

Jens Cierullies

**Auslegungs- und Bewertungsmetrik  
für die elektrische Energieversorgung  
von Kraftfahrzeugen**

Herausgegeben von

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Bender  
Technische Universität München**

in der Reihe

**Informationstechnik im Maschinenwesen**



Herbert Utz Verlag · München  
2006

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2006

ISBN-10 3-8316-0638-2

ISBN-13 978-3-8316-0638-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

089-277791-00

[www.utz.de](http://www.utz.de)

# Inhaltsverzeichnis

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Zusammenfassung der Arbeit</b>                                | <b>iii</b>   |
| <b>Vorwort und Danksagung</b>                                    | <b>ix</b>    |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                     | <b>x</b>     |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                       | <b>xviii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>     |
| 1.1 Elektrische Energieversorgung im Kraftfahrzeug . . . . .     | 2            |
| 1.1.1 Veränderung der Bordnetzaufgaben . . . . .                 | 2            |
| 1.1.2 Zielsetzung dieser Arbeit . . . . .                        | 4            |
| 1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .                                  | 5            |
| <b>2 Aufbau von Kfz-Bordnetzen</b>                               | <b>7</b>     |
| 2.1 Aufbau und Komponenten eines Kfz-Bordnetzes . . . . .        | 7            |
| 2.1.1 Generator . . . . .  | 7            |
| 2.1.2 Batterie . . . . .   | 10           |
| 2.1.3 Bordnetztopologie . . . . .                                | 15           |
| 2.2 Zunahme des Leistungsbedarfs . . . . .                       | 16           |
| 2.2.1 Verbrauch während der Fahrt . . . . .                      | 18           |
| 2.2.2 Verbrauch bei stehendem Motor . . . . .                    | 24           |
| 2.3 Systemanalyse . . . . .                                      | 27           |
| 2.3.1 Energiebilanz einer Fahrt . . . . .                        | 27           |
| 2.3.2 Gesamtenergiebilanz über einen längeren Zeitraum . . . . . | 30           |
| 2.3.3 Bordnetzdimensionierung . . . . .                          | 31           |
| <b>3 Bordnetze für gestiegenen Leistungsbedarf</b>               | <b>35</b>    |
| 3.1 Konzepte für zukünftige Bordnetze . . . . .                  | 35           |
| 3.1.1 Energiemanagement . . . . .                                | 36           |
| 3.1.2 Alternative Batterietechnologien . . . . .                 | 41           |
| 3.1.3 Zweibatterienbordnetz . . . . .                            | 42           |
| 3.1.4 42 V Bordnetz . . . . .                                    | 43           |
| 3.1.5 Einführung neuer Technologien in Serienfahrzeuge . . . . . | 46           |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.1.6    | Auslegungsproblematik durch neue Technologien . . . . .           | 48         |
| 3.2      | Bordnetzdimensionierung und -simulation . . . . .                 | 50         |
| 3.2.1    | Bisherige Dimensionierungsmethoden . . . . .                      | 50         |
| 3.2.2    | Defizite bisheriger Auslegungs- und Bewertungsverfahren . . . . . | 55         |
| 3.2.3    | Bordnetzsimulation . . . . .                                      | 57         |
| <b>4</b> | <b>Konzept zur Auslegung und Bewertung von Bordnetzen</b>         | <b>65</b>  |
| 4.1      | Erstellen einer ersten Bordnetzdimensionierung . . . . .          | 66         |
| 4.1.1    | Ermittlung der Bordnetzlast . . . . .                             | 67         |
| 4.1.2    | Generatordimensionierung . . . . .                                | 69         |
| 4.1.3    | Batteriedimensionierung . . . . .                                 | 72         |
| 4.1.4    | Notwendigkeit weiterer Erprobung . . . . .                        | 74         |
| 4.2      | Bewertung von Einzelfahrten anhand von Kenngrößen . . . . .       | 75         |
| 4.2.1    | Elektrische Kenngrößen . . . . .                                  | 76         |
| 4.2.2    | Kenngröße für die Funktionsverfügbarkeit . . . . .                | 79         |
| 4.2.3    | Kenngröße für die Batterieschädigung . . . . .                    | 85         |
| 4.2.4    | Fahrzyklen und Szenarien für die Kenngrößenbewertung . . . . .    | 96         |
| 4.2.5    | Grenzdefinition für die Bordnetzkenngößen . . . . .               | 104        |
| 4.2.6    | Zusammenfassung . . . . .   | 107        |
| 4.3      | Langzeitbewertung anhand des Fahrerverhaltens . . . . .           | 108        |
| 4.3.1    | Erweiterung der Bordnetzkenngößen . . . . .                       | 109        |
| 4.3.2    | Erstellen von typischen Langfahrzyklen . . . . .                  | 110        |
| 4.3.3    | Erstellen von kritischen Langzeitzyklen . . . . .                 | 117        |
| 4.3.4    | Bewertung von Langzeittests . . . . .                             | 120        |
| <b>5</b> | <b>Bordnetzsimulation anhand statistischer Daten</b>              | <b>123</b> |
| 5.1      | Anforderungen an eine Bordnetzsimulation . . . . .                | 123        |
| 5.2      | Aufbau der Bordnetzsimulation . . . . .                           | 125        |
| 5.2.1    | Ansteuerung des Simulators . . . . .                              | 126        |
| 5.2.2    | Simulation der Bordnetzfunktionen . . . . .                       | 130        |
| 5.2.3    | Ergebnisdarstellung . . . . .                                     | 134        |
| 5.3      | Statistische Daten für die Bordnetzbewertung . . . . .            | 135        |
| 5.3.1    | Fahrdauer . . . . .   | 137        |
| 5.3.2    | Leerlaufanteil . . . . .  | 138        |
| 5.3.3    | Standzeiten . . . . .   | 140        |
| 5.3.4    | Abhängigkeiten zwischen den Verteilungen . . . . .                | 140        |
| 5.3.5    | Verbraucherschaltung . . . . .                                    | 141        |
| 5.3.6    | Temperaturverteilung . . . . .                                    | 143        |
| <b>6</b> | <b>Bordnetzbewertung am Beispiel eines Oberklassefahrzeugs</b>    | <b>145</b> |
| 6.1      | Abschätzen der benötigten Generatorleistung . . . . .             | 146        |
| 6.2      | Bordnetzbewertung mit Einzelfahrten . . . . .                     | 147        |
| 6.2.1    | Bordnetzverhalten ohne Energiemanagement . . . . .                | 148        |

---

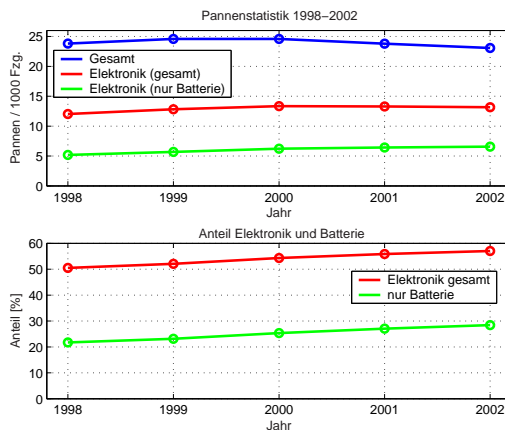
|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.2.2    | Verbesserung durch Lastabschaltung . . . . .                 | 149        |
| 6.2.3    | Überprüfung der Generatorgröße . . . . .                     | 150        |
| 6.3      | Bordnetzbewertung mit Langzeitsimulationen . . . . .         | 152        |
| 6.3.1    | Statistische Langzeitsimulationen . . . . .                  | 152        |
| 6.3.2    | Algorithmenvergleich mit festem Zwei-Wochen Zyklus . . . . . | 158        |
| 6.4      | Bewertung . . . . .  | 161        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                       | <b>163</b> |
| 7.1      | Ergebnisse dieser Arbeit . . . . .                           | 163        |
| 7.1.1    | Analyse moderner Kraftfahrzeugbordnetze . . . . .            | 163        |
| 7.1.2    | Bewertungskriterien für ein Bordnetz . . . . .               | 164        |
| 7.2      | Ausblick . . . . .   | 166        |
| <b>A</b> | <b>Temperaturmodell</b>                                      | <b>167</b> |
| A.1      | Erstellen eines Fahrzeugtemperaturmodells . . . . .          | 168        |
| A.1.1    | Wärmeübergänge . . . . .                                     | 169        |
| A.1.2    | Motorraummodell . . . . .                                    | 170        |
| A.1.3    | Klimaregelung . . . . .                                      | 175        |
| A.1.4    | Innenraummodell . . . . .                                    | 176        |
| A.2      | Verifikation . . . . .                                       | 179        |
| <b>B</b> | <b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>                         | <b>181</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>185</b> |



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Anzahl der Fahrzeugpannen aufgrund defekter elektrischer Komponenten in Kraftfahrzeugen ist in den letzten Jahren stetig angestiegen. Im Jahr 1998 betrug der Anteil der Elektronik an den Fahrzeugdefekten schon über 50 %, im Jahr 2005 wird bereits ein Elektronikanteil von über 60 % erwartet [Dud04].



**Abbildung 1.1:** Entwicklung der Pannenstatistik und Anteil der gesamten Elektronik und der Batterie. Während die Gesamtzahl an Pannen pro Fahrzeug leicht rückläufig ist, steigen die Ausfälle aufgrund defekter bzw. leerer Batterie zunehmend an (Quelle: ADAC-AutoMarxX).

Der am häufigsten auftretende Fehlerfall der Elektronik ist hierbei, dass der Verbrennungsmotor nicht mehr aus der Fahrzeugbatterie gestartet werden kann. Insgesamt wurde im Jahr 2002 vom ADAC bei fast 70.000 Fahrzeugen ein Fremdstart durchgeführt. Der zunehmende

Anteil der Elektronik an den Fahrzeugpannen und speziell der Anteil der Batterieausfälle ist in Abbildung 1.1 gezeigt.

Untersuchungen haben ergeben, dass bei 80% aller Fahrzeuge, bei denen ein Fremdstart durchgeführt werden musste, die Batterie nicht defekt, sondern nur entladen war [Dou95]. In diesen Fällen lag also nicht der Ausfall oder eine Störung einer Systemkomponente der elektrischen Energieversorgung vor, sondern eine vorangegangene zu hohe Energieentnahme durch elektrische Verbraucher. Die Dimensionierung der Komponenten zur Erzeugung und Speicherung von elektrischer Energie und die Abstimmung von Algorithmen zur Leistungsverteilung stellen demnach eine große Herausforderung für zukünftige Fahrzeuggenerationen dar.

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über Kfz-Bordnetze heutiger und zukünftiger Kraftfahrzeuge gegeben, nachfolgend werden dann das Ziel und die Gliederung dieser Arbeit vorgestellt.

## 1.1 Elektrische Energieversorgung im Kraftfahrzeug

Ein Kraftfahrzeugbordnetz, wie es heute in nahezu allen PKW anzufinden ist, besteht prinzipiell aus drei Bestandteilen:

- Einem Energieerzeuger, also meistens einem Generator, der vom Verbrennungsmotor angetrieben wird.
- Einem Zwischenspeicher in Form eines Akkumulators. Dies ist in heutigen Fahrzeugen meist eine Blei-Säure-Batterie.
- Elektrischen Verbrauchern, also Komponenten zum Betrieb des Fahrzeuges oder zur Erhöhung des Insassenkomforts, die elektrisch betrieben werden.

Der Energiefluss in einem Kraftfahrzeug mit und ohne laufenden Verbrennungsmotor ist in Abbildung 1.2 gezeigt.

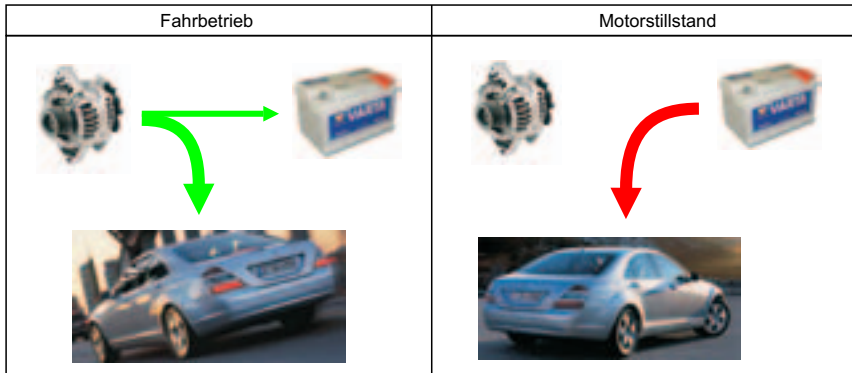
Während der Fahrt versorgt der Generator die elektrischen Verbraucher und lädt die in der Standzeit aus der Batterie entnommene Energie nach. Bei stehendem Motor werden die elektrischen Verbraucher aus der Batterie versorgt. Hierzu zählt auch der Start des Verbrennungsmotors über einen elektrischen Startmotor.

Bei einem Fahrzeugbordnetz handelt es sich demnach um ein autonomes System, dem von außen keine elektrische Energie zugeführt wird. Die gesamte während der Fahrt und im Stand benötigte Energie muss vom Generator während der Fahrzeiten erzeugt werden.

### 1.1.1 Veränderung der Bordnetzaufgaben

Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung haben sich in den letzten Jahren deutlich erhöht. Dies liegt zum einen an der Zunahme elektrischer Verbraucher, die während der Fahrt Energie benötigen, aber auch an Anforderungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs:





**Abbildung 1.2:** *Energiefluss im Fahrzeugbordnetz. Bei laufendem Verbrennungsmotor wird die Batterie geladen und die elektrischen Verbraucher vom Generator versorgt. Bei stehendem Motor versorgt die Batterie die elektrischen Verbraucher.*

- Die Einführung elektrischer Komfortsysteme wie Sitzheizungen und beheizbarer Scheiben bedingt einen starken Anstieg der maximal benötigten elektrischen Leistung.
- Elektronische Sicherheitssysteme wie ABS, ESP oder Gurtstraffer haben sowohl einen hohen Leistungsbedarf bei Aktion, aber auch Anforderungen an die Spannungsstabilität im Bordnetz
- Zur wirkungsvollen Reduzierung von Emissionen muss der Abgasstrang des Verbrennungsmotors möglichst schnell seine Betriebstemperatur erreichen. Auch hierzu werden elektrische Heizsysteme diskutiert.
- Um den Wirkungsgradverlauf des Verbrennungsmotors besser auszunutzen werden Stopp-Start-Systeme und Hybridfahrzeuge entwickelt, bei denen auch im Fahrbetrieb der Verbrennungsmotor nicht immer läuft, bzw. der Antriebsstrang elektrisch unterstützt werden kann.
- Auch während der Abstellzeiten eines Fahrzeuges sind elektrische Verbraucher aktiv, beispielsweise eine Diebstahlwarnanlage.

Für die Auslegung eines Bordnetzes bedeutet dies, dass elektrische Spitzenlasten möglich sind, welche die Nennleistung der größten verfügbaren Fahrzeuggeneratoren deutlich überschreiten. Da die mittlere Last weiterhin deutlich niedriger als die Spitzenlast ist, bietet es sich aus Kosten- und Gewichtsgründen an, eine Auslegung des Generators nur anhand von mittleren Lasten vorzunehmen. In Hochlastfällen wird dann Energie aus der Batterie entnommen

oder elektrische Komfortverbraucher werden kurzfristig durch ein Energiemanagement eingeschränkt. Dabei ist zu beachten, dass diese Leistungsreduktion dem Kunden nach Möglichkeit nicht auffällt. Eine Abwägung zwischen Kundenkomfort und Starticherheit muss getroffen werden.

Für die Bleibatterien zur Versorgung der Verbraucher im Stand und zum Starten des Verbrennungsmotors ergibt sich dadurch ein verändertes Anforderungsprofil:

- Heutige Batterien müssen einerseits hohe Startströme für kurze Zeit bereitstellen können, andererseits als Leistungspuffer im Teilladungsbereich verwendet werden können. Auf hohen Startstrom optimierte Batterien altern jedoch schneller, wenn sie im Teilladungsbereich betrieben werden.
- Eingeschaltete elektrische Verbraucher bei stehendem Motor belasten die Batterie deutlich stärker als noch vor wenigen Jahren. Dies ist einerseits durch die Vollvernetzung bedingt, bei der z.B. ein laufendes Radio den Standby-modus sämtlicher vernetzter Steuergeräte verhindert, andererseits benötigen neuartige Komfortfunktionen, wie z.B. das Einschalten des Abblendlichtes beim Öffnen des Fahrzeuges, zusätzliche Leistung.

Bei der Auswahl einer Batterie (Größe und Typ) müssen also sowohl Startfähigkeit als auch Lastanforderungen im Fahr- und Standbetrieb berücksichtigt werden. Hierbei ist neben dem Preis vor allem das hohe Gewicht von Bleiakкумуляtoren mit hoher Nennkapazität zu beachten.

### **1.1.2 Zielsetzung dieser Arbeit**

Um mit den gestiegenen Anforderungen an elektrische Bordnetze umzugehen, werden mehrere Technologien diskutiert. Hierzu zählt beispielsweise das elektrische Energiemanagement, das ein Abschalten von Verbrauchern und eine intelligente Steuerung des Generators erlaubt. Andere Ansätze verwenden ein Zwei-Batterien-Bordnetz zur Erhöhung der Starticherheit oder die Einführung einer höheren Spannungsebene (42 V-Bordnetz) zur Bereitstellung von mehr elektrischer Leistung. All diesen Entwicklungen ist gemein, dass sie zu einer erhöhten Komplexität der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen führen. Weiterhin ist es im kostenbestimmten Automobilbereich vor allem wichtig, für ein Bordnetz genau die Architektur und Komponenten auszuwählen, die mit minimalen Kosten und Gewicht eine Versorgung der elektrischen Verbraucher bei maximaler Kundenzufriedenheit gewährleisten.

Es bedarf also einer Bewertungsmetrik, welche die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Systeme miteinander zu vergleichen und zu evaluieren, ob ein Fahrzeugbordnetz zum Einsatz in Serienfahrzeugen geeignet ist. Dabei müssen u.a. eine dauerhafte Starticherheit, der Kundenkomfort und die Batteriealterung berücksichtigt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, ein solches Bewertungsverfahren zu entwickeln und eine beispielhafte Realisierung aufzuzeigen. Dabei soll diese Bewertungsmetrik die speziellen Eigenschaften der elektrischen Energieversorgung heutiger Fahrzeuge berücksichtigen, jedoch auch allgemein genug sein, um für geänderte Energieversorgungsstrukturen zukünftiger Kraftfahrzeuge einsetzbar zu sein.