

1 Einleitung / Motivation

Individuelle Mobilität, wie der Zugriff auf einen privaten Pkw, aber auch der Güterverkehr per Lkw vom Hersteller direkt zum Kunden stellen ein Charakteristikum unseres Lebens dar. Auch wenn vor allem die Dampfmaschine im Zusammenhang mit der industriellen Revolution des beginnenden 19. Jahrhunderts genannt wird, so ist es doch die durch Autos und Lkws gegebene Mobilität, die innerhalb von Flächenstaaten ein hohes Maß an Chancengleichheit für Menschen an verschiedensten Lebensstandorten gewährleistet. Tägliche Pendlerströme belegen eindrucksvoll die Trennung von Wohnort und Arbeitsplatz, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts so nicht möglich gewesen wäre. Ebenso ist für die Wahl eines Fabrikationsstandorts die Verkehrsanbindung über Autobahnen wichtiger als die Nähe zu den Abnehmern. Individuelle Mobilität ist daher nicht lediglich ein Komfortmerkmal, sondern Basis für die gegenwärtige Form des Zusammenlebens in der industrialisierten Welt.

Illustriert wird das auch durch eine von A. Heider zitierte Studie der Shell AG zum Mobilitätsgrad verschiedener Industrie- und Schwellenländer [115]. Offensichtlich besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wirtschaftskraft eines Landes und der Anzahl an Pkw je 1000 Einwohner. Die Anzahl der Fahrzeuge steigt dabei sogar überproportional zur Wirtschaftskraft.

Unterstützt wird diese Tendenz durch eine – weit über den objektiven Wert als Gebrauchsgegenstand hinausgehende – emotionale Bindung an Autos weltweit. So basteln Kinder in Afrika aus Holz- oder Blechteilen Flugzeuge, Busse, Lastwagen oder Autos; aber auch in Industrieländern wird der Pkw als Möglichkeit beworben und verstanden, die eigene Persönlichkeit zu betonen oder erst zu gestalten. Neben der gesellschaftlichen Notwendigkeit erfüllt automobiler Mobilität daher auch zu einem Gutteil Wünsche nach Selbstverwirklichung und ist wesentlicher Bestandteil der Freizeitgestaltung.

Diese Mobilität baut gegenwärtig auf zwei Stützen auf: den Verbrennungsmotoren und den Treibstoffen aus Rohölprodukten. Ausschlaggebend dafür sind nicht in erster Linie die Eigenschaften des Verbrennungsmotors, der sowohl als Otto- als auch als Dieselmotor zwar beachtliche Leistungsdaten vorweisen kann, dessen sonstiges Betriebsverhalten für den Einsatz in Straßenfahrzeugen aber nicht sehr geeignet ist, da der Betrieb von Verbrennungsmotoren komplizierte Triebstränge erfordert und eine Vielzahl von Emissionen verursacht.

Der Hauptgrund für die Verwendung von Verbrennungsmotoren liegt vielmehr in den Treibstoffen, Benzin oder Dieselmotorkraftstoff, die eine sehr hohe Energiedichte aufweisen und bei Umgebungstemperatur drucklos flüssig mitgeführt werden können. Obwohl nicht ungefährlich, wird der Umgang mit Benzin und Diesel als Kraftstoff im automobilen Umfeld sehr sicher beherrscht.

Diese Mobilität gerät allerdings sowohl vonseiten der Ressourcen, also der Treibstoffversorgung, als auch vonseiten der Schadstoff- und den Treibhausemissionen unter Druck.

Die endliche Reichweite wesentlicher Rohstoffe, darunter auch Rohöl, ist schon seit der Anfang der 70er Jahre im Auftrag des „Club of Rome“ durchgeführten Studie zu den Grenzen des Wachstums in der Diskussion. Die Autoren kamen schon damals zu dem Schluß, daß ein auf der Ausbeutung von endlichen Rohstoffen oder durch dauerhaft ungleiche Verteilung von Entwicklungschancen aufbauender Wohlstand auf Dauer nicht zu halten sein werde und die exponentiellen Wachstumsgesetze zu sehr kritischen Situationen für das weltweite Zusammenleben

führen können[1]¹. Ein zukunftsicheres Wirtschafts- und Gesellschaftsmodell dürfte demnach endliche Ressourcen immer nur in dem Maß in Anspruch nehmen, in dem auch für Ersatz gesorgt werden kann. Zu diesen nachhaltig zu bewirtschaftenden Vorräten gehört demnach auch die lebensnotwendige Umwelt als Schadstoffsene.

In den 80er Jahren setzte dann auch in Europa eine, in Kalifornien schon in der 70ern begonnene, strengere Abgasgesetzgebung für den Schadstoffausstoß von Industrieprozessen, Kraftwerken aber auch von Straßenfahrzeugen ein, die letztlich zur flächendeckenden Einführung des geregelten 3-Wege-Abgaskatalysators für Ottomotoren geführt hat. In Deutschland wurde die Diskussion vor allem durch das Phänomen des Waldsterbens angestoßen.

Anfang der 90er Jahre geriet dann auch der Kraftstoffverbrauch von Pkws über den damit verbundenen Ausstoß des als klimaschädlich identifizierten Kohlendioxids in den Blickpunkt.

Die Herausforderung für die Entwicklung von Kraftfahrzeugen besteht seitdem darin, den Kunden Fahrzeuge anzubieten, mit denen sie sich emotional identifizieren können, die aber gleichzeitig bei reduziertem Kraftstoffverbrauch die Abgasgesetzgebung einhalten.

1.1 Hybride Lösungen

Gelöst wird der Zielkonflikt durch den zunehmenden Einsatz von Elektronik im Fahrzeug, beginnend mit der elektronisch geregelten Kraftstoffeinspritzung über Motor- und Getriebemanagementsysteme und Fahrerassistenzsystemen bis hin zum weiten Bereich der Komfortausstattung im Karosseriebereich.

Nach anfänglich analogen Ansätzen werden die elektronischen Steuerungen inzwischen hauptsächlich als eingebettete Steuergeräte um einen oder mehrere μ Controller aufgebaut. In vielen früher mechanisch ausgeführten Systemen der Autos befindet sich daher inzwischen „Software-in-the-Loop“, d.h. die Systeme werden von Software gesteuert. Wurden dabei zunächst von den Steuergeräten nur Sollwerte für mechanische System vorgegeben, geht die Entwicklung, ähnlich wie im industriellen Bereich, inzwischen dahin, auch grundlegende mechanische Systemeinheiten vollelektronisch auszuführen. Beispiele sind die schon jetzt serienmäßigen elektronischen Pedalwertgeber für das Gaspedal, aber auch kommende entsprechende Systeme für Lenkung und Bremse oder sogar der Verzicht auf einen mechanischen Ventiltrieb beim Motor.

Neben den evolutionären Verbesserungen am bestehenden Antrieb existieren aber auch Vorschläge, die, sich zum Teil widersprechenden, Anforderungen an Fahrzeuge durch neue Antriebskonzepte zu erreichen. Stichworte sind hier z.B. Brennstoffzellen als Primärwandler im Fahrzeug oder hybridisierte Antriebe.

Neben den reinen Elektrofahrzeugen werden hybride Antriebe, d.h. Kombinationen aus Elektroantrieb und Verbrennungsmaschine oder Brennstoffzellen schon lange bei allen Pkw-Herstellern untersucht.

¹Die Autoren haben das Modell 20 Jahre danach nochmals verfeinert und mit aktuelleren Daten versehen. Die Ergebnisse sind dadurch nicht wesentlich verändert außer, daß der in einem stabilen Zustand weltweit erreichbare Wohlstand, aufgrund der entgegen den Empfehlungen nach der 1. Studie fortschreitenden Ausbeutung der weltweiten Ressourcen, inzwischen geringer war als während der ersten Betrachtung [2].

Während Elektrofahrzeuge dauerhaft hauptsächlich unter der gegenüber Kohlenwasserstoffen geringeren Energiedichte von Batterien leiden, bieten sich über die inzwischen zur Verfügung stehenden Komponenten attraktive technische Möglichkeiten für Hybridantriebe. Über eine optimierte Kombination von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor wird dabei versucht, sowohl die hohe Energiedichte der Kohlenwasserstoffe als auch die guten Traktionseigenschaften von Elektromaschinen zu nutzen. Die entstehenden Freiheitsgrade erlauben minimierte Emissionen bis hin zur lokalen Emissionsfreiheit, bei gleichzeitig reduziertem Verbrauch.

Allerdings ist aufgrund der vielfältigen Auslegungs- und Betriebsmöglichkeiten ein sehr sorgfältiger Systementwurf das entscheidende Kriterium für die Akzeptanz beim Kunden. Während z.B. der Audi Duo, ein in mehreren Versionen vermarkteter Parallelhybrid, kaum auf Resonanz gestoßen ist, weist Toyota darauf hin, daß der Prius in der kurzen Zeit am Markt weltweit öfter verkauft wurde als alle alternativ angetriebenen Pkw vorher zusammen.

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Die vorgelegte Arbeit beschreibt den seriellen Hybridantrieb für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, der im Rahmen eines 1997 in der Abteilung Energiewandlung und -speicherung  der Universität Ulm begonnenen Projekts sowohl als Laborprüfstand als auch als dynamische Antriebssimulation entstanden ist.

Die Herausforderung an die Fahrzeugentwicklung aufnehmend wurde dazu als Referenzsystem kein Fahrzeugtyp mit z.B. großvolumigem, nicht aufgeladenem Ottomotor gewählt, der durch eine Hybridisierung sicher besonders bemerkenswerte Verbrauchsvorteile geboten hätte, sondern ein im europäischen Markt eingeführtes Fahrzeug der Kompaktklasse mit direkteinspritzendem Dieselmotor. Technisch, also z.B. hinsichtlich des erzielbaren Kraftstoffverbrauchs, müssen sich alle Alternativen an dieser Antriebsvariante messen lassen. Solange sich die Aufwände für Kraftstoff sparende Antriebe² für die Käufer nur über niedrigere Betriebskosten amortisieren, muß jede Antriebsalternative aber auch wettbewerbsfähig sein um den Status der Liebhaberei verlassen zu können.

Ziel der Untersuchungen war daher ein Antrieb für einen PKW der den höheren technischen und damit auch wirtschaftlichen Aufwand durch entsprechend niedrigere Verbräuche rechtfertigt und außerdem das Potential bietet gültige und absehbare Abgasgrenzwerte einzuhalten.

Ein zentraler methodischer Ansatz dieser Arbeit liegt auf der Verknüpfung der Simulation des verteilten, mechatronischen Antriebssystems auf der einen Seite und des Prüfstands über einen modellbasierten Entwicklungsprozeß. Antrieb und Simulation sind dazu strukturgleich aufgebaut. Die Steuergeräte des Prüfstands werden aus der Simulation heraus appliziert und die Messungen am Prüfstand skalieren die Modelle.

Die Ergebnisse der Untersuchungen fließen dann in ein kostenbasiertes Energiemanagement ein. Über die Abstimmung des Betriebs durch diese Managementebene werden letztlich die an die Hybridisierung gestellten Ziele erreicht: Verbrauchseinsparung und Emissionsreduktion bei wechselnden Umgebungsbedingungen und Fahranforderungen.

²Zusatzaufwände gegenüber konventionellen Antrieben entstehen einerseits durch zusätzliche Komponenten, andererseits durch die bislang geringen Stückzahlen auf die die Entwicklungskosten für Antrieb, Komponenten und angepaßtes Fahrzeug umgelegt werden müssen.

Kapitel 2 bindet die Betrachtung des hybridisierten PKW Antriebsstrangs in die inhaltliche Schwerpunktsetzung der Abteilung *EMAS* in den Jahren 1997 bis 2001 ein. Die erkennbaren Grenzen der Mobilität durch endliche Ressourcen einerseits und nicht mehr tolerierbare Emissionen andererseits werden aufgezeigt. Dazu werden die Beiträge der verschiedenen Energieträger zur Energieversorgung Deutschlands insgesamt und ihr Einsatz in verschiedenen Verbrauchssektoren dargestellt. Sowohl hinsichtlich des Energieverbrauchs als auch bezüglich seines Anteils an den energienutzungsbedingten Emissionen wird der Verkehr in das gesamtwirtschaftliche Umfeld eingeordnet. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der klimawirksamen Emissionen verschiedener, für den mobilen Einsatz diskutierter Energieträger. Gerade im Umfeld der, noch bis 2001 als unmittelbar bevorstehenden angekündigten, Serienreife von Brennstoffzellen auch für mobile Anwendungen, war und wird Wasserstoff als der Energieträger zukünftiger Energiesysteme diskutiert. Auf diesem Hintergrund wird auch die gegenwärtige Bereitstellung von Wasserstoff und die damit verbundenen Emissionen mit eingebunden.

In **Kapitel 3** werden aktuelle Tendenzen der Antriebsentwicklung aufgenommen und die auf den Energieverbrauch wirkenden Einflußgrößen benannt. Beginnend mit einem Überblick über den Verbrennungsprozess und den daran ansetzenden Motorvarianten werden unterschiedliche Ansätze optimierter Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Ansatzpunkte sowie ihrer Möglichkeiten und Grenzen dargestellt. In diesem Umfeld werden auch die hybriden Antriebe eingeordnet. Berücksichtigt wird dabei sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen bzw. die Möglichkeiten der Abgasreinigung.

Betrachtet werden dabei auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, unter denen optimierte Antriebe beim Kunden akzeptiert werden können.

Voraussetzung für einen funktionsfähigen und attraktiven Antrieb ist eine geeignete Auslegung aller beteiligten Komponenten. Dies umso mehr, als die Anforderungen auch an die aus dem konventionellen Triebstrang bekannten Komponenten wie z.B. den Verbrennungsmotor im Hybridantrieb deutlich abweichen. Insbesondere kritisch sind hier bisher nur in Nischenfahrzeugen eingesetzte Komponenten wie die Traktionsbatterie für die sich in der Literatur, ebenso wie für die Dimensionierung der Maschinen unterschiedlichste, zum Teil willkürliche Kriterien finden.

Für den gewählten Pkw Antrieb und seinen Einsatz im europäischen Straßenverkehr werden daher in **Kapitel 4** die in der Abteilung *EMAS* verwendeten Kriterien und resultierenden Dimensionierungen begründet und dargestellt. Die sich daraus ergebende Komponentenauswahl für den im Kapitel 6 dargestellten Antriebsprüfstand wird benannt.

Ein großer Teil der Untersuchungen zum Energieverbrauch erfolgte anhand der dafür entwickelten parametrierbaren Simulation der Längsdynamik eines Pkw Antriebsstrangs. In **Kapitel 5** wird die Simulation als Werkzeug für den modellbasierten Entwicklungsprozeß dargestellt. Simuliert wurde das mechatronische System Triebstrang aus Maschinen, Speicher, Aktuatoren, Sensoren und Steuerung. Die Simulation ist eng verknüpft mit dem parallel entstandenen Prüfstand. Einerseits werden anhand von Testläufen am Prüfstand die Modelle der Simulation kalibriert, andererseits wird die Steuerung des Prüfstands modellbasiert aus der Simulation über eine modellbasierte Implementierung abgeleitet.

Der Prüfstand, seine Struktur und die Anbindung an die Simulation aus Kapitel 5 werden dann in **Kapitel 6** beschrieben. Wesentlich ist hier die modulare Struktur unter konsequentem Einsatz

aktueller Automatisierungstechnologie. Daneben stützt sich der Aufbau auf die Möglichkeit, die für sicherheitskritische Aufgaben parallel zu den PCs eingesetzten Steuergeräte über eine angepaßte, automatische Codeerzeugung direkt aus der Simulation, ohne manuelle Programmierung oder Fehlersuche im Code zu implementieren.

Die drei Einzelprüfstände für die Motor-Generator-Einheit MGU, den Speicherbereich und den elektrischen Traktionsantrieb werden vorgestellt, ebenso wie die für die Simulation und das Energiemanagement wesentlichen Meßergebnisse.

Auf diese Ergebnisse baut in **Kapitel 7** das Energiemanagement für den Antrieb auf. Zunächst werden bekannte Managementansätze analysiert. Bewertet werden dabei nur Verfahren, die sich für den tatsächlichen Fahrzeugeinsatz eignen. Entsprechend dem Ziel des Managements, dem kostengünstigen Betrieb, wird ein Management entwickelt, das die Leistungsaufteilung über einen die Kosten minimierenden Energiehandel vornimmt. Die dazu benötigten Kostenfunktionen für MGU und Batterien werden hergeleitet. Aus der Auswertung der Angebote der beteiligten Quellen wird dann jeweils dynamisch die günstigste Aufteilung ermittelt.

Ergänzt wird der Algorithmus um ein Thermomanagement für die MGU und ein Lademanagement für den Speicher. Das dynamische Verhalten des kostenbasierten Ansatzes, aber auch die gemessenen und simulierten Ergebnisse für Verbrauch, Energieumsätze und Emissionen werden dargestellt und verglichen.

Kapitel 8 faßt die Ergebnisse der Arbeit zusammen und bewertet sie vor dem Hintergrund der Anforderungen an die individuelle Mobilität aus Kapitel 2.

Details zur Simulation und zum Prüfstand finden sich im **Anhang** der Arbeit.

1.3 Methodik

Innerhalb des Textes werden Referenzen auf Abbildungen und Tabellen bei ihrer Hauptreferenzstelle **fett** gedruckt. *Hauptsächlich im Kapitel 3 werden die wesentlichen Aspekte jedes Optimierungsansatzes am Schluß nochmals in hervorgehobener Schrift zusammengefaßt.*³

³Die Auseinandersetzung mit der Literatur wurde zum Teil in Fußnoten verlagert, wo sie für den unmittelbaren Gedankengang nicht zwingend notwendig im Haupttext erfolgen mußte.