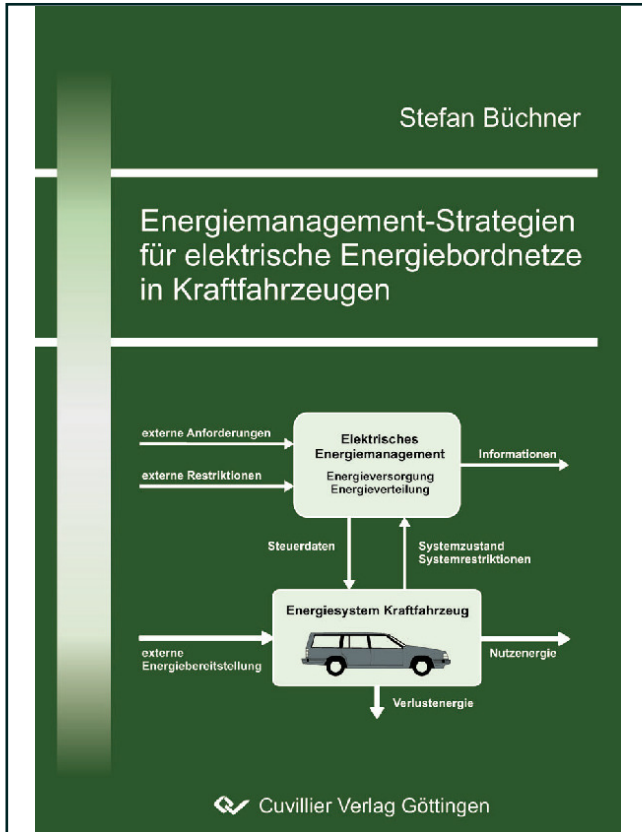




Stefan Büchner (Autor)

Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1268>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einführung

Der massive Zuwachs des individuellen Mobilitätsbedarfs von Personen und Gütern und der Siegeszug der Elektronik in technischen Systemen führten in den letzten Jahrzehnten zu einer fortdauernden Weiterentwicklung des Kraftfahrzeugs. Die Entwicklung innovativer Funktionen wird dabei vor allem durch die gesetzlichen Richtlinien für Sicherheit, Emissionen und Kraftstoffverbrauch vorangetrieben. Andererseits wird den zusätzlichen Kundenwünschen nach gesteigertem Komfort und hoher Fahrdynamik nachgegangen.

Ein wesentlicher Aspekt der Funktionsentwicklung stellt die Frage nach einer optimalen Form der Energiebereitstellung zur Erfüllung der gewünschten Funktionen dar. Da die Energieerzeugung im Kraftfahrzeug gegenwärtig fast ausschließlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger erfolgt, wird Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. Mit den aktuellen Veröffentlichungen der Klimaforschung [Ipcc07] ist die Diskussion um eine Reduzierung der CO₂-Emissionen wieder stärker in den Vordergrund gerückt. Vor dem zusätzlichen Hintergrund der endlichen Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe werden daher in Politik und Gesellschaft vermehrt neue umwelt- und ressourcenschonende Technologien unter anderem im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik gefordert. Die gesetzliche Zielvorgabe zur weiteren Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von zugelassenen Neuwagen in der EU bis zum Jahr 2012 durch die Europäische Kommission löste eine kontrovers geführte Debatte um die Möglichkeiten und Grenzen der fahrzeugtechnischen Maßnahmen aus [Acea07], [Got07], [Bund07]. Auf eine detaillierte Darlegung der Argumentation wird an dieser Stelle verzichtet. Es ist jedoch offensichtlich, dass eine umweltgerechte Mobilität nur durch weitere zusätzliche Elemente erreicht werden kann, welche in Bild 1.1 zusammengefasst sind.

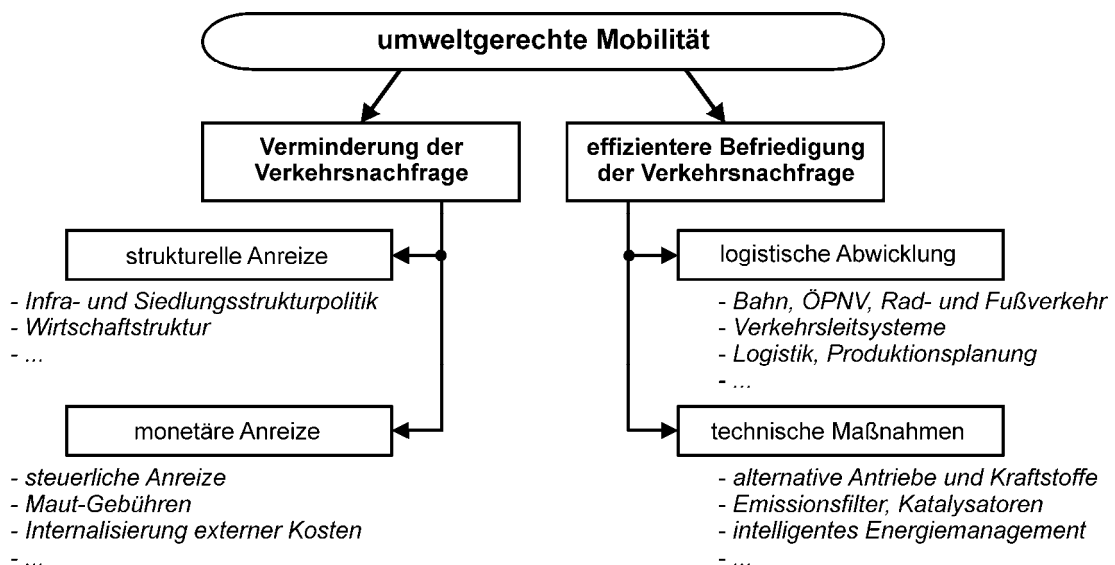


Bild 1.1: Elemente umweltgerechter Mobilität nach [Bmu07]

Es ist festzustellen, dass die Sensibilisierung der Kunden für energieeffizientere Fahrzeuge stärker in den Vordergrund rückt. Dies zeigt sich beispielsweise in der speziellen Kennzeichnung von Fahrzeugen oder durch Bewertung ihrer Umweltfreundlichkeit in den Medien bzw. in Vergleichslisten unabhängiger Institutionen [Dat07].

Im Hinblick auf technische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen wird neben den so genannten Biokraftstoffen der elektrischen Energie eine wesentliche Schlüsselrolle zugerechnet [Ble05]. Grund dafür ist neben ihrer Nutzungsvielfalt und sehr guten Steuerbarkeit die Möglichkeit, sie mit umweltfreundlichen sowie zukunftsweisenden Technologien bereitzustellen [Cra04]. Die Funktionsentwicklung im Kfz konzentriert sich aktuell auf hybride Antriebskonzepte mit elektrischen Maschinen sowie die Nutzung elektrischer Energie zum Betrieb von Neben- bzw. Zusatzaggregaten. Ziel ist dabei häufig die Entkopplung von Funktionen vom Betrieb des Verbrennungsmotors.

Voraussetzung für den Einsatz elektrischer Energie im Kraftfahrzeug ist eine zuverlässige und effiziente Bereitstellung durch das Kfz-Energiebordnetz. Dies stellt bei vielen neuartigen Funktionen mit hoher Stelldynamik eine Herausforderung dar, da diese häufig neben einem zusätzlichen Energiebedarf kurzfristig enorme Spitzenleistungen benötigen. Dafür sind geeignete Strategien zu entwickeln, welche mit einem elektrischen Energiemanagement (EEM) zur Koordination der Leistungsflüsse im Energiesystem realisiert werden [Chr04], [Büc05a].

Bei der Entwicklung von Energiemanagement-Strategien sind eine Vielzahl von Randbedingungen vorgegeben (Bild 1.2), welche einen Zielkonflikt darstellen. Einige Einflussfaktoren sind im Voraus bekannt und können im Designentwurf und während der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt werden. Andere Faktoren werden jedoch erst im Fahrbetrieb wirksam und sind dadurch im Funktionsentwurf mit Unsicherheiten behaftet. Die ingenieurtechnische Aufgabe besteht in der Konzeption geeigneter Bordnetzarchitekturen im Zusammenspiel mit intelligenten EEM-Funktionen zur Steuerung der Energieflüsse, um die Zielvorgaben möglichst optimal zu erfüllen.

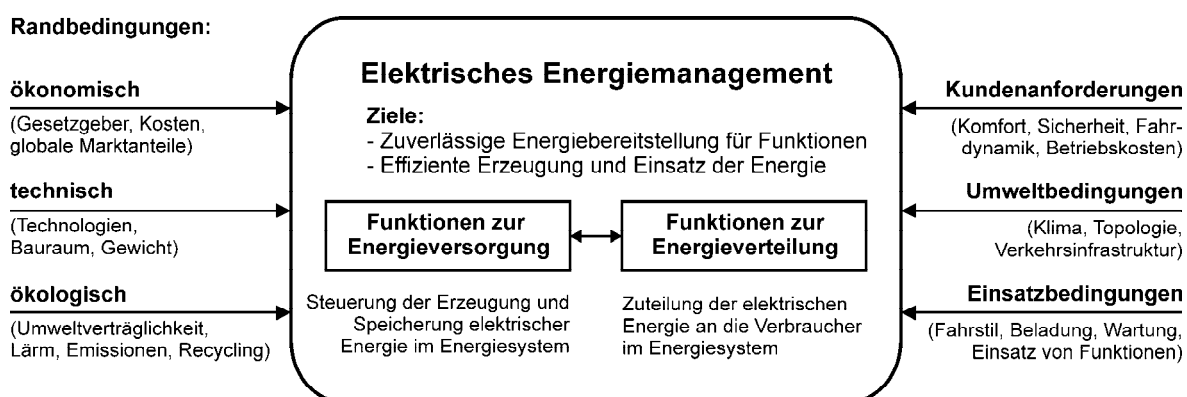


Bild 1.2: Ziele und Randbedingungen eines elektrischen Energiemanagements

Zielstellung und Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit werden die beiden Entwurfsziele der Zuverlässigkeit und der Effizienz bei der Entwicklung von Energiemanagement-Strategien untersucht. Ziel ist eine systematische Zusammenstellung und Einordnung der einzelnen Maßnahmen. Inhaltliche Schwerpunkte bilden dabei die Beherrschung von Lastwechseln im Bordnetz und die Wirkungsgradoptimierung der Energiewandlungskette durch eine Lastpunktverlagerung. An einem Bordnetzprüfstand erfolgen experimentelle Untersuchungen für einige Strategien sowie die Erprobung eines einfachen elektrischen Energiemanagements. Ein weiterer Fokus der Arbeit ist die Betrachtung ökonomischer Modelle für die Verwendung in einem Energiemanagement. Mit der Darstellung von wirtschaftswissenschaftlichen Theorien werden die Gemeinsamkeiten des Allokationsproblems in der Mikroökonomie und im Energiemanagement aufgezeigt. Dabei wird auf die Umsetzung eines einseitigen und eines zweiseitigen Allokationsmechanismus eingegangen und deren Vor- und Nachteile diskutiert.

Zu Beginn wird in Kapitel 2 eine Übersicht über aktuelle und zukünftige elektrische Energiebordnetzarchitekturen im Kfz gegeben. Es erfolgt eine Einordnung des elektrischen Energiemanagements in die Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs mit möglichen Freiheitsgraden und zugehörigen Schnittstellen zum elektrischen Energiebordnetz.

Kapitel 3 betrachtet Aspekte zur zuverlässigen Bereitstellung elektrischer Energie und systematisiert die einzelnen Lösungsansätze. Es erfolgt eine Beschreibung und Zuordnung der einzelnen Ziele und Maßnahmen anhand der Energieflüsse und Wirkungsketten.

Anschließend wird in Kapitel 4 die Effizienz der Energiewandlungskette zur Bereitstellung elektrischer Energie im Kfz mit Hilfe analytischer Methoden und dem Einsatz einer simulationsgestützten Optimierung näher untersucht. Dabei wird das Kraftstoffeinsparpotential einer Lastpunktverlagerung durch zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie analysiert.

Kapitel 5 gibt einen Exkurs in die Mikroökonomie und zeigt interessante Perspektiven für den Entwurf eines elektrischen Energiemanagements auf Grundlage ökonomischer Modelle. Es werden die theoretischen Grundlagen zusammengestellt und mögliche Funktionsstrukturen eines einseitigen und zweiseitigen Allokationsmechanismus in der Anwendung eines Energiemanagements verglichen und bewertet.

Den praktischen Bezug zum realen System stellen die experimentellen Untersuchungen am Bordnetzprüfstand in Kapitel 6 dar. Neben Messungen zum Systemverhalten bei Lastwechseln im Bordnetz wird die Integration eines elektrischen Energiemanagements beschrieben und bewertet.

Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick für zukünftige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet. Im Anhang werden detaillierte Modellbeschreibungen und Mess- bzw. Simulationsergebnisse gezeigt. Zudem sind weiterführende Exkurse zu ausgewählten Themen aufgeführt, welche sonst die Übersichtlichkeit der einzelnen Kapitel einschränken würden.

2 Elektrisches Energiemanagement im Kraftfahrzeug

Ausgehend von den Vorzügen der elektrischen Energieform zur Umsetzung von Fahrzeugfunktionen wird in diesem Kapitel der aktuelle und zukünftige elektrische Energiebedarf in Kraftfahrzeugen aufgezeigt. Danach werden wesentliche Erzeuger- und Speicherkomponenten sowie Topologievarianten für moderne Energiebordnetzarchitekturen vorgestellt. Daraufhin werden die Anforderungen und Freiheitsgrade eines elektrischen Energiemanagements im Zusammenhang mit Betriebsstrategien für das Gesamtfahrzeug präzisiert. Notwendige Schnittstellen zu den Bordnetzkomponenten werden erläutert. Abschließend wird vorgeschlagen, wie durch eine einheitliche Schnittstelle die bestehende Funktionsstruktur um ein elektrisches Energiemanagement (EEM) erweitert werden kann.

2.1 Eigenschaften des elektrischen Energiebordnetzes

Die wesentlichen Komponenten des heute üblichen elektrischen Energiebordnetzes im Kfz werden in Bild 2.1 gezeigt. Es handelt sich um ein lokales Energiesystem, welches folgende allgemeine Eigenschaften aufweist (vgl. [Hab04]):

- Es ist (zumeist) nur ein Energieerzeuger im System vorhanden. Seine Erzeugungsmenge ist vom Betrieb des Verbrennungsmotors abhängig und schwer prognostizierbar. Er wird überwiegend in Teillast betrieben.
- Ein leistungsfähiger Energiespeicher ist zwingend zur Zwischenspeicherung notwendig, um Lastspitzen auszugleichen und die Versorgung zu übernehmen, wenn der Erzeuger nur ungenügend oder keine Leistung bereitstellen kann.
- Das Zu- bzw. Abschalten einzelner Verbraucher hat großen Einfluss auf die Leistungsbilanz. Es treten große relative Änderungsgeschwindigkeiten im Lastgang auf, die Anzahl an Schalt- und Regelvorgängen ist verhältnismäßig hoch. Ein hoher stochastischer Anteil im Lastbedarf erschwert eine Prognose.

Eine hohe Versorgungssicherheit im Energiesystem ist deshalb nur mit hohem technischem Aufwand erreichbar. Zum einen ist es möglich, die Versorgungskomponenten mit genügend Leistungsreserve auszulegen. Auf Grund technischer Randbedingungen ist dieser Ansatz jedoch nur begrenzt anwendbar. Deshalb ist der Einsatz eines elektrischen Energiemanagements erforderlich. Dieses kann durch intelligente Steuerung der Leistungsflüsse zusätzlich zur Verbesserung der Versorgungssicherheit beitragen.

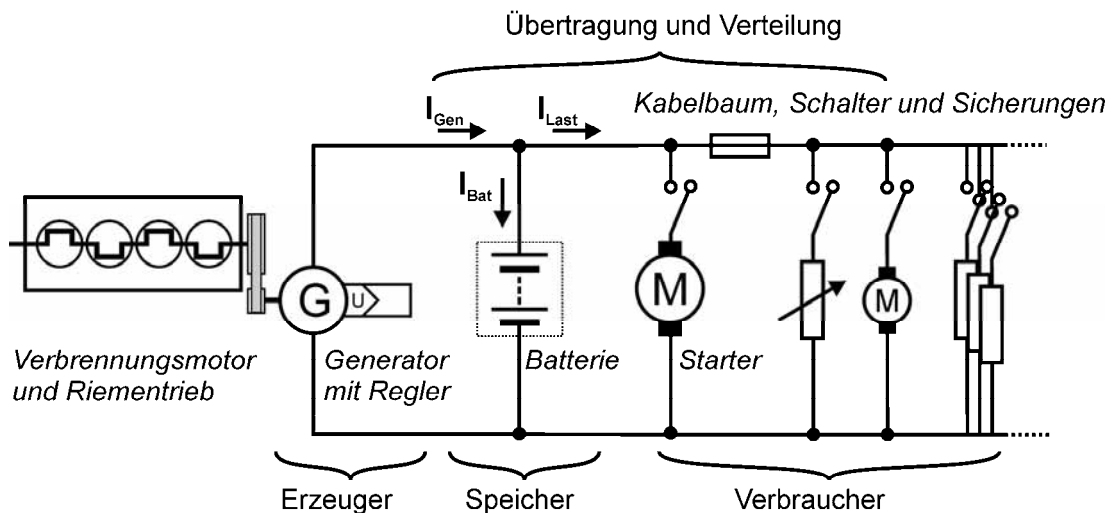


Bild 2.1: Schematischer Aufbau des elektrischen Energiebordnetzes im Kfz

2.2 Die Bedeutung elektrischer Energie für den Betrieb von Kraftfahrzeugen

Zu den ursprünglichen Verbrauchern des elektrischen Energiebordnetzes gehörten Zündung, Starter und Lichtanlage. Vor diesem historischen Hintergrund lassen sich die umgangssprachlichen Bezeichnungen Lichtmaschine und Starterbatterie für Generator und Fahrzeugbatterie ableiten. Schon sehr bald kamen immer neue Komponenten hinzu, welche neben der Effizienz des Verbrennungsmotors auch die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort deutlich verbesserten. Mit der rasanten Entwicklung der Elektronik erfolgte der große Durchbruch zu mechatronischen Lösungen. Sie ergänzen oder ersetzen zunehmend rein mechanische Systeme, da mit ihnen ein präziseres und flexibleres Stellen möglich ist. Auf diese Weise kann die Funktionalität bei gleichzeitiger Wirkungsgradsteigerung erweitert bzw. verbessert werden. Dabei spielt die elektrische Energie nicht nur zur Versorgung von Sensoren und informationsverarbeitenden Komponenten eine entscheidende Rolle, sondern wird auch bevorzugt als Endenergie für die Aktorik eingesetzt (Bild 2.2). Die Vorteile der elektrischen Energieform ergeben sich aus ihren Eigenschaften:

- Gute Verteilbarkeit: schnell, zuverlässig, sauber, verlustarm
- Sehr gute Steuerbarkeit: schnell und präzise messbar, steuerbar, regelbar
- Sehr gute Nutzbarkeit: lässt sich in alle Nutzenergieformen umwandeln
- Gute Speicherfähigkeit: je nach Technologie mit unterschiedlicher Energie- und Leistungsdichte

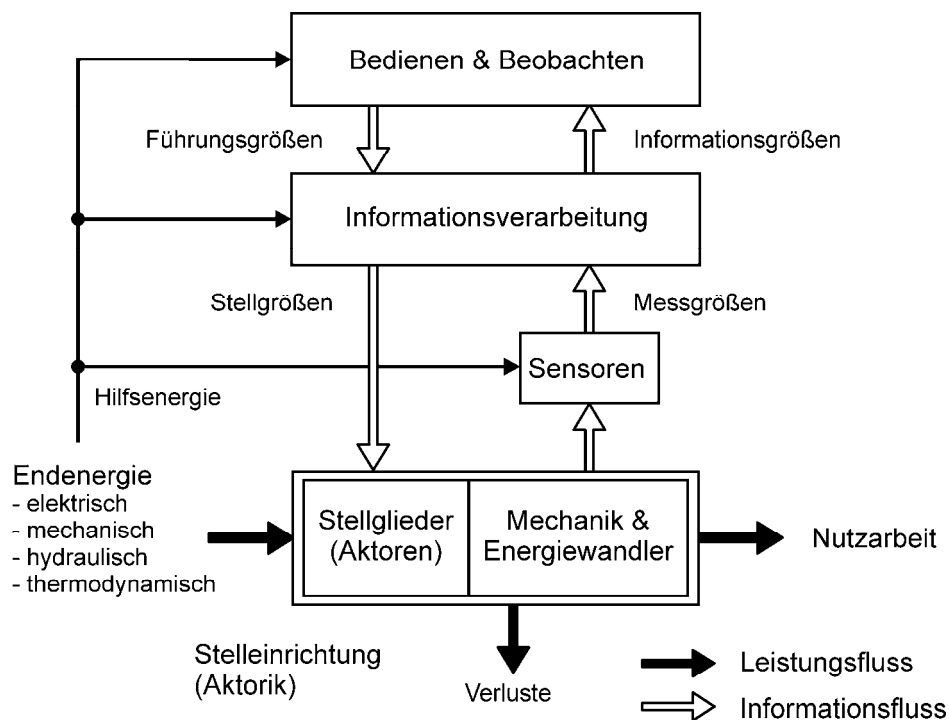


Bild 2.2: Leistungs- und Informationsfluss in geregelten mechatronischen Systemen

Ein gutes Beispiel für den erfolgreichen Einsatz mechatronischer Systeme ist die Entwicklung in der Motorsteuerung. Die Komponenten, welche für das Betreiben des Verbrennungsmotors notwendig sind, wurden nach und nach durch elektrische Sensorik und Aktorik sowie eine immer komplexer werdende Steuerung und Regelung ergänzt. Mit Hilfe dieser Elektronik ist es möglich, den Motor im aktuellen Arbeitspunkt in Bezug auf Leistungsabgabe, Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen zu optimieren. Dass die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, zeigen z. B. die aktuellen Forschungen am elektromechanischen Ventiltrieb [Pis07].

Die Anzahl von Sicherheits-, Komfort- und Informationssystemen ist schon heute je nach Fahrzeugkategorie und -ausstattung beträchtlich. Es ist dabei zu beobachten, dass zunehmend mehr Komponenten dieser Art zur Serienausstattung von Fahrzeugen gehören. Auf diesem Gebiet ist ein sehr großes Wachstumspotential an elektrischen Verbrauchern zu sehen, als Stichworte seien z. B. x-by-wire (elektrisches Lenken und Bremsen), aktive Fahrwerksregelung, Fahrerassistenzsysteme und Infotainment genannt.

2.2.1 Energiebedarf

Die Energiedienstleistungen bzw. Nutzprozesse (vgl. Bild 4.2), welche im Fahrzeug benötigt werden, erfüllen prinzipiell zwei Hauptaufgaben:

- Dienstleistungen zur Transportaufgabe des Fahrzeugs (Antreiben, Bremsen, Lenken, Fahrsicherheit)
- Dienstleistungen zur Unterstützung der Sicherheit und des Komforts der Insassen (u. a. Insassenschutz, Sitzpositionsverstellung, Klimatisierung, Telematiksysteme)

Der elektrische Energiebedarf richtet sich nach der technischen Realisierung der einzelnen Funktionen. Wie bereits ausgeführt, ist er in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Dies spiegelt sich in der installierten Generatorleistung und Batteriekapazität wieder, wie in Bild 2.3 für Beispielfahrzeuge aus zwei unterschiedlichen Fahrzeugklassen gezeigt wird. Dabei ist auffällig, dass bei dem Mittelklassefahrzeug je nach Motorisierung und Ausstattungsgrad die Leistungsfähigkeit der Energieversorgungs-komponenten stärker variiert. Bei Fahrzeugen der Oberklasse kamen schon sehr zeitig Generatoren mit hohen Leistungen zum Einsatz. Hier stellt die zur Verfügung stehende Technologie die Leistungsgrenze dar. Die wachsende Batteriegröße lässt darauf schließen, dass hier in stärkerem Maße Energieengpässe auftreten, welche durch den Speicher abgedeckt werden müssen¹.

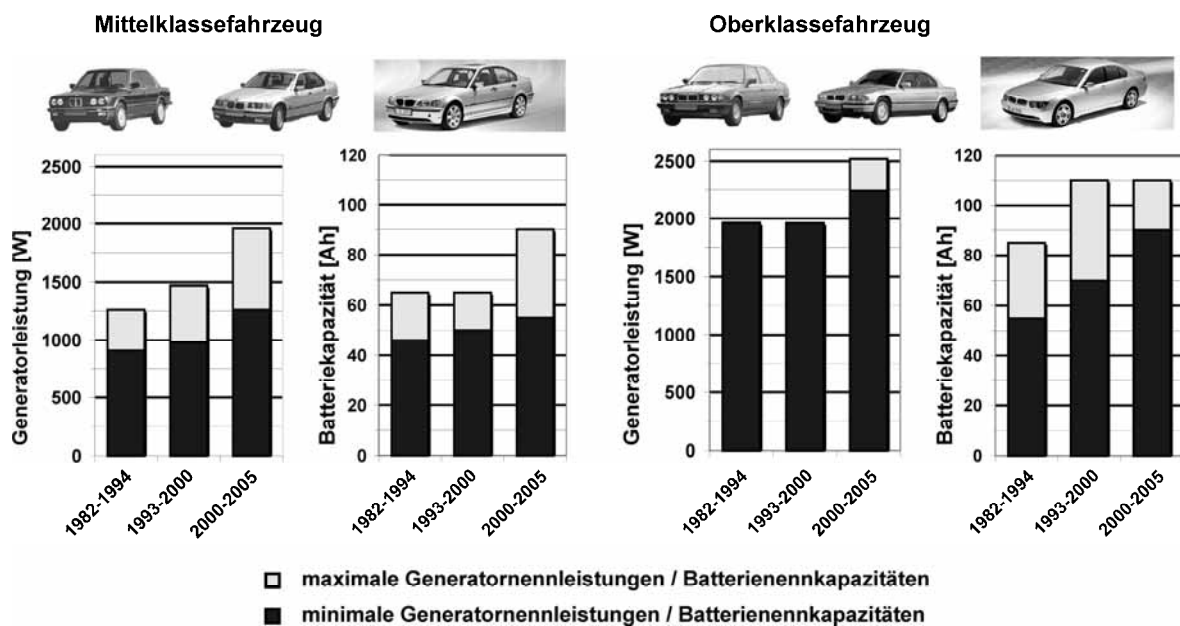


Bild 2.3: Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Generator und Batterie am Beispiel eines Mittelklassefahrzeugs und eines Oberklassefahrzeugs, Werte nach [Bmw05]

In Tabelle 2.1 sind die wesentlichen elektrischen Verbraucher im Fahrzeug aufgelistet. Die angegebene Leistungsaufnahme und Betriebsdauer dienen dabei als Ausgangspunkt zur Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs [Bos07]. Der Grundlastbedarf beträgt je nach Motorart und -größe zwischen 300 W und 500 W. Zur Abschätzung des maximalen Gesamtleistungsbedarfs ist es notwendig, die gleichzeitig aktiven Verbraucher in Abhängigkeit des Betriebsszenarios zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass durch den hohen Vernetzungsgrad moderner Fahrzeuge das Ausführen einer Funktion sehr häufig die gleichzeitige Aktivierung einer Vielzahl von elektrischen Verbrauchern zur Folge hat.

¹ Ein weiterer Grund sind die größeren Motorhubräume, wodurch höhere Startleistungen notwendig sind.