

1

Einleitung

Die moderne Gesellschaft ist hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung extrem von dem auf fossilen Brennstoffen basierenden Transportwesen abhängig – nur so ist die uneingeschränkte Beförderung von Gütern und Personen möglich. Nach einer Schätzung des US Department of Transportation gibt es weltweit rund 800 Millionen Autos, und rund 250 Millionen Kraftfahrzeuge werden auf US-amerikanischen Straßen bewegt [1]. Mit einer Automobilproduktion von 13,79 bzw. einem Absatz von 13,64 Millionen Einheiten hat China 2009 die Vereinigten Staaten als weltweit größter Autobauer und Absatzmarkt überholt [2]. Mit der fortschreitenden Urbanisierung, Industrialisierung und Globalisierung ist die Tendenz für eine schnelle Zunahme der Zahl der Personenwagen in der ganzen Welt unvermeidlich. Die mit diesem Trend zusammenhängenden Probleme sind augenscheinlich, denn das Transportwesen ist extrem vom Öl abhängig. Einerseits sind die Ölreserven der Erde begrenzt. Andererseits haben die durch das Verbrennen von Ölprodukten entstehenden Emissionen zu Klimawandel, schlechter Luft in Ballungsräumen und politischen Konflikten geführt. So sind weltweit Energiesystem- und Umweltprobleme entstanden, die größtenteils dem Individualverkehr zuzuschreiben sind.

Der Individualverkehr bietet Menschen die Möglichkeit, sich jederzeit frei zu bewegen. Allerdings schafft diese Wahlfreiheit auch einen Konflikt, der uns zunehmend Sorgen um Umwelt und Nachhaltigkeit über den Umgang der Menschen mit ihren natürlichen Ressourcen bereitet.

Erstens muss die Welt sich dem ernstesten Problem des steigenden Energiebedarfs und der schwieriger werdenden Energieversorgung stellen. Die Welt verbraucht tagtäglich rund 85 Millionen Barrel Öl. Es gibt aber lediglich 1300 Milliarden Barrel an bekannten Ölreserven. Legt man den aktuellen Verbrauch zugrunde, so wird die Welt in 42 Jahren alle Ölreserven aufgebraucht haben [3]. Ölreserven werden nicht so schnell entdeckt, wie die Nachfrage nach Öl zunimmt. Sechzig Prozent des verbrauchten Öls wird im Transportwesen verwendet [4]. Die Vereinigten Staaten verbrauchen rund 25 % des gesamten Öls auf der Welt [5]. Die Verringerung des Ölverbrauchs im Individualverkehr ist für das Erreichen von Nachhaltigkeit im Energie- und Umweltbereich entscheidend.

Zweitens muss die Welt sich der schwierigen Aufgabe des globalen Klimawandels stellen. Die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe erhöhen die

Konzentration an Kohlendioxid (CO₂) in der Erdatmosphäre. Sie werden auch als Treibhausgas- bzw. GHG-Emissionen (GHG, Green House Gas) bezeichnet. Die Zunahme der CO₂-Konzentration führt dazu, dass zu viel Wärme von der Erdoberfläche aufgenommen wird, was wiederum zu einem globalen Temperaturanstieg und in vielen Teilen der Welt zu extremen Wetterbedingungen führt. Die langfristigen Folgen der globalen Erwärmung können zur Erhöhung des Meeresspiegels und Instabilität von Ökosystemen führen.

Mit Benzin- und Dieselmotor betriebene Fahrzeuge gehören zu den Hauptverursachern von CO₂-Emissionen. Hinzu kommen andere Emissionen von herkömmlichen, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftfahrzeugen. Zu diesen Emissionen zählen Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO und NO₂ bzw. NO_x), die bei der Verbrennung von Motorbenzin entstehen, sowie Kohlenwasserstoffe, flüchtige organische Verbindungen (VOC, Volatile Organic Compound) aus verdampftem, unverbranntem Kraftstoff, Schwefeldioxid und Rußpartikel (Ruß), die bei der Verbrennung von Dieselmotor entstehen. Diese Emissionen verschmutzen die Luft und beeinträchtigen letztlich die Gesundheit von Mensch und Tier.

Drittens braucht die Gesellschaft Nachhaltigkeit, aber das aktuelle Modell ist alles andere als nachhaltig. Die Verringerung des fossilen Brennstoffverbrauchs und der Kohlenstoffemissionen ist Teil der gemeinsamen Anstrengungen zum Erhalt der natürlichen Ressourcen in nachhaltigen Grenzen. Darum sollte der künftige Individualverkehr mehr Freiheit, nachhaltige Mobilität und nachhaltiges wirtschaftliches Wachstum sowie Wohlstand für die Gesellschaft liefern. Beim Erreichen dieses Ziels spielen elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die Energie sauber, sicher und intelligent nutzen, eine wichtige Rolle.

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge bringen viele Vorteile und Herausforderungen mit sich. Elektrizität ist effizienter als der Verbrennungsprozess eines Autos. Well-to-wheel-Studien belegen, selbst wenn der Strom des Elektrofahrzeugs mit Rohöl erzeugt wird, kann das Elektrofahrzeug mit 1 Gallone (3,8l) Benzin eine Strecke von 173 km (108 Meilen) zurücklegen, während ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICE, Internal Combustion Engine) damit 53 km (33 Meilen) weit kommt [6–8]. Einfacher gesagt kostet eine rein elektrisch gefahrene Meile 0,02 USD, legt man den US-üblichen kWh-Preis von 0,12 USD zugrunde. Bei einem Kleinwagen mit Benzinmotor sowie einem Preis von 3,30 USD pro Gallone kostet die gefahrene Meile 0,10 USD.

Strom kann mithilfe erneuerbarer Quellen erzeugt werden, beispielsweise mit Wasserkraft, Wind- oder Solarenergie und mit Biomasse. Andererseits verfügt das derzeitige Elektrizitätsnetz in der Nacht, wenn weniger Energie gebraucht wird, über Überkapazitäten. Elektrofahrzeuge (EVs, Electric Vehicles) lassen sich also idealerweise über Nacht laden, wenn das Netz Überkapazitäten bietet.

Hohe Kosten, limitierte Reichweite und lange Ladezeiten sind die Hauptprobleme batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Hybrid-elektrische Fahrzeuge (HEVs, Hybrid Electric Vehicles), die für den Fahrzeugantrieb sowohl einen Verbrennungs- als auch einen Elektromotor nutzen, überwinden die Kosten- und Reichweitenprobleme rein elektrisch betriebener Fahrzeuge und müssen nicht an

einer Steckdose geladen werden. Der Kraftstoffverbrauch kann im Vergleich zu benzinbetriebenen Fahrzeugen bei HEVs erheblich gesenkt werden. Allerdings werden diese Fahrzeuge immer noch mit Benzin- bzw. Dieselmotoren betrieben.

Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge (PHEVs oder „Steckdosen“-Hybrids) sind mit größeren Batteriepaketen und größeren Elektromotoren als HEVs bestückt. PHEVs können am Stromnetz geladen werden und können im rein elektromotorischen Betrieb eine begrenzte Distanz (30–60 km) zurücklegen. Dieser Modus wird auch als „Charge-Depletion“-Betrieb (CD-Betrieb) bezeichnet. Sobald die Batteriekapazität einen Schwellenwert unterschreitet, funktionieren PHEVs ähnlich wie ein normales HEV. Dies wird als CS-Modus (CS, Charge-Sustain, Ladeerhaltung) bzw. als Reichweitenverlängerungsmodus bezeichnet. Da die meisten Personenwagen für Pendlerfahrten eingesetzt und 75 % dieser Fahrzeuge täglich lediglich max. 60 km bewegt werden [9], kann eine bedeutende Menge an fossilem Kraftstoff eingespart werden, wenn PHEVs genutzt werden, die über eine Reichweite von 60 km bei rein elektrischem Antrieb verfügen. Im CS-Betrieb arbeitet ein PHEV ähnlich wie ein HEV. Um eine bessere Kraftstoffeffizienz zu erzielen, werden Elektromotor und Batterie genutzt, um den Betrieb des Verbrennungsmotors und des Fahrzeugsystems zu optimieren. Dank der größeren Batterieleistung und Energiespeicherfähigkeit kann ein PEHV mehr kinetische Energie beim Bremsen zurückgewinnen und damit den Kraftstoffverbrauch weiter reduzieren.

1.1

Nachhaltigkeit im Transportwesen

Das aktuelle Modell des Individualverkehrssystems ist langfristig nicht nachhaltig, denn die Erde verfügt nur über begrenzte fossile Brennstoffreserven. Damit werden derzeit 97 % des gesamten Energiebedarfs im Transportwesen gedeckt [10]. Um zu verstehen, wie wir Nachhaltigkeit im Transportwesen erreichen können, müssen wir wissen, wie Energie gewonnen wird und wie Fahrzeuge angetrieben werden können.

Die uns zur Verfügung stehenden Energiearten können in drei Kategorien unterteilt werden: erneuerbare Energie, nicht erneuerbare Energie aus fossilen Brennstoffen und Atomenergie. Zu den erneuerbaren Energien gehören Wasserkraft, Solarenergie, Windenergie, ozeanische und geothermale Energie sowie Energie aus Biomasse usw. Zu den nicht erneuerbaren Energien gehören Kohle, Öl und Erdgas. Atomenergie ist zwar reichlich vorhanden, aber auch nicht erneuerbar. Schließlich sind auch die Ressourcen an Uran und anderen radioaktiven Elementen begrenzt. Zudem gibt es (wie der atomare Unfall nach dem Erdbeben und Tsunami in Japan gezeigt hat) begründete Bedenken hinsichtlich der nuklearen Sicherheit und der Endlagerung nuklearer Abfälle. Energie aus Biomasse ist erneuerbar, da sie aus Holz, Früchten, Zellulose, Abfall und Müll gewonnen werden kann. Elektrizität und Wasserstoff sind sekundäre Formen von Energie. Sie lassen sich aus einer Vielzahl von Primärenergiequellen gewinnen,

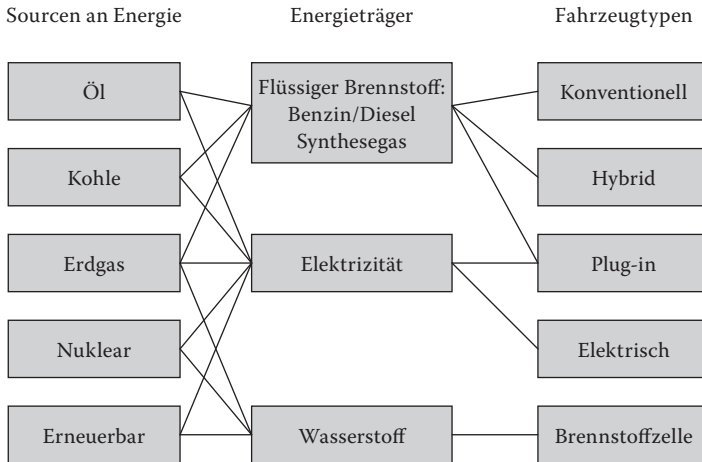


Abb. 1.1 Nachhaltiges Modell des Transportwesens.

unter anderem aus erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie. Benzin, Diesel und Synthesegase sind Energieträger, die aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden.

Abbildung 1.1 zeigt die verschiedenen Typen von Quellen von Energie, Energieträger und Fahrzeuge. Herkömmliche Benzin- bzw. Diesel-betriebene Fahrzeuge benötigen flüssigen Kraftstoff, der sich nur aus fossilem Brennstoff gewinnen lässt. Auch wenn HEVs effizienter und verbrauchsgünstiger als herkömmliche Fahrzeuge sind, benötigen sie fossilen Brennstoff als Primärenergie. Daher sind weder herkömmliche Kraftfahrzeuge noch HEVs nachhaltig. Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen Strom bzw. Wasserstoff. Elektrische Energie und Wasserstoff können beide aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden, weswegen sie nachhaltig sind, sofern dafür tatsächlich erneuerbare Energiequellen genutzt werden. Obschon nicht gänzlich nachhaltig, bieten PHEVs die Vorteile von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen. PHEVs können die fossile Brennstoffnutzung durch Nutzung des Elektrizitätsnetzes verdrängen. Sie sind keine ultimative Lösung für Nachhaltigkeit, aber ein gangbarer Weg zu künftiger Nachhaltigkeit.

1.1.1

Bevölkerung, Energie und Transportwesen

Wie in Abb. 1.2 gezeigt, wächst die Weltbevölkerung sehr schnell [11]. Gleichzeitig steigt auch der Pkw-Absatz sehr schnell, wie Abb. 1.2 zeigt (www.dot.gov s. auch http://en.wikipedia.org/wiki/Passenger_vehicles_in_the_United_States¹⁾). Es gibt eine klare Korrelation zwischen Bevölkerungswachstum und der Anzahl der jährlich verkauften Fahrzeuge.

1) Letzter Zugriff auf alle Weblinks 20.08.14, falls nicht anders angegeben.

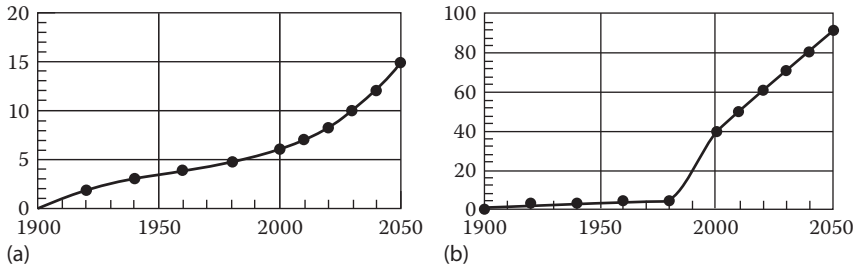


Abb. 1.2 Weltbevölkerungsentwicklung und jährlich verkaufte Fahrzeuge. (a) Weltbevölkerung, in Milliarden; (b) Jahresabsatz an Personenwagen, in Millionen.

In den USA wird der Kraftstoffverbrauch in Meilen pro Gallone (mpg) angegeben. Der Wert besagt, wie weit mit 3,8l Kraftstoff (1 Gallone) gefahren werden kann. In den meisten anderen Ländern der Welt wird der Verbrauch an Benzin (oder Diesel) für eine Strecke von 100 km angegeben, also in Litern pro 100 km (l/100 km). Mit dem CAFE-Standard (US Corporate Average Fuel Economy Standard) wurde die Kraftstoffeffizienz von Pkw für die Jahre von 1989–2008 auf 27,5 mpg festgelegt [12]. Mit einer durchschnittlichen Kraftstoffeffizienz von 27,5 mpg bzw. einem Kraftstoffverbrauch von rund 8,6l/100 km sowie einer durchschnittlichen Fahrleistung von 24 100 km (15 000 Meilen) pro Jahr sowie 250 Millionen zugelassenen Fahrzeugen verbrauchen die USA 136 Milliarden Gallonen Kraftstoff im Jahr. Das entspricht 7 Milliarden Barrel Öl oder 0,5 % aller bekannten Ölreserven auf der Erde.

2009 überholte China die Vereinigten Staaten und wurde mit 13 Millionen verkauften Fahrzeugen zum zweitgrößten Fahrzeugmarkt weltweit. Chinas Wirtschaftswachstum blieb fünf Jahre in Folge zweistellig. Aufgrund der Finanzkrise sank der Fahrzeugabsatz im Jahr 2009 weltweit um 20%. Nur Chinas Fahrzeugmarkt verzeichnete einen Zuwachs um 6% wie auch Chinas Wirtschaft, die fast 10% anhaltendes Wachstum verbuchen konnte. Früher konnte China seinen Ölbedarf aus eigenen Ressourcen decken. Schätzungen gehen heute davon aus, dass das Land schon 40% seines Ölverbrauchs importieren muss (<http://data.chinaoilweb.com/crudeoil-import-data/index.html>).

Zusätzlich zu den Industrieländern wie Japan und Deutschland, die viel Öl importieren müssen, haben Schwellenländer wie Indien und Brasilien in den vergangenen fünf Jahren einen enormen Anstieg der Fahrzeugverkäufe erlebt. Diese Länder müssen dieselben Herausforderungen hinsichtlich Ölnachfrage und Umweltproblematik bewältigen. Abbildung 1.3 zeigt Rohölverbrauch und -nachfrage pro Tag nach Ländern [13].

Abbildung 1.4 zeigt die weltweite Ölnachfrage, Verlauf und Prognose der Ölproduktion (<http://www.eia.doe.gov/steo/contents.html>). Viele Analytiker glauben an die Theorie, dass sich Ölnachfrage und -produktion derzeit auf einem historischen Höchststand befinden und dass die Ölproduktion bald nicht mehr ausreichen wird. Die klaffende Lücke zwischen Nachfrage und Produktion wird eine zweite Ölkrise hervorrufen, die uns wahrscheinlich unvorbereitet treffen wird.

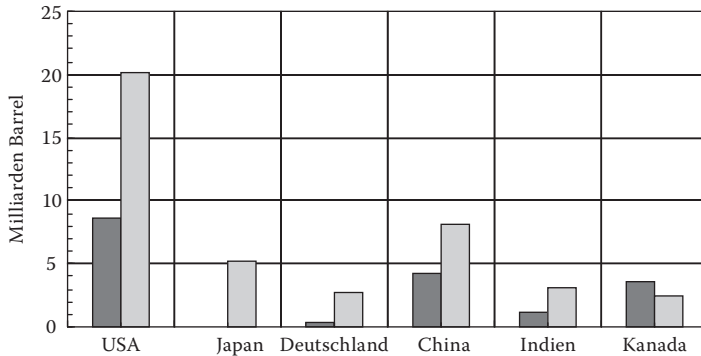


Abb. 1.3 Durchschnittlicher Rohölverbrauch im Jahr 2008 pro Tag nach Ländern, in Millionen Barrel. Die linke Spalte jedes Landes entspricht der Produktion, die rechte dem Verbrauch [13].

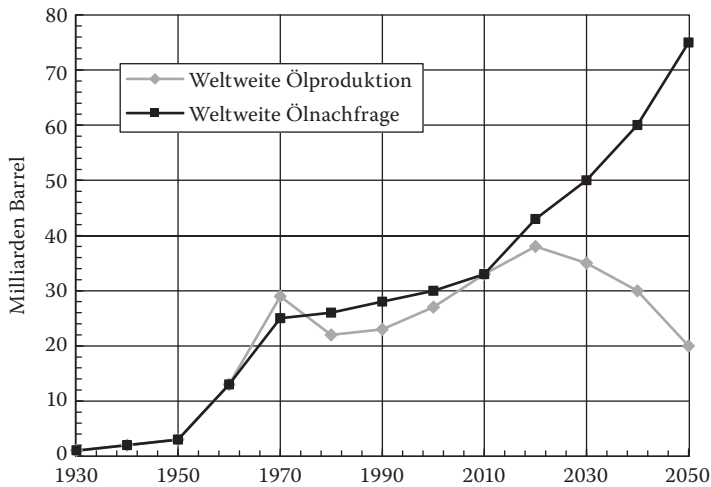


Abb. 1.4 Weltweite Ölnachfrage, Verlauf und Prognose der Ölproduktion.

1.1.2

Umwelt

Kohlenstoffemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe sind die primäre Ursache von Treibhausgasemissionen, die zu globalen Umweltveränderungen und Klimawandel führen. Abbildung 1.5 zeigt die fossilen Kohlenstoffemissionen von 1900 bis heute [14]. Der steilste Anstieg an Treibhausgasemissionen fand in den letzten 100 Jahren statt. Mit dem Anstieg der Treibhausgasemissionen ist auch der globale Temperaturanstieg verbunden. Abbildung 1.6 zeigt den Mittelwert der globalen Änderung von Land- und Ozeantemperatur zwischen 1880 und heute, wobei die Temperatur der Jahre 1951–1980 als Vergleichsbasis dienten (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>).

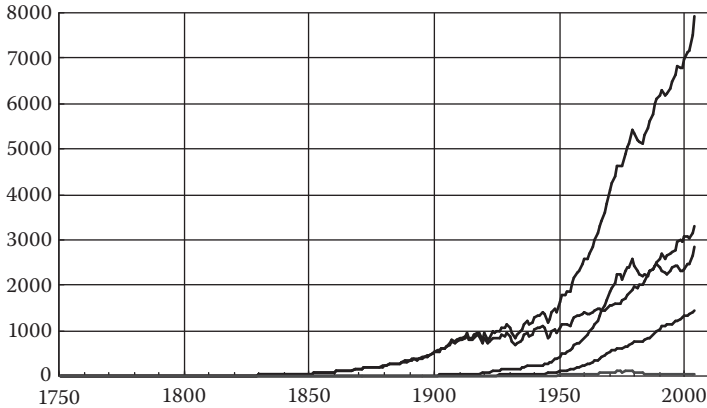


Abb. 1.5 Globale fossile Kohlenstoffemissionen von 1800–2004 [14]. An den rechten Kurvenenden, von oben nach unten: Summe CO_2 , Öl, Kohle, Zementproduktion sowie Sonstiges. Mit freundlicher Genehmigung des Oak Ridge National Laboratory.

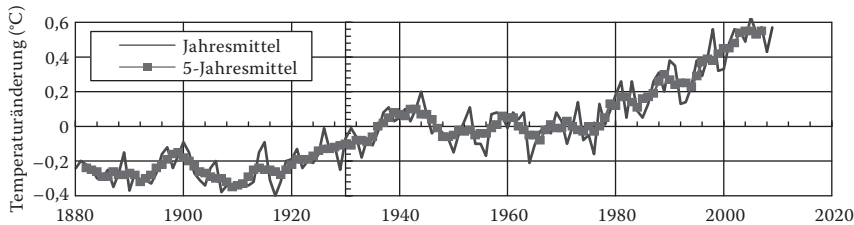


Abb. 1.6 Globales Jahresmittel der Lufttemperaturänderung an der Erdoberfläche. Daten von <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>. Mit freundlicher Genehmigung der NASA.

Abbildung 1.7 zeigt beispielhaft für den Beitrag der Fahrzeugemissionen an den Treibhausgasen die Emissionen eines typischen Personenwagens während der Kaltstartphase. Moderne Fahrzeuge sind mit Katalysatoren ausgerüstet, die die Emissionen aus den Auspuffrohren/Abgasanlagen der Fahrzeuge reduzieren. Allerdings muss ein Katalysator erst auf rund 350°C aufgeheizt werden, damit er effizient arbeiten kann. Schätzungen besagen, dass bei normalem Fahrzyklus rund 70–80 % der Gesamtemissionen während der ersten beiden Minuten nach dem Kaltstart entstehen.

1.1.3

Wirtschaftswachstum

Wirtschaftliches Wachstum ist stark von der Energieversorgung abhängig. Beispielsweise erreichte Chinas Wirtschaft zwischen 1999 und 2009 eine durchschnittliche Zuwachsrate von mehr als 10 %. Im gleichen Zeitraum stieg der Energiebedarf um über 15 % pro Jahr. Anfang der 1990er-Jahre reichte Chinas eigene Ölproduktion aus, um die eigene Wirtschaft zu versorgen. Im Jahr 2009

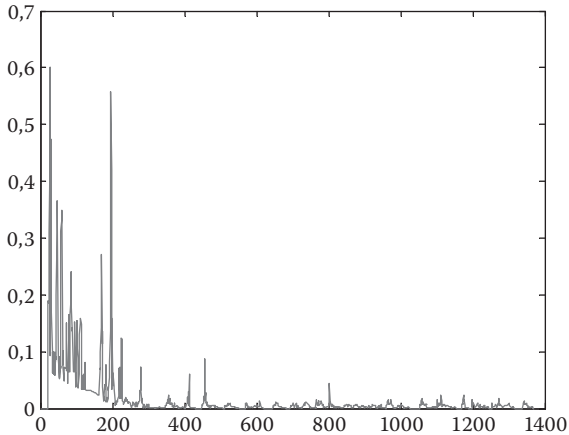


Abb. 1.7 Typische Emissionswerte eines Pkw während der Kaltstartphase. In der Abbildung ist der Gesamtwert in Gramm dargestellt, darin sind Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenstoffmonoxid, Stickoxide und Feinstaub enthalten.

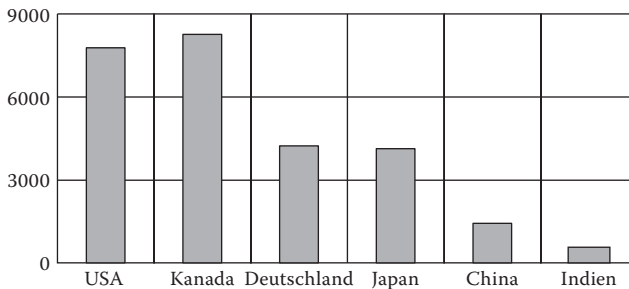


Abb. 1.8 Energieverbrauch pro Kopf im Jahr 2006 in Kilogramm Öläquivalent.

importierte China aber bereits einen Großteil seines Ölverbrauchs, schätzungsweise 40 % (<http://data.chinaoilweb.com/crude-oil-import-data/index.html>).

Abbildung 1.8 zeigt den Energieverbrauch pro Kopf in Kilogramm Öläquivalent [13]. Es ist augenscheinlich, dass die Schwellenländer immer noch unter dem Niveau der Industrieländer sind. Um Nachhaltigkeit zu erreichen, muss sich die Weltwirtschaft auf ein neues Modell einlassen.

1.1.4

Neue Kraftstoffeffizienzvorgaben

Im Jahr 2009 gab die US-Regierung ihre neue CAFE- Kraftstoffeffizienzvorgaben bekannt, wonach alle Fahrzeughersteller bis 2020 einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 35 mpg erzielen müssen. Das entspricht einem Kraftstoffverbrauch von 6,7l/100 km. Diese neue Vorgabe ist die wichtigste Kraftstoffeffizienzsteigerung in den Vereinigten Staaten seit 20 Jahren. Gegenüber der derzeit

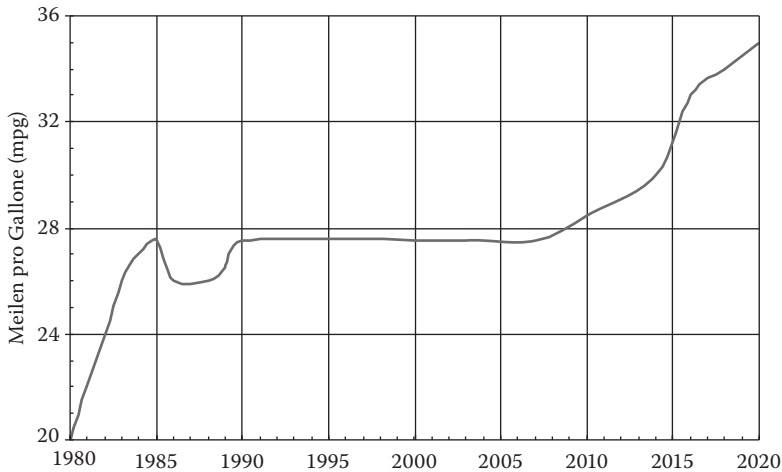


Abb. 1.9 Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs in den Vereinigten Staaten (CAFE-Vorgaben).

gültigen Vorgabe steigert dies die Kraftstoffeffizienz um 40 %, wie Abb. 1.9 zeigt. Dieses neue Gesetz stellt einen bedeutenden Fortschritt bei der Verringerung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen dar. Zum Erreichen dieses Ziels benötigen alle Autohersteller ein gemischtes Portfolio.

Zum einen müssen die Autohersteller weg von großen Fahrzeugen und Pick-ups hin zu kleineren Fahrzeugen, um ihr Portfolio anzugleichen. Zum anderen müssen sie die Technologie entwickeln, die bei herkömmlichen Benzinmotoren die Kraftstoffeffizienzverbesserungen unterstützt. Der wichtigste Punkt ist aber schließlich, dass die Fahrzeughersteller die Produktion von HEVs und PHEVs steigern.

1.2

Kurze Beschreibung der Entwicklung von HEVs

Elektrisch betriebene Kraftfahrzeuge (EVs, Electric Vehicles) wurden bereits 1834 erfunden, somit rund 60 Jahre vor den ersten Benzinfahrzeugen, die erst 1895 aufkamen. Im Jahr 1900 wurden 4200 Automobile in den Vereinigten Staaten verkauft, davon waren 40 % Elektrofahrzeuge (<http://aoghs.org/editors-picks/first-auto-show/>).

Der Deutsche Dr. Ferdinand Porsche baute 1898 wahrscheinlich das weltweit erste Hybrid-elektrische Fahrzeug (HEV, Hybrid Electric Vehicle). Er setzte einen Verbrennungsmotor ein, um einen Generator anzutreiben, der wiederum den Strom für die Radnabenmotoren lieferte (http://en.wikipedia.org/wiki/Ferdinand_Porsche). Ein anderes Hybridfahrzeug, das von Krieger 1903 gebaut wurde, nutzte einen Benzinmotor, um einen Elektromotor zu unterstützen, der elektrische Energie aus einem Batteriepaket bezog (<http://www.hybridcars.com/history/history-of->

hybrid-vehicles.html). Beide Hybridfahrzeuge besitzen Ähnlichkeit mit modernen HEV-Serienmodellen.

Ebenfalls um 1900 stellte ein belgischer Automobilhersteller namens Pieper seine „Voiturette“ mit 3,5 PS vor. Darin saß ein kleiner Benzinmotor, der an einen Elektromotor unter dem Sitz angeflanscht war (<http://en.wikipedia.org/wiki/Voiturette>). Bei normaler Fahrt diente der Elektromotor als Generator und lud die Batterien. Bei Bergauffahrt half der koaxial montierte Elektromotor dem Benzinmotor, das Fahrzeug anzutreiben. Im Jahr 1905 reichte der US-Ingenieur H. Piper ein Patent für ein benzinelektrisches Hybridfahrzeug ein. Seine Idee war, den Verbrennungsmotor durch den Elektromotor zu unterstützen, um mit dem Fahrzeug 25 Meilen/h erreichen zu können. Beide Hybridkonstruktionen sind dem modernen Parallel-HEV sehr ähnlich.

In den Vereinigten Staaten gab es in den 1920er-Jahren eine Reihe von Elektrofahrzeugherstellern, wobei zwei Firmen den EV-Markt dominierten – Baker aus Cleveland und Woods aus Chicago. Beide Fahrzeughersteller boten Hybrid-elektrische Fahrzeuge an. Allerdings waren die Hybridautos teurer als die Benzinautos und wurden kaum verkauft.

In den 1930er-Jahren verschwanden die HEVs und EVs wieder vom Markt und mit ihnen die Unternehmen, die sie herstellten. Es gab viele Gründe für das Verschwinden der EVs und HEVs. Beim Vergleich von Autos mit Benzinmotor ist festzustellen, dass EVs und HEVs

- aufgrund der größeren Batteriepakete teurer waren als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor,
- aufgrund der begrenzten Leistung der Bordbatterie schwächer waren als Benzinautos,
- zwischen den Ladezyklen eine geringe Reichweite hatten
- und zum Aufladen der Bordbatterie viele Stunden benötigten.

Dazu kam, dass der Zugang zu Elektrizität zum Laden der elektrischen und Hybrid-elektrischen Fahrzeuge in urbanen und ländlichen Gegenden schwierig war.

Die Erfindung von Startermotoren erleichterte das Anlassen von Benzinmotoren, und die Fließbandfertigung von Kraftfahrzeugen, wie beim Model-T von Henry Ford, machten die Fahrzeuge erheblich bezahlbarer als Elektro- und Hybridfahrzeuge.

Erst mit dem arabischen Ölembargo 1973 und dem Ölpreisanstieg wurde das Interesse an EVs neu geweckt. Der US-Kongress verabschiedete 1976 ein diesbezügliches Gesetz, den „Electric and Hybrid Vehicle Research, Development, and Demonstration Act“. Dieses US-Gesetz empfahl zur Verringerung der Ölabhängigkeit und der Luftverschmutzung die Nutzung von EVs. Angesichts der Smog-Belastung in Südkalifornien erließ die kalifornische Emissionsschutzbehörde (CARB, California Air Resource Board) 1990 das „Zero Emission Vehicle Mandate“ (eine Verordnung zum Verkauf abgasfreier Autos). Die Verordnung verlangte von den Automobilherstellern, bis 1998 2 % und bis 2003 10 % der in Kalifornien verkauften Autos emissionsfrei zu machen. Der Automobilabsatz in Kalifornien stellt einen Anteil von ca. 10 % am Gesamtabsatz in den Vereinigten Staaten dar.



Abb. 1.10 Ford Electric Ranger.

Die großen Automobilhersteller fürchteten, dass sie den kalifornischen Markt ohne ein Nullemissionsfahrzeug oder ZEV (Zero Emission Vehicle) verlieren könnten. Brennstoffzellenfahrzeuge wurden damals auch entwickelt. Es wurden viele EVs gebaut, etwa der EV1 von GM, der Ranger Pick-up EV von Ford (Abb. 1.10), der EV Plus von Honda, der Altra EV von Nissan sowie der RAV4 EV von Toyota.

1993 initiierte das US Department of Energy das Programm „Partnership for Next Generation Vehicle (PNGV)“, um die Entwicklung von EVs und HEVs voranzutreiben. Diese Partnerschaft bestand aus einem gemeinsamen Forschungsprogramm der US-Regierung und wichtigen Automobilherstellern und zielte darauf ab, die Effizienz von Fahrzeugen erheblich zu verbessern. Im Rahmen dieses Programms zeigten die US-amerikanischen Autobauer die Machbarkeit einer Vielzahl von neuen Automobiltechnologien, darunter ein HEV mit einem Verbrauch von 3,4l/100 km (bzw. einer Kraftstoffeffizienz von 70 mpg). Das Programm wurde 2001 eingestellt. Es wurde in das Programm „Freedom CAR“ (Cooperative Automotive Research) überführt. Es zeichnet für die aktuellen HEV-, PHEV- und Batterie-Forschungsprogramme unter der Führung des US Department of Energy verantwortlich.

Leider verschwanden mit dem EV-Programm im Jahr 2000 auch Tausende EV-Programme der Automobilhersteller. Das lag zum einen daran, dass die Akzeptanz der Verbraucher nicht überwältigend war, und zum anderen an der Tatsache, dass die CARB ihre ZEV-Verordnung lockerte.

Mit dem Verkauf des ersten modernen Hybrid-elektrischen Pkw im Jahr 1997 in Japan, dem Toyota Prius, wurde eine neue Seite in der Geschichte des Automobils aufgeschlagen. Ab dem Jahr 2000 war der Prius in den Vereinigten Staaten erhältlich, wie im Übrigen auch die Honda-HEVs Insight und Civic. Mit diesen frühen HEVs wurde der Öffentlichkeit eine völlig andere Art von Fahrzeug geboten. Diese nutzen sowohl die Vorteile von EVs als auch die herkömmlicher, benzinbetriebener Fahrzeuge. Heute sind über 40 HEV-Modelle von mehr als zehn großen Automobilherstellern auf dem Markt.

1.3

Gründe für Aufkommen und Misserfolg von EVs in den 1990er-Jahren und was daraus gelernt werden kann

In den 1990er-Jahren gab es in Kalifornien erhebliche Probleme durch Smog und Luftverschmutzung, die bekämpft werden mussten. Mit der ZEV-Verordnung der CARB zwang die Behörde die Autohersteller, ZEVs (Nullemissionsfahrzeuge) zu verkaufen, wenn sie in Kalifornien Autos verkaufen wollten. Das führte zur Entwicklung von Elektrofahrzeugen bei allen großen Automobilherstellern. Innerhalb weniger Jahre waren mehr als zehn Serien-EVs auf dem Markt, beispielsweise der GM EV1, Toyota RAV4, Ford Ranger etc.

Dennoch kollabierte der EV-Markt Ende der 1990er-Jahre. Woran scheiterte die EV-Branche? Die Gründe waren je nach Standpunkt des Betrachters unterschiedlich. Die folgenden Faktoren trugen aber entscheidend zum Scheitern der EVs in den 1990er-Jahren bei:

- *Einschränkungen der EVs:* Die meisten EVs hatten nur eine sehr limitierte Reichweite von 100–160 km (60–100 Meilen). Fahrzeuge mit Benzinmotor hingegen erreichten fast 500 km (300 Meilen) oder sogar mehr. Hinzu kamen die langen Ladezeiten (8 h oder mehr), die hohen Kosten (40 % Mehrkosten gegenüber Benzinfahrzeugen) sowie der in vielen EVs verkleinerte Stauraum.
- *Niedrige Benzinpreise:* Im Gegensatz zu der Investition, die ein Autokäufer mit dem Kauf eines EV tätigt, sind die Betriebskosten (Kraftstoffkosten) relativ unbedeutend.
- *Verbraucher:* Die Verbraucher glaubten, dass große SUVs (Sports Utility Vehicles) und Pick-ups sicherer und für viele Einsatzzwecke, etwa für den Anhängerbetrieb, besser geeignet wären. Daher zogen viele Verbraucher große SUVs kleineren und effizienten Fahrzeugen vor – auch aufgrund der niedrigen Benzinpreise.
- *Fahrzeughersteller:* Die Automobilhersteller gaben Milliarden für Forschung, Entwicklung und den Bau von EVs aus, und trotzdem blieb die Marktreaktion verhalten. Mit dem Verkauf von EVs machten sie Verluste. Wartung und Service von EVs stellten Zusatzbelastungen für die Autohäuser dar. Ein wesentlicher Grund war, dass an der Zuverlässigkeit von EVs gezweifelt wurde, obwohl es keinen Beweis gab, dass EVs weniger sicher als Benzinfahrzeuge waren.
- *Ölgesellschaften:* EVs wurden als Bedrohung für Ölgesellschaften und Ölindustrie angesehen. Die Lobbyarbeit der Autohersteller und Ölgesellschaften bei der US-Regierung und die Aufgabe der ZEV-Verordnung durch die kalifornische Regierung waren die entscheidenden Faktoren, die zum Verschwinden der EVs in den 1990er-Jahren führten.
- *Regierung:* In letzter Minute änderte die CARB die ZEV-Verordnung von einer Verordnung für EVs zu einer für Wasserstoff-Fahrzeuge.
- *Batterietechnologie:* In den 1990er-Jahren wurden in den meisten EVs Bleibatterien eingesetzt. Die Batterien waren groß und schwer, und das Wiederaufladen dauerte lange.

- *Infrastruktur*: Es gab nur eine begrenzte Infrastruktur für das Wiederaufladen von Batterien.

Da wir einen Weg hin zu einem nachhaltigen Transportwesen suchen, helfen uns die Lektionen aus der Vergangenheit, die Fehler nicht zu wiederholen. Um die aktuellen HEV- und PHEV-Entwicklungen zum Erfolg zu führen, müssen wir noch viele Hürden nehmen:

- *Schlüsseltechnologien*: Dies sind Batterien, Leistungselektronik und Elektromotoren. Besonders wenn sich keine bedeutenden Fortschritte bei der Batterietechnologie ergeben und die Benzinpreise weiter niedrig bleiben, wird der großtechnische Einsatz von EVs und PHEVs erheblich erschwert.
- *Kosten*: HEVs und PHEVs kosten erheblich mehr als ihre Benzin-Pendants. Um die Kosten für die Komponenten und die Systemkosten zu senken, müssen Anstrengungen unternommen werden. Wenn die Einsparungen beim Kraftstoff die Investition in ein HEV schnell wettmachen könnten, würden die Verbraucher auch schnell auf HEVs und PHEVs umsteigen.
- *Infrastruktur*: Der großtechnische Einsatz von PHEVs verlangt eine Infrastruktur, die das schnelle und bequeme Laden von PHEVs am Stromnetz ermöglicht. Die durch PHEVs zusätzlich benötigte elektrische Energie muss erzeugt werden, möglichst mit einem größeren Anteil aus erneuerbaren Energieträgern.
- *Politik*: Die Regierungspolitik hat einen bedeutenden Einfluss auf den Einsatz von vielen neuen Technologien. Zu Faktoren, die durch die Politik beeinflusst und den Einsatz von HEVs und PHEVs beschleunigen können, gehören z. B. Steuergesetze, Normen, Kaufanreize, Forschungsinvestitionen, Entwicklung sowie die Herstellung fortschrittlicher Technologieprodukte.
- *Neue Lösungsansätze*: Auch ein integrierter Ansatz, bei dem hocheffiziente Maschinen, Fahrzeugsicherheit und intelligentere Straßenführungen kombiniert werden, hilft, eine nachhaltige Zukunft für den Individualverkehr zu gestalten.

1.4

Konfigurationen von HEVs

Ein HEV ist eine Kombination aus einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem EV. Sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor/Generator werden für den Vortrieb genutzt. Die beiden Kraftquellen, der Verbrennungsmotor und Elektromotor, können im Hinblick auf den Leistungsfluss in *Serie* oder *parallel* angeordnet werden. Werden Verbrennungs- und Elektromotor des HEV seriell angeordnet, spricht man von einem seriellen Hybrid oder Serienhybrid. Dabei liefert nur der Elektromotor mechanische Leistung an die Räder. Sind Verbrennungs- und Elektromotor des HEV parallel angeordnet, so spricht man von einem parallelen Hybrid oder Parallelhybrid. Hier können so-

wohl der Elektromotor als auch der Verbrennungsmotor mechanische Leistung an die Räder liefern.

Beim HEV ist flüssiger Kraftstoff noch immer die Quelle für die Energie. Der Verbrennungsmotor ist der Hauptleistungswandler; er liefert die gesamte Energie für das Fahrzeug. Der Elektromotor verbessert die Systemeffizienz und verringert den Kraftstoffverbrauch durch die Rückgewinnung der kinetischen Energie beim regenerativen Bremsen. Er optimiert den Betrieb des Verbrennungsmotors durch Anpassen des Drehmoments und der Drehzahl beim normalen Fahren. Der Verbrennungsmotor verleiht dem Fahrzeug eine größere Reichweite und überwindet damit einen der Nachteile des rein elektrisch betriebenen Fahrzeugs.

Beim Plug-in-Hybrid-elektrischen Fahrzeug, kurz PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), wird neben dem im Fahrzeug zur Verfügung stehenden flüssigen Kraftstoff zusätzlich elektrische Energie in der Batterie gespeichert, die am Stromnetz geladen werden kann. Damit kann die Nutzung des flüssigen Kraftstoffs noch weiter reduziert werden.

Beim Serien-HEV oder -PHEV treibt der Verbrennungsmotor einen Generator. Beide zusammen werden auch als I/G-Einheit bezeichnet. Hierbei steht I für ICE, somit für den Verbrennungsmotor (ICE, Internal Combustion Engine), und G steht für den Generator. Der ICE wandelt die Energie im flüssigen Kraftstoff in mechanische Energie um. Der Generator wandelt die mechanische Energie auf der Abtriebsseite des Verbrennungsmotors in Elektrizität um. Die von der I/G-Einheit erzeugte Elektrizität nutzt der Elektromotor, um das Fahrzeug voranzutreiben. Dieser Elektromotor wird auch für die Rückgewinnung der kinetischen Energie beim Bremsen eingesetzt. Zwischen Generator und Elektromotor ist eine Batterie angeordnet, die die elektrische Energie zwischen I/G-Einheit und Elektromotor zwischenspeichert.

Beim parallelen HEV oder beim PHEV sind sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor über einen mechanischen Kopplungsmechanismus (z. B. Kupplung, Zahnräder, Riemen, Scheiben) mit der Welle des Achsantriebs verbunden. Diese Parallel-Konfiguration ermöglicht es, sowohl den Verbrennungsmotor als auch den Elektromotor separat oder kombiniert für den Fahrzeugantrieb zu nutzen. Der Elektromotor wird auch beim regenerativen Bremsen oder bei Schubbetrieb des Verbrennungsmotors zur Wiedergewinnung der überschüssigen Energie genutzt.

Neben der beschriebenen parallelen oder seriellen Konfiguration gibt es auch HEVs und PHEVs, die eine komplexere Konfiguration besitzen, dann aber üblicherweise mit mehreren Elektromotoren. Derartige Konfigurationen sind im Allgemeinen in der Lage, die Performance und die Kraftstoffeffizienz des Fahrzeugs noch weiter zu verbessern, allerdings bei höheren Bauteilkosten.

1.4.1

Serien-HEVs

Abbildung 1.11 zeigt die Konfiguration eines Serien-HEV. Bei diesem HEV stellt der Verbrennungsmotor den Hauptenergiewandler dar, der die chemische Ener-

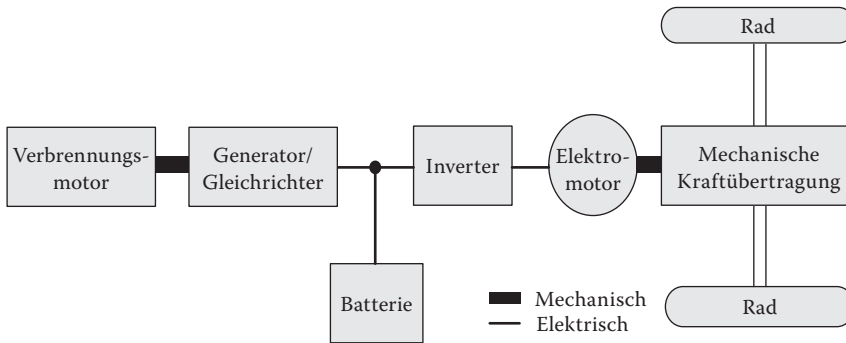


Abb. 1.11 Aufbau eines Serien-HEV.

gie aus dem Benzin in mechanische Leistung umwandelt. Die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors wird dann mithilfe eines Generators in Elektrizität umgewandelt. Der Elektromotor verwendet die vom Generator erzeugte oder in der Batterie gespeicherte Elektrizität, um den Achsantrieb zu bewegen. Der Elektromotor kann die Elektrizität auf drei Arten beziehen: aus der Batterie, direkt von dem vom Verbrennungsmotor angetriebenen Generator oder von beiden. Da der Verbrennungsmotor und die Räder nicht gekoppelt sind, kann die Motordrehzahl unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit gesteuert werden. Einerseits vereinfacht das die Steuerung des Verbrennungsmotors erheblich. Viel wichtiger ist aber, dass der Verbrennungsmotor so stets mit optimaler Drehzahl, somit auch mit optimaler Kraftstoffeffizienz betrieben werden kann. Dies liefert zudem mehr Flexibilität bei der Anordnung des Motors im Fahrzeug. Beim Serien-HEV wird keine herkömmliche mechanische Kraftübertragung benötigt. Je nach den Betriebsbedingungen des Fahrzeugs können die Antriebskomponenten eines Serien-HEV auf verschiedene Weisen kombiniert betrieben werden:

- *Reiner Batteriebetrieb:* Wenn die Batterie über ausreichend Energie verfügt und die geforderte Fahrzeugleistung gering ist, wird die I/G-Einheit abgeschaltet. Das Fahrzeug wird lediglich mit Batteriestrom angetrieben.
- *Kombinierter Antrieb:* Wenn viel Leistung angefordert wird, wird die I/G-Einheit eingeschaltet, und die Batterie versorgt den Elektromotor ebenfalls mit elektrischer Energie.
- *Verbrennungsmotorbetrieb:* Bei Überland-/Autobahnfahrt und mittlerem bis hohem Leistungsbedarf wird die I/G-Einheit eingeschaltet. Die Batterie wird weder geladen noch entladen. Das liegt daran, dass der Batterieladezustand (SOC, State of Charge) bereits recht hoch ist, die vom Fahrzeug geforderte Leistung das Abschalten des Verbrennungsmotors verhindert oder es nicht sinnvoll ist, ihn abzustellen.
- *Leistungsaufteilung (Power-Split):* Wenn die I/G-Einheit eingeschaltet ist, die angeforderte Fahrzeugleistung unterhalb des Leistungsoptimums der I/G-Einheit liegt und der Batterieladezustand niedrig ist, wird ein Teil der Leistung der I/G-Einheit für das Laden der Batterie verwendet.

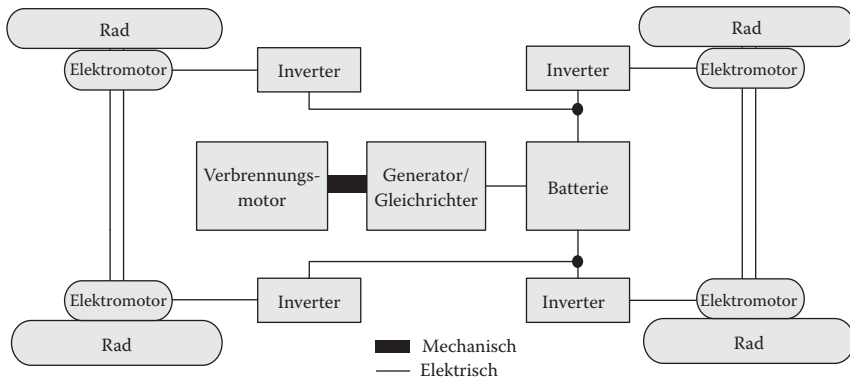


Abb. 1.12 Nabennotor-Konfiguration eines Serien-HEV.

- *Stationäres Laden:* Die Batterie wird von der I/G-Einheit geladen, ohne dass das Fahrzeug bewegt wird.
- *Regeneratives Bremsen:* Der Elektromotor wird als Generator betrieben, der die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie umwandelt und die Batterie lädt.

Ein Serien-HEV kann wie ein konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor konfiguriert werden, das heißt, dass der Elektromotor an der Stelle des Verbrennungsmotors sitzt, wie in Abb. 1.11 zu sehen ist. Es gibt auch andere Anordnungen, wie beispielsweise Nabennoten. In der in Abb. 1.12 dargestellten Anordnung sitzen vier Elektromotoren jeweils als Nabennoten in den Radnaben. Da Getriebe und Achsantrieb wegfallen, kann die Effizienz des Fahrzeugsystems beträchtlich gesteigert werden. Zudem verfügt ein solches Fahrzeug damit über einen Allradantrieb (AWD, All-Wheel Drive). Allerdings ist es nicht einfach, die vier Elektromotoren unabhängig zu regeln.

1.4.2

Parallel-HEVs

Abbildung 1.13 zeigt die Konfiguration eines parallelen Hybrids. Bei dieser Anordnung können Verbrennungsmotor und Elektromotor parallel Leistung an die Räder abgeben. Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor sind über einen Mechanismus wie beispielsweise Kupplung, Riemen, Scheiben und Zahnräder mit dem Achsantrieb verbunden. Sowohl Verbrennungs- als auch Elektromotor können kombiniert oder getrennt Leistung an den Achsantrieb abgeben. Der Elektromotor kann als Generator genutzt werden, um die kinetische Energie beim Bremsen zurückzugewinnen oder einen Teil der Leistung des Verbrennungsmotors zu nutzen. Der parallele Hybrid benötigt lediglich zwei Antriebseinrichtungen, den Verbrennungsmotor und den Elektromotor, die sich in folgenden Modi nutzen lassen:

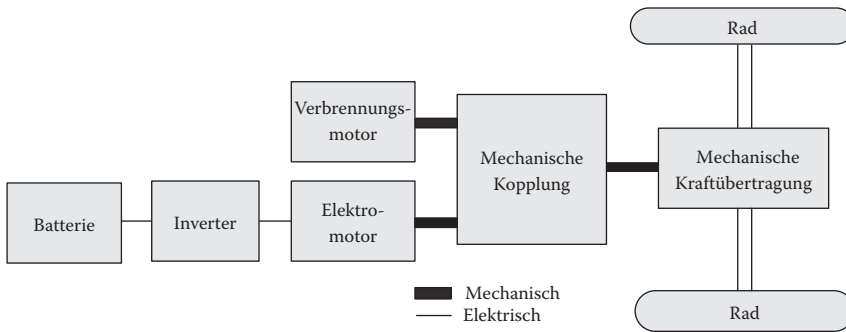


Abb. 1.13 Aufbau eines Parallel-HEV.

- *Reiner Elektromotorbetrieb:* Wenn die Batterie über ausreichend Energie verfügt und die geforderte Fahrzeugleistung gering ist, bleibt der Verbrennungsmotor abgeschaltet. Das Fahrzeug wird lediglich vom Elektromotor angetrieben, der mit Batteriestrom arbeitet.
- *Kombinierter Betrieb:* Bei hohem Leistungsbedarf wird der Verbrennungsmotor angelassen. Auch der Elektromotor gibt Leistung an die Räder ab.
- *Verbrennungsmotorbetrieb:* Bei Überland-/Autobahnfahrt und mittlerem bis hohem Leistungsbedarf liefert der Verbrennungsmotor die gesamte benötigte Antriebsleistung für das Fahrzeug. Der Elektromotor bleibt im Leerlauf (ohne Last). Das liegt meist daran, dass der Ladezustand der Batterie bereits recht hoch ist und die vom Fahrzeug geforderte Leistung aber das Abstellen des Verbrennungsmotors verhindert oder es nicht sinnvoll ist, ihn abzustellen.
- *Power-Split-Betrieb:* Wenn der Verbrennungsmotor läuft, aber der Leistungsbedarf des Fahrzeugs gering ist und der Ladezustand der Batterie niedrig ist, dann wird ein Teil der Leistung des Verbrennungsmotors vom Elektromotor in elektrischen Strom zum Laden der Batterie umgewandelt.
- *Stationärer Ladebetrieb:* Die Batterie wird durch den vom Verbrennungsmotor angetriebenen, als Generator betriebenen Elektromotor geladen, ohne dass das Fahrzeug bewegt wird.
- *Regenerativer Bremsbetrieb:* Der Elektromotor wird als Generator genutzt. Er wandelt die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie um, die in der Batterie gespeichert wird. Beachten Sie, dass es auch im regenerativen Betrieb prinzipiell möglich ist, den Verbrennungsmotor laufen zu lassen und damit mehr Strom zum schnelleren Laden der Batterie zu erzeugen. Der elektrische Antriebsmotor befindet sich dabei im Generatormodus, und sein Drehmoment muss entsprechend der gesamten in der Batterie aufgenommenen Leistung angepasst werden. In diesem Fall müssen die Steuerungen von Verbrennungs- und Elektromotor genau koordiniert werden.

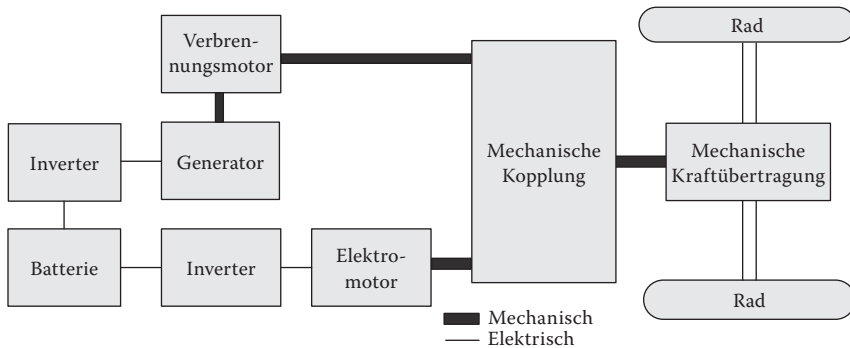


Abb. 1.14 Aufbau eines Parallel-HEV.

1.4.3

Serien-parallel-HEVs

Das in Abb. 1.14 dargestellte Serien-parallel-HEV verfügt über die Merkmale beider Anordnungen, somit der seriellen und parallelen HEVs. Darum lässt es sich auch als Serien- oder Parallel-HEV betreiben. Verglichen mit dem Serien-HEV verfügt das Serien-parallel-HEV über eine zusätzliche mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Achsantrieb. Das heißt, der Verbrennungsmotor kann die Räder direkt antreiben. Gegenüber dem Parallel-HEV verfügt das Serien-parallel-HEV über einen zweiten Elektromotor, der primär als Generator dient.

Da ein Serien-parallel-HEV sowohl im Serien- als auch im Parallel-Betriebsmodus gefahren werden kann, können Kraftstoffeffizienz und Fahrverhalten entsprechend den Betriebsbedingungen des Fahrzeugs optimiert werden. Aufgrund der höheren Zahl an Freiheitsgraden in der Steuerung sind Serien-parallel-HEVs sehr beliebt. Andererseits kostet die größere Zahl an Komponenten und größere Komplexität ihren Preis. Serien-parallel-HEVs sind also generell teurer als Serien-HEVs oder Parallel-HEVs.

1.4.4

Komplexe HEVs

Komplexe HEVs benötigen normalerweise Planetengetriebesysteme und mehrere Elektromotoren (bei Vierrad- bzw. Allradantrieb). Ein typisches Beispiel ist ein System mit Allradantrieb (4WD, Four-Wheel Drive), bei dem separate Antriebsachsen verwendet werden. Ein solches System ist in Abb. 1.15 dargestellt. In diesem System wird der Generator zur Umsetzung des Serien-Betriebsmodus verwendet. Zudem wird er genutzt, um die Betriebsbedingungen des Verbrennungsmotors auf maximale Effizienz zu trimmen. Die beiden Elektromotoren werden zur Umsetzung des Allradantriebs sowie zum Erzielen einer besseren Performan-

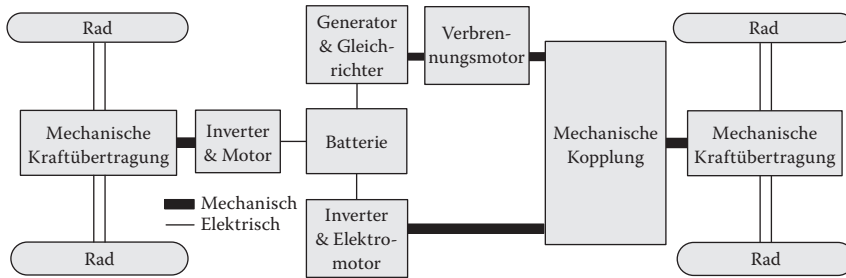


Abb. 1.15 Elektrischer Allradantrieb mit komplexer Architektur.

ce beim regenerativen Bremsen genutzt. Damit lassen sich zudem die Stabilitätskontrolle und das ABS (Antiblockiersystem) verbessern.

1.4.5

Diesel-Hybridfahrzeuge

HEVs lassen sich auch mit Dieselfahrzeugen realisieren. Alle bisher erläuterten Topologien, ob HEVs in Serien-, Parallel-, Serien-parallel-Anordnung oder komplexe HEVs, lassen sich auch auf Diesel-Hybrids anwenden. Aufgrund der Tatsache, dass Dieselfahrzeuge eine höhere Kraftstoffeffizienz als Benzin erzielen können, lässt sich mit der Hybridisierung von Dieselfahrzeugen auch eine bessere Kraftstoffeffizienz erreichen.

Fahrzeuge wie Lkw und Busse verfügen über besondere Fahrbetriebsprofile und haben eine relativ geringe Kraftstoffeffizienz. Die Hybridisierung dieser Fahrzeuge bietet bedeutende Kraftstoffeffizienz. Hybrid-Lkw und -Busse lassen sich als Serien-, Parallel- und Serien-parallel-HEVs sowie als komplex aufgebaute HEV bauen und können mit Benzin- oder Dieselmotor betrieben werden.

Diesellokomotiven stellen einen speziellen Typ von Hybridfahrzeug dar. Bei Diesellokomotiven werden ein Dieselmotor und eine Generatoreinheit zum Erzeugen von elektrischer Energie verwendet. Die Elektromotoren werden für den Antrieb des Zugs genutzt. Auch wenn eine Diesellokomotive als Serien-Hybrid bezeichnet werden kann, so gibt es bei manchen Architekturen für das Hauptantriebssystem keine Batterie zum Puffern der Energie zwischen der I/G-Einheit und dem Elektromotor (I/G steht für Internal Combustion Engine/Generator). Diese spezielle Konfiguration wird manchmal als Einfachhybrid (Simple Hybrid) bezeichnet. Bei anderen Konfigurationen werden auch Batterien verwendet, um die Generatorgröße verringern und die regenerative Bremsenergie speichern zu können. In diesem Fall können die Batterien auch eingesetzt werden, um kurzfristig hohe Drehmomente bereitzustellen, ohne dass größere Generatoren verbaut werden müssen.

1.4.6

Andere Konzepte der Hybridisierung von Fahrzeugen

Das Hauptthema dieses Buchs sind HEVs, also elektrische Benzin- und Diesel-Hybridfahrzeuge. Allerdings gibt es auch andere Arten der Hybridisierung, bei denen andere Typen von Energiespeichern und Antrieben genutzt werden, etwa Druckluft-, Schwungmassen- oder Hydrauliksysteme. Ein typischer Hydraulik-Hybrid ist in Abb. 1.16 gezeigt. Hydrauliksysteme liefern sehr große Drehmomente. Aufgrund der Komplexität des Hydrauliksystems kommt ein Hydraulik-Hybrid nur für große Lkw und Nutzfahrzeuge in Betracht, bei denen der Verbrennungsmotor häufiger und länger abgeschaltet werden muss.

1.4.7

Hybridisierungsgrad

Einige neuere Konzepte sind auch erst in den letzten Jahren entstanden, darunter Vollhybrid, Mild-Hybrid und Micro-Hybrid. Diese Bezeichnungen beziehen sich üblicherweise auf die Nennleistung des elektrischen Hauptantriebsmotors in einem HEV. So spricht man beispielsweise von einem Vollhybrid, wenn das HEV einen recht großen Elektromotor sowie entsprechend leistungsfähige Batterien enthält. Andererseits kann man dann einen HEV mit relativ kleinem Elektromotor als Micro-Hybrid bezeichnen.

Typisch für einen Vollhybrid ist, dass das Fahrzeug bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit mit dem Elektromotor und der Batterie für eine bestimmte Zeit angetrieben werden kann. Meist wird als Grenzwert für die Geschwindigkeit die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Wohngebiete genommen. Die typische Nennleistung eines Elektromotors in einem Vollhybrid-Pkw beträgt 50–75 kW.

Andererseits bietet der Micro-Hybrid nicht die Möglichkeit, das Fahrzeug rein elektromotorisch anzutreiben. Der Elektromotor wird nur für das Starten und

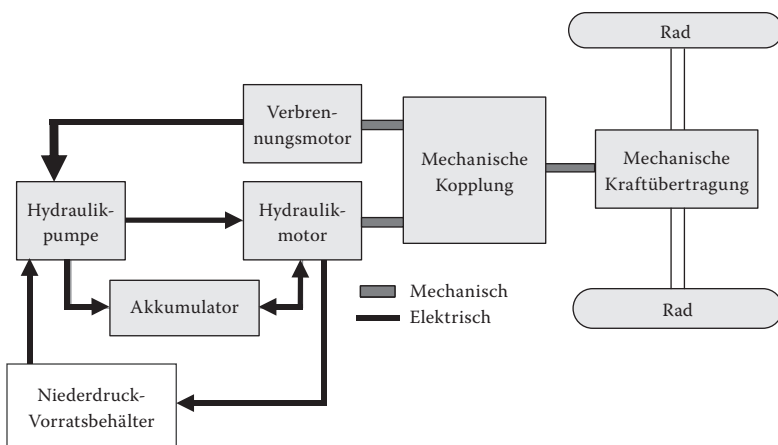


Abb. 1.16 Ein Parallel-Hydraulik-Hybridfahrzeug (ND – Niederdruck).

Stoppen des Verbrennungsmotors genutzt. Die Nennleistungen der Elektromotoren in Micro-Hybrids liegen typischerweise unter 10 kW. Ein Mild-Hybrid ist zwischen einem Vollhybrid und einem Micro-Hybrid angesiedelt.

Ein effektiver Ansatz zur Bewertung von HEVs besteht in der Verwendung des sogenannten Hybridisierungsgrads. Für einen Parallel-Hybrid ist der Hybridisierungsgrad als das Verhältnis der elektrischen Leistung an der Gesamtantriebsleistung definiert. So hat beispielsweise ein HEV mit einem Elektromotor mit einer Nennleistung von 50 kW und einem Verbrennungsmotor mit einer Nennleistung von 75 kW einen Hybridisierungsgrad von $50/(50 + 75) \text{ kW} = 40\%$. Demnach hat ein herkömmliches, benzinbetriebenes Fahrzeug einen Hybridisierungsgrad von 0 % und ein batteriegetriebenes EV einen Hybridisierungsgrad von 100 %. Aufgrund der Tatsache, dass ein Serien-HEV im EV-Betrieb betrieben wird, hat dieses einen Hybridisierungsgrad von 100 %.

1.5

Das fachbereichsübergreifende Wesen von HEVs

Abgesehen von herkömmlichem Verbrennungsmotor und mechanischen und hydraulischen Systemen benötigen HEVs elektrische Maschinen, Leistungselektronik (Inverter) und Batterien. Der fachübergreifende Charakter von HEV-Systemen kann wie in Abb. 1.17 dargestellt werden. Im HEV-Umfeld sind Technikbereiche involviert, die über das traditionelle Automobilingenieurwesen, das sich am Maschinenbau orientiert, hinausgehen. Leistungselektronik, elektrische Maschinen, Energiespeichersysteme und Steuer- und Regelsysteme sind integraler Bestandteil der in HEVs und PHEVs verbauten Technik.

Wärmemanagement ist in HEVs und PHEVs ebenfalls wichtig. Schließlich brauchen Leistungselektronik, elektrische Maschinen und Batterien deutlich niedrigere Betriebstemperaturen als die Nicht-Hybrid-Komponenten des Antriebs-

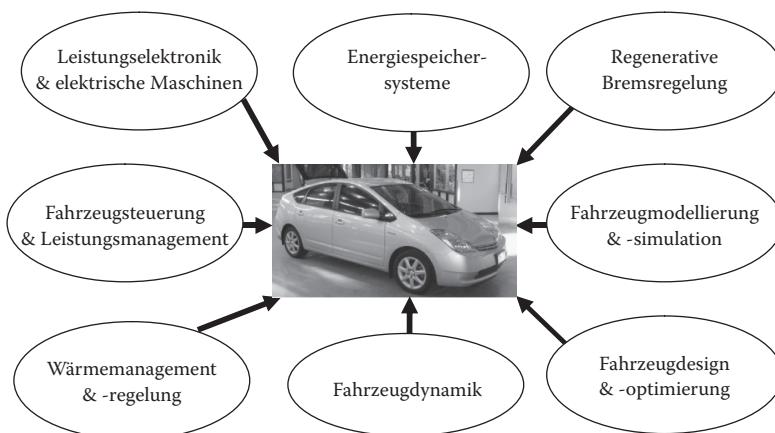


Abb. 1.17 Allgemeine Merkmale von HEVs und berührte Technikfelder.

strangs. Für das traditionelle automobiltechnische Umfeld sind Modellierung und Simulation, Fahrdynamik sowie Konstruktion und Optimierung des Fahrzeugs auch problematisch. Dies liegt am grundsätzlich schwierigeren Zusammenbau von Komponenten und zugehörigem Wärmemanagementsystemen sowie an den Änderungen bei Gewicht, Form und Gewichtsverteilung.

1.6

Stand der Technik bei HEVs

In den vergangenen zehn Jahren wurden viele neue HEVs von den großen Automobilherstellern entwickelt und auf den Markt gebracht. Abbildung 1.18 zeigt den HEV-Absatz in den Vereinigten Staaten zwischen 2000 und 2009 sowie die Absatzprognosen (http://electricdrive.org/index.php?ht=d/Articles/cat_id/5514/pid/2549, letzter Zugriff 12.09.2010). Abbildung 1.19 gibt die Aufschlüsselung der HEV-Absatzzahlen in den USA nach Herstellern wieder. Es ist klar, dass die HEV-Verkäufe in den vergangenen zehn Jahren beträchtlich zugenommen haben. Im Jahr 2008 knickten die Absatzzahlen ebenso wie die der herkömmlichen Fahrzeuge um 20 % gegenüber dem Vorjahr ein. Man kann auch sehen, dass die meisten HEV-Verkäufe Toyota zugeordnet werden konnten. Toyota brachte als erstes Unternehmen einen modernen HEV, den Prius, heraus und bietet auch die meisten Modelle an (Lexus eingeschlossen).

In Tab. 1.1 werden die heute in den Vereinigten Staaten erhältlichen HEVs mit den Basismodellen mit Benzinantrieb verglichen (www.toyota.com, www.ford.com, www.gm.com, <http://www.nissanusa.com>, www.honda.com, www.chrysler.com).

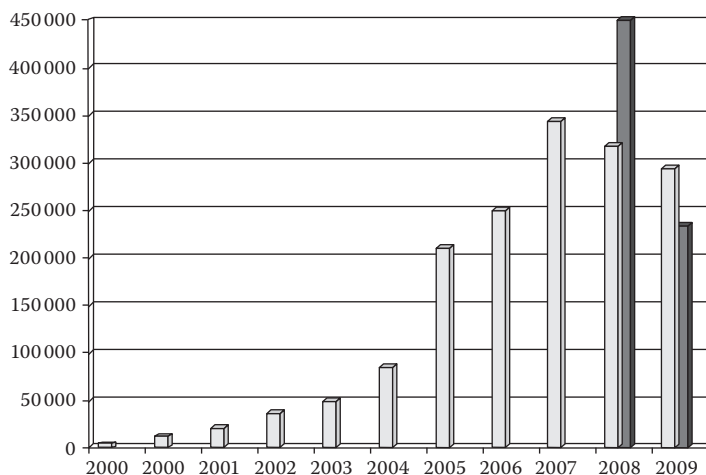


Abb. 1.18 Gesamtzahl der in den Vereinigten Staaten zwischen 2000 und 2009 verkauften HEVs (in Tausenden): linker Balken – tatsächliche Zahl verkaufter Fahrzeuge; rechter Balken – prognostizierte Zahl.

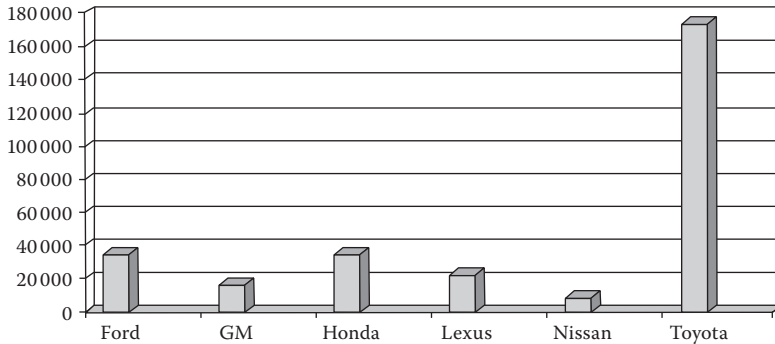


Abb. 1.19 Aufschlüsselung der HEV-Absatzzahlen (in Tausenden) im Jahr 2009 in den Vereinigten Staaten nach Modell.

com). Beim Toyota Prius wird der Vergleich anhand des Toyota Corolla vorgenommen. Man kann auch erkennen, dass der Preis von HEVs im Allgemeinen ca. 40 % über dem der Basismodelle liegt. Die Kraftstoffeinsparung von HEVs ist ebenfalls signifikant, insbesondere beim Stadtzyklus.

1.6.1

Der Toyota Prius

1997 produzierte Toyota mit dem Prius den ersten modernen Großserien-HEV, der in Abb. 1.20 dargestellt ist. Bereits 2009 hatte Toyota weltweit mehr als 1 Million Prius verkauft. Durch Verwendung eines Planetengetriebes wird ein stufenloser Antrieb bzw. ein CVT (Continuous Variable Transmission) realisiert. Daher wird bei diesem System kein konventionelles Getriebe benötigt. Wie Abb. 1.21 zeigt, ist der Verbrennungsmotor mit dem Planetenradträger verbunden, während der Generator mit dem Sonnenrad verbunden ist. Das Hohlrad ist ebenso wie der Elektromotor mit dem Achsantrieb verbunden. Das Planetengetriebe fungiert auch als Kraft- bzw. Drehmomentweiche. Im Normalbetrieb



Abb. 1.20 Der Toyota Prius (Modell 2010).

Tab. 1.1 Unvollständige Liste der in den Vereinigten Staaten erhältlichen HEVs.

Hersteller	Modell	HEV-Preis (USD)	Basis-modell-Preis (USD)	Mehr-Preis (%)	HEV mpg		MPG-Basis-Fzg.		MPG-Verbesserung (%)	
					Stadt	Überland	Stadt	Überland	Stadt	Überland
Toyota	Prius ^{a)}	22 800	15 450	47,6	51	48	26	35	96	37
	Camry	26 400	19 595	34,7	33	34	22	33	50	3
	Highlander	34 900	25 855	35,0	27	25	20	27	35	12
Ford/	Fusion	27 950	19 695	41,9	41	36	22	34	86	6
Mercury	Escape	29 860	21 020	42,1	34	31	22	28	55	11
	Mariner	30 105	23 560	27,8	34	31	21	28	62	11
	Milan	31 915	21 860	46,0	41	26	23	34	78	-24
Honda	Insight ^{a)}	19 800	15 655	26,5	40	43	26	34	54	26
	Civic	23 800	15 655	52,0	40	45	26	34	54	32
Nissan	Altima	26 780	19 900	34,6	35	33	23	32	52	3
Lexus	RX 450h	42 685	37 625	13,4	32	28	18	25	78	12
	GS 450h	57 450	54 070	6,3	22	25	17	24	29	4
	LS 600h	108 800	74 450	46,1	20	22	16	23	25	-4
GM GMC,	Tahoe	50 720	37 280	36,1	21	22	15	21	40	5
Chevrolet und Cadillac	Yukon	51 185	38 020	34,6	21	22	15	21	40	5
	Sierra	38 710	20 850	85,7	21	22	15	22	40	0
Saturn ^{c)}	Malibu	22 800	21 825	4,5	26	34	22	33	18	3
	Escalade	73 425	62 495	17,5	21	22	13	20	62	10
	Silverado	38 340	29 400	30,4	22	21	13	17	69	24
Chrysler	Aspen ^{d)}	44 700	40 000	11,8	18	19	15	20	38	6
Dodge	Durango ^{d)}	45 900	40 365	13,7	18	19	15	20	38	6

a) Vergleich mit Corolla.

b) Vergleich mit Civic.

c) Die Automarke Saturn enthält auch die Fahrzeuge Vue und Saturn Aura, die nicht angeboten werden.

d) Der Chrysler Aspen nutzt eine ähnliche Plattform wie der Durango, der aber nicht mehr angeboten wird.

wird die Drehzahl des Hohlrades durch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt, wogegen die Generator Drehzahl so gesteuert werden kann, dass der Verbrennungsmotor in dem Drehzahlfenster dreht, der den optimalen Kraftstoffverbrauch bietet.

Das Nickel-Metallhydrid-Batteriepaket mit 6,5 Ah/21 kW wird vom Generator bei Schubbetrieb sowie beim regenerativen Bremsen durch den elektrischen Antriebsmotor, der sich dazu im Generatorbetrieb befindet, geladen. Der Verbrennungsmotor bleibt beim Fahren mit geringer Geschwindigkeit abgeschaltet.

Die gleiche Technik wurde auch beim Camry Hybrid, Highlander Hybrid und bei den Hybridfahrzeugen der Marke Lexus verwendet. Allerdings setzen Highlander und die Hybridfahrzeuge der Marke Lexus einen dritten Elektromotor am

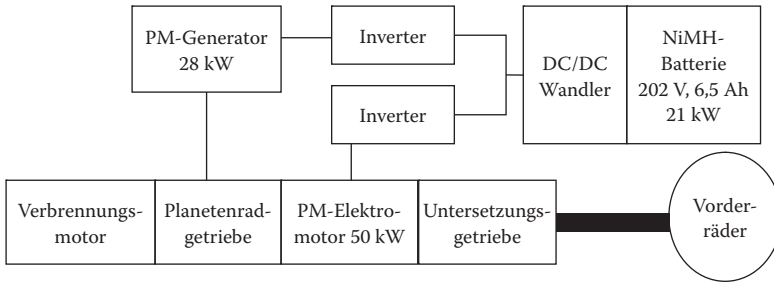


Abb. 1.21 Antriebsstranganordnung des Toyota Prius (EM – elektrische Maschine; PM – Permanentmagnet).

Hinterrad ein. Dadurch konnte die Performance beim Fahren, beispielsweise beim Beschleunigen und Bremsen, weiter gesteigert werden.

1.6.2

Der Honda Civic

Der Elektromotor des Honda Civic Hybrid ist zwischen dem Verbrennungsmotor und dem CVT (Continuously Variable Transmission) eingebaut, wie in Abb. 1.22 gezeigt. Bei hohem Leistungsbedarf unterstützt der Elektromotor den Benzinmotor. Bei geringem Leistungsbedarf zweigt er Leistung beim Verbrennungsmotor ab.

1.6.3

Der Ford Escape

Der Escape Hybrid der Ford Motor Company (Abb. 1.23) ist der erste Hybrid in der SUV-Klasse. Beim Escape Hybrid wurde auf das gleiche Planetengetriebekonzept wie beim System von Toyota zurückgegriffen.

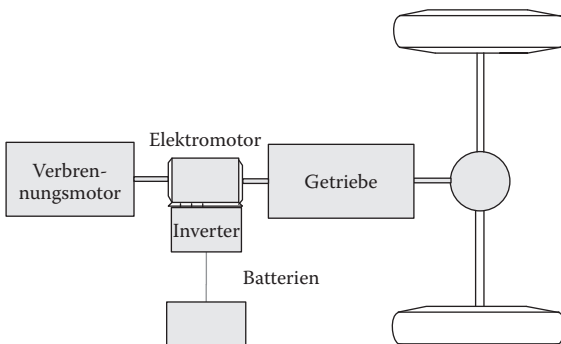


Abb. 1.22 Antriebsstranganordnung des Honda Civic Hybrid.

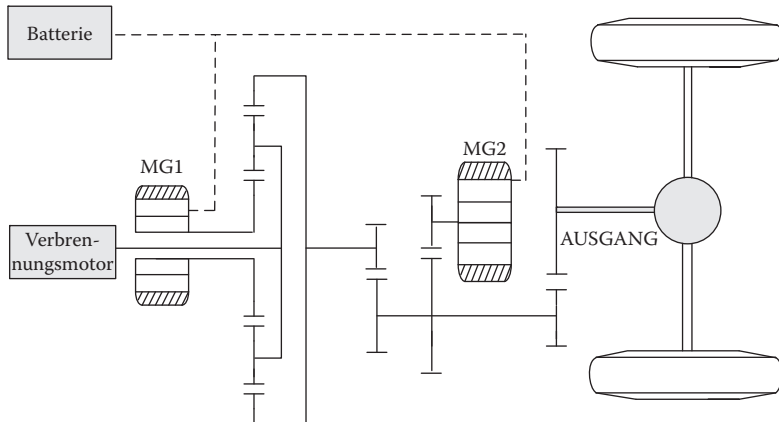


Abb. 1.23 Der Ford Escape Hybrid-SUV (MG steht für „Motor/Generator“).

1.6.4

Das Two-Mode-Hybridsystem

Die Entwicklung der „Two-Mode“-Hybridfahrzeug-Kraftübertragungen wurde 1996 von GM (Alison) begonnen. Ab 2005 wurde das System von GM, Chrysler, BMW und Mercedes-Benz im Rahmen eines Joint Venture namens Global Hybrid Cooperation weiterentwickelt. Die GM Two-Mode-Hybrids (Abb. 1.24) verwenden zwei Planetenradgetriebe und zwei elektrische Maschinen, um zwei verschiedene Betriebsarten zu realisieren, je eine für langsames und eine für schnelles Fahren. Der Betrieb des Two-Mode-Hybrids wird in Kapitel 4 detailliert beschrieben.



Abb. 1.24 Der Chrysler Aspen Two-Mode-Hybrid.

1.7

Herausforderungen und Schlüsseltechnologie bei HEVs

Mit HEVs können einige Nachteile des rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs sowie benzinbetriebener herkömmlicher Fahrzeuge wettgemacht werden. Zu den Vorteilen von HEVs zählen optimierter Kraftstoffverbrauch und reduzierte Emissionswerte, verglichen mit konventionellen Fahrzeugen. Im Vergleich zu reinen EVs haben sie auch eine größere Reichweite, geringere Ladezeiten und Batteriegrößen – und Kosten.

Dennoch gibt es bei HEVs und PHEVs noch viele Probleme zu lösen. Dazu zählen höhere Kosten, verglichen mit konventionellen Fahrzeugen; von den Hochleistungskomponenten verursachte elektromagnetische Störungen (EMS), Bedenken bzgl. der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit aufgrund der zusätzlichen Komponenten/Komplexität sowie die Kompaktbauweise, Fahrzeugsteuerung und das Leistungsmanagement:

- *Leistungselektronik und elektrische Maschinen:* Das Thema Leistungselektronik für/bei Elektromotoren ist nicht neu. Allerdings ist der automobiler Einsatz von Leistungselektronik bedeutend schwieriger als bei anderen industriellen Anwendungen. Umweltweinflüsse wie extrem hohe und extrem niedrige Temperaturen, Vibrationen, Stöße und Schaltverhalten unterscheiden sich stark von früheren Anforderungen an Elektromotoren und Leistungselektronik in der Industrie. Zu den Problemen im Zusammenhang mit der Leistungselektronik in einem HEV zählen bauliche Enge, Größe, Kosten und Wärmemanagement.
- *Elektromagnetische Störungen:* Hochfrequente Schaltvorgänge und Betrieb von Leistungselektronik/Elektromotoren mit hohen Leistungen erzeugen reichlich elektromagnetische Störungen, die den Rest des Fahrzeugsystems beeinträchtigen, wenn sie nicht einwandfrei abgefangen werden.
- *Energiespeichersysteme:* Derartige Systeme stellen die größte Herausforderung für HEVs und PHEVs dar. Herkömmliche Batterien sind üblicherweise kaum in der Lage, das pulsierende Leistungsverhalten und den geforderten Energieinhalt zu liefern, die für optimale Performance gebraucht werden. Die Lebensdauer und der unsachgemäße Umgang mit den Batterien sind ebenso entscheidend für ihren Einsatz im Fahrzeug. Derzeit werden in den meisten HEVs Nickel-Metallhydrid- und in den PHEVs Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Superkondensatoren (auch Ultrakondensatoren genannt) wurden auch in einigen Spezialanwendungsfällen in Betracht gezogen, bei denen die Leistungsanforderung ein großes Problem war. Auch Schwungmassen wurden untersucht. Die Einschränkungen bei den derzeitigen Energiespeichersystemen sind unzureichende Leistungsdichte und Energiedichte, begrenzte Nutzungsdauer, hohe Kosten und potenzielle Sicherheitsprobleme.
- *Regenerative Bremsregelung:* Die Rückgewinnung der kinetischen Energie beim Bremsen ist eines der wichtigsten Funktionsmerkmale von HEVs und PHEVs. Allerdings ist die Koordinierung der regenerativen Bremsanlage mit dem hy-

draulischen und reibungsbasierten Bremssystem insofern schwierig, als hier Sicherheit und Bremsleistung im Vordergrund stehen.

- *Leistungsregelung und Fahrzeugsteuerung:* HEVs brauchen mehrere Antriebskomponenten, die harmonisch koordiniert werden müssen. Daher ist die Leistungsregelung ein wesentlicher Aspekt für die Fahrzeugsteuerungsfunktionen in einem HEV. Ein optimiertes Fahrzeugsteuergerät hilft, eine bessere Kraftstoffeffizienz im HEV zu erzielen.
- *Wärmemanagement:* Leistungselektronik, elektrische Maschinen und Batterien brauchen deutlich niedrigere Betriebstemperaturen als ein Benzinmotor. In einem HEV wird hierfür ein separates Kühlsystem benötigt.
- *Modellierung und Simulation, Fahrdynamik, Fahrzeugkonstruktion und -optimierung:* Durch die höhere Zahl an Komponenten in einem HEV ist das Anordnen der Komponenten bei gleichem Raumangebot eine Herausforderung. In dem Zusammenhang stellen Fahrdynamik, Fahrzeugdesign (bzw. Auslegung/Dimensionierung) sowie Modellierung und Simulation weitere wichtige Probleme dar, die es zu lösen gilt.

1.8

Die „unsichtbare Hand“ und Unterstützung durch die Regierung

Ohne die Unterstützung der Regierung würden sich HEVs und PHEVs aufgrund von Kosten- und anderen Nachteilen im Markt wohl erst später durchsetzen. Bei den Verbrauchern gibt es zwei Arten von HEV-Käufern. Die einen möchten im Laufe der Zeit Geld sparen durch verringerten Kraftstoffverbrauch. Die anderen kaufen einen Hybrid, weil sie sich Sorgen um die Umwelt machen. Die Amortisationszeit, das heißt die Zeit, die vergeht, bis sich die Investition in ein HEV durch Kraftstoffeinsparungen bezahlt gemacht hat, hängt größtenteils vom Benzinpreis ab.

Nehmen wir den Toyota Prius als Beispiel. Dieses HEV kostet in den USA 22 800 US-Dollar, wogegen ein ähnliches Modell, der konventionell angetriebene Toyota Corolla nur 15 450 USD kostet. Die Kraftstoffersparnis beträgt 96 % bei Stadt- und 37 % bei Überland- bzw. Autobahnfahrt. Nehmen wir an, der Fahrzeugbesitzer fährt im Jahr durchschnittlich 16 100 km (10 000 Meilen) in der Stadt und 8050 km (5000 Meilen) über Land. Dann ergibt sich folgender jährlicher Kraftstoffverbrauch für das Basismodell und das Hybrid-Modell:

Konventionell:

$$10\,000 \text{ Meilen}/26 \text{ mpg} + 5000 \text{ Meilen}/35 \text{ mpg} = 527 \text{ Gallonen}$$

In Kilometern bzw. l/100 km:

$$(16\,093,44 \text{ km} \times 9,051/100 \text{ km}) + (8046,72 \text{ km} \times 6,721/100 \text{ km}) = 1997,121$$

HEV:

10 000 Meilen/51 mpg + 5000 Meilen/48 mpg = 300 Gallonen

In Kilometern bzw. l/100 km:

$(16\,093,44 \text{ km} \times 4,61/100 \text{ km}) + (8046,72 \text{ km} \times 4,91/100 \text{ km}) = 1134,59 \text{ l}$

Bei einem Benzinpreis von 0,5 EUR/l (2,50 USD/Gallone) ergibt sich eine Kostenersparnis von ca. 425 EUR (568 USD) jährlich. Anders ausgedrückt, Sie warten 13 Jahre, bis Sie die Mehrkosten des HEV wieder eingespart haben. Wenn der Benzinpreis 1,29 EUR/l (6,5 USD/Gallone) beträgt, brauchen Sie nur fünf Jahre, um die Differenz wettzumachen.

Nehmen wir als weiteres Beispiel den Ford Escape SUV. Dieser HEV kostet 29 860 USD, das konventionelle Modell dagegen 21 020 USD. Wir nehmen wieder das gleiche Verhältnis zwischen Stadtverkehr und Fernverkehr, somit durchschnittlich 16 100 km (10 000 Meilen) in der Stadt und 8050 km (5000 Meilen) über Land pro Jahr. Dann ergibt sich folgender jährlicher Kraftstoffverbrauch für das Basismodell und das Hybrid-Modell:

Konventionell:

10 000 Meilen/22 mpg + 5000 Meilen/28 mpg = 633 Gallonen

In Kilometern bzw. l/100km:

$(16\,093,44 \text{ km} \times 10,691/100 \text{ km}) + (8046,72 \text{ km} \times 8,41/100 \text{ km}) = 2396,31 \text{ l}$

HEV:

10 000 Meilen/34 mpg + 5000 Meilen/31 mpg = 455 Gallonen

In Kilometern bzw. l/100 km:

$(16\,093,44 \text{ km} \times 6,921/100 \text{ km}) + (8046,72 \text{ km} \times 7,591/100 \text{ km}) = 1724,41 \text{ l}$

Sie sparen insgesamt rund 674 l (178 Gallonen). Bei einem Benzinpreis von 0,5 EUR/l (2,50 USD/Gallone) ergibt sich eine Kostenersparnis von ca. 341 EUR (455 USD) jährlich. Sie bräuchten 19 Jahre, um die Mehrkosten des HEV aufzuwiegen. Wenn der Benzinpreis 1,29 EUR/l (6,5 USD/Gallone) beträgt, brauchen Sie nur 7,5 Jahre, um die Differenz wettzumachen.

Von der Regierung ermöglichte steuerliche und andere Vorteile können hier einen großen Unterschied ausmachen. Tabelle 1.2 listet die für bestimmte HEVs von der US-Regierung gebotenen Steuervorteile auf (<http://www.irs.gov/businesses/article/0,,id=223736,00.html>, letzter Zugriff 12.09.2010). Wenn wir den Ford Escape HEV als Beispiel nehmen und der Steuervorteil berücksichtigt wird, würde der Kostennachteil nach 5 bzw. 13 Jahren ausgeglichen, wenn wir die oben genannten Benzinpreise von 1,29 bzw. 0,5 EUR/l (6,5 bzw. 2,5 USD/Gallone) zur Berechnung heranziehen.

In den Vereinigten Staaten ist es in wenigen Bundesstaaten und Ballungsräumen erlaubt, dass HEVs auf HOV-Lanes (HOV, High-Occupancy-Vehicle, Anmerkung des Übersetzers: „Fahrgemeinschaftsspuren“) fahren dürfen, beispielsweise im Bundesstaat Kalifornien und in Washington DC. Durch die Tatsache,

Tab. 1.2 Steuervorteile für in den Vereinigten Staaten verkaufte HEVs (<http://www.irs.gov/businesses/article/0,,id=223736,00.html>, letzter Zugriff 12.09.2010).

Modelljahr	Hersteller	Modell	Gutschrift (USD)
2011	BMW	Active Hybrid 750i	900
		Active Hybrid Li	900
		Active Hybrid X6	1550
2011	Cadillac	Escalade Hybrid (2WD und 4WD)	2200
2011	Chevrolet	Tahoe Hybrid C1500 2WD	2200
		Tahoe Hybrid K1500 4WD	2200
		Silverado Hybrid C15 2WD	2200
		Silverado Hybrid K15 4WD	2200
2011	GMC	Sierra Hybrid C15 2WD	2200
		Sierra Hybrid K15 4WD	2200
		Yukon Hybrid C1500 2WD	2200
		Yukon Hybrid K1500 4WD	2200
		Yukon Denali Hybrid K1500 4WD	2200
2011	Mercedes-Benz	ML450 Hybrid	2200
2011	Nissan	Altima Hybrid	2350
2011	Porsche	Cayenne S Hybrid	1800

dass sie viel Zeit im Berufsverkehr durch das Nutzen der HOV-Lanes sparen können, sind einige Verbraucher motiviert, einen HEV oder PHEV zu kaufen.

Einige andere Bundesstaaten, wie Colorado und Kalifornien, bieten zusätzlich zu den Anreizen der Bundesregierung weitere Vorteile an. Einige privatwirtschaftlich geführte Unternehmen, etwa Google, Bank of America, STMicroelectronics oder Hyperion belohnen ihre Mitarbeiter, wenn Sie einen HEV kaufen oder leasen. Es erscheint mir interessant, anzumerken, dass die Motivation der Unternehmen bei einer solchen Investition der Mitarbeiter, darin bestehen könnte, mehr Zeit im Büro als im Verkehr zu verbringen.

Im Jahr 2009 gab der amerikanische Präsident bekannt, die Entwicklung von PHEVs mit 2,4 Milliarden US-Dollar zu fördern und damit 48 Projekte zu unterstützen, die von wichtigen Automobilherstellern und -zulieferern betrieben werden. Die Projekte unterstützen die Entwicklung von Batterien und Komponenten für elektrische Antriebe sowie den Einsatz von Elektrofahrzeugen. Der Präsident der Vereinigten Staaten gab das Ziel aus, bis 2015 eine Million Plug-in-Hybrids zu erreichen. Zudem gibt es derzeit zusätzliche Anreize für Entwickler und Verbraucher.

Heute leisten China, Japan, die Europäische Union und viele Länder in aller Welt Unterstützung bei der Entwicklung, Vorstellung und dem Einsatz von EVs, PHEVs sowie von Batterien und elektrischen Antriebskomponenten.

Ogleich die Hybridisierung von Fahrzeugen letztlich keine Lösung für Nachhaltigkeit im Individualverkehr/Transportwesen ist, so stellt sie den Weg für eine nachhaltige Zukunft dar. Die auf diesem Wege entwickelte Technologie sorgt für den Übergang von einem auf fossilen Brennstoffen basierenden Transportwesen zur schlussendlichen Elektrifizierung des Transportsektors.

Elektrifizierung alleine bringt noch keine Nachhaltigkeit. Entlang dieses kritischen Pfades bedarf es konzertierter Maßnahmen, also koordinierter Anstrengungen. Dazu zählen auch intelligente Stadtplanung, öffentliche Verkehrsmittel, Hochgeschwindigkeitsschienennetze sowie intelligentere Straßen und Fahrzeuge. Dazu bedarf es kollektiver Anstrengungen vieler Interessengruppen. Die Energiewirtschaft muss den Anteil an erneuerbaren Energien und umweltfreundlich erzeugter Energie erhöhen. Die Regierungen müssen schnelle Schienenverkehrssysteme für urbane Ballungsräume entwickeln.

Literatur

- 1 Tabelle 1060. State Motor Vehicle Registrations: 1990 to 2007, <http://www.census.gov/compendia/statab/2010/tables/10s1060.pdf>, (letzter Zugriff 20.08.2014).
- 2 China's Auto Sales Rebound in August after July's Monthly Decline, http://news.xinhuanet.com/english2010/business/2010-09/09/c_13487102.htm, (letzter Zugriff 12.09.2010). Siehe auch <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=aqqmjRjpc4Uk>, (letzter Zugriff 12.09.2010).
- 3 Owen, N.A., Inderwildi, O.R. und King, D.A. (2010) The status of conventional world oil reserves – Hype or cause for concern? *Energy Policy*, **38**, 4743 <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.enpol.2010.02.026>, (letzter Zugriff 12.09.2010).
- 4 US Oil Demand by End-Use Sector (1950–2004), http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/petroleum/analysis_publications/oil_market_basics/dem_image_us_cons_sector.htm, (letzter Zugriff 12.09.2010).
- 5 International Energy Outlook. United States Energy Information Administration (2007) Petroleum and Other Liquid Fuels, May, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/archive/ieo07/pdf/oil.pdf>, (letzter Zugriff 20.08.2014).
- 6 Williamson, S.S. und Emadi, A. (2005) Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **54** (3), 856–862.
- 7 Imai, S., Takeda, N. und Horii, Y. (1997) Total efficiency of a hybrid electric vehicle. *Proc. Power Convers. Conf.*, Nagasaki.
- 8 Rousseau, A. und Sharer, P. (2004) Comparing Apples to Apples: Well-to-wheel Analysis of Current ICE and Fuel Cell Vehicle Technologies. Argonne National Laboratory, <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/300.pdf>, (letzter Zugriff 20.08.2014).
- 9 Sanna, L. (2005) Driving the Solution – The Plug-in hybrid Vehicle, http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2005-Fall/1012885_PHEV.pdf, (letzter Zugriff 20.08.2014).
- 10 The Energy Report, <http://www.window.state.tx.us/specialrpt/energy/exec/fuel.html>, (letzter Zugriff 20.08.2014).
- 11 World Population, http://www.google.com/publicdata?ds=wb-wdi&met=sp_pop_totl&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+population, (letzter Zugriff 20.08.2014).

- 12 Annual Update on the Automotive Fuel Economy Program, <http://icsw.nhtsa.gov/cars/rules/CAFE/overview.htm>, (letzter Zugriff 27.01.2011).
- 13 The World Factbook, Oil Consumption by Country, <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2174rank.html>, (letzter Zugriff 27.01.2011).
- 14 Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions, <http://web.archive.org/web/20080508060713/>, http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm, (letzter Zugriff 27.01.2011).