe zu investieren – und dieser Ansatz der unaufhaltsamen Weiterentwicklung und Verfeinerung dieses Konzepts hält bis heute an.

Angesichts der damaligen Diskussionen über das optimale automobile Triebwerk ist es nicht überraschend, dass verschiedene zukunftsorientierte Ingenieure die Kombination zweier verschiedener Kraftquellen vorschlugen, um die Vorteile beider Quellen zu nutzen – daher war bereits um die Jahrhundertwende zum 20. Jahrhundert die Idee eines Hybridfahrzeugs geboren. Damals sprach man noch nicht von einem „Hybridauto“, allerdings ist es schon bemerkenswert, dass beispielsweise der 1902 von Woods realisierte „gaselektrische“ Wagen [5] den heutigen seriellen Hybridfahrzeugen konstruktiv sehr ähnlich ist. Das Fahrzeug wurde von einem Elektromotor angetrieben, der auch als Generator diente. Der Wagen konnte bei geringer Geschwindigkeit nur von der Batterie angetrieben werden. Zum Laden der Batterie konnte der wegen des Elektromotors kleinere Benzinmotor genutzt werden. Zudem verfügte auch dieses Fahrzeug schon über eine regenerative Bremsanlage.

Obschon es eine beachtliche Zahl verschiedenster Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge gibt, sind heutzutage drei Architekturen von besonderem Interesse, alle direkt verknüpft mit kommerziell erhältlichen Modellen. Die drei Arten werden in Abb. 1.3 dargestellt und sind:

1. Plug-in-elektrisches Fahrzeug (EV), z. B. Nissan Leaf,
2. EV mit Range-Extender, z. B. Chevrolet Volt,
3. hybridelektrisches Fahrzeug (HEV), z. B. Toyota Prius.

Kapitel 7 stellt die hochaktuellen Hybridantriebe vor. Es ist nicht beabsichtigt, eine umfassende Behandlung der sich rasant entwickelnden Hybridfahrzeugtechnologie zu liefern – zu diesem Thema gibt es bereits viele exzellente Bücher, die am Ende von Kapitel 7 auch aufgeführt sind. Das Kapitel soll vielmehr zeigen, wie die gleichen Analysemethoden für Antriebe, die das zentrale Thema dieses Fachbuches darstellen, auch auf unterschiedliche Technologien angewendet werden kön-

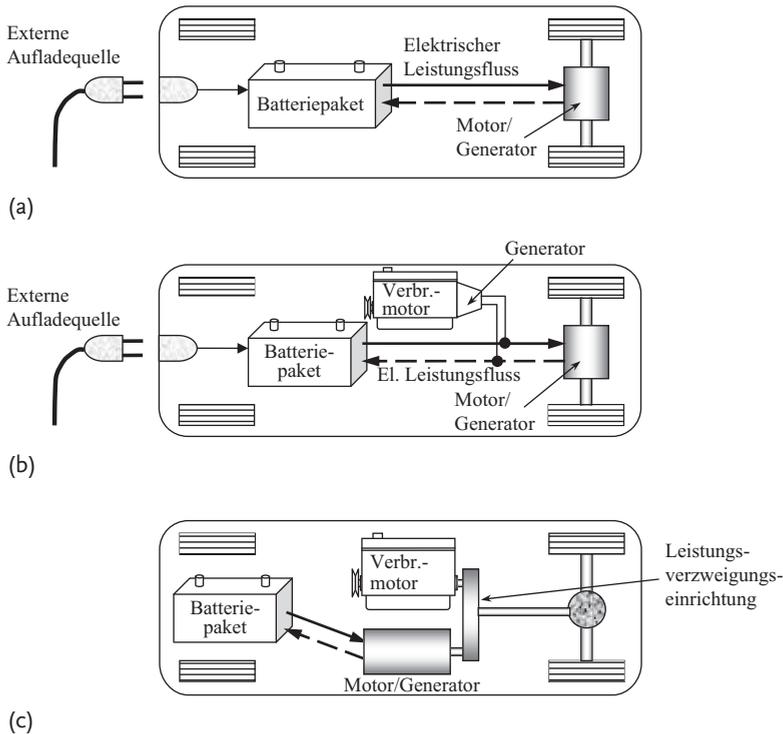


Abb. 1.3 Drei Arten typischer 2011 verfügbarer Hybrid-/Elektrofahrzeugarchitekturen: (a) Plug-in-Elektrofahrzeug, (b) Elektrofahrzeug mit Range-Extender und Plug-in-Vorrichtung, (c) HEV (hybridelektrisches Fahrzeug) – Antriebsleistung von Verbrennungsmotor, E-Motor oder einer Kombination beider.

nen. Hier soll gezeigt werden, dass der Systemansatz zur Analyse von sogenannten herkömmlichen Antriebskomponenten unverändert auf Antriebe anwendbar ist, die aus verschiedenen Komponenten bestehen, etwa Batterien, Motor-Generator-Kombinationen, Brennstoffzellen, Superkondensatoren.

1.2 Antriebskomponenten

Die Komponenten im Antriebsstrang werden detailliert in allen folgenden Kapiteln des Buches beschrieben, mit Querverweisen zu weiterführenden Büchern zum Thema. Es versteht sich von selbst, dass alle diese Komponenten ständig und unermüdlich weiterentwickelt werden und ihre Performance verbessert wird – Wirkungsgrad, Emissionssteuerung, Verfeinerung –, ebenso wie die Kosteneffizienz insgesamt. Im Folgenden werden die neuesten Entwicklungen der Antriebskomponententechnik zusammengefasst.

1.2.1

Verbrennungsmotor

- Schichtladeverfahren;
- Magerverbrennung;
- HCCI-Verbrennung (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition);
- variable Ventilsteuerung;
- Aufladung oder Doppelaufladung (in Verbindung mit einem Downsizing-Motor);
- aufgeladene Dieselmotoren mit Direkteinspritzung;
- Benzinmotoren mit Direkteinspritzung;
- Common-Rail-Dieselmotoren;
- Turboladung mit variabler Geometrie.

1.2.2

Kraftübertragung

- Reibungsmindernde Schmierstoffe (Motoröl, Getriebeöl, Achsöl);
- Drehmomentwandler mit Überbrückung in Automatikgetrieben zur Verringerung von Schlupf und Leistungsverlusten im Wandler;
- stufenlose CVT-Getriebe (CVT, Continuously Variable Transmission);
- automatisierte Schaltgetriebe;
- Doppelkupplungsgetriebe;
- Zunahme der Zahl der Gangstufen in Schalt- und Automatikgetrieben.

1.2.3

Fahrzeugaufbau

- Gewichtsreduktion durch Verwendung von Werkstoffen wie Aluminium, Fiberglas, Kunststoff, hochfestem Stahl und Kohlefaser statt Schmiedestahl und Gusseisen;
- Einsatz von leichteren Werkstoffen für bewegte Teile wie Kolben, Kurbelwelle, Zahnräder und Leichtmetallräder;
- Tausch von Reifen gegen Modelle mit geringerem Rollwiderstand.

1.2.4

Systemfunktionen

- Automatische Abschaltung (Start-Stopp-Funktion) bei stehendem Fahrzeug;
- Rückgewinnung verbrauchter Energie beim Bremsen (regenerative Bremsanlage);
- Unterstützung des Downsizing-(Verbrennungs-)Motors mit einem elektrischen Antriebssystem und Batterie (Mild-Hybrid-Fahrzeuge);

- verbesserte Regelung von wasserbasierten Kühlsystemen, um die effizienteste Betriebstemperatur früher zu erreichen.

1.3

Fahrzeugleistung

Seit die ersten gebrauchsfähigen Straßenfahrzeuge auf den Straßen erschienen – wie sie beispielsweise in den 1890er- und 1900er-Jahren von Daimler, Benz, Peugeot oder Panhard & Levassor gebaut wurden – wurden Leistungsangaben gemacht, um die Fahrzeuge vergleichen zu können. An erster Stelle standen natürlich Höchstgeschwindigkeit und Reichweite. Danach kamen mit den stärker werdenden Motoren andere Performance-Werte – etwa Beschleunigung, Steigfähigkeit und Zugkraft. Die Leistung ließ sich anhand der sehr einfachen Modelle des zweiten Newton'schen Gesetzes der Bewegung voraussagen. So wurde beispielsweise im Buch von Kerr Thomas aus dem Jahr 1932 [6] mit dem Titel *Mechanics of a Moving Vehicle* gezeigt, wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden konnten, wenn Werte wie Motordrehmoment und Drehzahlverlauf, Übersetzungsverhältnisse sowie Schätzwerte für Rollwiderstand und Luftwiderstand bekannt waren.

Nach einem von dem amerikanischen Kraftfahrzeug-Pionier Olley [7] verfassten Prüfbericht wog der typische amerikanische Wagen dieser Zeit rund 2 t (2000 kg) und verfügte über eine Motorleistung von rund 75 kW (100 PS). Damit wurden normalerweise eine Beschleunigung von $\sim 3 \text{ m/s}^2$ (10 ft/s^2), eine Steigfähigkeit von 11 % und eine Höchstgeschwindigkeit von 38 m/s oder 140 km/h (85 mph) erreicht. Die Genauigkeit dieser Leistungsberechnungen besserte sich ab den 1930er-Jahren, als die Messmethoden für Motorleistung [8], Reifenrollwiderstandseigenschaften [9] und Luftwiderstandswerte [10] besser wurden. Abbildung 1.4 zeigt für eine typische Stadt- und Autobahnfahrt, wo die Energie für die Longitudinalbewegung eines Fahrzeugs im Einzelnen verbraucht wird.

In den 1970er-Jahren kam es zu einer massiven Verlagerung des Interesses von der Fahrzeug-Performance hin zu Berechnungen der Krafteffizienz. In den USA reagierte man darauf mit den CAFE-Verordnungen (CAFE, Corporate Average Fuel Economy), die der Kongress erstmalig 1975 erließ. Diese Verordnungen der US-Regierung waren die Folge der Ölkrise 1973 und sollten dazu beitragen, die durchschnittliche Kraftstoffeffizienz von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen zu verbessern. Im Grunde handelte es sich um Vorgaben für die verkaufsbereinigte Kraftstoffeffizienz aller Modelle an Pkw und leichten Nfz eines Herstellers, die für den Verkauf in den Vereinigten Staaten gefertigt wurden. Damit begann weltweit das ungläubliche Interesse an der Kraftstoffeffizienz und dem damit verknüpften Thema, den Emissionen. Zugleich wurden Regierungen sehr aktiv, Gesetze zur Messung und Kontrolle dieser beiden Aspekte der Fahrzeug-Performance zu erlassen.

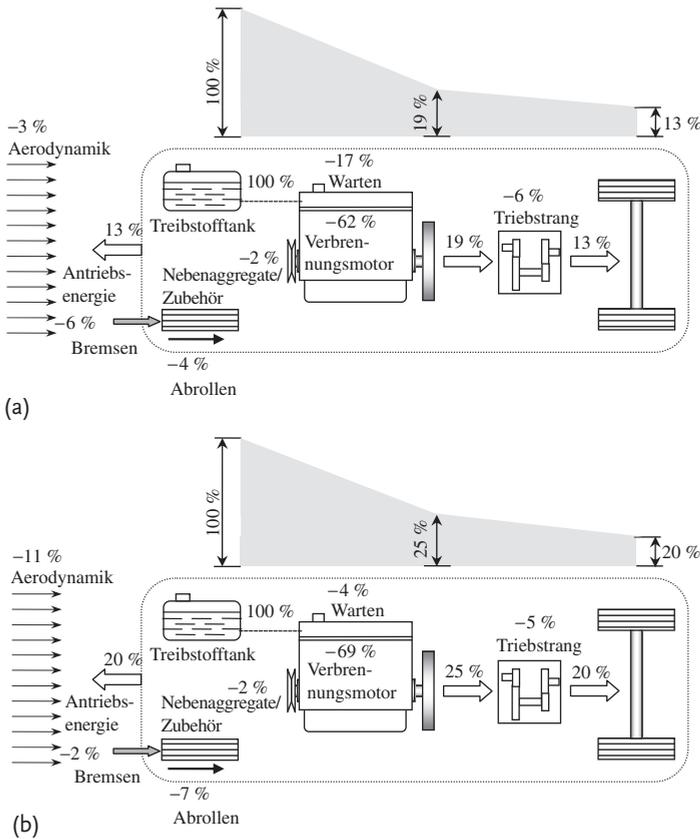


Abb. 1.4 Beispiel eines Energieflussdiagramms während eines Stadt- (a) und Autobahn-/Überland-Fahrzyklus (b).

In den vergangenen Jahrzehnten glaubten Fahrzeugverkäufer im gewerblichen Umfeld, dass Verbraucher Daten und Vergleichszahlen brauchen, um verschiedene Modelle der Hersteller zu vergleichen. Longitudinale Performance-Werte, wie Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung, Steigfähigkeit, Anhängelast usw., sind recht einfach zu messende und wenig kontroverse Werte. Dagegen haben sich die Kraftstoffeffizienz- und erst recht Emissionswerte als äußerst kontrovers herausgestellt.

Das gängige Verfahren zur Ermittlung der verbrauchten Kraftstoffmenge für einen Standardfahrzyklus wird am Fahrzeug auf einem Prüfstand vorgenommen. Der Fahrzyklus besteht schlicht aus einer Reihe von Datenpunkten, die vorgeben, wie ein Streckenprofil mit bestimmten Geschwindigkeiten abgefahren wird. Es wurden verschiedene Fahrzyklen entwickelt, um bestimmte Fahrzeugbetriebsarten zu simulieren, beispielsweise Überlandfahrt, Stadtfahrt, Autobahnfahrt und eine Kombination von Stadt- und Autobahnfahrt.

Obwohl dieser Ansatz international anerkannt ist, sind wesentliche Unterschiede im Detail in verschiedenen Ländern und Regionen der Welt entstanden. Weltweite Vergleiche der Kraftstoffeffizienz von Fahrzeugen anzustellen, ist sehr schwierig! Grob gesagt haben sich die derzeitigen Standard-Fahrzyklen aus den drei großen Automobilabsatzmärkten entwickelt – Europa, USA und Asien – und die Unterschiede geben auf gewisse Weise die verschiedenen Fahrmuster in diesen Regionen wieder. Eine exzellente Übersicht zum Vergleich der verschiedenen Fahrzyklen wird in [11] gegeben. Die Situation verkompliziert sich weiter durch die Tatsache, dass verschiedene Länder oder Regionen verschiedene Grenzwerte für Kraftstoffeffizienz und Emissionen festgelegt haben – das macht es den Automobilherstellern weltweit nicht gerade einfacher, die Vorgaben in den verschiedenen Ländern zu erreichen.

Aufgrund dieser regionalen Differenzen kam es in der Branche verschiedentlich zu Meinungsstreitigkeiten über die Prüfbedingungen für Fahrzyklen. Aber die Sache stellt sich auch aus Verbrauchersicht extrem kontrovers dar, denn es hat sich herausgestellt, dass es quasi unmöglich ist, die unter Normbedingungen ermittelten idealen Zahlenwerte in der Praxis zu erzielen. Für die Ingenieure ist dieses Ergebnis eher normal und vorhersehbar – die Tests und Messungen werden schließlich unter Laborbedingungen mit verschiedenen reproduzierbaren Fahrzyklen durchgeführt, wobei die Fahrzyklen lediglich ein „typisiertes Bild“ von Millionen von verschiedenen realen Fahrsituationen sein können. Der wesentliche Vorteil ist natürlich, dass Fahrzeuge zumindest unter fairen und reproduzierbaren Bedingungen miteinander verglichen werden. Allerdings argumentieren Verbraucherorganisationen und Autozeitschriften, dass die Zahlenangaben – die mittlerweile auch am Fahrzeug im Verkaufsraum sichtbar sein müssen – auch in der Praxis erreichbar sein müssten.

In der Europäischen Union wird die Kraftstoffeffizienz in zwei Fahrzyklen ermittelt, Stadtverkehr und Überlandfahrt. Der Stadtzyklus (ECE-15) wurde 1999 vorgestellt. Er simuliert eine 4 km lange Strecke mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,7 km/h und einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Der Überlandzyklus (NEFZ, Neuer Europäischer Fahrzyklus) simuliert eine Mischung von Stadt- und Autobahnfahrt. Er dauert 400 s und gibt eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 62,6 km/h sowie eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h vor. In den USA werden die Prüfverfahren von der US-Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) verwaltet und wurden 2008 aktualisiert. Damit wurden fünf separate Tests aufgenommen, die dann zusammen gewichtet werden, um daraus die Angaben für den EPA-City- und EPA-Highway-Fahrzyklus zu ermitteln. Diese Werte müssen auch beim Fahrzeugverkauf ausgewiesen werden. Es kann gesagt werden, dass diese Angaben den realen Kraftstoffverbrauch besser wiedergeben als die EU-Angaben.

Um die Verwirrung noch zu vergrößern, wird die Kraftstoffeffizienz weltweit zudem in verschiedenen Einheiten angegeben. So wird beispielsweise in den USA und im Vereinigten Königreich „Miles per Gallon“ (mpg) verwendet – und auch schon diese Werte sind nicht vergleichbar, da die US-Gallone um den Faktor 0,83 kleiner als die britische Gallone ist! In Europa und Asien wird der Kraftstoffver-

brauch in l/100 km angegeben. Beachten Sie, dass sowohl der Kleinbuchstabe (l) als auch der Großbuchstabe (L) für Liter verwendet werden kann. Diese Verbrauchsangabe ist eigentlich der Kehrwert des mpg-Ansatzes, sodass ein großer Wert in mpg mit einem kleinen Wert in l/100 km vergleichbar ist. Zum Beispiel entsprechen $30 \text{ mpg} = 9,4 \text{ l/100 km}$ und $50 \text{ mpg} = 5,6 \text{ l/100 km}$.

Dennoch stimmen die meisten Fahrzeuganalytiker darin überein, dass alle Fahrzyklen insgesamt weniger aggressiv sind als typische reale Fahrbedingungen. Praktisch bedeutet dies, dass bei diesen Fahrzyklen geringere Beschleunigungs- und Verzögerungswerte abgefahren werden als unter normalen Fahrbedingungen. Mit dem stark steigenden Interesse an Hybridantrieben in den ersten beiden Jahrzehnten nach 2000 war unvermeidlich, dass der Fokus insbesondere auf die Herausstellung des Kraftstoffeinsparpotenzials gegenüber konventionellen Antrieben gelegt wurde. Damit wurde eine fortlaufende Debatte darüber ausgelöst, ob die Fahrzyklen die HEV-Antriebe tendenziell begünstigen gegenüber konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor. Prinzipiell bieten HEVs das größte Verbesserungspotenzial im Start-Stopp-Betrieb, beispielsweise beim Fahren im dichten Stadtverkehr. Da die meisten Fahrzyklen den Stadtbetrieb und die Einbeziehung von Leerlaufperioden tendenziell bevorzugen, wird argumentiert, dass sie die potenziellen Vorteile, die mit Hybridantrieben zur Verfügung stehen, verzerrt wiedergeben.

Hinsichtlich der Emissionen gibt es zwei Aspekte zu vermerken. Beide werden meist als „Tailpipe-Emissionen“ bezeichnet – schließlich treten sie aus dem Auspuffrohr (engl. „tailpipe“) als Produkte des Verbrennungsvorgangs aus. Das erste Problem sind die Schadstoffemissionen: Dazu gehören Kohlenmonoxid (CO), nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NOx). In Europa wurden Abgasnormen in den frühen 1990er-Jahren eingeführt, um all diese von Fahrzeugen ausgestoßenen Schadstoffe zu reduzieren. Das führte zu signifikanten Verbesserungen bei den schädlichen Emissionen von Personenkraftwagen. 2011 trat die Euro-5-Norm für Pkw in Kraft. Mit der Euro-6-Norm ist eine weitere Verschärfung der Verordnungen für Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen schon geplant.

Das zweite Problem sind die Kohlendioxid-Emissionsmengen (CO₂) von Fahrzeugen. Sie haben zu Beginn des 21. Jahrhunderts angesichts der wachsenden globalen Besorgnis über die Umwelt steigende Aufmerksamkeit erlangt. Sie sind Teil der Berechnungen des Carbon-Footprint. Ab 2001 wurde in Großbritannien die Kfz-Steuer für Neufahrzeuge an die CO₂-Emissionen gebunden, sodass für Fahrzeuge mit weniger als 100 g/km tatsächlich keine Kfz-Steuer erhoben wird. Im Jahr 2008 wurde eine ehrgeizige Rechtsvorschrift erlassen, die die europäischen Fahrzeughersteller verpflichtet, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen bis 2015 auf 130 g/km zu senken.

1.4

Verhalten des Fahrers

Auch wenn dieses Fachbuch sich ganz dem Fahrzeug und der Technik des Antriebssystems von Fahrzeugen widmet, muss beachtet werden, dass das System Fahrzeug, also ein auf der Straße bewegtes Fahrzeug, Fahrzeug und Fahrer umfasst. Das in Abb. 1.5 dargestellte komplette System zeigt auch den Fahrer, der als Feedback-Regler fungiert – indem er die Fahrzeug-Performance überwacht und diese Information zurückgibt, um sie mit seinen Anforderungssignalen an Gaspedal, Bremse, Gangwahl usw. zu vergleichen. Aus dem Blickwinkel der Dynamik betrachtet haben wir es praktisch mit einem Regelsystem zu tun. Darum müssen wir uns beim Entwurf des automobiltechnischen Systems die Fahrerpräferenzen als einen Regler bewusst machen.

Subjektiv gesprochen bevorzugen Fahrer tendenziell Systeme, die folgende Eigenschaften besitzen:

- Reaktionsfreudigkeit;
- Kontrollierbarkeit;
- Reproduzierbarkeit;
- Stabilität;
- minimale Zeitverzögerung;
- Linearität;
- Ruckfreiheit.

Die Untersuchungen, die sich mit der Einschätzung der longitudinalen Kontrolle des Fahrzeugs durch den Fahrer befassen, nennt man Fahrbarkeitsstudien. Es hat sich herausgestellt, dass Fahrbarkeit ein entscheidendes Merkmal der Verbesserung der Kundenakzeptanz von neuen Antriebskomponenten ist. Beispielsweise wurde die Fahrbarkeit ab 2000 in der Automobilbranche zur Beurteilung der Ruckfreiheit von Schaltvorgängen bei der Neuentwicklung von Getrieben genutzt, etwa bei Doppelkupplungsgetrieben und stufenlosen CVT-Getrieben (CVT, Conti-

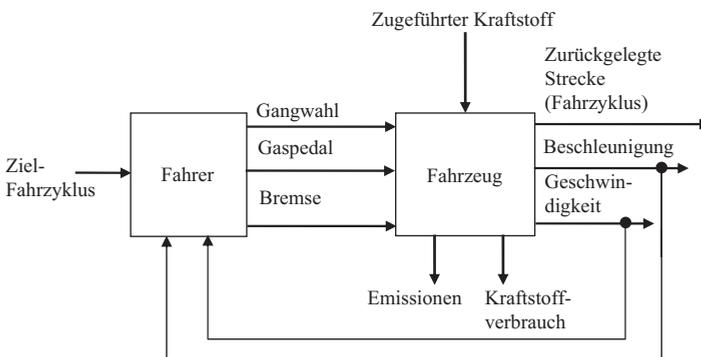


Abb. 1.5 Überblick über das System Fahrer–Fahrzeug, das die longitudinale Fahrzeugleistung regelt.

nously Variable Transmission). Tatsächlich wurden Prozeduren zur Beurteilung der äußerst subjektiven Fahrerwahrnehmung in spezielle Softwarepakete wie AVL-DRIVE integriert [12]. Hierbei soll ein objektives Maß gefunden werden, das auf subjektiven Einschätzungen der Fahrer basiert. Dazu wird ein vorgegebenes Vokabular verwendet, wobei einige Begriffe leichter zu interpretieren sind als andere, also etwa: Rucken, Tip-in und Tip-out (plötzliches Gasgeben und Loslassen), Gaspedal durchtreten, Ansprechverzögerung, Schwingungen, Welligkeit, Spiel usw.

Es gibt Fälle, wo bei der Berechnung und Simulation der Fahrzeug-Performance ein mathematisches Modell für den Fahrer in das Komplettsystem eingebunden werden muss, wie in Abb. 1.5 gezeigt. Im folgenden Abschnitt wird die sogenannte „Forward-facing Simulation“ oder Vorwärtssimulation erläutert. Bei der Vorwärtssimulation wird ein Fahrermodell benötigt, das mit an den Signaleingängen aus Gaspedal und Bremse versucht, einen vorgegebenen Fahrzyklus abzufahren. Oft ist der hier verwendete Ansatz ein einfaches PID-Modell (PID, Proportional-Integral-Differenzial). Es eignet sich gut zur Nachführung des Geschwindigkeitsprofils, ist aber nicht notwendigerweise repräsentativ für das tatsächliche Verhalten des Fahrers, denn beispielsweise wird dieses wahrscheinlich ein vorausschauendes Element enthalten.

1.5

Die Bedeutung der Modellierung

Die Idee dieses Buches basiert auf dem Ansatz, mithilfe der Modellierung ein Antriebssystem zu analysieren und zu verstehen. Dahinter steckt das Ziel, zunächst zu erklären, wie Komponenten funktionieren. Anhand der physikalischen Eigenschaften simuliert man dann das Betriebsverhalten der Komponenten mithilfe der mathematischen Modelle. Nun lassen sich die Komponenten zu einem kompletten Antriebssystem kombinieren. Das resultierende Modell ist ein Werkzeug, das einen wichtigen Beitrag bei der Entstehung des Fahrzeugdesigns liefert. Trotz dieses analytischen Ansatzes, der dem grundsätzlichen Verständnis des Verhaltens dient, sind die Ergebnisse immer darauf ausgerichtet, den Fahrzeugingenieuren einen praktischen Nutzen zu bringen.

Die im gesamten Buch verwendeten Modelle sind relativ einfach. Es werden auch Übungen aufgeführt, in denen die Modelle in der MATLAB®/Simulink®-Umgebung ausgedrückt bzw. gelöst werden. Damit ist der komplette Prozess nachvollziehbar, von der Herleitung der Bestimmungsgleichungen über deren Codierung in MATLAB/Simulink bis hin zu ihrer Auflösung und der Darstellung der Ergebnisse. Da das Buch auf grundsätzlichen Fragen aufgebaut ist, erscheint es wichtig, dass der Leser – ob Student oder Ingenieur – das gesamte Verfahren versteht und selbst erproben kann.

Bei Berechnungen der Fahrzeug-Performance für einen gegebenen Fahrzyklus gibt es zwei fundamental unterschiedliche Ansätze, die zunächst schwer verständlich erscheinen. Die zumeist verwendete Berechnungsmethode ist die „Backward-facing Simulation“ oder Rückwärtssimulation. Bei der Rückwärtssimulation sind

die Momentanwerte für Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs von allen Punkten des Geschwindigkeits-/Streckenprofils bekannt. Mit diesen Werten ist es möglich, das Antriebssystem von den Rädern zur Antriebsquelle hin „rückwärts“ abzuarbeiten und damit die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Drehmomente und Leistungen aller Komponenten zu berechnen. Der Prozess wird einfach für alle Fahrzykluspunkte wiederholt, und die Resultate werden am Ende aufsummiert. Dies ist die einfachste und am häufigsten eingesetzte Methode zur Voraussage der Fahrzeug-Performance für einen Fahrzyklus.

Der zweite Ansatz wird „Forward-facing Simulation“ genannt. Die Vorwärtssimulation benötigt zusätzlich zum Fahrzeugmodell noch ein Modell, das den Fahrer simuliert. Der Fahrzyklus besteht hier aus einer vorgegebenen Bahnkurve, der der Fahrer mit Eingangssignalen für das Fahrzeugsystem zu folgen versucht. Die Simulation wird schließlich als eine konventionelle Zeitverlauf-Simulation durch Integration dynamischer Gleichungen durchgeführt. Dieser Ansatz muss für die Entwicklung von Steuerungssystemen für Elemente des Antriebsstrangs gewählt werden, damit das Echtzeitverhalten einer Steuerung im Fahrzeug simuliert werden kann.

Für genauere Analysen von Antriebskomponenten und -systemen sind verschiedene, kommerziell erhältliche Pakete auf dem Markt. Sie werden weltweit intensiv in den Fahrzeug-Konstruktionsbüros genutzt. Obwohl diese Softwarepakete zweifelsohne die beteiligten technischen Systeme besser darstellen, bieten sie weniger Informationen über die zugrunde liegende Mechanik. Einige Beispiele für derartige Pakete:

- ADVISOR® – Der Simulator (ADVISOR, „ADvanced VehIcle SimulatOR“ – Anm. d. Übersetzers: „Fortschrittlicher Fahrzeugsimulator“) wurde 1994 vom Center for Transportation Technologies and Systems des National Renewable Energy Laboratory des US Department of Energy vorgestellt. Es galt als flexibles Modellierungswerkzeug, mit dem sich Leistung und Energieverbrauch von konventionellen, elektrischen, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen schnell beurteilen ließen. Es wurde 2003 von AVL aufgekauft [12].
- AVL CRUISE – Fahrzeug- und Antriebssystemanalyse für konventionelle und künftige Fahrzeugkonzepte [12].
- AVL-DRIVE – Bewertung der Fahrbarkeit [12].
- CarSim – Simulation der Wechselbeziehungen zwischen Fahrzeug-Performance und den Eingangsparametern aus Bremse, Lenkung und Beschleunigung¹⁾.
- IPG CarMaker – Simulation der Wechselbeziehungen zwischen Fahrzeug-Performance und den Eingangsparametern aus Bremse, Lenkung und Beschleunigung²⁾.
- Dymola – Mehrkörpersystem-Dynamik-Pakete für automobiltechnische und andere industrielle Anwendungen³⁾.

1) www.carsim.com, zuletzt besucht im März 2011.

2) www.ipg.de, zuletzt besucht im März 2011.

3) www.dymola.com, zuletzt besucht im März 2011.

- WAVE – eindimensionale Motor- und Gasdynamik-Simulation, verfügt auch über ein Triebstrangmodell, das die komplette Simulation eines Fahrzeugs ermöglicht⁴⁾.
- SimDriveline – Blöcke zur Beschreibung der Triebstrangkomponenten zur Integration in einer Simulink-Umgebung⁵⁾.
- Easy5 – fachbereichsübergreifende Modellierung und Simulation der Dynamik von physikalischen Systemen⁶⁾.

1.6

Ziel dieses Buches

Hauptziel dieses Buches ist die Bereitstellung eines umfassenden Überblicks zu Analyse und Planung von Fahrzeugantriebssystemen. Dabei stehen die folgenden Punkte im Vordergrund:

- zusammenfassende Darstellung des Systemansatzes beim Entwurf des Fahrzeugantriebs;
- Bereitstellung von Informationen zu Analyse und Entwurf von Antriebskomponenten, insbesondere für:
 - Verbrennungsmotor
 - Kraftübertragungen
 - Antriebskomponenten;
- Analyse der longitudinalen Fahrzeugdynamik zur Vorausbestimmung der Performance;
- Analyse und Erörterung der Kraftstoffeffizienz von Fahrzeugen;
- Analyse des torsionsdynamischen Verhaltens des Antriebssystems;
- Beschreibung der Grundlagen von hybridelektrischen Komponenten und deren Nutzungsstruktur im Hybridfahrzeugantrieb;
- Vorstellung von Beispielen und Übungen: einige davon mit im Buch erarbeiteten Lösungen;
- Vorstellung von Fallbeispielen der Antriebsstrang-Performance mittels MATLAB als Analysetool.

1.7

Allgemeines zu den Literaturhinweisen

Die als Literaturhinweise [1–5] aufgeführten Bücher bieten ausgezeichnete Hintergrundinformationen über die Entwicklungsgeschichte der Automobiltechnik,

4) www.ricardo.com, zuletzt besucht im März 2011.

5) www.mathworks.com, zuletzt besucht im März 2011.

6) www.mscsoftware.com, zuletzt besucht im März 2011.

des Verbrennungsmotors, der Kraftübertragungstechnik und der Hybridfahrzeuge. Zur Vorbereitung auf die Analyse von Antriebssystemen sind sie allemal leistungswert.

Literatur

- 1 SAE (1997) *The Automobile: A Century of Progress*, SAE, ISBN 0-7680-0015-7.
- 2 Eckermann, E. (2001) *World History of the Automobile*, SAE, ISBN 0-7680-0800-X.
- 3 Daniels, J. (2003) *Driving Force: The Evolution of the Car Engine*, 2. Aufl., Haynes Manuals, ISBN 978-1859608777.
- 4 Gott, P.G. (1991) *Changing Gears: The Development of the Automatic Transmission*. SAE, ISBN 1-56091-099-2.
- 5 Fuhs, A.E. (2009) *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*. CRC Press, ISBN 978-1-4200-7534-2.
- 6 Kerr, T.H. (1932) *Automobile Engineering*, Bd. 1, Sir Isaac Pitman & Sons.
- 7 Olley, M. (1936) National Influences on American Passenger Car Design. *Proc. Inst. Automob. Eng.*, XXXII, 509–541.
- 8 Plint, M.J. (2007) *Engine Testing*, 3. Aufl., SAE International, ISBN: 978-0-7680-1850-9.
- 9 Clark, S.K. (Hrsg.) (1981) *Mechanics of Pneumatic Tyres*. DOT HS 805 952, US Dept of Transportation.
- 10 Hucho, W.-H. (Hrsg.) (1998) *Aerodynamics of Road Vehicles*, 4. Aufl., SAE International, ISBN 0-7680-0029-7.
- 11 Samuel, S., Austin, L. und Morrey, D. (2002) Automotive test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels: A review. *Proc. Inst. Mech. Eng. D: J. Autom. Eng.*, 216 (7), 555–564.
- 12 www.avl.com, zuletzt besucht im März 2011.

Weiterführende Literatur

- www.carsim.com, zuletzt besucht im März 2011.
- www.ipg.de, zuletzt besucht im März 2011.
- www.dymola.com, zuletzt besucht im März 2011.
- www.ricardo.com, zuletzt besucht im März 2011.
- www.mathworks.com, zuletzt besucht im März 2011.
- www.mscsoftware.com, zuletzt besucht im März 2011.