

1. Einleitung

1.1 Primärenergie - Bestandsaufnahme und Prognosen

Ein charakteristisches Merkmal für die Leistungsfähigkeit eines Staates ist seit jeher sein Primärenergieverbrauch¹: Entwicklungsstand und -tempo sowie das Bruttoinlandsprodukt als Maß für die Wertschöpfung einer Volkswirtschaft hängen mit der Nachfrage nach (Primär-) Energie unmittelbar zusammen.

So entfallen heute fast 80 % der weltweit eingesetzten Primärenergie auf Europa, Nordamerika, Japan, Australien und den Nahen Osten; bei nur 8% Anteil an der Weltbevölkerung hält allein Westeuropa etwa 35% des weltweiten Bruttoinlandsprodukts und verbraucht etwa 18% der Primärenergie der Welt ([Q 1.01] bis [Q 1.07]).

Absolut betrachtet ist der weltweite Primärenergieverbrauch seit dem Jahr des Ölpreisschocks (1973) bis heute um über 40% gestiegen. Auch wenn in den führenden Industrienationen Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum (Bruttonominalprodukt) nicht mehr direkt korreliert sind - d.h. Wirtschaftswachstum führt nicht mehr im gleichen Maße zu einer Zunahme des Primärenergieverbrauchs - und zukünftig in diesen Staaten nur noch moderate Steigerungsraten des Primärenergieverbrauchs zu erwarten sind, so wird die Entwicklung der Staaten Südamerikas und insbesondere Asiens, gekennzeichnet durch zunehmende Industrialisierung und Bevölkerungsexplosion, zu einer auch zukünftig steigenden Nachfrage nach Energie führen. Führende Institute wie z.B. der Weltenergiearat WEC², die Internationale Energieagentur IEA oder das Institute for Applied System Analysis IIASA erwarten dementsprechend - in Abhängigkeit verschiedener Szenarien der Weltwirtschaftsentwicklung - einen Anstieg des Welt-Primärenergieverbrauchs von 1995 bis zum Jahre 2020 um mindestens 50%, eventuell sogar dessen Verdopplung. Mit einer weiteren Verdopplung des Welt-Primärenergieverbrauchs zwischen 2020 und 2050 wird gerechnet ([Q 1.01] bis [Q 1.08]).

Dem entgegen steht auf nationaler deutscher Ebene eine Stagnation: gemäß Prognosen verschiedener Forschungsinstitute (Prognos) und führender Industrieunternehmen (RWE, Shell, Esso) wird - unter Voraussetzung eines stabilen Wirtschaftswachstums, moderat steigender Rohölpreise und einer traditionellen Energiepolitik - der Primärenergiebedarf Deutschlands etwa konstant bleiben ([Q 1.08] bis [1.13])³.

Mineralöl stellt ungeachtet der wachsenden Bedeutung des Erdgases heute und zukünftig mit etwa 40% den größten Anteil am gesamten Welt-Primärenergieverbrauch, und von diesem Anteil fließen wiederum über 50% in die Versorgung des Verkehrssektors (Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffverkehr) mit Treibstoff in Form von Benzin und Diesel. Aus obigen Prognosen folgt damit zum einen unmittelbar ein enormer zukünftiger Bedarf an Erdöl - eine weltweite Verdopplung des Verbrauchs bis zum Jahre 2020 auf dann 5 Mrd t pro Jahr

¹ Der Primärenergieverbrauch ergibt sich als Summe aus inländischer Gewinnung von (nicht umgewandelten) Primärenergieträgern, aus Außenhandel und Bestandsveränderungen von Primär- und Sekundärenergieträgern sowie aus Hochseebunkerungen von Sekundärenergieträgern. Dagegen werden im Endenergieverbrauch die zur alleinigen Erzeugung von Nutzenergie dienenden Primärenergieträger ohne Verbrauch und Verluste im Energiesektor und ohne nicht-energetischen Verbrauch erfaßt.

² Der nicht-staatliche Weltenergiearat (World Energy Council WEC) mit Sitz in London ist seit 1924 tätig. Er repräsentiert mit seinen über 100 Komitees etwa 90% des Weltenergieaufkommens.

³ Begründet liegt dies in den fortwährenden Bemühungen zum Energiesparen, technischen Verbesserungen sowie insbesondere im Strukturwandel der Verbraucherguppen (Bedeutungsverlust der Schwerindustrie).

ist denkbar -, zum anderen verdeutlicht diese Tatsache auch die große Bedeutung des Straßenverkehrs und insbesondere des motorisierten Individualverkehrs⁴, der heute und zukünftig Ansprüchen von Flexibilität, Mobilität und auch Lebensqualität gerecht werden muß.

Im nachfolgenden Abschnitt soll dies mit Zahlen und Fakten belegt werden.

1.2 Der Straßenverkehr - Bestandsaufnahme und Prognosen

Die Zahl der zugelassenen PKW stieg weltweit von 330 Millionen im Jahre 1980 über 420 Millionen Stück im Jahr 1990 auf 550 Millionen im Jahr 2000⁴; für das Jahr 2020 werden weltweit 1 Milliarde zugelassene Personenkraftwagen erwartet. Bis zu diesem Zeitpunkt führt dieses Verkehrswachstum zu einer Verdopplung der Stoff-, Energie- und Schadstoffströme gegenüber einem Stand von 1995. Pro Jahr werden allein in Europa zwischen 12 und 15 Millionen PKW neu zugelassen.

Diese Tendenz gilt - wenn auch in abgeschwächtem Maße - für Deutschland. Der Endenergieverbrauch im Straßenverkehr hat sich seit den 50er-Jahren in Deutschland mehr als versechsfacht; in unserem Land wurden Ende 1999 42,84 Millionen PKW und Kombi betrieben, d.h. je 1000 Einwohner waren etwa 530 Fahrzeuge zugelassen. Insgesamt entfallen in Deutschland heute so fast 35 % der eingesetzten Primärenergie auf die Sparte „Verkehr“ ([Q 1.01], [Q 1.11] bis [Q 1.22], [Q 1.26]).

Der Trend zur steigenden Motorisierung, insbesondere derjenige zum Zweit- und Drittfahrzeug pro Haushalt, wird sich allen Prognosen zufolge weiter fortsetzen (Bild 1.1). Der steigende Motorisierungsgrad wird dabei die Anstrengungen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs, d.h. des Endenergieeinsatzes, zunächst überkompensieren und somit zu einer Steigerung des Verkehr-Anteils am Primärenergieeinsatz führen ([Q 1.15], [Q 1.18] bis [Q 1.20])

Allein 2001 erwarten die Automobilhersteller für Deutschland nach einem eher schwachen Absatzjahr 2000 wieder 3,4 bis 3,8 Millionen neu zugelassene PKW; in Europa sollen es insgesamt 14,5 Millionen sein. Bis zum Jahr 2010 wird allein der Personen-Individualverkehr um über 30% steigen. Die zuvor bereits angeführten Institute prognostizieren für diesen Zeitraum einen Anstieg des Motorisierungsgrades auf - je nach Szenario - 550 bis 650 Fahrzeuge pro 1000 Einwohner, was absolut 45 bis 48 Millionen PKW entspräche. Das Wachstum des PKW-Bestands wird dabei im wesentlichen auf die zunehmende Motorisierung der Frauen und der älteren Bevölkerung, d.h. auf gesellschaftspolitische und soziodemographische Aspekte, zurückzuführen sein. Erst nach dem Jahr 2010 ist in Deutschland mit einem stagnierenden Automobilbestand und einem aufgrund der kraftstoffverbrauchssenkenden Maßnahmen sinkenden Anteil des Verkehrs am Primärenergieverbrauch zu rechnen ([Q 1.01], [Q 1.11] bis [Q 1.22], [Q 1.25]).

Die daraus ableitbaren Konsequenzen samt möglichen Lösungsansätzen sollen in nachfolgendem Abschnitt verdeutlicht werden.

⁴ Diese Dissertation beleuchtet vor allem das Spektrum der Personenkraftwagen als Teil des motorisierten Individualverkehrs. Daher finden Lastkraftwagen, Motorräder oder sonstige Fahrzeuge im weiteren Verlauf der Arbeit keine explizite Berücksichtigung.

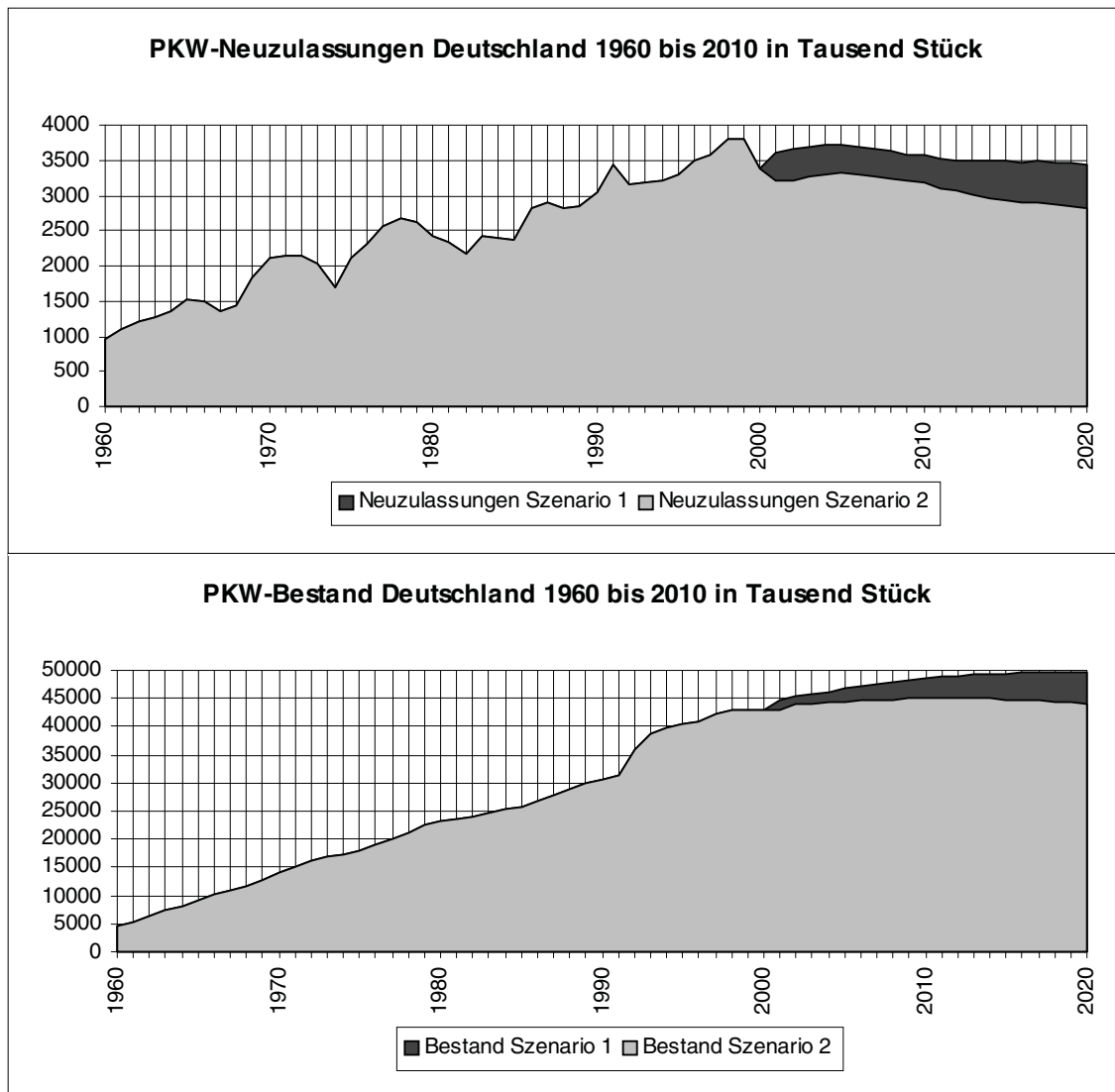


Bild 1.1: Neuzulassungen und PKW-Bestand in Deutschland: Stand und Ausblick (ab 1992 Gesamtdeutschland, ab 2001 Prognose) ([Q 1.01], [Q 1.14] bis [Q 1.16], [Q 1.21], [Q 1.22])

1.3 Die Auswirkungen des Straßenverkehrs und Lösungsansätze

Im wesentlichen sind folgende drei Aspekte in Zusammenhang mit dem steigenden Motorisierungsgrad unserer Gesellschaft zu untersuchen:

- Kohlendioxid-Ausstoß
- Schadstoff-Emissionen
- Natürliche Limitierung der konventionellen Kraftstoffe auf Erdöl- und Erdgasbasis

Diese drei Gesichtspunkte sollen nachfolgend näher analysiert werden.

1.3.1 Kohlendioxid-Ausstoß

Im Gegensatz zu Schadstoff-Emissionen (vgl. Abschnitt 1.3.2) sind Kohlendioxid-Emissionen (CO₂) direkt mit dem Kraftstoffverbrauch konventioneller Verbrennungsmotoren verknüpft und können daher nur durch dessen Reduktion positiv beeinflusst werden. Etwa 10-15% der gesamten CO₂-Emissionen Deutschlands werden gegenwärtig von Personenkraftwagen verursacht - deutlich weniger als zum Beispiel von Kraftwerken (ca. 40%) und Industrie (ca. 20%) ([Q 1.11], [Q 1.26]). Dennoch gilt auch für den Automobilsektor das Ziel der

Bundesregierung, die CO₂-Emissionen Deutschlands bis zum Jahre 2005 um 25% gegenüber 1990 zu reduzieren ([Q 1.13] bis [Q 1.15]). Nach den Ergebnissen der Umweltgipfel von Kyoto (Japan, 1997) bis Bonn (2001) ist Deutschland im Zuge der Umsetzung der Gipfel-Beschlüsse innerhalb der Europäischen Union gefordert, seine Kohlendioxid-Emissionen bis zum Jahr 2010 um 21 % (bezogen auf 1990) zu reduzieren.

Nationale Forschungsinstitutionen sind sich in ihrer Bewertung dieses Vorhabens uneins: während z.B. eine Prognos-Studie eine Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes im Straßenverkehr Deutschlands bis zum Jahr 2010 für unwahrscheinlich hält und dafür den mittelfristig stark ansteigenden Güterverkehr sowie die Überkompensation des Kraftstoffeinsparpotentials durch Neuzulassungen verantwortlich sieht, gehen Untersuchungen der Mineralölkonzerne Shell und Esso von einer CO₂-Minderung von - je nach Szenario - 15 bis 40% im PKW-Bereich bis zum Jahr 2020 aus. Begründet wird diese Prognose mit Fortschritten auf dem Gebiet der Kraftstoffverbrauchsreduktion konventioneller Fahrzeugantriebe und mit dem verstärkten Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge ([Q 1.08], [Q 1.12], [Q 1.15]).

1.3.2 Schadstoff-Emissionen

Der Straßenverkehr, insbesondere der durch PKW verursachte Verkehr, ist bereits gegenwärtig für etwa 50 % der Stickoxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen sowie für etwa 30 % der Kohlenwasserstoff-Emissionen verantwortlich. Dagegen ist sein Anteil an den Schwefeldioxid- und Staub- bzw. Rußemissionen mit 5% relativ gering.

Verbesserungen auf dem Gebiet der Abgastechnik konventionell angetriebener Fahrzeuge (vgl. auch Kapitel 2) und die zunehmende Verbreitung alternativer Antriebssysteme werden trotz des zukünftig steigenden Motorisierungsgrades zu einer deutlichen Reduzierung der obigen Schadstoff-Emissionen führen ([Q 1.09] bis [Q 1.15], [Q 1.23]).

1.3.3 Natürliche Limitierung der konventionellen Kraftstoffe auf Erdöl- und Erdgasbasis

Ein dritter, bei der Prognose der Zukunfts-Chancen des Straßenverkehrs nicht zu vernachlässigender Gesichtspunkt ist die Beschränktheit der natürlichen Ressourcen. Zur Zeit wird bei Erdöl eine statische Reichweite⁵ von ca. 45 Jahren, bei Erdgas von ca. 65 Jahren angesetzt ([Q 1.02] bis [Q 1.04]). Bei dem nach Abschnitt 1.2 zu erwartenden steigenden Bedarf müssen absolut immer größere Erdöl und Erdgas-Vorkommen entdeckt werden, um diese statische Reichweite zu gewährleisten.

Die zukünftig explorierbaren Ressourcen sind zudem global sehr ungleichmäßig verteilt und damit aus politischen Gründen mit einer gewissen Versorgungs-Unsicherheit behaftet: Momentan wird die Öl- und Gasversorgung Europas zu über 70 % aus europäischen Nordsee-Vorkommen gedeckt. Ab dem Jahre 2020 wird die Öl- und Gasversorgung Europas aber stark von den Staaten des mittleren Ostens und der früheren Sowjetunion abhängig sein.

1.3.4 Lösungsansätze

All die zuvor aufgeführten Aspekte verdeutlichen die Dringlichkeit für Innovationen auf dem Gebiet der Verkehrs- und Kraftfahrzeugtechnik und münden zusammengefaßt in folgenden Forderungen bzw. Maximen:

⁵ Die statische Reichweite bezeichnet die Reichweite bei gleichbleibendem Verbrauch und gleichbleibenden gewinnbaren Vorräten.

- Reduktion des Kraftstoffverbrauches von PKW
- Reduktion des Schadstoffausstoßes von PKW

Zu diesem Zweck sind sowohl der Gesetzgeber mittels strengerer Vorgaben (z.B. durch Abgasnormen, Steuergesetze, Festsetzung von Flottenverbräuchen u.ä., vgl. Kapitel 2), die Automobilindustrie selbst durch technische Innovationen als auch der Kunde - der PKW-Fahrer bzw. -Nutzer - mittels angepaßter Fahrweise und konkreter Verkehrsvermeidung gefordert. Da ein Wertewandel bezüglich des PKW-Einsatzes durch den Kunden weder wahrscheinlich noch abschätzbar ist ([Q 1.19], [Q 1.24]), beschränken sich die praktikablen und wissenschaftlich bewertbaren Lösungsansätze auf folgende Mittel:

- Infrastrukturelle Maßnahmen zur Verbesserung von Verkehrsablauf, -management und -organisation z.B. durch den Einsatz von Telematik,
- Verlagerung des Verkehrs auf andere Verkehrsmittel (z.B. Bahn und Öffentlicher Personennahverkehr ÖPNV) durch verbessertes Zusammenspiel von Individualverkehr und ÖPNV (u.a. [Q 1.25]),
- Verbesserung der konventionellen Fahrzeugtechnik durch Innovation oder alternative Kraftfahrzeugtechnologie wie Elektro-, Hybrid- oder Brennstoffzellenfahrzeuge.

Allein letzterer Punkt wird im Rahmen dieser Arbeit näher analysiert (vgl. Kapitel 2): das (serielle) Hybridfahrzeug und sein Energiemanagement sollen Gegenstand dieser Arbeit sein.

1.4 Abgrenzung und Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden eine Offline- und eine Online-Optimierung des Energiemanagements eines seriellen Hybridfahrzeuges vorgenommen: eine Offline-Optimierung der Leistungsverteilung zwischen Motor-Generator-Einheit und Speichersystem ist bei a priori bekanntem Fahrzyklus möglich, während bei realem Fahrzeugeinsatz und unbekannter Fahrstrecke andere Kriterien zum Entwurf eines Energiemanagements herangezogen werden müssen.

Dazu werden zunächst das vorhandene Fahrzeugspektrum klassifiziert, Vor- und Nachteile verschiedener Antriebskonzepte einander gegenübergestellt und für Hybridstrukturen geeignete Komponenten ausgewählt (Kapitel 2). Die Optimierung dieser Komponenten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern es werden der gegenwärtige Stand der Technik beleuchtet und Abschätzungen für zukünftige Potentiale zur Emissionsreduzierung gegeben.

Anschließend erfolgt in Kapitel 3 die Beschreibung des modellbasierten Entwicklungsprozesses für ein serielles Hybridfahrzeug: ausgehend von der Darstellung der verwendeten Hard- und Softwaretools (Prüfstand und Simulation) und der Abfolge des Entwicklungsprozesses wird eine ausführliche energetische Betrachtung der Fahrzeuglängsdynamik in verschiedenen europäischen und US-amerikanischen Normzyklen vorgenommen. Die (mechanischen) Fahrleistungsanforderungen bilden die Grundlage für die Dimensionierung des Elektrotraktionsmotors, die sich aus dieser Wahl ergebenden elektrischen Leistungen im Gleichspannungszwischenkreis bedingen eine erste Einschätzung zur Wahl der Motor-Generator-Einheit (Motor Generator Unit MGU) und eines geeigneten Speichersystems. Zusätzlich erfolgt eine Abschätzung der elektrischen Nebenverbraucher des Fahrzeuges (Bordnetzmodell).

Kapitel 4 hat die Offline-Optimierung der Leistungsverteilung zwischen MGU und Speichersystem des Serienhybrids zum Inhalt. Dazu ist eine Einführung in die Theorie der Optimierung samt Beschreibung des Optimalsteuerungsproblems der Leistungsverteilung des seriellen Hybridantriebs notwendig. Eine erste einfache Betriebsstrategie zum Ladungsausgleich des Speichersystems (Batterie-Ladung durch Rekuperation) ermöglicht die

Dimensionierung des Speichers hinsichtlich Leistung und Energieinhalt. Erfolgversprechende Betriebsmöglichkeiten der MGU werden diskutiert; eine Abschätzung des Potentials der Batterieladung durch die MGU wird angegeben. Zur Lösung des Optimalsteuerungsproblems der Leistungsverteilung des seriellen Hybridantriebs wird ein numerisches Lösungsverfahren (DIRCOL) angewendet, da eine analytische Lösung nur unter hohem Aufwand möglich ist. Die Ergebnisse dieses numerischen Optimierungstools werden analysiert und in eine Beschreibung der Betriebsart der MGU umgesetzt.

In Kapitel 5 wird - ausgehend von den in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse bei der Offline-Optimierung - eine Online-Regelung des Fahrzeuges entworfen. Dazu wird eine Struktur verteilter Steuergeräte (distributed systems) vorgestellt und erläutert. Die wesentlichen Fahrzeugkomponenten Elektrotraktionsmotor, Generator, Speichersystem und Verbrennungsmotor werden in ihrer Dynamik samt Zustandsautomaten und nichtlinearen Einflußparametern (Temperaturen usw.) in SIMULINK modelliert und anhand von Prüfstandsversuchen validiert. Die zentrale Steuereinheit des Fahrzeuges (Vehicle Management Unit VMU) sowie diejenige der MGU werden mittels Fuzzy-Reglern implementiert; ihre Robustheit gegenüber Störungen wird nachgewiesen, Abweichungen von der Offline-Optimalstrategie werden erläutert.

Am Ende dieser Arbeit steht eine Zusammenfassung samt Ausblick.

Im Vergleich zu thematisch ähnlichen Arbeiten (vgl. [Q 3.07], [Q 4.03], [Q 4.13] [Q 4.19], [Q 4.21]) behandelt diese Dissertation den gesamten modellgestützten Entwicklungsprozeß für einen Kleinspeicher-Serienhybrid, ausgehend von der Auslegung und Dimensionierung der eingesetzten Komponenten über die numerische Offline-Optimierung der Betriebsstrategie, den Entwurf eines Online-Energiemanagements auf Fuzzy-Logic-Basis bis hin zu Prüfstandstests (vgl. auch [Q 3.01]). Obwohl in dieser Arbeit auf eine Motor-Generator-Einheit Bezug genommen wird, können die in Kapitel 4 und 5 gewonnenen Ergebnisse auch auf ein serielles Hybridfahrzeug mit Brennstoffzelle übertragen und adaptiert werden.