

Karlsruher Schriftenreihe  
Fahrzeugsystemtechnik

Ralf Oberfell

## Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug

Ein einsatzorientiertes Bewertungs-  
und Optimierungsverfahren



Scientific  
Publishing



Ralf Oberfell

## **Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug**

Ein einsatzorientiertes Bewertungs-  
und Optimierungsverfahren

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik  
Band 38**

Herausgeber

**FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik**

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

# **Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug**

Ein einsatzorientiertes Bewertungs-  
und Optimierungsverfahren

von  
Ralf Oberfell

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Fakultät für Maschinenbau, 2015

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover – is licensed under the  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0403-0

DOI: 10.5445/KSP/1000047790

# Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist gegenwärtig großen Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und -betrieb benötigter Rohstoffe, globaler Wettbewerb, gesellschaftlicher Wandel und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduktion, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Benutzerfreundlichkeit und angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Moderne Kraftfahrzeuge sind hochkomplexe mechatronische Systeme, zu deren Entwicklung vermehrt virtuelle Prototypen eingesetzt werden. Komplexe Vollmodelle gestatten die Berechnung des zeitlichen Verhaltens des Fahrzeugs über Fahrzyklen hinweg und ermöglichen so eine detaillierte Bewertung von Konzepten und Ausführungsformen. Diese Vorgehensweise führt allerdings bei längeren Fahrstrecken zu relativ hohen Rechenzeiten und hat darüber hinaus den Nachteil, dass das Simulationsergebnis nur den vorgegebenen, spezifischen Lastverlauf berücksichtigt. Es ist daher wünschenswert, über ergänzende Simulationsverfahren zu verfügen, die es erlauben, die Breite der in der Praxis vorkommenden Streuung der Lastfälle in die Bewertung einer Maßnahme mit vertretbarem Aufwand einzubeziehen.

Hier setzt die Arbeit von Herrn Oberfell an, in der er ein stochastisches Simulationsverfahren vorschlägt. Es stützt sich auf Messungen

in umfangreichen realen Fahrzeugeinsätzen unterschiedlichster Art, für die die Systemzustände des Fahrzeugs statistisch ausgewertet werden. Häufigkeitsverteilungen dienen als Eingangsgrößen für eine nachfolgende Berechnung des Einflusses von Maßnahmen am Fahrzeug. Als Ergebnis liegen die Ausgangsgrößen, etwa der Kraftstoffverbrauch, ebenfalls als Verteilungen vor und erlauben eine näherungsweise Aussage über die wahrscheinliche Auswirkung der Maßnahmen im realen Fahrzeugeinsatz. Herr Oberfell schlägt weiterhin eine Vorgehensweise zur Nutzung der stochastischen Simulation bei der Optimierung von Maßnahmen im Bereich des Energiemanagements vor.

Karlsruhe,  
27.03.2015

*Prof. Dr. rer. nat. F. Gauterin*  
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*



# Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug

Ein einsatzorientiertes  
Bewertungs- und Optimierungsverfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing. Ralf Oberfell

|                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 19.03.2015                         |
| Hauptreferent:              | Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin |
| Korreferent:                | Prof. Dr.-Ing. Stefan Gast         |



# Kurzfassung

Kundenanforderungen und gesetzliche Rahmenbedingungen sind heutzutage Treiber der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge. Durch eine systematische Betrachtung der Stellhebel des Energiemanagements lassen sich wirksame Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs identifizieren und umsetzen. Der zunehmende Einsatz mechatronischer Systeme erhöht jedoch die Systemkomplexität und damit den Aufwand einer simulativen Bewertung des Gesamtfahrzeugs. Dieser Aufwand wird durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Einsatzbedingungen weiter vergrößert.

Als effizienter Ansatz zur Verbrauchssimulation wird in der vorliegenden Promotionsschrift ein stochastisches Simulationsverfahren vorgestellt. Dieses Verfahren ergänzt die explizite Berechnung im Zeitbereich. Dabei berechnet es unter Berücksichtigung statistisch ausgewerteter Fahrzeug- und Streckendaten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu erreichenden Energieeinsparung. Der Algorithmus nutzt dabei die Berechnungsvorschriften aus der mathematischen Modellierung der längsdynamischen Eigenschaften eines Nutzfahrzeugs. Die Verwendung eines Optimierungsverfahrens ergänzt die in dieser Arbeit vorgestellte Entwicklungsmethodik und ermöglicht eine einsatzspezifische Auslegung von Nutzfahrzeugen.

Unter beispielhafter Anwendung ausgewählter Verbrauchsmaßnahmen wird das stochastische Verfahren dargestellt. Anhand zeitbasierter Verfahren werden die Vor- und Nachteile der Methodik gegenübergestellt und bewertet. Abschließend wird die vorteilhafte Verwendung der Methodik zur Beantwortung praktischer Fragestellungen innerhalb einer frühen Entwicklungsphase aufgezeigt.



# Abstract

## **Stochastic Simulation of Energy Flows in Commercial Vehicles A Use Case Oriented Evaluation and Optimization Process**

Customer requirements and legal conditions are currently driving the development of energy-efficient vehicles. Systematic consideration of the key factors of energy management allows to identify and to implement effective energy reduction measures. However, the progressively use of mechatronic systems increases the complexity of the system and thus the effort involved in conducting a simulated evaluation of the entire vehicle. The effort becomes even higher by consideration of various operating conditions.

This doctoral thesis proposes a stochastic simulation process as an efficient approach to consumption simulation. The process complements the explicit transient analysis. Thereby, it takes into account statistically evaluated vehicle and route data and calculates a probability distribution of the energy savings which can be achieved by specific measures. The algorithm uses a dynamic longitudinal characteristics model of a commercial vehicle. An optimization process enhances the development method and allows commercial vehicles to be designed for specific uses.

The stochastic process is presented using selected consumption measures as examples. The advantages and disadvantages of the simulation method are contrasted and assessed by means of time-based simulation. Finally, the beneficial use of this method to answer practical questions within an early development phase is illustrated.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Truck Vorentwicklung der Daimler AG. Sie wurde im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes durch das Institut für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unterstützt und betreut.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, Inhaber des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik, für die ausgezeichnete Betreuung, die wertvollen gemeinsamen Diskussionen und die große Unterstützung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenfalls besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Gast, Professor der Fakultät für Maschinenbau und Automobiltechnik, Hochschule Coburg, für die hervorragende Zusammenarbeit, den regelmäßigen und fruchtbaren Gedankenaustausch und natürlich für die sofortige Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Vielen Dank auch meinen Vorgesetzten sowie allen Kolleginnen und Kollegen der Daimler AG für die gute Arbeitsatmosphäre, die Unterstützung meiner Arbeit in Form von Dokumentationen, Kennfeldern, Simulationsmodellen, Messdaten, Umbautätigkeiten und Erprobungsfahrten sowie die konstruktiven Diskussionen und wertvollen Anregungen. Stellvertretend hierfür möchte ich einige Personen gesondert hervorheben und ihnen danken: Herrn Dr. Werner Kober für die zahlreichen guten Ideen und gehaltvollen Diskussionen während meiner Doktorandenzeit, meinen Abteilungsleitern Herrn Dr. Andreas Schwarzhaupt und Herrn Markus Kirschbaum für das entgegengebrachte Vertrauen und die nicht selbstverständliche Bereitstellung diverser Erprobungsfahrzeuge, meinem Teamleiter Herrn Enrico Wohlfarth für das Überlassen der freien Gestaltungsmöglichkeit dieses spannenden Themas und die bereichernden Diskussionen, Herrn Claudio Rivas Zöller für den stetigen Erfahrungsaustausch mit der EvoBus GmbH, Herrn Peter Maniura für die Bereitstellung einer zeitbasierten Längsdynamiksimulation aus der Konzernforschung sowie die zahlreichen Gespräche über Simulationmethoden, Herrn Roland Dold und Herrn Dr. Ottmar Gehring für die

Bereitstellung der Flottendaten des Atego Hybrid Feldtests, Herrn Prof. Hans-Christian Pflug und Herrn Hagemann für die Integration und den Erfahrungsaustausch innerhalb des CO<sub>2</sub>-Engineerings, Herrn Dr. Thomas Neff für den Informationsaustausch innerhalb des Technologieforums Energiemanagement, Herrn Christoph Bösig und seinem Team für die tolle Unterstützung im Bereich Bordnetzauslegung und Speichertechnologien sowie Herrn Wolfgang Sülzer für den Erfahrungsaustausch zur Fahrleistungs- und Verbrauchssimulation von Nutzfahrzeugen.

Einen ganz lieben Dank möchte ich meinen Auszubildenden, Praktikanten, Bacheloranden und Diplomanden aussprechen, die ich während meiner Zeit als Doktorand betreuen durfte. Alle haben dazu beigetragen, das Thema Energiemanagement im Nutzfahrzeug und die konzernweite Bewertungskompetenz dieser Maßnahmen in kurzer Zeit in der Daimler Trucks Vorentwicklung zu etablieren. Für ihr außerordentliches Engagement möchte ich folgenden Personen danken: Andreas Lang, Denny Kirchner, Florian Heckert, Johannes Schietzold, Johannes Büsing, Jean-Sébastien Hecker, Pierre Lamothe, Alexander Sehi, Patrick Hildenbrand, Yannick Frank, Thomas Stoll, Philipp Strobl, Giries Aboudy, Guillaume Chauvel, Andreas Eibofner, Michael Schmidt, Chadi Bitar, Mohammed Abdo und Christian Möhring. Vielen Dank auch den Betreuern der jeweiligen Hochschule oder Universität für die gute Zusammenarbeit.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, meinen Verwandten und allen Freunden, die mich während dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Stuttgart, im März 2015

*Ralf Oberfell*



# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Vorwort des Herausgebers</b>                               | <b>VII</b>  |
| <b>Deckblatt</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>Kurzfassung</b>  | <b>XI</b>   |
| <b>Abstract</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>Danksagung</b>   | <b>XV</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>                                     | <b>XVII</b> |
| <b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>                           | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation . . . . .                                      | 1           |
| 1.2 Ausgangssituation . . . . .                               | 4           |
| 1.3 Problemstellung und Lösungsansatz . . . . .               | 6           |
| 1.4 Aufbau und Inhalt der Arbeit . . . . .                    | 7           |
| <b>2 Simulation von Energieflüssen – Stand des Wissens</b>    | <b>11</b>   |
| 2.1 Modellbildung und Simulation . . . . .                    | 11          |
| 2.1.1 Grundlagen und Definitionen . . . . .                   | 12          |
| 2.1.2 Aufbau einer Simulation . . . . .                       | 15          |
| 2.1.3 Klassifizierung von Simulationen . . . . .              | 17          |
| 2.1.4 Ergebnis: Bausteine einer Simulation . . . . .          | 19          |
| 2.2 Modellbasierte Abbildung eines Nutzfahrzeugs . . . . .    | 20          |
| 2.2.1 Längsdynamische Kräftebilanz . . . . .                  | 21          |
| 2.2.2 Modellierung des Antriebsstrangs . . . . .              | 25          |
| 2.2.3 Beschreibung der Nebenaggregate . . . . .               | 28          |
| 2.2.4 Hybride Antriebssysteme . . . . .                       | 30          |
| 2.2.5 Wirtschaftliche Randbedingungen . . . . .               | 33          |
| 2.2.6 Quasistationäres und dynamisches Verhalten . . . . .    | 35          |
| 2.2.7 Ergebnis: Mathematisches Fahrzeugmodell . . . . .       | 38          |
| 2.3 Mathematische Analyse- und Berechnungsverfahren . . . . . | 39          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.3.1    | Merkmalswerte der deskriptiven Statistik . . . . .                     | 40        |
| 2.3.2    | Eigenschaften von Verteilungen . . . . .                               | 47        |
| 2.3.3    | Mehrdimensionale Charakteristiken . . . . .                            | 50        |
| 2.3.4    | Stochastische Unabhängigkeit . . . . .                                 | 53        |
| 2.3.5    | Rechnen mit Verteilungen . . . . .                                     | 55        |
| 2.3.6    | Optimierung in der Fahrzeugauslegung . . . . .                         | 62        |
| 2.3.7    | Ergebnis: Stochastisches Lösungsverfahren . . . . .                    | 68        |
| <b>3</b> | <b>Energiemanagementsysteme – Stand des Wissens</b>                    | <b>69</b> |
| 3.1      | Grundlagen und Begriffsdefinitionen . . . . .                          | 69        |
| 3.1.1    | Energiemanagement nach ISO 50001 . . . . .                             | 70        |
| 3.1.2    | Energiemanagement in Kraftfahrzeugen . . . . .                         | 72        |
| 3.1.3    | Versorgungssicherheit und Energieeffizienz . . . . .                   | 73        |
| 3.2      | Energie und Leistung . . . . .   | 75        |
| 3.2.1    | Definition von Energie und Leistung . . . . .                          | 75        |
| 3.2.2    | Primär- und Sekundärenergie . . . . .                                  | 77        |
| 3.2.3    | Energiebilanzierung . . . . .  | 79        |
| 3.2.4    | Energiepfade . . . . .   | 83        |
| 3.3      | Stellhebel des Energiemanagements . . . . .                            | 85        |
| 3.3.1    | Reduzierung des Endenergiebedarfs . . . . .                            | 85        |
| 3.3.2    | Effiziente und bedarfsgerechte Bereitstellung von<br>Energie . . . . . | 86        |
| 3.3.3    | Rekuperation von Energie . . . . .                                     | 87        |
| 3.4      | Ansatzmöglichkeiten für effiziente Nutzfahrzeuge . . . . .             | 88        |
| 3.4.1    | Elektrische Energiebereitstellung . . . . .                            | 90        |
| 3.4.2    | Pneumatische Energiebereitstellung . . . . .                           | 91        |
| 3.4.3    | Hydraulische Energiebereitstellung . . . . .                           | 92        |
| 3.4.4    | Klimatisierungskonzepte . . . . .                                      | 93        |
| 3.4.5    | Systemübergreifende Ansätze . . . . .                                  | 94        |
| 3.4.6    | Hybrider Antriebsstrang . . . . .                                      | 94        |
| 3.4.7    | Ausgewählte Konzepte für diese Arbeit . . . . .                        | 95        |
| 3.5      | Zusammenfassung: Energiemanagementsysteme . . . . .                    | 95        |
| <b>4</b> | <b>Analyse der Betriebszustände schwerer Nutzfahrzeuge</b>             | <b>97</b> |
| 4.1      | Zugrundeliegende Datenquellen . . . . .                                | 98        |
| 4.1.1    | Flottenversuche . . . . .  | 98        |
| 4.1.2    | Kundenfahrerprobung . . . . .  | 100       |
| 4.1.3    | Erprobungsfahrzeuge . . . . .  | 102       |
| 4.2      | Datenaufbereitung, -analyse und -zuordnung . . . . .                   | 105       |
| 4.2.1    | Kriterien der Vorsortierung . . . . .                                  | 106       |
| 4.2.2    | Mustererkennung . . . . .  | 108       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.2.3    | Ableitung repräsentativer Muster . . . . .                                     | 112        |
| 4.2.4    | Gliederung der Messdaten . . . . .   | 115        |
| 4.3      | Wissensbasis . . . . .   | 117        |
| 4.3.1    | Eindimensionale Merkmale . . . . .   | 121        |
| 4.3.2    | Mehrdimensionale Merkmale . . . . .  | 122        |
| 4.3.3    | Leistungs- und Energiebilanz . . . . .   | 123        |
| 4.4      | Energiebilanz des betrachteten Einsatzprofils . . . . .                        | 124        |
| 4.4.1    | Kenngrößen der Leistungs- und Energiebilanzen . . . . .                        | 125        |
| 4.4.2    | Leistungsbedarfe der Nebenaggregate . . . . .                                  | 128        |
| 4.4.3    | Energiebilanz des Bordnetzes . . . . .   | 130        |
| <b>5</b> | <b>Stochastischer Berechnungsansatz zur<br/>einsatzorientierten Simulation</b> | <b>135</b> |
| 5.1      | Ablaufplan und Vorgehensweise . . . . .  | 137        |
| 5.2      | Abschnitt A: Erstellen der Energiebilanz . . . . .                             | 143        |
| 5.3      | Abschnitt B: Änderung der Systembilanz . . . . .                               | 153        |
| 5.3.1    | Variation der Endleistung . . . . .  | 155        |
| 5.3.2    | Integration einer Betriebsstrategie . . . . .                                  | 161        |
| 5.3.3    | Variation von Komponenteneigenschaften . . . . .                               | 178        |
| 5.4      | Abschnitt C: Ausgabe des Optimierungskriteriums . . . . .                      | 184        |
| <b>6</b> | <b>Maßnahmenbewertung und Parameteroptimierung</b>                             | <b>191</b> |
| 6.1      | Aktives Generatormanagement . . . . .  | 192        |
| 6.1.1    | Berechnung des Verbrauchspotenzials . . . . .                                  | 192        |
| 6.1.2    | Vergleich mit der zeitbasierten Berechnung . . . . .                           | 197        |
| 6.1.3    | Wirtschaftliche Bewertung der Varianten . . . . .                              | 198        |
| 6.1.4    | Fazit: Systembetrachtungen und -vergleiche . . . . .                           | 200        |
| 6.2      | Solarzellenintegration . . . . .   | 200        |
| 6.2.1    | Energieeinsparung . . . . .  | 202        |
| 6.2.2    | Amortisationsdauer . . . . .   | 203        |
| 6.2.3    | Fazit: Integration streuender Umgebungsgrößen . . . . .                        | 205        |
| 6.3      | Volumenstromreduziertes Lenksystem . . . . .                                   | 206        |
| 6.3.1    | Volumenstromreduktion bei Geradeausfahrt . . . . .                             | 206        |
| 6.3.2    | Elektromotorische Lenkunterstützung . . . . .                                  | 209        |
| 6.3.3    | Fazit: Ereignisbedingte Leistungsreduktion . . . . .                           | 210        |
| 6.4      | Klimatisierungskonzepte . . . . .  | 210        |
| 6.4.1    | Fazit: Schnelle Übersicht . . . . .  | 215        |
| 6.5      | Hybrider Antriebsstrang . . . . .  | 215        |
| 6.5.1    | Fazit: Auswirkung großer Systemänderungen . . . . .                            | 220        |
| 6.6      | Gezielte Optimierung freier Systemparameter . . . . .                          | 221        |
| 6.6.1    | Optimale Dimensionierung von Bauteilen . . . . .                               | 221        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 6.6.2     | Elektrifizierung von Nebenaggregaten . . . . .           | 223        |
| 6.6.3     | Fazit: Automatisierte Optimierung von Systemen . . . . . | 224        |
| <b>7</b>  | <b>Bewertung des stochastischen Verfahrens</b>           | <b>225</b> |
| 7.1       | Bestimmung der Bewertungskriterien . . . . .             | 226        |
| 7.1.1     | Validierungsarten . . . . .                              | 226        |
| 7.1.2     | Bewertungsansatz . . . . .                               | 229        |
| 7.2       | Validierung des Fahrzeugmodells . . . . .                | 231        |
| 7.3       | Vergleich verschiedener Simulationsverfahren . . . . .   | 233        |
| 7.3.1     | Einsparungspotenziale . . . . .                          | 233        |
| 7.3.2     | Nachbildung stochastischer Verfahren . . . . .           | 236        |
| 7.3.3     | Generierung zufälliger Eingangsgrößen . . . . .          | 239        |
| 7.3.4     | Simulationsaufwand . . . . .                             | 242        |
| 7.3.5     | Fazit des Genauigkeitsvergleichs . . . . .               | 245        |
| 7.4       | Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeit . . . . .   | 245        |
| 7.5       | Objektive Bewertung des Verfahrens . . . . .             | 249        |
| 7.6       | Subjektive Bewertung des Verfahrens . . . . .            | 252        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                      | <b>255</b> |
| 8.1       | Stochastisches Simulationsverfahren . . . . .            | 256        |
| 8.2       | Grenzen des Verfahrens . . . . .                         | 258        |
| 8.3       | Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle . . . . .    | 260        |
| 8.4       | Empfehlungen für die weitere Forschung . . . . .         | 260        |
| <b>A.</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                             | <b>263</b> |
| <b>B.</b> | <b>Tabellenverzeichnis</b>                               | <b>271</b> |
| <b>C.</b> | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                             | <b>273</b> |
| <b>D.</b> | <b>Verwendete Formelzeichen</b>                          | <b>277</b> |
| <b>E.</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                              | <b>289</b> |
| <b>F.</b> | <b>Stichwortverzeichnis</b>                              | <b>301</b> |
| <b>G.</b> | <b>Eigene Publikationen</b>                              | <b>307</b> |
| G.1       | Tagungsbeiträge/Veröffentlichungen . . . . .             | 307        |
| G.2       | Offenlegungsschriften . . . . .                          | 309        |
| <b>H.</b> | <b>Betreute wissenschaftliche Arbeiten</b>               | <b>315</b> |

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Motivation

Die als *Wirtschaftswunder* beschriebene schnelle und lang anhaltende wirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Zweiten Weltkrieg wurde dadurch vorangetrieben, dass der ebenfalls steigende Energiebedarf durch günstiges Erdöl gedeckt werden konnte [21]. Mit dem Beginn des 21. Jahrhunderts bestehen nach einer Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe neue Erkenntnisse in Verbindung mit der energetischen Nutzung fossiler Rohstoffe [21]:

1. Erdöl kann der erste Rohstoff der Erde werden, bei dem die Förderung aufgrund von Beschränkungen in der geologischen Verfügbarkeit nicht mehr steigerbar ist.
2. Um eine anthropogene Beeinträchtigung des Klimas einzuschränken, müssen die *Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen* global reduziert werden.
3. Schwellenländer wie China und Indien sind aufgrund ihres schnellen Wirtschaftswachstums sehr stark auf die Nutzung von nicht-erneuerbaren Energieträgern angewiesen.

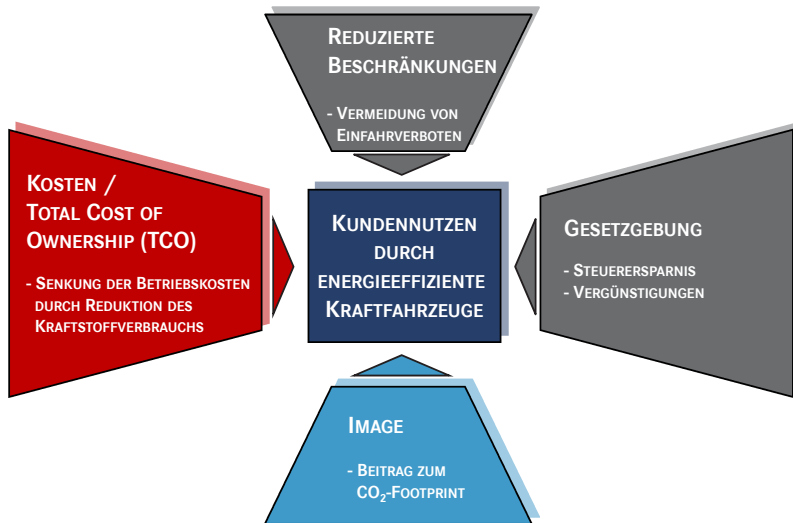
Das jährliche *Güterverkehrsaufkommen* in Deutschland soll sich nach Schätzungen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung bis zum Jahr 2050 um beinahe 50 % auf ca. 5,5 Milliarden Tonnen erhöhen. Betrachtet man dabei zusätzlich die mittlere Transportweite, so ergibt sich eine Verdopplung der jährlichen Güterverkehrsleistung auf 1.200 Milliarden Tonnenkilometer. Der Straßengüterverkehr wird nach dieser Prognose im Jahr 2050 etwa 81 % der gesamtmodalen Nachfragemenge transportieren [23]. Eine stark anwachsende Nutzfahrzeugindustrie ist mit ihren Produkten Wachstumsmotor dieser Branche und generiert darüber hinaus Arbeitsplätze in vielen anderen Bereichen weltweit. Allerdings wird der starke Anstieg der Transportleistung ohne geeignete Gegenmaßnahmen zu einer weiteren Zunahme des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes führen.

Die *Gesetzgebung* stellt daher in regelmäßigen Zeitabständen Regularien zur Steigerung der Umweltverträglichkeit und der Reduktion von Energieverbräuchen auf. Generell sollen durch gesetzliche Regelungen die Anreize für Entwicklung und Einsatz umweltfreundlicher Fahrzeuge gestärkt werden. Ein großer Treiber neuer Antriebskonzepte sind Einfahrbeschränkungen, die entweder Fahrzeugen mit hohen Emissionen die Einfahrt verweigern oder deren Einfahrt mit hohen Gebühren beaufschlagen. Die Einführung einer Regulierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen zwingt die Fahrzeughersteller in den nächsten Jahren zur Umsetzung und Markteinführung verbrauchsreduzierender Innovationen.

Im Zuge der *Regulierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes* hat der Verband der europäischen Automobilhersteller (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA)) die „Vision 20 – 20“ vorgestellt. Mit dieser Selbstverpflichtung wollen alle europäischen Nutzfahrzeughersteller bis zum Jahr 2020 den Kraftstoffverbrauch moderner Lastkraftwagen um durchschnittlich 20 % pro Tonnenkilometer senken. Die Basis dazu stellen die Verbrauchswerte vergleichbarer Fahrzeuge aus dem Jahr 2005 [47].

Die neuen Erkenntnisse und Forderungen zur Nutzung fossiler Brennstoffe verlangen nach einer nachhaltigen Entwicklung alternativer Transport- und Fortbewegungsmittel in einem derzeit verbrennungsmotorisch geprägten Verkehrssystem. Durch die Verringerung der Kraftstoffkosten und Steuern sowie einem Wegfall möglicher emissionsgebundener Strafzahlungen sind verbrauchs- und energieeffiziente Fahrzeugsysteme für den Kunden wirtschaftlich interessant, sofern eine möglichst schnelle Amortisation dieser Systeme darstellbar ist. Der Einsatz energieeffizienter Fahrzeuge ist weiterhin ein Mittel, das die Außendarstellung eines Speditionsunternehmens verbessern kann („grünes Image“). Der wesentliche Treiber von effizienten Fahrzeugsystemen ist daher die *Erhöhung des Kundennutzens* (vgl. Abbildung 1.1) [82].

Die *Fahrzeughersteller* arbeiten an Lösungen, um den Verkehr möglichst sicher, umweltgerecht und gleichzeitig ökonomisch effizient zu gestalten. Seit Mitte der sechziger Jahre hat die Nutzfahrzeugindustrie den CO<sub>2</sub>-Ausstoß ihrer Produkte pro Tonnenkilometer um ca. 45 % verringert. Dazu konnte gleichzeitig der Stickoxid- und Partikelausstoß um 96 % beziehungsweise 97 % reduziert werden [129]. Laut der gegenwärtigen Verkehrsverflechtungsprognose für das Bundesverkehrsministerium ist bis zum Jahr 2025 mit einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen, die aufgrund der gestiegenen Transportleistung allerdings nur ca. 9 % betragen wird [41]. Zur Verbesserung der Verbrauchseffizienz bei Kraftfahrzeugen sind zahlreiche



**Abb. 1.1:** Erhöhung des Kundennutzens als Treiber energieeffizienter Fahrzeuge, nach [82]

Ansätze bekannt, die ebenfalls auf Nutzfahrzeuge angewendet werden können [28, 98, 134]:

- die kontinuierliche Verbesserung der konventionell eingesetzten Technik in der Verbrennungskraftmaschine
- die Weiterentwicklung der Getriebe
- die Reduzierung von Beschleunigungs-, Roll- und Luftwiderständen
- die Hybridisierung von Antriebsstrang und Nebenaggregaten
- die Änderung des Antriebskonzepts als Grundlage für die Verwendung von regenerativen Energieträgern
- das emissionsfreie Fahren mit alternativen Energieträgern (z. B. Wasserstoff als Energieträger in Verbindung mit einer Brennstoffzelle)
- das klimaneutrale Fahren mit regenerativ gewonnenen Energieträgern (z. B. elektrische Energie als Energieträger in Verbindung mit voll-elektrifizierten Fahrzeugen)

Vor der *Entwicklung und Einführung eines energieeffizienten Fahrzeugsystems* muss dessen Nutzen untersucht werden. Aus diesem Grund müssen Verfahren bereitstehen, die neue Fahrzeugkonfigurationen und Betriebsstrategien hinsichtlich ihres Potenzials zur Verbrauchssenkung analysieren, bewerten, auslegen und optimieren können. Zieht der Fahrzeughersteller eine Maßnahme zur Verbrauchseinsparung in Betracht, liegt der primäre Fokus der Entwickler zunächst auf dem maximal möglichen Einsparpotenzial (Grenzpotezial) der Einzelmaßnahme und der Auswirkung seiner Einflussparameter auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs. Gleichzeitig sollen aus der Betrachtung der gewählten Maßnahme Rückschlüsse gezogen werden, bei welcher Fahrmission die Maßnahme besonders hohe Einsparpotenziale erzielt, welche Betriebsstrategien zu bevorzugen sind und wie Bauteile und Betriebsstrategien verbrauchsoptimal auf den Einsatzfall der Kunden ausgelegt werden können.

## 1.2 Ausgangssituation

Die *Bewertung des Kraftstoffverbrauchs* von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen unter Durchführung einer bestimmten Fahr- oder Transportaufgabe wird heutzutage in einem frühen Entwicklungsstadium in den meisten Fällen mit Hilfe einer Computersimulation durchgeführt. Die Erstellung eines energetischen Fahrzeugmodells durch theoretische oder experimentelle Modellbildung und dessen Integration in eine Simulationsumgebung sind heutzutage Stand der Technik und in ihrer Komplexität überschaubar und beherrschbar [17]. Die wesentlichen Stellhebel für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse und den Aufwand zur Durchführung einer Simulation sind durch Modellierungsart, Detaillierungstiefe, Lösungsverfahren und Wahl der Eingangsparameter gegeben.

Bei der *Anwendung einer Längsdynamiksimulation* zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zu Verbrauchsmessungen aus dem Fahrversuch. Die Längsdynamik betrachtet dabei alle relevanten Aspekte der Fahrzeugbewegung in Längsrichtung [104]. Es wird dabei vorausgesetzt, dass Fahrzeugquerbeschleunigungen keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben und damit vernachlässigt werden können [4]. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich mit der Reduktion von Fahrzeug und darauf einwirkende Kräfte auf ein Punktmassenersatzmodell [33, 43].

Die *Längsdynamik des Fahrzeugs* lässt sich nach Abbildung 1.2 sehr anschaulich signalfussorientiert modellieren, wobei hier zwei grundsätzliche



Simulationsrichtungen unterschieden werden: Die Vorwärtssimulation (dynamische Rechnung), in der eine Regelgröße vorgegeben wird und das System darauf antwortet, und die Rückwärtssimulation (quasistationäre Rechnung), bei der die nötige Regelgröße auf Grund der gewünschten Antwort berechnet wird. In Rückwärtssimulationen lässt sich der Einfluss verschiedener Fahrertypen auf den Kraftstoffverbrauch ausblenden, da über die Sollgeschwindigkeit des Fahrzeugs die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors berechnet werden [72, 83].

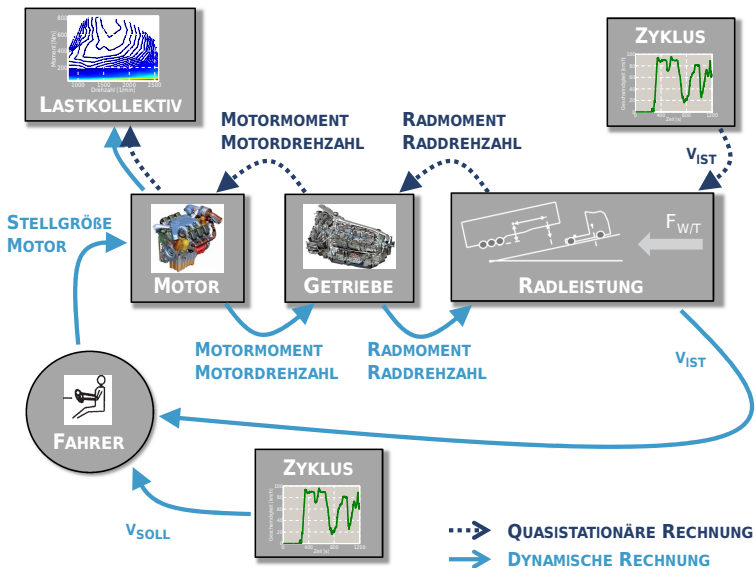


Abb. 1.2: Dynamische und quasistationäre Längsdynamiksimulation, nach [83]

Um den *Simulationsaufwand* zu reduzieren und die simulative Abbildung der Problemstellung zu vereinfachen, wurden auf dem Forschungsgebiet der Festigkeitsberechnung in den letzten Jahren neue Methoden entwickelt und erforscht, die sich teilweise oder ganz von der zeitdiskreten Simulation lösen. Einige davon werden im Folgenden beschrieben.

In [65] wird eine Vorgehensweise aufgezeigt, mit der eine gemessene oder simulierte Zielstrecke durch eine Kombination kurzer Fahr- und Belastungsmanöver nachgebildet werden kann. Die sogenannten Grundmanöver sind von kurzer Dauer und in ihrer Anzahl begrenzt, so dass die Rechen-

zeit der Simulation gering gehalten wird. Eine stochastische Simulation und Optimierung wird in [114] angewendet, um die Auswirkung streuender Materialstärken und streuender Versuchsrandbedingungen auf das Strukturverhalten bei Dynamik und Frontalcrash zu untersuchen. Die stochastische Simulation basiert hierbei im Gegensatz zur deterministischen Simulation, in der alle Systemvariablen eindeutig bestimmt sind, auf zufallsbasierten Simulationsgrößen.

Eine weitere Anwendung der stochastischen Simulation findet in [92] statt. Hier wird die stochastische Simulation anhand einer Kopfaufprall-Simulation und der Verbesserung eines Rückhaltesystems vorgestellt und validiert. Weil Crashversuche komplex, nichtlinear und nicht reproduzierbar sind, eignet sich an dieser Stelle die auf dem Zufall basierende stochastische Simulation als Ergänzung zur deterministischen Simulation.

### 1.3 Problemstellung und Lösungsansatz

Die *Entwicklung und Auslegung von Fahrzeugsystemen* wird mit steigender Funktionsvielfalt, wachsenden Anforderungen durch die Gesetzgebung und wirtschaftlichen Zwängen zunehmend komplexer [45]. Speziell die Auslegung der Energieversorgung des Kraftfahrzeugs ist aufgrund der Integration bedarfsgerecht angesteuerter Verbraucher, der Veränderung der Energiewandlungskette (z. B. durch eine Elektrifizierung mechanisch angetriebener Komponenten), dem Wechsel der Betriebsstrategie und der Bauteilvariation mit zahlreichen Wechselwirkungen versehen. Wegen ihrer Vielfalt an Ausstattungsmerkmalen und Verwendungsmöglichkeiten sind Nutzfahrzeuge davon besonders betroffen. Um die Anzahl der Iterationsschleifen während der Fahrzeugentwicklung zu reduzieren, sind daher geeignete Methoden und Wege einzusetzen.

Die *zeitbasierte Längsdynamiksimulation* eignet sich für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines verbrauchsreduzierenden Fahrzeugsystems beim Kunden nur bedingt. Dies ist darin begründet, dass der Aufwand in der Fahrzeugabbildung unter Betrachtung aller Freiheitsgrade, die aus dem Zusammenwirken der Eigenschaften von Fahrzeug, Fahrumgebung und Fahrer entstehen, stark ansteigt. Unter Betrachtung der Vielfalt an relevanten Fahrzeug- und Ausstattungsmerkmalen, Einsatzbedingungen sowie Strecken- und Fahrprofilen entsteht eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten, die bei der ganzheitlichen Bewertung einer Maßnahme berücksichtigt werden muss.

Eine *effiziente Simulationsmethodik* erlaubt, die mannigfaltigen Merkmale von Fahrzeug und Fahrumgebung mit wenig Aufwand zu erfassen und für die Integration in eine längsdynamische Energieflusssimulation<sup>1</sup> vorzubereiten. Das Simulationsverfahren muss unter Zuhilfenahme dieser Eingangsinformationen in der Lage sein, verschiedene Fragestellungen hinsichtlich der Energieeffizienz einer Fahrzeugkonfiguration zu beantworten. Nach einer Systemanalyse durch den ersten Berechnungsdurchlauf soll die Möglichkeit bestehen, einzelne Systemparameter für ein optimales Gesamtergebnis zu verändern. Der Lösungsalgorithmus der Simulation muss dabei ermöglichen, Berechnungsvorschriften aus dem mathematisch beschriebenen Modell des längsdynamischen Systems zu entnehmen. Anschließend soll er mit Hilfe der Eingangsdaten der Simulation das gewünschte Resultat (z. B. den Kraftstoffbedarf) berechnen. Sowohl die Schnelligkeit des Lösungsverfahrens als auch die Genauigkeit der Fahrzeugabbildung sollen sich dabei an bestehenden Simulationsverfahren orientieren.

Auf Basis bekannter Simulationsverfahren soll daher in der vorliegenden Arbeit ein stochastischer Simulationsansatz für die Berechnung des Energiebedarfs von Nutzfahrzeugen entwickelt und untersucht werden. Anschließend sollen anhand ausgewählter Bewertungskriterien die Vor- und Nachteile des neuen Verfahrens beschrieben werden. Nach der durchgeführten Bewertung soll eine Empfehlung über geeignete Anwendungsfälle für diesen neuen Berechnungsansatz erfolgen.

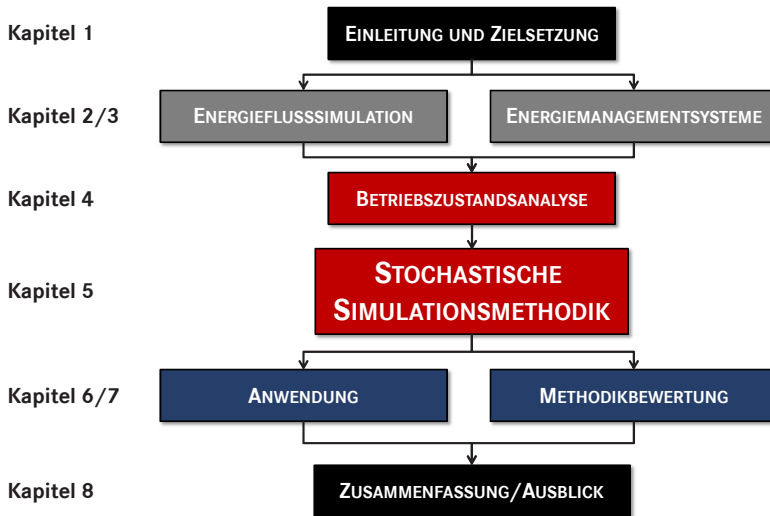
## 1.4 Aufbau und Inhalt der Arbeit

In der *vorliegenden Promotionsschrift* wird ein *neuartiges stochastisches Simulationsverfahren* zur Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug vorgestellt und anhand der Anwendung auf ausgewählte Energiemanagementmaßnahmen bewertet. Die Arbeit ist nach Abbildung 1.3 in acht Kapitel untergliedert.

Nach der Einführung in das Thema und der Herleitung von Ausgangssituation und Problemstellung innerhalb des ersten Kapitels stellt Kapitel 2 den Stand der Wissenschaft und Technik von *Simulationsverfahren* zur Bewertung des Kraftstoffverbrauchs dar. Nach grundlegenden Definitionen von Modellbildung, Lösungsverfahren und Optimierungsansätzen werden

---

<sup>1</sup> Definition von Energie, Energiefluss und Energiemanagement siehe Kapitel 3



**Abb. 1.3:** Aufbau und Inhalt der Arbeit

die mathematischen Gleichungen der physikalischen Abbildung eines Kraftfahrzeugs hergeleitet. Weiter werden mathematische Verfahren zur Lösung des deterministischen Berechnungsmodells vorgestellt. Anschließend werden die Eigenschaften verschiedener Simulationsverfahren aufgezählt und hinsichtlich der gestellten Aufgabe bewertet und verglichen. Somit stehen am Ende des Kapitels einige Bausteine bereit, aus denen längsdynamische Gesamtfahrzeugsimulationen zusammengestellt werden können.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen und Begrifflichkeiten zu *Energiemanagementsystemen* vorgestellt. Aufgrund der Leistungs- und Energiebilanz eines zugrunde gelegten Nutzfahrzeugs werden mögliche Stellhebel zur Energieeinsparung hergeleitet und diskutiert. Sinnvolle Konzepte hierzu werden in diesem Kapitel als Grundlage für eine spätere Bewertung und Optimierung herangezogen.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der Analyse der *Betriebszustände von Nutzfahrzeugen*. Diese Analyse in Kombination mit einer anschließenden Datenvorverarbeitung bildet nach Kapitel 2 den ersten Baustein des neuen Simulationsverfahrens. Sie dient dazu, die Eingangsgrößen in Abhängigkeit des gewählten Lösungsverfahrens und der mathematischen Modellierung der Simulation bereitzustellen.

Das *neue Simulationsverfahren* wird in Kapitel 5 erläutert. Die Teilbausteine der methodischen Vorgehensweise, deren Grundlagen bereits in den Kapiteln 2 und 4 vorgestellt wurden, werden nun in einen logischen Zusammenhang gebracht. Der Ablauf der Methodik wird anhand eines Ablaufplans erklärt und an einem Beispiel veranschaulicht. Die Anwendung verschiedener Betriebsstrategien und Konfigurationen auf ein Niedervolt-Bordnetz stellt alle grundsätzlichen Möglichkeiten des Energiemanagements dar und ermöglicht somit die einfache Übertragbarkeit der neuen Methodik auf vergleichbare Fragestellungen.

Das Kapitel 6 zeigt die *Anwendung der Methodik* auf einige in Kapitel 3 hergeleitete Energiemanagementmaßnahmen. Mit Hilfe der stochastischen Simulation einer Solarzellenintegration, einer fahrzustandsabhängigen Generatorsteuerung, eines volumenstromreduzierten Lenksystems, Klimatisierungskonzepten und einem hybriden Antriebsstrang werden aktuelle Maßnahmen mit der neuen Methodik bewertet.

Im siebten Kapitel wird die neue Simulationsmethodik anhand subjektiver und objektiver Bewertungskriterien *untersucht und bewertet*. Dieser Vergleich ergibt die Möglichkeit, die Vor- und Nachteile des neuen Simulationsverfahrens zu erkennen.

Eine *Zusammenfassung und einen Ausblick* enthält das letzte Kapitel, Kapitel 8. Mit den Erfahrungen, die während der Verfahrensentwicklung gemacht wurden, erfolgen abschließend einige Empfehlungen für die weitere Forschung.



## 2 Simulation von Energieflüssen – Stand des Wissens

Dieses Kapitel stellt alle Definitionen und notwendigen Grundlagen bereit, um gemäß der Aufgabenstellung ein schweres Nutzfahrzeug simulativ abzubilden und anschließend seine energetischen Zustandsgrößen zu berechnen. Zur Hinführung auf die hier erarbeitete Simulationsmethodik werden nachfolgend dargestellt:

- Grundlagen der Modellbildung und Simulation
- Mathematische Modellbildung am Beispiel von Nutzfahrzeugen
- Mathematische Verfahren zur Datenanalyse, Berechnung stochastischer Größen und Optimierung nichtlinearer Funktionen am Beispiel nutzfahrzeugspezifischer Anwendungsfälle

Die folgenden Unterkapitel liefern einen Überblick über technische Systeme, Prozesse und die Nachbildung von Systemen. Nach einer Klassifizierung und Charakterisierung der Simulationsarten wird das längsdynamische Verhalten eines Nutzfahrzeugs hergeleitet und beschrieben. Durch die mathematische Beschreibung der energetischen Eigenschaften eines Fahrzeugs steht das gleichungsbasierte Modell des Fahrzeugs zur Verfügung, das anschließend mit Hilfe mathematischer Verfahren hinsichtlich der gewünschten Zielgröße (z. B. Kraftstoffverbrauch, Kosten o. Ä.) aufgelöst werden kann. Zu deren Optimierung werden am Ende des Kapitels geeignete Vorgehensweisen vorgestellt.

### 2.1 Modellbildung und Simulation

Die *Erfassung des Kraftstoffbedarfs* von Kraftfahrzeugen, die mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet sind, zeichnet sich durch eine sehr gute absolute Genauigkeit aus. Abstriche in der Genauigkeit beruhen lediglich auf der Qualität der Messtechnik und der Festlegung der Abtastrate aller

Messwerte. Die absolute Kraftstoffmessung auf einem definierten Streckenverlauf scheint nach heutigem Stand der Technik Mittel der Wahl zu sein. Jedoch ist in der Messung durch einen Fahrversuch weder die Reproduzierbarkeit und damit der relative Vergleich von Fahrzeugen gegeben, noch steht der zeitliche und finanzielle Aufwand dieser Methode in Relation zu den erzielbaren Ergebnissen. Diese Nachteile werden vorwiegend durch die hohe Anzahl an Einflussgrößen (z. B. Fahrer, Verkehr, Umwelt usw.) hervorgerufen.

Vorteile durch eine kostengünstige und vergleichende (relative) Bewertung ergeben sich in der Verwendung von *Methoden der virtuellen Produktentstehung*, z. B. einer Simulation [104]. Deren weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit der Bewertung von Komponenten oder Betriebsstrategien, die zum Zeitpunkt der Bewertung noch nicht verfügbar sind. In diesem Unterkapitel sind einige dieser Methoden beschrieben.

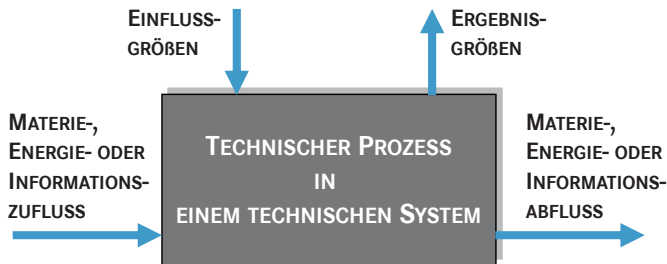
### 2.1.1 Grundlagen und Definitionen

Ein *System* beschreibt nach [50] eine Zusammenfassung von Objekten, die in Beziehung stehen, aufeinander einwirken und plausibel von der Umgebung abgegrenzt werden können. Ein *technisches System* hingegen besteht ausschließlich aus technischen Bestandteilen. Es besitzt nach [50] eine statische Struktur und kann ein dynamisches Verhalten aufweisen. Beide Merkmale können durch geeignete Mittel beschrieben werden. Zu seiner Beschreibung muss jedes abzubildende Original (z. B. ein Kraftfahrzeug) als System aufgefasst werden.

Das *Verhalten* wird durch im System ablaufende Prozesse und die Systemeigenschaften gekennzeichnet. Nach Normung durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) ist entsprechend der Norm 66201 [40] ein Prozess die „... Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden ...“.

In Abbildung 2.1 ist die *Prozessdefinition* dargestellt. Es ist notwendig, eine klare Unterscheidung zwischen System und Umgebung vorzunehmen. Die *Umgebung* beeinflusst das System, ohne aber am System teilzunehmen. Bei der Bewertung von Kraftfahrzeugen wird die Systemgrenze in der Regel um das Fahrzeug und den Fahrer definiert. Die Eigenschaften der Umwelt beeinflussen das Fahrzeug und den Fahrer und somit das System.





**Abb. 2.1:** Prozessdefinition nach DIN 66201, nach [40]

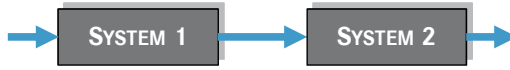
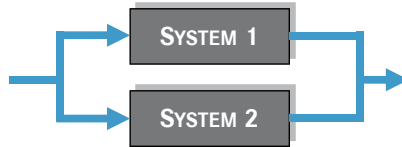
Die *Struktur eines Systems* hat eine wesentliche Auswirkung auf die spätere Modellierung. Sie legt das Verhalten als Reaktion auf Einflussgrößen und die Zeitbeziehung des Systems fest und beschreibt die Beziehungen zwischen dem System und dem Umgebungssystem, einschließlich deren Eigenschaften.

Abbildung 2.2 stellt mögliche Verschaltungsarten von Systemen und Systemelementen dar. [122] nutzt hierbei zur anschaulichen Darstellung der jeweiligen Systemverschaltung die Verwendung von Blockschaltbildern. Ein System setzt sich nach seiner Definition aus vielen Einzelkomponenten zusammen, die im Zusammenwirken die Eigenschaften eines Systems beschreiben [10].

Bei den ersten beiden *Kopplungsarten* in Abbildung 2.2 sind die Teilsysteme miteinander verbunden, ohne aber eine Verbindung mit dem Anfangszustand des Systems oder mit dem vorausgegangenen Wert der betrachteten Eigenschaften aufzuweisen [122]. Die dritte Struktur stellt eine Rückkopplung dar. Alle Arten von Kopplungen können allerdings auf eine Form zurückgeführt werden. Gleichung (2.1) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße  $X_E$  und der Ausgangsgröße  $X_A$  durch die Übertragungsfunktion  $F_{(S)}$  des modellierten Systems  $S$ .

$$X_A = F_{(S)} \cdot X_E \quad (2.1)$$

Bei einem *statischen oder nichtdynamischen System* hängt die Ausgangsgröße ausschließlich vom momentanen Eingangswert ab. Ein *dynamisches System* grenzt sich gegenüber einem statischen System dadurch ab, dass bei diesem die Ausgangsgröße nicht nur vom augenblicklichen Eingangswert, sondern auch von „... vergangenen (bei nicht kausalen Systemen auch von zukünftigen) Werten abhängt.“ [89].

**SERIENSCHALTUNG****PARALLELSCHALTUNG****RÜCKKOPPLUNG**

**Abb. 2.2:** Arten von Kopplungen zwischen Systemen oder Systemelementen, nach [122]

Bei dynamischen Systemen geschieht die Umsetzung einer Eingangsgröße in die Ausgangsgröße nicht direkt, sondern mit Hilfe von Zwischengrößen. Die Umformung hängt dabei nicht nur von den Eingangsgrößen, sondern auch vom Anfangszustand oder dem letzten Zustand des Systems ab, durch den die Anfangsbedingungen für die dazugehörigen Differentialgleichungen bestimmt sind. Zustandsgrößen bzw. Zustandsvariablen charakterisieren und definieren den aktuellen Zustand eines Systems.

Ein System ist durch *Ein- und Ausgangsgrößen* sowie Zustandsgrößen bestimmt. Alle Größen besitzen nach [105] vier mögliche Charakteristiken:

1. Wertevorrat: wertkontinuierlich oder -diskret
2. Zeitbeziehung: zeitkontinuierlich oder -diskret

Die Nachbildung des realen technischen Systems „Kraftfahrzeug“ und der Wechselwirkung mit seiner Umwelt kann durch den Einsatz verschiedenster *Modellierungsmethoden* durchgeführt werden. Ein Modell bildet ein Originalsystem auf der Basis von Funktions-, Struktur- oder Verhaltensähnlichkeiten nach, um dieses Modell für Problemlösungen zu verwenden, da dies am Original nicht möglich ist oder mit zuviel Aufwand verbunden wäre [109]. Der Modellierer muss zunächst festlegen, welche Eigenschaften

modelliert werden sollen, auf welche Weise und mit welchem Zeitbezug. Ist ein System durch ein physikalisches Modell ersetzt, können daraus mathematische Modelle abgeleitet und erstellt werden. Nach [115] lassen sich Modelle klassifizieren in:

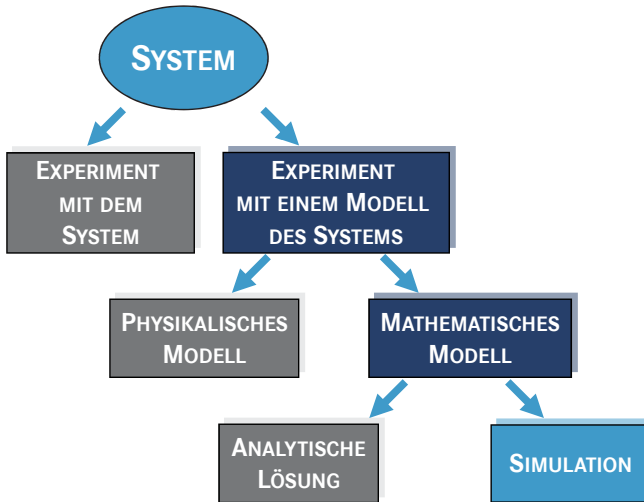
1. statisch oder dynamisch,
2. deterministisch oder stochastisch,
3. stetig oder diskret.

Für die in dieser Arbeit benötigte *Abbildung von Leistung und Verbrauch* können unter Annahme eines physikalischen Modells des Kraftfahrzeugs die notwendigen Teilsysteme definiert werden. Sowohl für den Antriebsstrang als auch für Nebenaggregate werden hierfür Leistungsquellen, -senken und -wandler sowie Speicher und Verbraucher verwendet, die miteinander verknüpft sind. Die Interaktion dieser Einheiten muss mit Hilfe von mathematischen Methoden beschrieben werden, damit in Folge ein Algorithmus generiert werden kann, der in einer Simulation durch einen Computer abgearbeitet wird. Für eine mathematische Beschreibung können algebraische Gleichungen, Differentialgleichungen, Differenzgleichungen, Graphen, Automatentabellen, Wahrscheinlichkeitsverteilungen etc. verwendet werden [24, 104].

### 2.1.2 Aufbau einer Simulation

Unter dem Begriff *Simulation* versteht man „... den Prozess des Bildens einer Aussage über ein System mit Hilfe und auf Ebene eines Modells ...“ [110]. Ziel der Simulation ist ein möglichst realitätsnahes Nachbilden des Geschehens in der Wirklichkeit. Durch Abstraktion kann ein Modell geschaffen werden, an dem nach zielgerichteten Experimenten die Resultate der Simulation auf das reale Problem übertragen werden [110]. Abbildung 2.3 zeigt die Möglichkeiten der Nachbildung eines Systems durch physikalische und mathematische Modelle sowie der Simulation.

In der Regel versteht man Simulationen als *Computersimulationen*. Simulationen ohne Computer sind z. B. physikalische Experimente wie Untersuchungen in Strömungswindkanälen, Brandsimulationen und Crashtests. Es bestehen diverse Simulationsarten, die sich in ihrer Funktionsweise grundlegend unterscheiden [14]:



**Abb. 2.3:** Wege zur simulativen Systemanalyse, nach [115]

1. Statische Simulation
2. Dynamische Simulation
  - a) Kontinuierliche Simulation
  - b) Diskrete Simulation
  - c) Hybride Simulation
3. Stochastische Simulation
4. System Dynamics Simulation
5. Multi-Agenten-Simulation

Die Eigenschaften der Simulationsarten sind im Folgenden nach [14, 53, 112] beschrieben. Die *statische Simulation* bildet die Verhaltenseigenschaften eines realen Systems im modellierten System ab. Der Zeitbezug ist dabei nicht relevant, da nur ein Zeitpunkt betrachtet wird. Im Gegensatz dazu betrachtet die *dynamische Simulation* einen Ablauf bzw. einen Prozess, d. h. hier besteht eine zeitliche Abhängigkeit. Die *kontinuierliche Simulation* bildet stetige Prozesse ab und nutzt dazu in der Regel Differentialgleichungen, während die *diskrete Simulation* nach einem bestimmten Zeitintervall

den nächsten Systemzustand bestimmt. Von einer *hybriden Simulation* wird dann gesprochen, wenn Eigenschaften beider vorangegangenen Simulationsarten vorhanden sind. Die *stochastische Simulation* basiert auf Zufallszahlen und findet heutzutage vor allem Anwendung in der Physik. Unter *System Dynamics Simulation* versteht man die Systemuntersuchung dynamischer Systeme mit Hilfe von qualitativen und quantitativen Modellen. Sie findet vor allem Anwendung im sozio-ökonomischen Bereich. Bei der *Multi-Agenten-Simulation* handelt es sich um ein System aus mehreren handelnden Einheiten, die kollektiv ein Problem lösen.

In [119] wird eine Differenzierung von Simulationsverfahren in zwei Gruppen vorgenommen, wie sie am weitesten verbreitet sind:

- a) Simulationsverfahren für komplexe adaptive Systeme: Artificial Life, Genetische Programmierung, Evolutionäre Algorithmen, Neuronale Netze etc.
- b) Natur- und ingenieurwissenschaftliche Problemstellungen: deterministische, quantenmechanische, probabilistische, stochastische, ereignisorientierte Simulationen etc.

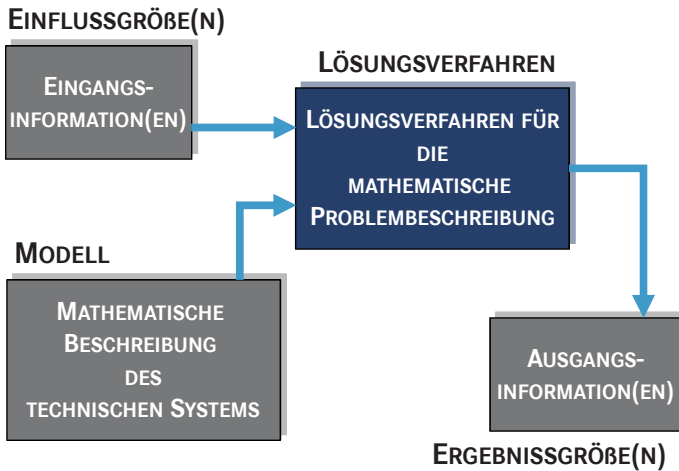
Diese Einteilung zeigt bereits die Zuordnung und Charakterisierung von Simulationsverfahren zu gezielten wissenschaftlichen und fachspezifischen Fragestellungen.

### 2.1.3 Klassifizierung von Simulationen

Der grundlegende Aufbau einer Simulation besteht aus den Ein- und Ausgangsgrößen des Systems, dem mathematischen Modell als Nachbildung des physikalisch-/technischen Systems und dem Lösungsverfahren, das die gesuchten Ausgangsgrößen auf Basis des verwendeten Modells in Abhängigkeit der Eingangsgrößen berechnet. In Abbildung 2.4 sind diese Bausteine und ihre Beziehung zueinander grafisch dargestellt.

In Abhängigkeit des jeweiligen Simulationsansatzes unterscheiden sich sowohl die Art der mathematischen Beschreibung der Eingangsgrößen, die Modellierungstiefe und -art des technischen Systems als letztendlich auch die Darstellung der Ausgangsgrößen, die sich aus der Kombination von Eingangsinformationen und Lösungsverfahren ergeben.

Für die Beschreibung und Darstellung von *Eingangsgrößen* bestehen folgende Möglichkeiten:



**Abb. 2.4:** Bausteine einer Simulation

- Zeitlich unveränderliche Eingangsgrößen, z. B. Konstanten oder Variablen
- Zeitlich veränderliche Eingangsgrößen, z. B. Mengen, Vektoren oder Zeitreihen [35]
- Funktionen, z. B. Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Verteilungsfunktionen

Dabei ist sowohl der Ursprung als auch die spätere Verwendung der Eingangsgröße zunächst nicht relevant. Die Eingangsinformation (z. B. ein Geschwindigkeitsverlauf) kann aus Messdaten, Simulationen, Zufallsgeneratoren, Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen etc. generiert werden. [81], z. B., verwendet zur vereinfachten Beschreibung der Eigenschaften des Fahrers eine Häufigkeitsverteilung seines Verhaltens. Aus der Häufigkeitsverteilung wird durch die Simulation eine zeitdiskrete Eingangsgröße generiert, die anschließend dem Berechnungsverfahren zugeführt wird.

Das *Modell* kann je nach Art seiner mathematischen Beschreibung folgendes Verhalten des originalen Systems abbilden:

- statisches,
- quasistatisches,
- dynamisches Verhalten.

Im Fall des dynamischen Verhaltens besitzen die Ausgangs- oder Zustandsgrößen eine Rückwirkung auf das technische System, da in diesem Fall der Wert des vorangegangenen Zustands gleichzeitig der Eingangswert für den folgenden Simulationsschritt ist.

Das einzusetzende *Lösungsverfahren* hängt von den Eigenschaften des Modells und der Art der verwendeten Eingangsgrößen ab. Je nach Gegebenheit der Eingangsgrößen kommt hier ein stochastisches (bei Vorgabe einer Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Werte der Eingangsgröße) oder ein arithmetisches Verfahren (bei Vorgabe einer zeitlich veränderlichen Größe für die Werte der Eingangsgröße) zum Einsatz. Als arithmetische Lösungsverfahren stehen für Differentialgleichungen Methoden zur Verfügung, die mit Hilfe von Approximation durch Differenzen ein lineares oder nichtlineares Gleichungssystem oder eine direkte Lösungsvorschrift hervorbringen [57, 86]. Lineare Gleichungssysteme lassen sich durch iterative oder direkte Verfahren lösen. Als Beispiel für iterative Verfahren seien hier das Gauß-Seidel- und das Jacobi-Verfahren genannt. Zu den direkten Verfahren gehören das Einsetzungs-, Gleichsetzungs- und Additionsverfahren sowie das gaußsche Eliminationsverfahren [70, 75]. Zur Berechnung von Verteilungsfunktionen stehen je nach Rechenvorschrift des Fahrzeugmodells verschiedene Rechenverfahren [61] zur Verfügung, die im Algorithmus hinterlegt werden müssen. Zur numerischen Lösung von stochastischen Differentialgleichungen stehen Verfahren wie das Euler-Maruyama-Verfahren zur Verfügung [55].

Die mathematische Darstellung der *Ausgangsgrößen* hängt maßgeblich vom verwendeten Fahrzeugmodell, Lösungsverfahren und den Eingangsgrößen ab und ist ein Resultat der durchgeführten Berechnung.

### 2.1.4 Ergebnis: Bausteine einer Simulation

Die Verwendung einer Computersimulation ist als mögliches Werkzeug für die Berechnung des Energiebedarfs von Nutzfahrzeugen geeignet. Für seine Anwendung muss nach Kapitel 2.1.1 eine Systemgrenze definiert werden, die das System plausibel von der Umgebung abgrenzt. Da die Abbildung der Umwelt den Modellierungsaufwand zu groß werden lässt, wird die Systemgrenze in der Regel um das technische System Nutzfahrzeug definiert. Dabei wird der Einfluss der Umwelt über Eingangsgrößen des technischen Systems beschrieben. Einflussgrößen des Systems können die Steigung der Fahrbahnoberfläche, der Reibwert des Straßenbelags, die Sonnenstrahlung und vieles mehr sein. Die Beschreibung der Eigenschaften des Fahrers

kann sowohl innerhalb des technischen Systems geschehen (Modellierung des Fahrerverhaltens) als auch ohne Modellierung als Eingangsgröße bereitstehen, wobei diese Eingangsgrößen aus Messdaten, Annahmen oder Wahrscheinlichkeiten generiert werden können.

Eine *Simulation* besteht nach Kapitel 2.1.2 aus der mathematischen Modellierung des physikalischen Systems. Ein Modell des originalen technischen Systems ist in der Regel gegenüber der Realität vereinfacht und bewusst auf die zu beantwortende Fragestellung ausgelegt. Je nach Funktionsweise bestehen unterschiedliche Simulationsansätze, die statischen, dynamischen und stochastischen Verhaltensweisen folgen.

Der Energiefluss des technischen Systems resultiert aus dem Zusammenwirken einzelner Objekte (z. B. Generator, Verbrennungsmotor, ...), die miteinander in Beziehung stehen. Neben der signalflussorientierten Modellierung ist es ebenfalls möglich, einen bidirektionalen Signalfluss abzubilden. Dieser wird hauptsächlich bei grafischen Modellierungsverfahren angewendet. Beispielhafte grafische Modellierungsverfahren sind die Methode der Bondgraphen [18, 51], das Causal Ordering Graph (COG) und das Energetic Macroscopic Representation (EMR) [27].

Durch die Gliederung einer Simulation unter Anwendung der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Systematik ist es möglich, die Bausteine der Simulation zu charakterisieren und zu unterscheiden. Es ergeben sich unterschiedliche Simulationsansätze, die in Abhängigkeit zu den ausgewählten Eingangsgrößen stehen.

## 2.2 Modellbasierte Abbildung eines Nutzfahrzeugs

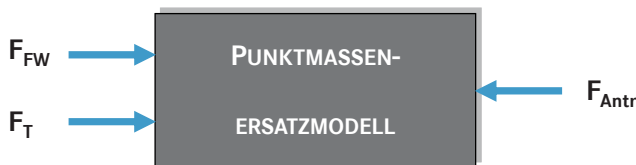
Nach den Grundlagen der Simulation und Modellbildung sollen in diesem Abschnitt die wesentlichen Kernpunkte für die modellbasierte mathematische Abbildung eines Nutzfahrzeugs vorgestellt werden. Die Vorgehensweise orientiert sich an der in Kapitel 2.1 beschriebenen: Die Systemgrenze wird um das technische System „Nutzfahrzeug“ definiert. Die Fahrumgebung und der Fahrer(-regler) sind nicht Bestandteil des technischen Systems. Sie haben als Systemumgebung einen Einfluss auf das System selbst. Die mathematische Modellbildung nutzt Differentialgleichungen sowie bei der Betrachtung des Verhaltens Lösungsvorschriften der Analytik. Nach Abgrenzung und Definition der Funktions-, Struktur- und Verhaltensähnlichkeiten



erfolgt in diesem Kapitel die Bildung eines physikalischen und anschließend eines mathematischen Modells.

### 2.2.1 Längsdynamische Kräftebilanz

Das *physikalische Modell* des Fahrzeugsystems ist gegenüber der Realität reduziert und nimmt daher bewusst Abweichungen in Kauf. Für die Abbildung der längsdynamischen Eigenschaften werden mit Hilfe des sogenannten Punktmassenersatzmodells sowohl Zugfahrzeug als auch die Kombination mit einem Anhänger/Auflieger auf einen bewegten Antriebsstrang reduziert, dem die Parameter des Gesamtfahrzeugs zugeordnet werden [33, 43]. Die Parameter (z. B. Masse, Rollwiderstandsbeiwert, Luftwiderstandsbeiwert, Fläche, ...) orientieren sich hierbei an den Kräften in Längsrichtung. Das Fahrzeug wird als massebehaftetes Volumen angenommen, dessen Zustandsgrößen (z. B. Geschwindigkeit, Antriebskraft, ...) zeitabhängig berechnet werden. Nach Abbildung 2.5 können mit Hilfe des Punktmassenersatzmodells die Kräfte in Längsrichtung berechnet werden. Das Kräftegleichgewicht ist hierbei durch die Zug- oder Antriebskraft  $F_{\text{Antr}}$ , die Trägheitskraft  $F_T$  und die restlichen Fahrwiderstandskräfte  $F_{\text{FW}}$  beschrieben.

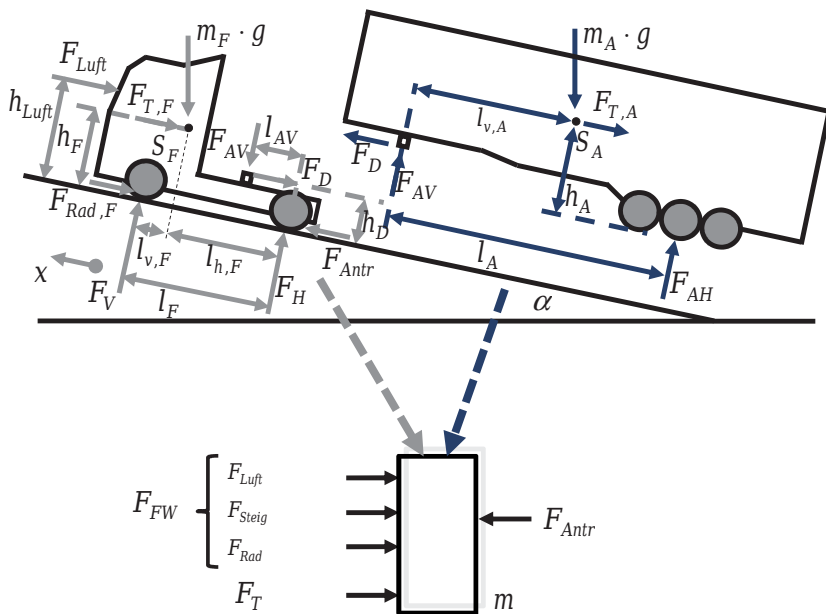


**Abb. 2.5:** Punktmassenersatzmodell, nach [33] und [43]

Für die Berechnung von Fahrleistung und Verbrauch ergeben diese Vereinfachungen keine nennenswerte Auswirkung auf die Energiebilanz [83]. Das *Punktmassenersatzmodell* hat den weiteren Vorteil, dass die zahlreichen Variationen aus Zugfahrzeug und Anhänger nicht explizit abgebildet werden müssen. Fahrdynamische Berechnungen (z. B. Kurvenfahrten mit Schräglauf der einzelnen Räder) sind mit diesem Modell allerdings nicht berechenbar. Neben der längsdynamischen Kräftebilanz müssen der Antriebsstrang, bestehend aus Verbrennungsmotor, Getriebe und Nebenaggregaten sowie hybride Antriebsformen modelliert und mathematisch beschrieben werden.

In Abbildung 2.6 ist das *Ersatzmodell* für einen Sattelzug mit den entsprechenden Schnittkräften veranschaulicht. Die *Fahrwiderstandskraft*  $F_{FW}$  sei hier nach Gleichung (2.2) als die Summe der Widerstandskräfte aus den Anteilen von Luftwiderstand  $F_{Luft}$ , steigungsbedingtem Widerstand  $F_{Steig}$  und Radwiderstand  $F_{Rad}$  beschrieben. Die *Antriebskraft*  $F_{Antr}$  definiert sich als die auf die Straße übertragene Kraft des Sattelzugs.

$$F_{FW} = F_{Luft} + F_{Steig} + F_{Rad} \quad (2.2)$$



**Abb. 2.6:** Kräfte an einem Sattelzug (oben, nach [5]) und nach Anwendung des Punkt-massenersatzmodells (unten), nach [97]

Die *Radwiderstandskraft*  $F_{Rad}$  ist definiert als die Summe aller Widerstandskräfte am rollenden Rad, zu denen Walk-, Luft-, Schwall-, Schlupf- und Schräglaufwiderstand gehören. Der Hauptanteil davon ist die Walkwiderstandskraft, die linear mit der Radlast zusammenhängt [83]. Bei Nutzfahrzeugen besteht im Vergleich zu Personenkraftwagen die Besonderheit, dass der Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$ , der im Wesentlichen von Radlast,

Fahrgeschwindigkeit, Reifentyp, Reifenluftdruck und Reifentemperatur sowie der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche abhängt, durch die möglichen Gewichtsunterschiede zwischen leerem und beladenem Fahrzeug um bis zu Faktor 3 variieren kann.

Die *Luftwiderstandskraft*  $F_{Luft}$  bestimmt sich aus dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$ , der Fahrzeugstirnfläche  $A$ , der Luftdichte  $\rho_L$ , dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit  $v_{Anstr}$  und dem Anströmwinkel der Luft. Herrscht Windstille, so kann die Anströmgeschwindigkeit  $v_{Anstr}$  mit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  gleich gesetzt werden.

Der *Steigungswiderstand* berechnet sich aus dem Steigungswinkel  $\alpha$ , der Fahrzeugmasse  $m$ , sowie der Erdbeschleunigung  $g$ .

Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich die folgenden Gleichungen.

$$m = m_F + m_A \quad (2.3)$$

$$F_F = m_F \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

$$F_F = F_V + F_H \quad (2.5)$$

$$F_A = m_A \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.6)$$

$$F_A = F_{AV} + F_{AH} \quad (2.7)$$

$$F_{T,F} = m_F \cdot a \quad (2.8)$$

$$F_{T,A} = m_A \cdot a \quad (2.9)$$

$$F_V = \frac{m_F \cdot g}{l_F} \cdot (l_{h,F} \cdot \cos(\alpha) - h_F \cdot \sin(\alpha)) + F_{AV} \cdot \frac{l_{AV}}{l_F} - F_{T,F} \cdot \frac{h_F}{l_F} - F_D \cdot \frac{h_D}{l_F} - F_{Luft} \cdot \frac{h_{Luft}}{l_F} \quad (2.10)$$

$$F_H = \frac{m_F \cdot g}{l_F} \cdot (l_{v,F} \cdot \cos(\alpha) + h_F \cdot \sin(\alpha)) + F_{AV} \cdot \frac{l_F - l_{AV}}{l_F} + F_{T,F} \cdot \frac{h_F}{l_F} + F_D \cdot \frac{h_D}{l_F} + F_{Luft} \cdot \frac{h_{Luft}}{l_F} \quad (2.11)$$

$$F_{AV} = \frac{m_A \cdot g}{l_A} \cdot ((l_A - l_{v,A}) \cdot \cos(\alpha) - h_A \cdot \sin(\alpha)) - F_{T,A} \cdot \frac{h_A}{l_A} + F_D \cdot \frac{h_D}{l_A} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
F_{AH} &= \frac{m_A \cdot g}{l_A + h_D \cdot f_{R,AH}} \cdot (l_{v,A} \cdot \cos(\alpha) + (h_A - h_D) \cdot \sin(\alpha)) \\
&\quad + F_{T,A} \cdot \frac{h_A - h_D}{l_A + h_D \cdot f_{R,AH}}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$F_{\text{Rad},i} = F_i \cdot f_{R,i} \quad i \in \{V,H,AH\} \tag{2.14}$$

$$F_{\text{Rad}} = \sum F_{\text{Rad},i} \quad i \in \{V,H,AH\} \tag{2.15}$$

$$F_{\text{Luft}} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2 \tag{2.16}$$

$$F_{\text{Steig}} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \tag{2.17}$$

Dabei beinhaltet der Radwiderstand  $F_{\text{Rad},i}$  alle Räder einer Achse oder Achsanordnung. Die Gleichung für den Luftwiderstand gilt bei Anströmung direkt von vorne (d. h. Anströmwinkel = 0).

Nach Abbildung 2.6 gilt am Punktmassenersatzmodell das Kräftegleichgewicht. Bei einer Differenz zwischen  $F_{\text{Antr}}$  und  $F_{\text{FW}}$  ergibt sich eine Beschleunigung des Fahrzeugs, die durch eine *Trägheitskraft*  $F_T$  dargestellt werden kann. Diese besteht aus einem translatorischen und einem rotatorischen Anteil. Der translatorische Anteil steht für die Beschleunigung der Fahrzeugmasse, während der rotatorische Anteil die Drehzahländerung der rotierenden Teile berücksichtigt. Das Motormoment bewirkt eine Winkelbeschleunigung des Motors, des Antriebsstrangs und der Antriebsräder und stützt den verbleibenden Teil des Moments über die Aufstandsflächen der Antriebsräder als Antriebskraft an der Straße ab. Dadurch kommt es zur translatorischen Beschleunigung des Fahrzeugs und zur rotatorischen Beschleunigung der nicht angetriebenen Räder. Aus diesem Grund sind für die Berechnung der Trägheitskraft ausschließlich die nicht angetriebenen Räder zu betrachten. Die Trägheiten der Antriebsräder werden in der Kräfte- bzw. Momentenbilanz des Antriebsstrangs aufgeführt.

Das *Massenträgheitsmoment*  $J_{\text{n.a.Raeder}}$  ergibt sich somit durch Berücksichtigung der Trägheitsmomente der nichtangetriebenen Räder.  $r_{\text{dyn}}$  bezeichnet den dynamischen Radhalbmesser.

$$F_T = -F_{\text{Antr}} - F_{\text{FW}} \tag{2.18}$$

$$F_T = m \cdot \dot{v} + \frac{J_{\text{n.a.Raeder}}}{r_{\text{dyn}}^2} \cdot \dot{v} \tag{2.19}$$

Damit ergibt sich für die Antriebskraft  $F_{\text{Antr}}$  des Sattelzugs folgende Gleichung

$$F_{\text{Antr}} = -\left(\sum F_i \cdot f_{R,i} + \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha)\right) + \left(m + \frac{J_{\text{n.a.Raeder}}}{r_{\text{dyn}}^2}\right) \cdot \dot{v} \quad i \in \{\text{V,H,AH}\} \quad (2.20)$$

## 2.2.2 Modellierung des Antriebsstrangs

Die Bestimmung der Betriebspunkte des Verbrennungsmotors sowie die Berechnung seines Leistungs- und Energiebedarfs ist im Regelfall die hauptsächliche Aufgabe bei der Durchführung einer längsdynamischen Simulation. Aus diesen Ergebnissen kann der Kraftstoffverbrauch nach Durchführung einer Fahraufgabe ermittelt werden.

Bei der *Modellbildung des Verbrennungsmotors* sind sowohl mechanische, thermodynamische, strömungsmechanische als auch chemische Modelle notwendig, die den technischen Prozess des Verbrennungsmotors beschreiben [76]. Eine deutliche Vereinfachung des Modellierungsaufwands ergibt sich in der Verwendung von Kennfeldern, die durch Vermessung an Prüfständen erfolgen kann. [83] benennt zwei Arten einer auf den Kraftstoffverbrauch reduzierten Beschreibung des Verbrennungsmotors durch ein Verbrauchsmodell und ein Drehmomentmodell.

Das *Verbrauchsmodell*, das in quasistationären Simulationen eingesetzt wird, berechnet u. a. aus der Motordrehzahl  $n_{\text{VKM}}$  und dem Motordrehmoment  $M_{\text{VKM,e}}$  den Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_K$ . Das *Drehmomentmodell* als bevorzugtes Modell für dynamische Simulationen berechnet aus der Motordrehzahl  $n_{\text{VKM}}$  und der Fahrpedalstellung  $FP$  über das Motorkennfeld und die Fahrpedalkennlinie das angeforderte Motordrehmoment  $M_{\text{VKM,e}}$ .

Die *effektive Leistung*  $P_{\text{VKM,e}}$  an einem beliebigen Betriebspunkt des Verbrennungsmotors errechnet sich aus dem Produkt von Motordrehmoment  $M_{\text{VKM,e}}$  [Nm] und Drehfrequenz  $f_{\text{VKM}}$  [1/s].

$$P_{\text{VKM,e}} = M_{\text{VKM,e}} \cdot \omega_{\text{VKM}} = M_{\text{VKM,e}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{VKM}} \quad [\text{W}] \quad (2.21)$$

Der *effektive Mitteldruck*  $p_{\text{m,e}}$  [bar] ergibt sich aus dem Quotienten des effektiven Motormoments  $M_{\text{VKM,e}}$  [Nm] und dem Gesamthubvolumen des

Motors  $V_H$  [m<sup>3</sup>]. Für einen 4-Takt-Motor ergeben sich nach [7]  $i = 0,5$  Arbeitsspiele pro Umdrehung.

$$p_{m,e} = \frac{M_{VKM,e} \cdot 2 \cdot \pi}{V_H \cdot i} \cdot 10^{-5} = \frac{M_{VKM,e} \cdot 4 \cdot \pi}{V_H} \cdot 10^{-5} \quad [\text{bar}] \quad (2.22)$$

Nach [7] unterscheidet man zwischen einem inneren, effektiven und mechanischen Wirkungsgrad. Die Berechnung der ersten beiden Wirkungsgrade geht von der Energie aus, die im Kraftstoff gespeichert ist. Die durch den Kraftstoff zugeführte Energie  $E_K$  pro Zeit  $t$  ist mit Hilfe des Heizwertes  $H_i$  definiert als

$$\frac{dE_K}{dt} = \dot{m}_K \cdot H_i \quad [\text{W}] \quad (2.23)$$

Der *Wirkungsgrad* betrachtet die Motorleistung  $P_{VKM,e}$  als Nutzen und die zugeführte Kraftstoffenergie pro Zeit als Aufwand. Für den effektiven Wirkungsgrad  $\eta_e$  ergibt sich die folgende Beziehung:

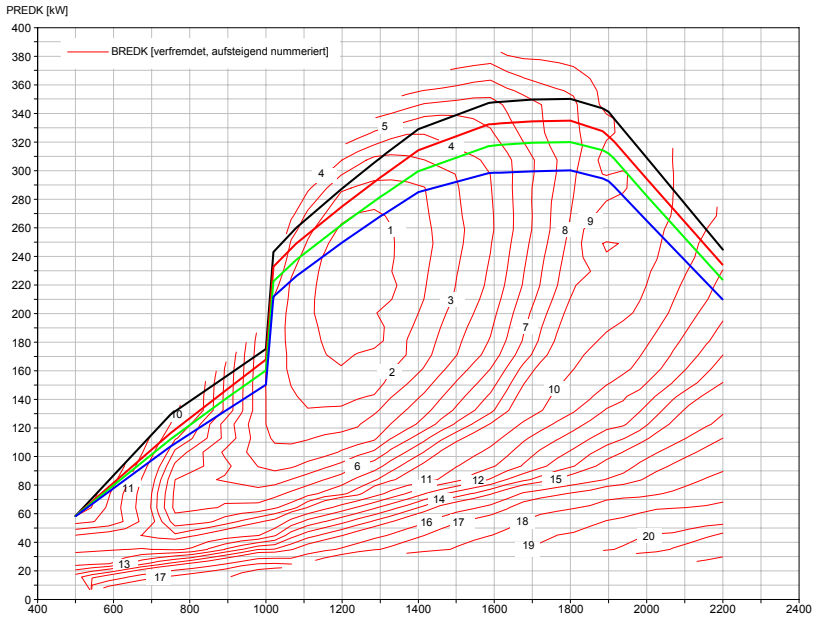
$$\eta_e = \frac{P_{VKM,e}}{\dot{m}_K \cdot H_i} \quad [-] \quad (2.24)$$

Zur Vergleichbarkeit verschiedener Motoren wird der Kraftstoffverbrauch auf die innere Leistung  $P_{VKM,i}$  oder die effektive Leistung bezogen. Der *effektive spezifische Kraftstoffverbrauch*  $b_e$  ergibt sich nach [78] als Quotient aus zugeführtem Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_K$  und effektiver Motorleistung  $P_{VKM,e}$ .

$$b_e = \frac{\dot{m}_K}{P_{VKM,e}} = \frac{1}{\eta_e \cdot H_i} \quad [\text{g/kWh}] \quad (2.25)$$

Der Kraftstoffbedarf von Verbrennungsmotoren wird über verschiedene Arten von Kennfeldern angegeben. Die Fischhakenkurve [76] stellt den effektiven spezifischen Kraftstoffverbrauch  $b_e$  über dem effektiven Mitteldruck  $p_{m,e}$  in Abhängigkeit des Luftverhältnisses  $\lambda$  dar. Am gebräuchlichsten ist allerdings das Muscheldiagramm nach Abbildung 2.7, das den spezifischen Kraftstoffverbrauch  $b_e$  über den effektiven Mitteldruck  $p_{m,e}$  oder die effektive Leistung  $P_{VKM,e}$  und die Drehzahl des Verbrennungsmotors  $n_{VKM}$  darstellt.

Der Antriebsstrang eines konventionellen Kraftfahrzeugs setzt sich nach [101, 102, 128] neben dem Verbrennungsmotor aus Drehzahlwandlern (z. B. Kupplungen) und Drehmomentwandlern (z. B. Getriebe, Verteilergetriebe oder Antriebsräder) zusammen. Für deren modellbasierte Abbildung werden in der längsdynamischen Betrachtung wieder bewusst Vereinfachungen verwendet, die kaum Auswirkungen auf die Berechnung von Fahrleistung



**Abb. 2.7:** Muschediagramm eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors mit Volllastkennlinien verschiedener Motorkonfigurationen, x-Achse: Motordrehzahl  $n_{VKM}$  [1/min] [29]

und Verbrauch haben. Das mechanische Ersatzmodell geht von einem auf eine Punktmasse reduzierten Fahrzeug aus. Elastizitäten werden nicht berücksichtigt. Das starr gekoppelte Antriebsstrangmodell besitzt einen Freiheitsgrad, nämlich die Drehung um die Rotationsachse. Somit kann man nach [125] unter Berücksichtigung der Trägheitsmomente einzelner Systemkomponenten einen Bezug des Drehmoments am Verbrennungsmotor  $M_{VKM,e}$  zum Antriebsmoment an den Rädern  $M_{Antr}$  herstellen. Bei dieser Betrachtung ist der Leistungsbedarf der Nebenaggregate zunächst noch nicht berücksichtigt.

Es ergeben sich bei geschlossener Kupplung und unter Vernachlässigung des Radschlupfes folgende Beziehungen [125]:

$$M_{Antr} = -M_{FW} - M_T \quad (2.26)$$

$$M_{Antr} = M_{VKM,e} \cdot \eta_{Triebstrang} \cdot i_{G,i} \cdot i_{Achse} - \frac{J_{Antr,i}}{r_{dyn}} \cdot \dot{\vartheta} \quad (2.27)$$

$$\omega_{\text{VKM}} = \frac{v}{r_{\text{dyn}}} \cdot i_{\text{G},i} \cdot i_{\text{Achse}} \quad (2.28)$$

Die Berechnung des Trägheitsmomentes des Antriebsstrangs  $J_{\text{Antr},i}$  basiert auf den Trägheitsmomenten seiner Einzelkomponenten. Dabei sind die jeweiligen Übersetzungsverhältnisse  $i_n$  entsprechend zu beachten. Die Trägheitsmomente von Motor  $J_{\text{VKM}}$ , Kupplung  $J_{\text{K}}$ , Getriebe  $J_{\text{G}_i}$  (mit  $i$  für den jeweiligen Gang), Antriebswellen und Differential  $J_{\text{Antr},\text{Diff}}$  und der angetriebenen Räder  $J_{\text{Antriebsraeder}}$  ergeben zusammen mit der Achsübersetzung  $i_{\text{Achse}}$  und der Getriebeübersetzung  $i_{\text{G}_i}$  das Trägheitsmoment des Antriebsstrangs  $J_{\text{Antr},i}$ :

$$J_{\text{Antr},i} = J_{\text{Antriebsraeder}} + i_{\text{Achse}}^2 \cdot J_{\text{Antr},\text{Diff}} + i_{\text{Achse}}^2 \cdot i_{\text{G},i}^2 \cdot (J_{\text{VKM}} + J_{\text{K}} + J_{\text{G}_i}) \quad (2.29)$$

Die Formel enthält Vereinfachungen:

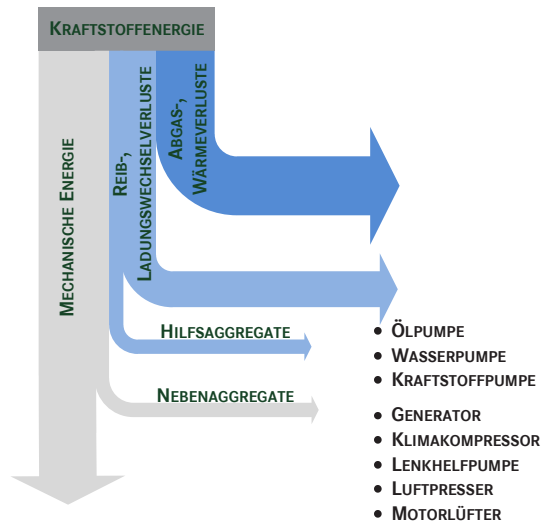
1. Das Trägheitsmoment der rotierenden Getriebeteile unterliegt nicht vollständig der Vervielfachung durch die Getriebeübersetzung, sondern nur die mit der Eingangswelle starr verbundenen Teile. Gleiches ist für das Differenzial gegeben (Ausnahme: Geradeausfahrt).
2. An den angetriebenen Achsen laufen die Räder unter Schlupf, weswegen sie schneller drehen, als es der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht. Die in Fahrzeugbewegung umgesetzte Leistung reduziert sich aufgrund der gegenüber der Reifenumfangsgeschwindigkeit geringeren Fahrzeuggeschwindigkeit.

### 2.2.3 Beschreibung der Nebenaggregate

Die *Hilfsaggregate* Ölpumpe, Wasserpumpe, Motorlüfter und Kraftstoffpumpe sowie die *Nebenaggregate* Generator, Lenkhilfpumpe, Luftpresseur und Klimakompressor haben sehr vielfältige Aufgaben. Sie reichen nach [71] von der Sicherstellung der mechanischen Funktion des Verbrennungsmotors durch Kühlung und Förderung von Schmier- und Kraftstoffen über die elektrische Energieversorgung des Bordnetzes bis zum Betrieb von Komfort- und Sicherheitseinrichtungen (z. B. Lenkunterstützung oder Klimatisierung).

Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Funktions- und Energiearchitekturen können heutzutage die Begriffe Neben- und Hilfsaggregate nicht mehr eindeutig zugeordnet werden. Waren früher Hilfsaggregate in ihrer Funktion dem Verbrennungsmotor zugeordnet und für die





**Abb. 2.8:** Sankey-Diagramm der Energieverteilung im Nutzfahrzeug

Gewährleistung dessen Betriebs zuständig, so übernehmen heutzutage Nebenaggregate, die ursprünglich ausschließlich für Sicherheit und Komfort konzipiert waren, auch Hilfsfunktionen für den Verbrennungsmotor (z. B. Bereitstellung elektrischer Energie zur Funktionserfüllung des Motorsteuergeräts). Daher wird oft für alle motornahen Aggregate der Begriff Nebenaggregate verwendet. Diese Bezeichnung wird in dieser Arbeit ebenfalls verwendet.

Die *Anbindung der Nebenaggregate* an den Verbrennungsmotor erfolgt in der Regel starr. Die Übertragung der Antriebsleistung geschieht dabei über einen Riementrieb oder über Zahnräder, die ein definiertes Übersetzungsverhältnis vorgeben. Das Übersetzungsverhältnis der Nebenaggregate ist in der Regel  $i_{NA} \geq 1$ . Die Auslegung der Energiewandler orientiert sich nach [100] an dem sogenannten Worst-Case-Szenario, das eine ausreichende Energieversorgung bei maximaler Leistungsaufnahme der Energieverbraucher bei allen Drehzahlen und Lastzuständen der Verbrennungskraftmaschine sicherstellen soll. Durch das feste Übersetzungsverhältnis liegt der Auslegungsfall meist bei geringen Motordrehzahlen (z. B. Motorleerlauf). Werden keine oder eine geringere Endenergie benötigt, können einige der mechanisch fest gekoppelten Aggregate durch Magnetkupplungen abgeschaltet oder über Viskokupplungen drehzahlregelt werden.

Die Leistung der Nebenaggregate in der jeweiligen Form der Endenergie berechnet sich nach [99] aus dem Produkt von Kraft- und Bewegungsgröße. Für verschiedene Energieformen gilt:

$$P_{\text{el}}(t) = I(t) \cdot U(t) \quad [\text{A} \cdot \text{V} = \text{W}] \quad (2.30)$$

$$P_{\text{mech, transl}}(t) = F(t) \cdot v(t) \quad [\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{W}] \quad (2.31)$$

$$P_{\text{mech, rot}}(t) = M(t) \cdot \omega(t) \quad [\text{Nm} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \text{W}] \quad (2.32)$$

$$P_{\text{hydr, inkompr}}(t) = \dot{V}(t) \cdot p(t) \quad [\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \text{Pa} = \text{W}] \quad (2.33)$$

$$P_{\text{th, konv}}(t) = \dot{m}(t) \cdot h_s(t) \quad [\frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{W}] \quad (2.34)$$

Die elektrische Leistung  $P_{\text{el}}$  ist dabei das Produkt des elektrischen Stroms  $I$  und der elektrischen Spannung  $U$ . Die translatorische mechanische Leistung  $P_{\text{mech, transl}}$  berechnet sich aus den Größen Kraft  $F$  und Geschwindigkeit  $v$ . Um die rotatorische mechanische Leistung  $P_{\text{mech, rot}}$  zu berechnen, benötigt man die Größen Drehmoment  $M$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Die hydraulische Leistung  $P_{\text{hydr, inkompr}}$  ergibt sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der Druckdifferenz  $p$ . Für den Wärmetransport durch Konvektion berechnet man die thermische Leistung  $P_{\text{th, konv}}$  aus Massenstrom  $\dot{m}$  und spezifischer Enthalpie  $h_s$  [99].

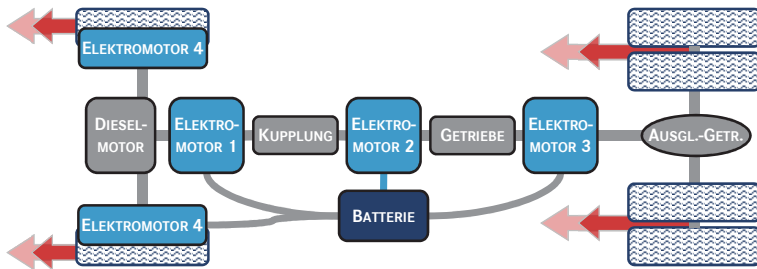
## 2.2.4 Hybride Antriebssysteme

Ein *Hybridelektro kraftfahrzeug* ist gemäß der EG Richtlinie 46/2007 als „... ein Fahrzeug mit mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei verschiedenen Energiespeichersystemen (im Fahrzeug) zum Zwecke des Fahrzeugantriebs ...“ definiert [46]. Die Kombinationsmöglichkeiten, die aus dieser Definition hervorgehen, sind sehr vielfältig. Allerdings haben sich nur wenige davon etablieren können. Der heutige Stand der Technik unterscheidet drei Prinzipien, nach denen die Leistungsübertragung der beiden Energiewandler stattfindet [91]:

1. *Serieller Hybrid*: Bei diesem Prinzip ist der Verbrennungsmotor mechanisch von der Antriebsachse entkoppelt und treibt einen elektrischen Generator an. Der Elektromotor erbringt die geforderte Leistung für den Antrieb des Fahrzeugs.

2. *Paralleler Hybrid*: Hier wirken beide Energiewandler mechanisch auf den Antriebsstrang. Durch Momenten- oder Drehzahladdition summiert sich die Leistung beider Antriebsaggregate zur abgegebenen Antriebsleistung.
3. *Leistungsverzweigter Hybrid*: Der sogenannte Mischhybrid ist eine Kombination aus serielllem und parallelem Hybrid. In Abhängigkeit des Betriebszustands kann der Verbrennungsmotor nach dem seriellen Prinzip den Elektromotor über einen Generator mit elektrischer Leistung versorgen oder nach dem parallelen Prinzip den Antriebsstrang mechanisch antreiben. Die Mischform ist die vorwiegend vorherrschende Betriebsart.

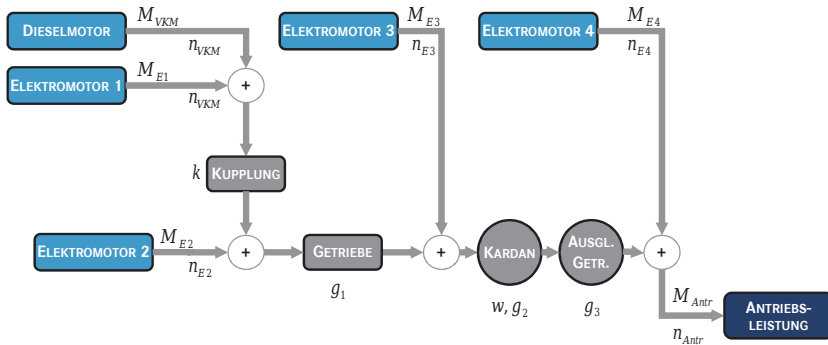
Des Weiteren wird ein Hybridsystem nach seiner Funktionalität unterschieden, was in der Regel mit der Leistung des Elektromotors verbunden ist. Nach [111] wird eine Einteilung in die Klassen Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid und Voll-Hybrid vorgenommen. Während beim Mikro-Hybrid der Elektromotor keinen Beitrag zum Antrieb leistet und nur zum Starten des Verbrennungsmotors benutzt wird, unterstützt der Elektromotor des Mild-Hybrids bereits die Funktionen Beschleunigen und Bremsen. Beim Voll-Hybrid kann je nach Antriebsprinzip der Elektromotor die gesamte Fahrleistung übernehmen.



**Abb. 2.9:** Antriebsstrangmodell mit möglichen elektrischen Eingriffen, nach [97]

Mit Hilfe des *funktionalen Fahrzeugmodells* in Abbildung 2.9 lassen sich alle parallelen Hybridformen und -anordnungen abbilden. In Abhängigkeit der Positionierung des Elektromotors resultiert dabei eine der vier parallelen Hybridanordnungen P1, P2, P3 und P4. Der Elektromotor befindet sich entweder starr verbunden am Verbrennungsmotor vor der Kupplung

(Elektromotor 1), zwischen Kupplung und Getriebeeingang (Elektromotor 2), an der Getriebeausgangsseite, direkt am Getriebe oder nahe dem Differentialgetriebe (Elektromotor 3), in unmittelbarer Nähe des Rades auf der Antriebswelle oder als Radnabenmotor (Elektromotor 4). Entfällt die mechanische Verbindung zwischen Elektromotor 3 und den Antriebsrädern, so ist damit auch das serielle Hybridprinzip mit einem der Elektromotoren 1 bis 3 sowie dem Elektromotor 4 abgebildet. Der serielle Hybridantrieb wäre ebenfalls durch den Wegfall von Kupplung, Elektromotor 2 und Getriebe zu realisieren, sofern es keinen Durchtrieb zwischen den Elektromotoren 1 und 3 gibt.



**Abb. 2.10:** Antriebsleistung in der hybriden Struktur, nach [97]

Als Basis für die Erstellung der *Energiebilanz im Hybridfahrzeug* gilt die folgende Momentenverteilung nach Abbildung 2.10:

$$M_{Antr} = (((M_{VKM,e} + M_{E1}) \cdot k + M_{E2}) \cdot g_1 + M_{E3}) \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot w + M_{E4} \quad (2.35)$$

Dabei gilt:

$$g_1 = i_G \cdot \eta_G \quad (2.36)$$

$$g_2 = \eta_{Kardan} \quad (2.37)$$

$$g_3 = i_{Diff.} \cdot \eta_{Diff.} \quad (2.38)$$

Da die meisten Fahrzeuge nur einen Elektromotor besitzen, ist das Modell und seine gleichungsbasierte Beschreibung um zwei Steuer- beziehungsweise Parametriergrößen erweitert. Mit Hilfe des Parameters  $k$  (Kupplung) kann festgelegt werden, ob zwischen Verbrennungsmotor sowie Elektromotor 1 einerseits und Getriebe andererseits eine mechanische Leistungsübertragung stattfinden kann. Der Parameter  $k$  ist dabei eine rationale Zahl im Wertebereich zwischen 0 und 1. Der Parameter  $w$  (Kardanwelle) ist eine natürliche Zahl mit den möglichen Werten 0 (Kardanwelle nicht vorhanden) oder 1 (Kardanwelle vorhanden).

Für die Berechnung der Drehzahlen gilt:

$$n_{\text{Antr}} = n_{\text{VKM}/\text{E}_1} \cdot i_{\text{G}}^{-1} \cdot i_{\text{Diff}}^{-1} \quad (2.39)$$

$$= n_{\text{E}_2} \cdot i_{\text{G}}^{-1} \cdot i_{\text{Diff}}^{-1} \quad (2.40)$$

$$= n_{\text{E}_3} \cdot i_{\text{Diff}}^{-1} \quad (2.41)$$

$$= n_{\text{E}_4} \quad (2.42)$$

## 2.2.5 Wirtschaftliche Randbedingungen

Nach Kapitel 1.1 ist der überwiegende Teil der Nutzfahrzeugkunden in der Regel an einem Fahrzeugkauf interessiert, wenn ihm eine technische Systemänderung einen wirtschaftlichen Vorteil bringt. Dieser Vorteil kann sowohl durch Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion als auch durch eine absolvierte Kilometerleistung bzw. ein erreichtes Fahrzeugalter hervorgerufen werden, nach denen das Fahrzeug ersetzt werden muss (wg. Abschreibung, Garantiedauer, Garantiehäufigkeit usw.). Die Kernanforderungen und Kaufkriterien eines Nutzfahrzeugkunden sind mit Qualität/Zuverlässigkeit, Festigkeit/Lebensdauer und Kraftstoffverbrauch/Wirtschaftlichkeit benannt.

In dieser Arbeit soll der Fokus allein auf die Kraftstoffersparnis gerichtet werden. Im Rahmen der Markteinführung des Mercedes-Benz Atego Bluetec Hybrid untersuchte die Daimler AG das Kaufinteresse seiner Kunden [30]. Dabei wurden vier Kundentypen identifiziert:

- Die erste Gruppe an Kunden zeigt weder Kaufbereitschaft, noch sieht sie in einem Hybridfahrzeug Kosten- und Imagevorteile. Sie ist grundsätzlich risikoavers gegenüber neuen Technologien eingestellt.
- Eine weitere Gruppe handelt aufgrund von Restriktionen (z. B. ein-fahrbeschränkte Einsatzgebiete), die sie dazu zwingen, kraftstoff- und emissionsarme Fahrzeuge zu erwerben.

- Ein kleiner Teil der Kunden bildet die Gruppe derjenigen, die aus Umwelt- und Imagegründen emissionsarme Fahrzeuge kaufen und sogar bereit sind, dafür Mehrkosten zu tragen.
- Eine weitere Gruppe von Kunden ist dann kaufbereit, wenn ihre Gesamtkosten (Total Cost of Ownership (TCO)) durch ein verbrauchsarmes Fahrzeug sinken.

Aus der prozentualen Verteilung der Gruppen geht hier allerdings hervor, dass die Wirtschaftlichkeit gegenüber den Umweltaspekten klar im Vordergrund steht. Die Wirtschaftlichkeit generell ist sogleich die zentrale Orientierungsgröße der strategischen Unternehmensplanung [95].

Die *Kosten-Nutzen-Analyse* beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob das Ergebnis (Nutzen) einer Aktion deren Aufwand (Kosten) rechtfertigt. Dabei werden alle Wirkungen mit dem Ziel erfasst, sie zu quantifizieren und in monetären Einheiten auszudrücken. Durch die Monetarisierung ist diese Art der Analyse allerdings nur in der Lage, die Zieldimension „Kosten“ zu berücksichtigen [42].

In Tabelle 2.1 sind die zu betrachtenden monetären und monetarisierbaren Größen sowie intangible (nicht quantifizierbare Größen) aus Sicht eines Fahrzeugherstellers aufgeführt. Für die Integration einer Energiemanagementmaßnahme ist lediglich der relative Vergleich zum bestehenden Fahrzeug relevant. Dies hat den Vorteil, dass einige der zu betrachtenden Größen (z. B. Personalkosten) nicht betrachtet werden müssen, da sie sich durch die Einführung der Maßnahme nicht verändern.

| <b>Wirkungen</b>               |                       |                   |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>intern<br/>(Hersteller)</b> | <b>extern (Kunde)</b> | <b>intangibel</b> |
| Entwicklungskosten             | Investitionskosten    | Fahrkomfort       |
| Komponentenkosten              | Betriebskosten        | Fahrerkondition   |
| Herstellungskosten             | Schadstoffemissionen  | Image Kunde       |
| Servicekosten                  | Geräuschemissionen    | Image Hersteller  |
| Marketingkosten                |                       |                   |
| Verwaltungskosten              |                       |                   |
| Verkaufserträge                |                       |                   |
| Serviceerträge                 |                       |                   |

**Tab. 2.1:** Auswirkungen einer Energiemanagementmaßnahme aus Sicht des Fahrzeugherstellers

Eine *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung* für eine Kundengruppe berücksichtigt die Differenz der Betriebskosten für den Kunden pro Jahr  $\Delta K_{\text{TCO},\text{Jahr}}$  für ein Fahrzeug, das eine verbrauchsreduzierende Maßnahme verbaut hat. Die Integration der Kostenbetrachtung in die längsdynamische Simulation erfolgt hierbei sowohl über die Kostenersparnis für den jährlichen Kraftstoffverbrauch  $\Delta K_{\text{KS},\text{Jahr}}$  als auch über die Investitionskosten  $\Delta K_{\text{I},\text{Jahr}}$ , die für den Erwerb einer Energiemanagementmaßnahme notwendig sind. Der Faktor für die zu erzielende Kraftstoffersparnis  $f_{\text{VR}}$  bestimmt hierbei die monetäre Kostenersparnis durch die Verbrauchersparnis, während die Investitionskosten sich aus den für die verbrauchsreduzierende Maßnahme zusätzlich aufzuwendenden Entwicklungs- ( $K_{\text{E},\text{Fzg.}}$ ) und Komponentenkosten ( $K_{\text{K},\text{Fzg.}}$ ) zusammensetzen.  $f_{\text{VR}}$  ist dabei der Quotient der Kraftstoffverbrauchswerte des bisherigen Fahrzeugs und des Fahrzeugs mit der verbrauchsreduzierenden Maßnahme.

$$\Delta K_{\text{TCO},\text{Jahr}} = \Delta K_{\text{KS},\text{Jahr}} + \Delta K_{\text{I},\text{Jahr}} \quad (2.43)$$

$$\Delta K_{\text{KS},\text{Jahr}} = K_{\text{KS},\text{Jahr}} \cdot f_{\text{VR}} \quad (2.44)$$

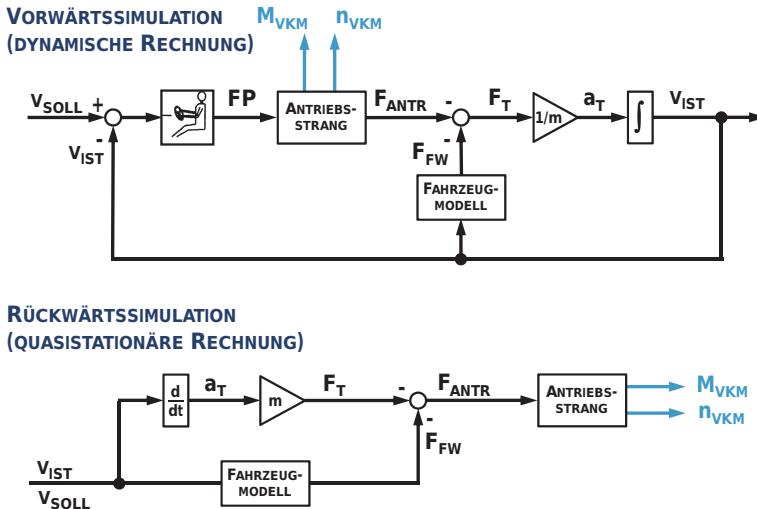
$$\Delta K_{\text{I},\text{Jahr}} = \Delta K_{\text{E},\text{Fzg.}} + \Delta K_{\text{K},\text{Fzg.}} \quad (2.45)$$

Der Parameter  $\Delta K_{\text{TCO},\text{Jahr}}$  eignet sich sehr gut für eine automatisierte Optimierung eines neuen Fahrzeugsystems. Da die Investitionskosten  $\Delta K_{\text{I},\text{Jahr}}$  sich in der Regel gegenläufig zu den Kraftstoffkosten  $\Delta K_{\text{KS},\text{Jahr}}$  verhalten, können die Gesamtkosten durch die Anwendung eines Optimierungsverfahrens minimiert werden. Die Auswahl der Gesamtkosten als Optimierungsgröße schließt aus, dass z. B. bei der Auslegung eines hybriden Antriebsstrangs eine Maximierung des Parameters „Verbrauchersparnis“ dazu führen würde, dass das teuerste und beste technische System dimensioniert wird, das allerdings weit entfernt von einer wirtschaftlichen Lösung für den Kunden liegt.

## 2.2.6 Quasistationäres und dynamisches Verhalten

Die längsdynamische Abbildung des Kraftfahrzeugs resultiert nach Gleichung (2.20) in einer *Bewegungsgleichung*. Durch die Integration eines Fahrerreglers entsteht daraus eine Differentialgleichung. Die Lösung dieser Zusammenhänge ist jeweils nach einem Berechnungsansatz möglich [34, 44]:

- a) Bewegungsdifferentialgleichung: Dynamische Rechnung
- b) Lineare Bewegungsgleichung: Quasistationäre Rechnung



**Abb. 2.11:** Vorwärts- und Rückwärtssimulation zur Lösung der längsdynamischen Bewegungsgleichungen

In Abbildung 2.11 ist die Vorgehensweise der beiden Verfahren dargestellt. In dem auch als zeitdiskrete Vorwärtssimulation bezeichneten Simulationsverfahren wird durch die Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils, das der Soll-Geschwindigkeit entspricht, der Regelprozess eingeleitet. Der Fahrerregler steuert entsprechend der Differenz aus der Soll-Geschwindigkeit und der Ist-Geschwindigkeit über die Vorgabe der Fahrpedalstellung eine Momentenanforderung an den Verbrennungsmotor. Aus den Eigenschaften von Verbrennungsmotor und Antriebsstrang ergeben sich damit das resultierende Motormoment und die Motordrehzahl. Die Ist-Geschwindigkeit für den nächsten Zeitschritt wird durch das Lösen der Differentialgleichung berechnet. Der Motor wird in dieser Methode als Ursache für die Fahrzeugbewegung betrachtet. Die Berechnungsreihenfolge entspricht somit einer Ursache-Wirkungs-Kette, weshalb dieses Verfahren auch als „Ursache-Wirkung-Methode“ bezeichnet wird. Dieses Prinzip kommt dem realen System Fahrer-Fahrzeug-Straße sehr nahe.

Bei der *quasistationären Rechnung* oder Rückwärtssimulation lässt sich der Fahrereinfluss ausblenden. Hier wird vorausgesetzt, dass das Fahrzeug dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil exakt nachfahren wird. Somit entspricht die gegebene Soll-Geschwindigkeit der Ist-Geschwindigkeit. Durch



das Differenzieren des Geschwindigkeitsverlaufs kann die Beschleunigung des Fahrzeugs ermittelt werden. Wird die Beschleunigung in die Bewegungsdifferentialgleichung eingesetzt, so reduziert sich diese auf ein lineares Gleichungssystem. Über die Fahrzeuggeschwindigkeit werden somit die aufzubringende Antriebsstrangleistung, die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors und der Kraftstoffverbrauch berechnet [72]. Die Reihenfolge der Berechnung dreht sich im Vergleich zur dynamischen Simulation um. Daher wird dieses Lösungsverfahren auch als „Wirkung-Ursache-Methode“ bezeichnet.

|           | <b>Vorwärtsrechnung</b>                                   | <b>Rückwärtsrechnung</b>  |
|-----------|---|---|
| Vorteile  | Berücksichtigung des Fahrereinflusses                     | Vergleichbarkeit technischer Konzepte ohne störenden Einfluss des Fahrerreglers |
|           | Abbildung des Zeitverhaltens der Stellglieder             | Niedriger Rechenaufwand   |
|           | Untersuchung von Fahrdynamik und Beschleunigungsverhalten |   |
|           | Abbildung instationären Verhaltens des Antriebsstrangs    |   |
| Nachteile | Hoher Simulations- und Rechenaufwand                      | Ungenauigkeit bei starker Dynamik (z. B. großen Geschwindigkeitsänderungen)     |

**Tab. 2.2:** Vor- und Nachteile der Lösungsansätze, nach [83]

Die Auswahl des geeigneten Lösungsverfahrens hängt stark von der Simulationsaufgabe ab. Die *Vor- und Nachteile der Simulationsverfahren* sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Grundsätzlich eignet sich die ressourcenaufwändigere Vorwärtssimulation für stark dynamische und instationäre Fragestellungen. Die Rückwärtssimulation eignet sich zum Konzeptvergleich von Maßnahmen, die keinen Einfluss auf die Fahrerregelung haben.

Die Regelung der Fahrpedalstellung in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit kann beim Vergleich zweier Fahrzeugkonzepte dazu führen, dass die Fahrmission durch ein anderes

Beschleunigungsverhalten verändert wird. Dies kann dann der Fall sein, wenn einem Fahrzeug weniger Motorleistung zur Überwindung der Trägheit zur Verfügung steht. Es kann nach der Berechnungsvorschrift nicht der geforderten Soll-Geschwindigkeit folgen. Somit könnte die Simulation einer Verbrauchsmaßnahme zunächst nicht zu einer Kraftstoffersparnis, sondern nur zu einer Veränderung der Fahrzeit führen.

Für die Bewertung von Energiemanagementmaßnahmen in ihrer Auswirkung auf Fahrprofile vieler Kunden kann man näherungsweise davon ausgehen, dass sich die Trajektorie<sup>1</sup> der Fahrzeuge durch eine leichte Anpassung der Antriebsleistung kaum verändert. Die Trajektorie eines schweren Nutzfahrzeugs und das Fahrverhalten des Fahrers ist in erster Linie abhängig von Verkehrsfluss, Transportaufgabe, festgelegter Route und Geschwindigkeitsbeschränkungen. Somit ist zur Bewertung des Verbrauchs das quasistationäre Verfahren im Vorteil. Würde man ein dynamisches Verfahren einsetzen, könnte man einen Zeitvorteil auf gefahrenen Routen zusätzlich berücksichtigen, ggf. durch dessen Abbildung mit Hilfe monetärer Größen.

### 2.2.7 Ergebnis: Mathematisches Fahrzeugmodell

Mit Hilfe der mathematischen Beschreibungen aus diesem Unterkapitel steht nach Abbildung 2.4 ein Baustein der Fahrzeugsimulation zur Verfügung: das Fahrzeugmodell, das die mathematische Beschreibung des technischen Systems beinhaltet. Die gleichungsbasierte Darstellung ist dazu geeignet, verschiedene Lösungsverfahren und Einfluss- bzw. Eingangsgrößen zu verwenden. Je nach Art der dafür gewählten Methoden ändert sich das Verhalten des Modells (dynamisch oder quasistationär) und die Art der Ausgangs- bzw. Ergebnisgrößen.

In Abbildung 2.12 ist eine mögliche Abbildung der Nebenaggregate dargestellt. In den jeweiligen Subsystemen sind die Eigenschaften der Aggregate Motorlüfter, Luftpresser, Generator, Lenkhilfpumpe und Klimakompressor abgebildet. Die Subsysteme bestehen jeweils aus Zustandsgrößen und Parametern. Mit Hilfe ihrer Ein- und Ausgangsgrößen erfolgt die Kopplung an die übergeordneten Systeme Motor und Antriebsstrang.

Durch die Modellierung des Nutzfahrzeugs ergeben sich mathematische Gleichungen. Diese können auf die Aufgabenstellung angewendet werden,

---

<sup>1</sup> lat.: Raumkurve, Bahnkurve, hier: v-a-Diagramm des Fahrzeugs

um sie z. B. hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs aufzulösen. Dazu werden ein Lösungsverfahren sowie Parameter und Einflussgrößen für das Fahrzeugmodell benötigt.

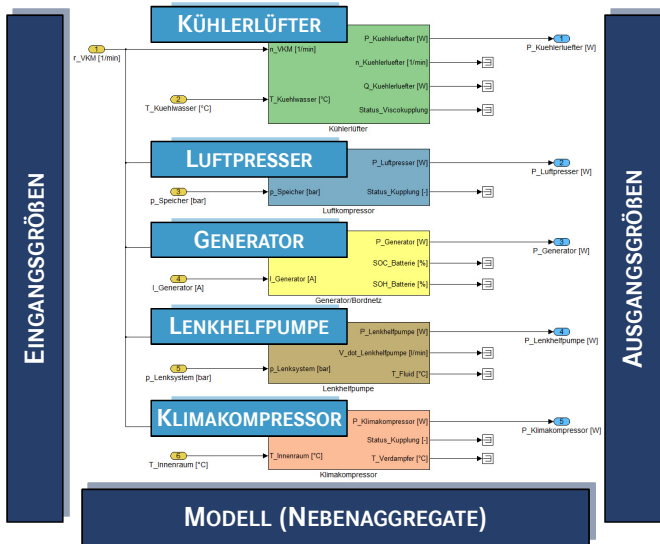


Abb. 2.12: Modellbasierte Abbildung der Nebenaggregate

## 2.3 Mathematische Analyse- und Berechnungsverfahren

Sowohl für die Filterung relevanter Daten aus vorliegenden Messdaten und Fahrzeugsimulationen als auch zur Datenvorverarbeitung basiert die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit auf mathematischen Verfahren.

Methoden aus dem Bereich der deskriptiven Statistik bieten die Möglichkeit, vorliegende zeitlich aufeinanderfolgende Messwerte qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Dabei wird durch eine Verdichtung der Daten ihr Datenumfang verringert. Eine Möglichkeit der zeitunabhängigen Beschreibung von Datenreihen bieten Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Werden diese Verteilungen als Eingangsgrößen einer Simulation zugeführt,

so sind dafür Berechnungsvorschriften notwendig. Diese werden in diesem Unterkapitel vorgestellt.

Die Optimierung freier Parameter ist nach Kapitel 2.2.5 eine geeignete Möglichkeit, um Fahrzeugsysteme wirtschaftlich auf den Kunden auszulegen. Dafür werden hier die Grundlagen der Optimierungsverfahren dargestellt.

Um einen praktischen Bezug zu den Berechnungsabläufen herzustellen, die in Kapitel 4, 5 und 6 durchgeführt werden, sollen in diesem Unterkapitel Berechnungs- und Anwendungsbeispiele die theoretischen Herleitungen verdeutlichen. Weiterhin werden bereits an dieser Stelle Berechnungen durchgeführt, die später für den stochastischen Simulationsansatz benötigt werden. Als Berechnungsgrößen werden physikalische Werte (u. a. elektrische Leistungs-, Drehzahl- und Wirkungsgradverläufe) verwendet, die mittels geeigneter Messeinrichtungen an einem Erprobungsfahrzeug ermittelt worden sind.

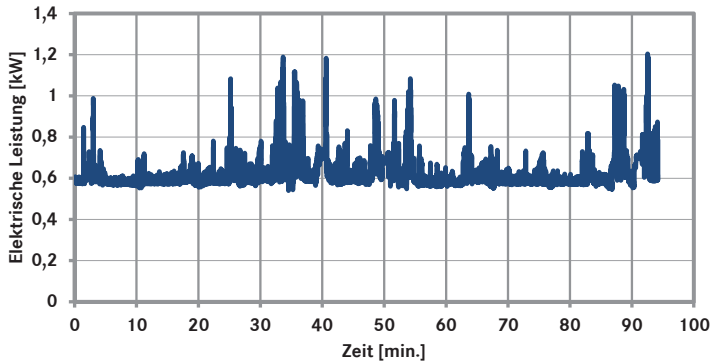
### 2.3.1 Merkmalswerte der deskriptiven Statistik

Durch die Anwendung der *deskriptiven Statistik* versucht man, empirische Daten übersichtlich darzustellen und zu ordnen. Dies geschieht überwiegend durch Tabellen, Grafiken sowie grundlegende Kenngrößen [113]. Der Einsatz dieser Verfahren für eine große Anzahl an Mess- und Simulationsdaten eines zu untersuchenden Kraftfahrzeugs ist aus mehreren Gründen sinnvoll:

- Über eine Vielzahl von numerischen Werten kann schnell ein Überblick geschaffen werden.
- Mess- oder Datenfehler können identifiziert werden.
- Datenverläufe können quantitativ dargestellt werden.

Die folgenden Gleichungen werden nun begleitend auf eine physikalische Größe angewendet. Diese ist die elektrisch abgegebene Leistung eines Generators  $P_{\text{Gen,el}}$ , die an einem Erprobungsfahrzeug messtechnisch erfasst wurde. Der zeitliche Verlauf der Messgröße ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Die Messdauer beträgt dabei 94,2 Minuten bei einer Abtastrate der Messdaten von 1 Hz. Dies entspricht einer Anzahl von 5652 aufgezeichneten Messwerten.

In Abbildung 2.14 sind die absoluten sowie die relativen Häufigkeiten der gemessenen Generatorleistung dargestellt.



**Abb. 2.13:** Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leistungsabgabe des Generators

Die wichtigsten Kenngrößen sind die *Lagemaße* und die *Streuungsmaße* [25]. Das Lagemaß gibt eine zentrale Tendenz einer Häufigkeitsverteilung wieder, während das Streuungsmaß die Streuung oder Dispersion einer Verteilung beschreibt. Zu den Lagemaßen zählen die Kenngrößen Mittelwert, Median, Quantile und Modus. In die Gruppe der Streuungsmaße gehören Standardabweichung, Varianz, Variationsbreite, Interquartilbereiche und die mittlere absolute Abweichung. Sofern nicht explizit gekennzeichnet, entstammen die folgenden Definitionen den Literaturquellen [8, 108, 113, 131].

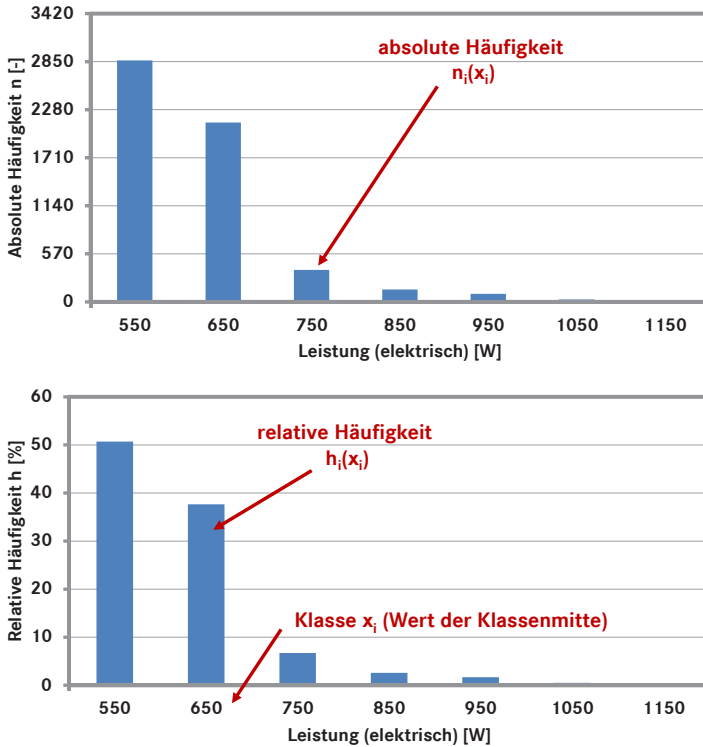
Der *arithmetische Mittelwert*  $\bar{x}$  ist ein quantitatives Merkmal für die Schwerpunktlage. Für  $m$  Messwerte gilt:

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (2.46)$$

Der Mittelwert berücksichtigt sowohl die absolute Häufigkeit (Anzahl der aufgetretenen Werte) als auch die absoluten Zahlenwerte (Wertigkeiten) aller Messwerte. Aus diesem Grund kann der Mittelwert selbst Werte annehmen, die in der Beobachtung nicht oder nur selten vorkommen.

Im vorliegenden Beispiel beträgt der arithmetische Mittelwert

$$\bar{P}_{\text{Gen,el}} = \frac{1}{5652} \sum_{i=1}^{5652} P_{\text{Gen,el}_i} = 627,7 \text{ W} \quad (2.47)$$



**Abb. 2.14:** Absolute und relative Häufigkeiten der elektrischen Leistungsabgabe des Generators, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_i} = 100 \text{ W}$

Das Minimum sowie das Maximum der gemessenen elektrischen Leistung beträgt jeweils

$$P_{\text{Gen,el}_{\min}} = 540,7 \text{ W} \quad (2.48)$$

$$P_{\text{Gen,el}_{\max}} = 1190,7 \text{ W} \quad (2.49)$$

Werden Werteklassen (z. B. 500 ... 505 W) betrachtet, so ist hier das gewogene arithmetische Mittel zu verwenden, unter Berücksichtigung der relativen oder absoluten Häufigkeiten  $h(x_j)$  oder  $n(x_j)$ . Das *gewogene arithmetische Mittel*  $\bar{x}$  ist definiert als:

$$\bar{x} = \sum_{j=1}^m x_j \cdot h(x_j) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j \cdot n(x_j) \quad (2.50)$$

Wenn die Häufigkeiten aller Messwerte deutlich ungleich verteilt sind, können beide Mittelwerte zu falschen Annahmen verleiten [66]. Die Häufigkeitsverteilungen sind daher durch vier Werte gekennzeichnet: Modus, Median sowie 1. und 3. Quartil. Der *Modus*  $x_{mod}$  ist mit

$$x_{mod} = \left\{ x_j \mid \max_j h(x_j) \right\} \quad j = 1, \dots, m \quad (2.51)$$

der am häufigsten vorkommende Messwert. Das Vorkommen mehrerer Modi bezeichnet man als mehrdeutig. Der Modus der hier beispielhaft betrachteten elektrischen Generatorleistung beträgt

$$P_{Gen,el,mod} = 540,7W \quad (2.52)$$

Damit entspricht dieser gleichzeitig dem Minimum der elektrischen Leistung  $P_{Gen,el,min}$ .

Der Median und die Quantile beschreiben Eigenschaften, die jeweils aus der empirischen Verteilungsfunktion  $F(x_k)$  resultieren. Für die *Verteilungsfunktion*

$$F(x_k) = \sum_{j=1}^k h(x_j) \quad 0 \leq k \leq m \quad (2.53)$$

repräsentiert das Quantil „... die Merkmalsausprägung, die einem bestimmten relativen Anteil der Verteilungsfunktion entspricht.“ [66]. Das *p-Quantil* ist folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} x_{(p)} &= F^{-1}(p) = F^{-1} \left( \min_x (F(x_{(p)}) \geq p) \right) \\ &= F^{-1} \left( \min_x \sum_{x_j \leq x} f(x_j) \geq p \right) \end{aligned} \quad (2.54)$$

Die Mitte der Häufigkeiten wird als das 0,5-Quantil oder Median bezeichnet, da jeweils 50 % aller Werte kleiner und größer sind. In Abstufung dazu gelten das 0,25- und das 0,75-Quantil als das 1. und 3. Quartil. Hier sind jeweils 25 % bzw. 75 % aller Werte kleiner als das Quartil. Der Abstand zwischen den Quartilen wird als *Interquartilsabstand* (IQA) bezeichnet, der die Verteilungen der Werte skizziert. Er ist definiert als:

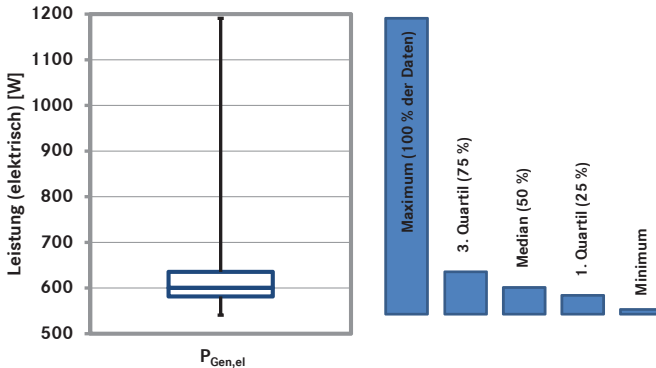
$$IQA = x_{(0,75)} - x_{(0,25)} \quad (2.55)$$

Aus den Abständen zwischen den Quartilen lässt sich der *Quartilskoeffizient der Schiefe* (QS) ermitteln. Er berechnet sich als Quotient der Differenzen

nach

$$QS = \frac{x_{(0,5)} - x_{(0,25)}}{x_{(0,75)} - x_{(0,5)}} \quad (2.56)$$

Für  $QS = 1$  gilt dabei Symmetrie, für  $QS < 1$  eine linkssteile Verteilung und für  $QS > 1$  eine rechtssteile Verteilung. Die Kenngrößen für die elektrische Generatorleistung finden sich in Tabelle 2.3. Abbildung 2.15 zeigt einen Box-Whisker-Plot der elektrischen Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$  mit den Kenngrößen Maximum, Minimum und den Quartilen.



**Abb. 2.15:** Box-Whisker-Plot mit Kenngrößen der elektrischen Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$

Als weiterer Wert zur Beschreibung der Verteilung von Werten gilt die Varianz. Diese ist definiert als arithmetisches Mittel der quadratischen Abweichungen vom arithmetischen Mittel:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2 \quad (2.57)$$

Die positive Quadratwurzel der Varianz nennt man *Standardabweichung*. Es gilt hier:

$$\sigma = +\sqrt{\sigma^2} \quad (2.58)$$

Der Wert der Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung einer Zufallsvariablen um ihren Erwartungswert  $\mu$ . Für eine Normalverteilung kann man angeben, welcher Anteil aller Werte innerhalb des Streubands  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  liegt. Dieser beträgt 68,27%. Es gilt für den *Variationskoeffizienten*:

$$|\nu| = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.59)$$



Dies setzt allerdings voraus, dass nur Mittelwerte  $\bar{x}$  vorkommen, die ungleich Null sind.

Für das hier verwendete Beispiel finden sich alle ermittelten Kenngrößen in Tabelle 2.3.

| Kenngröße                      | Wert                   |
|--------------------------------|------------------------|
| $P_{\text{Gen,el}}$            | 627, 7 W               |
| $P_{\text{Gen,el}(0,25)}$      | 581, 7 W               |
| $P_{\text{Gen,el}(0,5)}$       | 600, 4 W               |
| $P_{\text{Gen,el}(0,75)}$      | 635, 5 W               |
| $IQA_{P_{\text{Gen,el}}}$      | 53, 8 W                |
| $QS_{P_{\text{Gen,el}}}$       | 0, 53                  |
| $\sigma_{P_{\text{Gen,el}}}^2$ | 6320, 3 W <sup>2</sup> |
| $\sigma_{P_{\text{Gen,el}}}$   | 79, 5 W                |
| $\nu_{P_{\text{Gen,el}}}$      | 0, 13                  |

**Tab. 2.3:** Kenngrößen des elektrischen Leistungsverlaufs des Generators

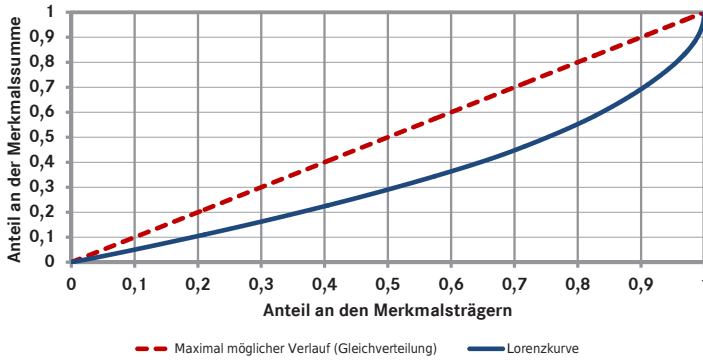
Weitere Definitionen neben den absoluten und relativen Häufigkeitsverteilungen  $n(x_j)$  und  $h(x_j)$  sind die anteilige Merkmalssumme  $G(x_j)$  und die relative Merkmalssumme  $g(x_j)$ . Diese sind vor allem bei Differenzengrößen interessant, die lediglich (zeitliche) Änderungen wiedergeben. Es gilt mit  $G$  als Summe aller Beobachtungswerte:

$$G(x_j) = \sum_{j=1}^m x_j \quad (2.60)$$

$$g(x_j) = \frac{G(x_j)}{G} \quad (2.61)$$

Die *Lorenzkurve* (Abbildung 2.16) veranschaulicht das Ungleichverteilungsmaß innerhalb der Verteilung. Sie beschreibt die Abweichung zwischen einem ideal gleichverteilten Merkmal und dem beobachteten<sup>1</sup>. Die relative Merkmalssumme  $g(x_j)$  wird als Lorenzkurve aufgetragen. Wenn alle Messungen denselben Wert liefern, ergibt sich eine Gerade durch den Ursprung mit dem Anstieg 1 (Gleichverteilungsgerade). Die Fläche  $F_K$  zwischen

<sup>1</sup> Mit einem gleichverteilten Merkmal ist hier gemeint, dass alle Stichproben denselben Wert ergeben (d. h. es tritt aus dem möglichen Wertebereich nur ein einziger Wert auf). Dies bedeutet also etwas anderes als eine Gleichverteilung, die aussagt, dass alle Werte des Wertebereichs gleich wahrscheinlich auftreten.



**Abb. 2.16:** Lorenzkurve des Verlaufs der elektrischen Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$

der Lorenzkurve und der 45°-Geraden beschreibt die Konzentration der Messwerte:

$$F_K = \frac{1}{2} - \frac{1}{m} \left( \sum_{j=1}^{m-1} g(x_j) + \frac{1}{2} \right) \quad (2.62)$$

In Verbindung mit der maximal möglichen Fläche

$$F_{K,\max} = \frac{1}{2} \quad (2.63)$$

ergibt der Quotient

$$L = \frac{F_K}{F_{K,\max}} \quad (2.64)$$

den Gini-Koeffizienten, der die Stärke der Konzentration angibt.

Für den Verlauf der elektrischen Leistung des Generators ergibt sich die Lorenzkurve nach Abbildung 2.16. Der Gini-Koeffizient beträgt für dieses Beispiel hierbei

$$L_{P_{\text{Gen,el}}} = \frac{0,167}{0,5} = 0,334 \quad (2.65)$$

Ein Gini-Koeffizient mit einem Wert kleiner 1 bedeutet für dieses Beispiel, dass der Wert der elektrischen Leistung schwankt. Wenn die Leistung des Generators konstant ist, ergibt sich ein Gini-Koeffizient von 1.

### 2.3.2 Eigenschaften von Verteilungen

Die *Verteilung* ist eine häufig verwendete, allerdings unpräzise Bezeichnung für mathematische Beschreibungen im Bereich der Statistik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Dieser Begriff bezeichnet entweder eine Häufigkeitsverteilung, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung oder eine Verteilungsfunktion. Die *Häufigkeitsverteilung* ist eine Methode zur empirischen Beschreibung von Daten (z. B. Messdaten oder Merkmalswerten). Sie kann interpretiert werden als eine Funktion, die für jeden vorkommenden Wert angibt, wie oft dieser vorgekommen ist [94].

Die *Wahrscheinlichkeitsverteilung* in der Wahrscheinlichkeitstheorie kann mit der Häufigkeitsverteilung in der deskriptiven Statistik verglichen werden. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit gewisse Ereignisse zu erwarten sind. Die folgenden Definitionen sind den Literaturquellen [108, 113, 131] entnommen.

Die *absolute Häufigkeit*  $n(x_j)$  sei definiert als die Anzahl der Beobachtungswerte mit  $m$  verschiedenen Merkmalsausprägungen  $x_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ). Der relative Anteil der absoluten Häufigkeiten an der Gesamtzahl der Beobachtungswerte  $n$  wird als *relative Häufigkeit*  $h(x_j)$  bezeichnet.

$$h(x_j) = \frac{n(x_j)}{n} \quad (2.66)$$

Verwendet man an dieser Stelle als Beobachtungswerte die Messwerte der Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$ , so ergibt sich die Häufigkeitsverteilung nach Abbildung 2.17. Als Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}$  wurde hierbei 10 W angesetzt.

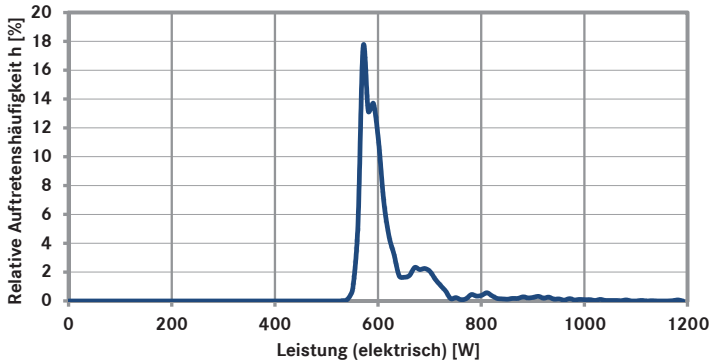
Es gelten folgende Zusammenhänge für die relativen Häufigkeiten:

$$0 \leq h(x_j) \leq 1 \quad (2.67)$$

$$\sum_{j=1}^m h(x_j) = 1 \quad (2.68)$$

Das *Wahrscheinlichkeitsmaß* bzw. die Funktion  $\mu$  ordnet jedem Ereignis  $A$  eine Wahrscheinlichkeit  $\mu(A)$  zu. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zufallsvariable  $X$  bestimmte Werte annimmt, ist definiert als

$$\mu(A) = P(X \in A) \quad (2.69)$$



**Abb. 2.17:** Relative Häufigkeitsverteilung des zeitlichen Verlaufs der Generatorleistung  $h(P_{\text{Gen,el}})$ , Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 10 \text{ W}$

Im begleitenden Beispiel sei die Zufallsvariable  $X$  die Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$ . Das Ereignis  $A$  kann nun dadurch beschrieben sein, dass die Generatorleistung einen bestimmten Wert annimmt, z. B.  $P_{\text{Gen,el}} = 540 \text{ W}$ .

In einer *Wahrscheinlichkeitsfunktion*  $\rho(x)$  lassen sich diskrete Verteilungen beschreiben. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\rho(x) = P(X = x)^1 \quad (2.70)$$

$$P(X \in A) = \sum_{x \in A} \rho(x) \quad (2.71)$$

Mit diesen Zusammenhängen kann z. B. die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, in der die Generatorleistung im Bereich von beispielsweise 540 W ... 750 W liegt.

Bei stetigen Verteilungen gilt für die Zufallsvariable  $X$  immer  $P(X = x) = 0$ . Die Wahrscheinlichkeiten lassen sich als *Dichtefunktion*  $f(x)$  darstellen.

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.72)$$

Mit der *Verteilungsfunktion*  $F(x)$  kann beschrieben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Zufallsvariable einen Wert kleiner oder gleich  $x$  annimmt.

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (2.73)$$

<sup>1</sup> „ $P(X = x)$ “: die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable  $X$  den Wert  $x$  annimmt

Bei einer gegebenen Dichtefunktion ist die Verteilungsfunktion das Integral der Dichtefunktion.

Die bekanntesten Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind die Gleichverteilung, die Normalverteilung und die logarithmische Normalverteilung. Für eine auf dem Intervall  $[a, b]$  gleichverteilte Zufallsvariable  $X$  sind Dichtefunktion  $f(x)$  und Verteilungsfunktion  $F(x)$  gegeben mit

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.74)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{für } a < x < b \\ 1 & \text{für } x \geq b \end{cases} \quad (2.75)$$

Folgende weitere Eigenschaften zeichnen die *Gleichverteilung* aus:

$$\text{Erwartungswert und Median: } E(X) = \frac{a+b}{2} \quad (2.76)$$

$$\text{Varianz: } Var(X) = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (2.77)$$

Für die *Normalverteilung* gelten folgende Beziehungen für Dichtefunktion  $f(x)$ , Erwartungswert  $E(X)$  und Varianz  $Var(X)$ :

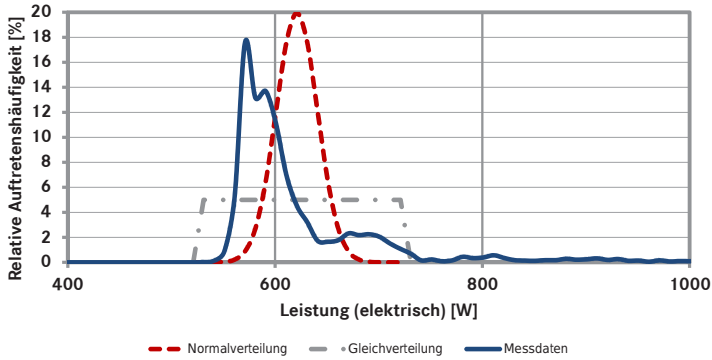
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.78)$$

$$E(X) = \mu \quad (2.79)$$

$$Var(X) = \sigma^2 \quad (2.80)$$

In Abbildung 2.18 ist die Häufigkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistung abgebildet. Zusätzlich enthält diese Grafik weitere mögliche Verläufe von Verteilungsfunktionen, die einer Normalverteilung und einer Gleichverteilung entsprechen. Dabei stimmen die gewogenen arithmetischen Mittelwerte (vgl. Gleichung (2.50)) aller drei Verteilungen überein.

Würde die messtechnisch erfasste Generatorleistung an dieser Stelle einer bekannten Verteilungsfunktion entsprechen, so könnten nach den vorgestellten Verfahren ihre Kenngrößen (z. B.  $\mu$  oder  $\sigma^2$ ) ermittelt werden. Für eine spätere Verwendung der Messdaten in einer Simulation könnten diese Kenngrößen dazu verwendet werden, um mathematische Operationen



**Abb. 2.18:** Häufigkeitsverteilung der messtechnisch erfassten Generatorleistung sowie eine Normal- und Gleichverteilung, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 10 \text{ W}$

(z. B. Additionen, Multiplikationen etc.) durchzuführen. Da die Messdaten der Generatorleistung allerdings keiner Verteilungsfunktion entsprechen, müssen für jede Messgröße die absoluten oder relativen Häufigkeiten sowie die Klassenanzahl und -breite als Eingangsgrößen für die Rechenoperationen verwendet werden. Dies erhöht den Rechenaufwand.

In Kapitel 7.3.4 wird ein Ansatz vorgestellt, der beschreibt, wie anhand von messtechnisch erfassten Häufigkeitsverteilungen die Parameter von multimodalen Verteilungsfunktionen bestimmt werden können, was eine Reduktion des Rechenaufwands zur Folge hätte.

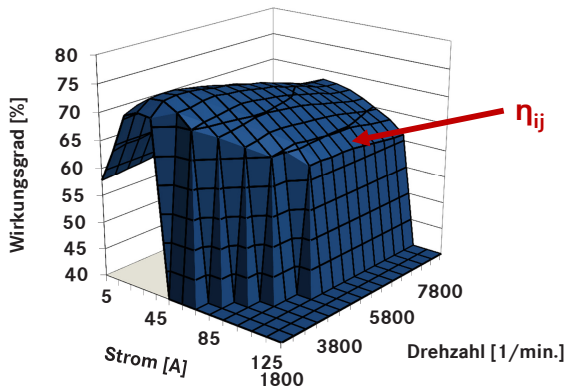
### 2.3.3 Mehrdimensionale Charakteristiken

Zur Analyse und Interpretation des Verhaltens von Systemen werden in dieser Arbeit Betriebspunkte und Systemzustände sowie die Häufigkeit ihres Auftretens bestimmt. Ein Systemzustand ist in der Regel von mehreren physikalischen Größen abhängig, die voneinander unabhängig sein können.

Ein Energiewandler wandelt Energieformen, im Falle eines Generators wird mechanische in elektrische Energie gewandelt. Für die Weiterverarbeitung der Eingangsdaten in einer späteren Simulation ist entscheidend, welche der beschreibenden Größen verwendet wird. Wird lediglich die Auftretenshäufigkeit seiner mechanischen Leistung betrachtet, die sich ent-

weder aus den jeweiligen Zustandsgrößen elektrischer Strom und Spannung (elektrische Seite) oder Drehzahl und Drehmoment (mechanische Seite) berechnet, so kann später keine Zuordnung zwischen korrespondierenden Zustandsgrößen (z. B. elektrischer Strom und Drehzahl) erfolgen. Daher ist es wichtig, diese Zustandsgrößen ebenfalls — inklusive ihrer Abhängigkeit zu anderen Zustandsgrößen — zu erfassen.

Für ein begleitendes Beispiel sollen in diesem Fall die Zustandsgrößen eines Generators dienen. In Analogie zum Beispiel in Kapitel 2.3.1 werden die physikalischen Größen Strom  $I_{\text{Gen}}$ , Spannung  $U_{\text{Gen}}$ , Drehzahl  $n_{\text{Gen}}$  und Drehmoment  $M_{\text{Gen}}$  des Generators an einem Erprobungsfahrzeug über eine Strecke mit einer Zeitdauer von 94,2 Minuten gemessen. In Abbildung 2.19 ist das Wirkungsgradkennfeld des eingesetzten Generators dargestellt.



**Abb. 2.19:** Drehzahl-Strom-Wirkungsgrad-Kennfeld eines elektrischen Generators

In einem Diagramm mit Wertebereichen  $0 \dots i, 0 \dots j$  für zwei physikalische Größen  $A$  und  $B$  können die relativen Häufigkeiten  $h_{ij}(A_i \wedge B_j)$  für ein gleichzeitiges Auftreten von Werten beider Zufallsvariablen  $A_i$  und  $B_j$  dargestellt werden. Beispielhafte physikalische Größen können hierbei die Drehzahl  $n$  und der Strom  $I$  sein. Die gemessenen oder simulierten Werte können innerhalb dieses Diagramms aufgetragen werden und werden dazu in Klassen eingeteilt, so dass für das Intervall der  $i$ -ten bzw.  $j$ -ten Klassen der Parameter gilt:

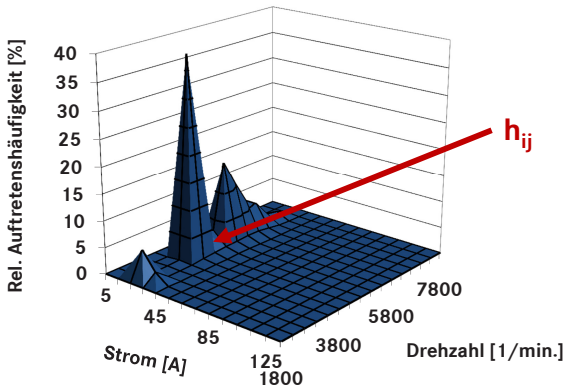
$$(n_i - \Delta n_i) < n \leq n_i \quad (2.81)$$

$$(I_j - \Delta I_j) < I \leq I_j \quad (2.82)$$

Die *Intervallbreite* ( $\Delta n_i$  oder  $\Delta I_j$ ) kann dabei variabel gestaltet werden. In Bereichen, in denen wenige Messpunkte liegen, kann man die Klasseneinteilung größer wählen [59].

Im vorliegenden Beispiel soll die Häufigkeitsverteilung des Wirkungsgrades aus den Auftretenshäufigkeiten von Strom und Drehzahl berechnet werden. Die Klassenbreite beträgt hierbei für die Drehzahl  $\Delta n_i = 100$  1/min. und für den Strom  $\Delta I_j = 10$  A.

Die Ermittlung der relativen Verteilung der auftretenden Wirkungsgrade erfolgt nun in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Häufigkeiten  $h_{ij}$  des gemeinsamen Auftretens der Werte von Strom und Drehzahl bestimmt. Mit Hilfe des Wirkungsgradkennfelds aus Abbildung 2.19 kann anschließend für die Kombination aller Klassen von Strom und Drehzahl der jeweilige Wirkungsgrad abgelesen werden. Im zweiten Schritt werden die relativen Auftretenshäufigkeiten aller Wirkungsgrade  $\eta_{\text{Gen},ij}$  bestimmt, indem man die relativen Auftretenshäufigkeiten von Wirkungsgraden einer selben Klasse aufsummiert.

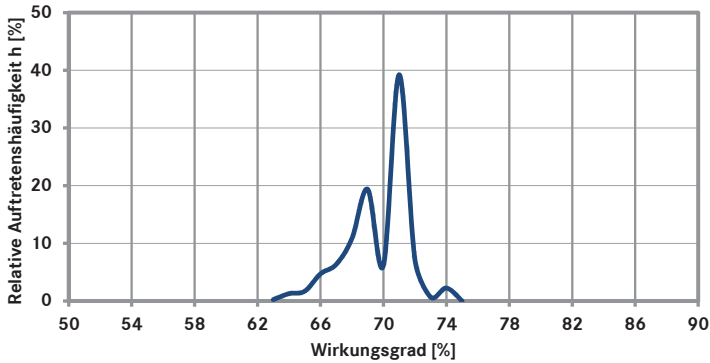


**Abb. 2.20:** Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators, Klassenbreiten  $\Delta n_i = 100$  1/min.,  $\Delta I_j = 10$  A

Abbildung 2.20 stellt die relativen Häufigkeiten des gemeinsamen Auftretens von Strom und Drehzahl als Ergebnis des ersten Berechnungsschrittes dar.

In Abbildung 2.21 ist das Ergebnis des zweiten Berechnungsschrittes dargestellt. Hier wurden jeweils alle relativen Häufigkeiten des Wirkungsgrades aufsummiert, die der selben Klasse zugehören. Die Klassenbreite beträgt hier  $\Delta \eta_{\text{Gen},k} = 1$  %.





**Abb. 2.21:** Häufigkeitsverteilung der Wirkungsgrade des Generators  $\eta_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite  $\Delta\eta_{\text{Gen}_k} = 1\%$

### 2.3.4 Stochastische Unabhängigkeit

In der Wahrscheinlichkeitstheorie spricht man von *stochastischer Unabhängigkeit*, wenn bei zwei zufälligen Ereignissen  $A$  und  $B$  die Information über das Eintreten von Ereignis  $A$  nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Ereignis  $B$  beeinflusst [113]. Kann eine stochastische Unabhängigkeit vorausgesetzt werden, vereinfachen sich die Berechnungsvorschriften (z. B. Addition oder Multiplikation) der Wahrscheinlichkeit. Zwei Ereignisse  $A$  und  $B$  mit  $P(A), P(B) > 0$  sind nach [13] dann stochastisch unabhängig, wenn folgende Beziehungen gelten:

$$P(A | B) = P(A) \quad (2.83)$$

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2.84)$$

Die dargestellten Beziehungen bedeuten Folgendes:

1. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis  $A$  eintritt, hängt nicht davon ab, ob Ereignis  $B$  eintritt.
2. Zwei Ereignisse  $A$  und  $B$  sind stochastisch unabhängig, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass beide Ereignisse eintreten, dem Produkt ihrer Einzelwahrscheinlichkeiten entspricht.

Zur Anwendung der vereinfachten Berechnungsvorschriften ist es also erforderlich, die Unabhängigkeit nachzuweisen. Dazu bestehen folgende Möglichkeiten:

- Eine mögliche Art, die stochastische Unabhängigkeit zu überprüfen, ist die Berechnung und der anschließende Vergleich der Wahrscheinlichkeiten  $P(A \cap B)$  und  $P(A) \cdot P(B)$ . Entsprechen sich die jeweiligen Werte, so besteht zwischen den beiden Zufallsvariablen eine stochastische Unabhängigkeit. Sollen zwei gemessene Größen auf ihre Unabhängigkeit untersucht werden, so müssen ihre Messwerte synchron aufgezeichnet vorliegen. Anschließend können die Werte  $P(A \cap B)$  und  $P(A) \cdot P(B)$  bestimmt und verglichen werden. Diese Vorgehensweise entspricht im Wesentlichen dem sogenannten  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest.
- Die *statistische Versuchsplanung* ist ein Verfahren, um Versuche zu planen, die das Ziel haben, die Abhängigkeit der Zielgrößen von anderen Größen zu ermitteln. Die Bestimmung der Zusammenhänge geschieht nach der Durchführung der Versuche meist durch das Verfahren der multiplen Regression. Um zu prüfen, ob die ermittelten Zusammenhänge statistisch signifikant sind, werden statistische Tests eingesetzt, z. B. der *F-Test* oder der *t-Test*.

Für den Nachweis der Unabhängigkeit wird in dieser Arbeit der  $\chi^2$ -Test angewendet. Er wird neben dem Unabhängigkeitstest auch für Anpassungstests und Homogenitätstests verwendet [66].

Der  $\chi^2$ -Test betrachtet zwei diskrete Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$ . Diese können zwei Messgrößen sein, z. B. die elektrischen Leistungen  $P_{el}$  zweier Verbraucher. Nun zählt man, wie oft jeweils die  $j$ -te Ausprägung von  $X$  mit der  $k$ -ten Ausprägung von  $Y$  auftritt. Das Resultat ist die gemeinsame absolute Häufigkeit  $n_{jk}$ .

Die Prüfgröße für den Unabhängigkeitstest lautet:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \frac{(n_{jk} - n_{jk}^*)^2}{n_{jk}^*} \quad (2.85)$$

mit

$$n_{jk}^* = \frac{n_j \cdot n_k}{n} \quad (2.86)$$

Ist die Prüfgröße  $\chi^2$  klein, vermutet man, dass die Hypothese wahr ist, die Merkmale also unabhängig voneinander sind. Dazu findet ein Vergleich

der Prüfgröße mit der  $\chi^2$ -Verteilung statt: Bei einem Signifikanzniveau  $\alpha$  wird die Nullhypothese (die Merkmale  $X$  und  $Y$  sind stochastisch unabhängig) abgelehnt, sobald die Prüfgröße  $\chi^2$  größer dem  $(1-\alpha)$ -Quantil der  $\chi^2$ -Verteilung mit  $(m-1)(r-1)$  Freiheitsgraden ist.

Es wird empfohlen, dass folgende Randbedingungen erfüllt sind [93, 126]:

1. Es sollte ein ausreichend großer Stichprobenumfang vorhanden sein, etwa  $n > 30$ .
2. Eine Klasse ohne Wert darf nicht benutzt werden, d. h. alle absoluten Häufigkeiten müssen größer als 1 sein.
3. 80 % aller Klassen sollten mehr als 5 Werte haben, d. h. 80 % aller Besetzungszahlen müssen größer als 5 sein.

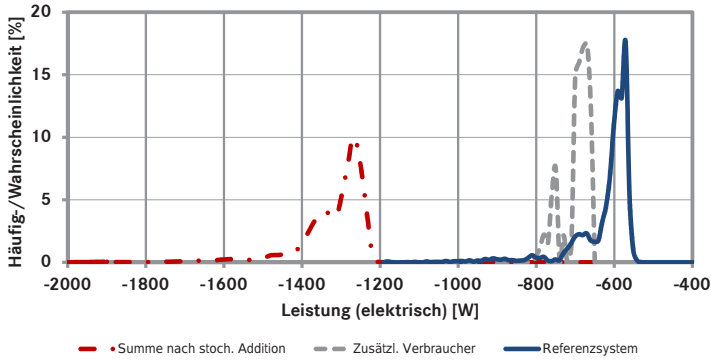
Eine Anwendung des  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests auf Eingangsgrößen der Simulation und die Bestimmung der Prüfgröße  $\chi^2$  findet in Kapitel 7.4 statt.

### 2.3.5 Rechnen mit Verteilungen

In Kapitel 2.2 wurde das längsdynamische Fahrzeugmodell eines Nutzfahrzeugs hergeleitet. Dieses beinhaltet mathematische Operationen (z. B. Addition, Multiplikation usw.). Da das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren vorsieht, diese Berechnungsschritte mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen als Eingangsgrößen durchzuführen, werden an dieser Stelle die Berechnungsvorschriften für stochastische Berechnungsvorgänge hergeleitet. Parallel zu den theoretischen Herleitungen werden praxisnahe Berechnungsvorgänge dargestellt, die bereits Bezug auf den stochastischen Berechnungsansatz in Kapitel 5 nehmen.

Die folgenden Definitionen und mathematischen Zusammenhänge entstammen den Literaturquellen [58, 60, 73, 96]. Auch wenn im Folgenden von Wahrscheinlichkeiten (z. B.  $P(X)$ ) gesprochen wird, können die Vorschriften auch auf Häufigkeitsverteilungen (z. B.  $h(P_K)$ ) angewendet werden.

a) Addition: Abbildung 2.22 stellt zwei Verteilungen dar, die zu einer weiteren Verteilung addiert wurden. Die anwendungsbezogene Fragestellung ist die Folgende: In ein heutiges System soll ein zusätzlicher elektrischer Verbraucher in das Bordnetz integriert werden. Die Häufigkeitsverteilung seiner elektrischen Leistungen  $P(P_{el,Z})$  sei bekannt. Der Leistungsbedarf des heutigen Systems ist durch die messtechnische Erfassung der Generatorleistung  $h(P_{Gen,el})$  ebenfalls bekannt (vgl. Abbildung 2.17). Die Aufgabenstellung,



**Abb. 2.22:** Häufigkeitsverteilungen zweier elektrischer Leistungsverläufe sowie deren Addition, Klassenbreite  $\Delta P_{el,k} = 10 \text{ W}$

die sich hieraus ergibt, ist die Herleitung der Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Gesamtleistung  $P(P_{el,gesamt})$ .

Für die Addition zweier unabhängiger stochastischer Variablen  $X$  (hier: der Leistungsbedarf des Generators) und  $Y$  (hier: der Leistungsbedarf des zusätzlichen Verbrauchers) gilt also  $Z = X + Y$  (hier: die neue elektrische Gesamtleistung). Die Wahrscheinlichkeit  $P(Z = z)$  ist die Summe der Produkte beider Wahrscheinlichkeiten  $P(X = x)$  und  $P(Y = y = z - x)$ . Für alle Kombinationen von  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  gilt dabei  $z = x + y$ . Das Ergebnis lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) \cdot f_Y(z - x) \cdot dx \quad (2.87)$$

$$P(Z = z) = \sum_{k=1}^n P(X = x_k) \cdot P(Y = z - x_k) \quad (2.88)$$

Für den Mittelwert gilt folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} E(X + Y) &= E(Z) = \mu_Z \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_k = \frac{1}{m^2} \sum_{i,j=1}^m (x_i + y_j) = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m (x_i + y_j) \right) \\ &= \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \left( m \cdot x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right) = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m (m \cdot x_i + m \cdot \mu_Y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{m^2} \cdot \left( \sum_{i=1}^m m \cdot x_i + m^2 \cdot \mu_Y \right) \\
&= \frac{1}{m^2} \cdot \left( m \cdot \sum_{i=1}^m x_i + m^2 \cdot \mu_Y \right) \\
&= \frac{1}{m^2} \cdot (m^2 \cdot \mu_X + m^2 \cdot \mu_Y) \\
&= \mu_X + \mu_Y = E(X) + E(Y)
\end{aligned} \tag{2.89}$$

Weiterhin berechnet sich die Varianz nach folgender Gleichung:

$$\begin{aligned}
\sigma_Z^2 &= \text{Var}(Z) = \text{Var}(X + Y) \\
&= E(((X + Y) - E(X + Y))^2) = E((X + Y - E(X) - E(Y))^2) \\
&= E((X - E(X) + Y - E(Y))^2) = E((X - E(X))^2 \\
&\quad + (Y - E(Y))^2 + 2 \cdot (X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))) \\
&= E((X - E(X))^2) + E((Y - E(Y))^2) \\
&\quad + 2 \cdot E((X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))) \\
&= \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) + 2 \cdot \text{Cov}(X, Y) \\
&= \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 2 \cdot \sigma_{XY}
\end{aligned} \tag{2.90}$$

$\sigma_{XY}$  ist die Kovarianz von zwei Signalen X und Y. Existieren  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$  und  $\mu_{X \cdot Y}$ , dann besteht folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{XY} = \mu_{X \cdot Y} - \mu_X \cdot \mu_Y \tag{2.91}$$

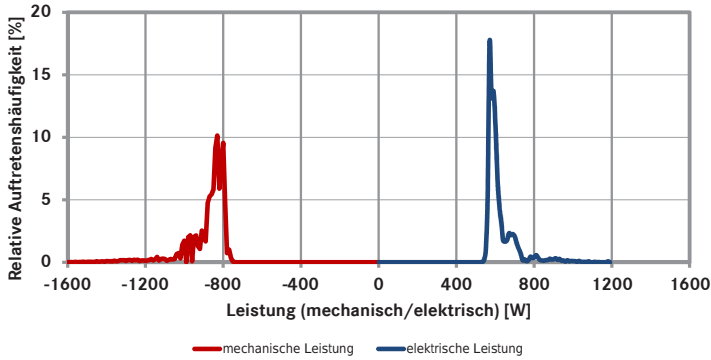
Da X und Y unabhängig sind, ist die Kovarianz  $\sigma_{XY}$  gleich Null. Es gilt

$$\sigma_Z^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 \tag{2.92}$$

Nach Anwendung der Regeln für die Addition stochastisch unabhängiger Zufallsvariablen ergibt sich in Abbildung 2.22 die Häufigkeitsverteilung der elektrischen Leistungsanforderung des neuen Systems  $P(P_{\text{el,gesamt}})$ .

b) **Multiplikation:** Abbildung 2.23 stellt eine beispielhafte Anwendung der Multiplikation dar. Eine Multiplikation wird z. B. bei der Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Energiewandlung durchgeführt. Die mechanische Leistung des Generators ergibt sich aus der Multiplikation der elektrischen Leistung mit dem reziproken Wirkungsgrad (vorliegend als Verteilung). Es gilt:

$$P_{\text{Gen,mech}} = -P_{\text{Gen,el}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{Gen}}} \tag{2.93}$$



**Abb. 2.23:** Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el/mech}_k} = 10 \text{ W}$

Die Multiplikation setzt ihrerseits ebenfalls voraus, dass die Zufallsvariablen (hier: physikalische Größen)  $X$  und  $Y$  voneinander stochastisch unabhängig sind. Die Wahrscheinlichkeit  $P(Z = z)$  ist die Summe des Produkts der Wahrscheinlichkeiten  $P(X = x)$  und  $P(Y = y)$ . Für alle Kombinationen von  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  gilt hierbei  $z = x \cdot y$ . Das heißt Folgendes:

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, \frac{z}{x}) \cdot dx \quad (2.94)$$

mit:

$$h(x, \frac{z}{x}) = \begin{cases} \frac{1}{|x|} \cdot f_X(x) \cdot f_Y(\frac{z}{x}) & \text{für } x \neq 0 \\ f_X(0) + f_Y(0) - f(X = 0 \cap Y = 0) & \text{für } x = z = 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \text{ und } z \neq 0 \end{cases}$$

$$P(Z = z) = \sum_{k=1}^n \begin{cases} P(X = x_k) \cdot P(Y = \frac{z}{x_k}) & \text{für } x_k \neq 0 \\ P[(X = 0) \cup (Y = 0)] & \text{für } x_k = z = 0 \\ 0 & \text{für } x_k = 0 \text{ und } z \neq 0 \end{cases} \quad (2.95)$$

Es gilt für den Mittelwert:

$$\begin{aligned}
 E(X \cdot Y) &= \mu_{X \cdot Y} \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_k = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^m x_i \cdot y_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m x_i \cdot y_j \right) \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \left( x_i \cdot \sum_{j=1}^m y_j \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (x_i \cdot m \cdot \mu_Y) \\
 &= \frac{1}{n} \cdot m \cdot \mu_Y \cdot \sum_{i=1}^m x_i = \frac{1}{n} \cdot m \cdot \mu_Y \cdot m \cdot \mu_X \\
 &= \frac{1}{m^2} \cdot m^2 \cdot \mu_Y \cdot \mu_X \\
 &= \mu_X \cdot \mu_Y = E(X) \cdot E(Y) \tag{2.96}
 \end{aligned}$$

Da über alle Kombinationen summiert wird, gilt hier:  $n = m^2$ .

Für die Varianz gelten folgende Voraussetzungen:

$$\sigma_Z^2 = \text{Var}(Z) = \text{Var}(X \cdot Y) = E((X \cdot Y)^2) - (E(X \cdot Y))^2 \tag{2.97}$$

$$\begin{aligned}
 E((X \cdot Y)^2) &= E(X^2 \cdot Y^2) = E(X^2) \cdot E(Y^2) \\
 &\quad + \text{Cov}(X^2, Y^2) \tag{2.98}
 \end{aligned}$$

Wenn  $X, Y$  unabhängig sind, sind auch  $X^2, Y^2$  unabhängig. Daraus ergibt sich in diesem Fall:

$$E((X \cdot Y)^2) = E(X^2) \cdot E(Y^2) \tag{2.99}$$

Weiterhin gilt:

$$\begin{aligned}
 E(X^2) &= E(X \cdot X) = E(X) \cdot E(X) + \text{Cov}(X, X) \\
 &= (E(X))^2 + \text{Var}(X) \tag{2.100}
 \end{aligned}$$

$$E(Y^2) = (E(Y))^2 + \text{Var}(Y) \tag{2.101}$$

$$(E(X \cdot Y))^2 = (E(X) \cdot E(Y) + \text{Cov}(X, Y))^2 \tag{2.102}$$

Wenn  $X, Y$  unabhängig sind, gilt:

$$(E(X \cdot Y))^2 = (E(X))^2 \cdot (E(Y))^2 \tag{2.103}$$

Es folgt für die Varianz:

$$\begin{aligned} \text{Var}(X \cdot Y) &= ((E(X))^2 + \text{Var}(X)) \cdot ((E(Y))^2 + \text{Var}(Y)) \\ &\quad - (E(X))^2 \cdot (E(Y))^2 = (E(X))^2 \cdot (E(Y))^2 \\ &\quad + (E(X))^2 \cdot \text{Var}(Y) + (E(Y))^2 \cdot \text{Var}(X) \\ &\quad + \text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y) - (E(X))^2 \cdot (E(Y))^2 \\ &= (E(X))^2 \cdot \text{Var}(Y) + (E(Y))^2 \cdot \text{Var}(X) \\ &\quad + \text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y) \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{X \cdot Y}^2 = \mu_X^2 \cdot \sigma_Y^2 + \mu_Y^2 \cdot \sigma_X^2 + \sigma_X^2 \cdot \sigma_Y^2 \quad (2.105)$$

Unter Anwendung der Berechnungsvorschriften der Multiplikation ergibt sich die Verteilung der mechanischen Leistung nach Abbildung 2.23.

c) *Integration*: Überwiegend für die Bestimmung von Speicherständen müssen auftretende Leistungen über ihre Zeitdauer integriert werden, da das Verhalten von Betriebsstrategien in vielen Fällen von dieser Größe abhängt (z. B. das Laden der Batterie bis zu einem definierten Speicherstand). Das Integral eines zeitkontinuierlichen Signals sei hier gesetzt als

$$Y(t) = \int_0^t X(t) \cdot dt \quad (2.106)$$

Eine *Integration* ist nur mit kontinuierlichen Signalen möglich. Bei den vorhandenen physikalischen Größen handelt es sich allerdings um zeitdiskrete Signale. Für diesen Fall gibt es verschiedene Methoden, um die Integration des Zeitbereichs zu approximieren [49]. Die Trapezregel ist ein mathematisches Verfahren, das das Integral einer Funktion  $f(t)$  im Intervall  $[t_i, t_{i+1}]$  numerisch annähert, indem die Fläche durch ein oder mehrere Trapeze ersetzt wird. Zur Berechnung der Fläche in Abbildung 2.24 gelten folgende Beziehungen:

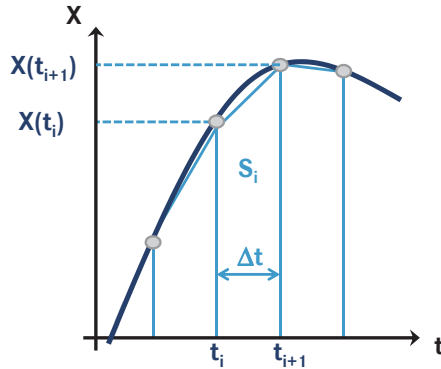
$$Y(t) = \sum_{i=0}^{n-1} S_i = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{X(t_i) + X(t_{i+1})}{2} \cdot \Delta t$$

mit  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  und  $S_i$  als Trapezfläche. (2.107)

Das Integral kann damit als Summe von  $n$  Additionsvorgängen gesehen werden. Es gilt hierbei:  $n \cdot \Delta t = t$ .

$$P(Y = y) = \sum_{k_0=1}^m \dots \sum_{k_{n-1}=1}^m P[(X_0 = x_{k_0}) \cap \dots \cap (X_{n-1} = x_{k_{n-1}})]$$





**Abb. 2.24:** Die Trapezregel, nach [49]

$$\cap(X_n = \frac{2 \cdot y}{\Delta t} - x_{k_0} - 2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} x_{k_j}) \quad (2.108)$$

Der Index  $m$  stellt eine Diskretisierung der Zufallsvariablen  $X$  dar. Da  $X$  dann nicht beliebige Werte annehmen kann, legt der Index  $m$  den Wertebereich von  $X$  fest. Für stochastisch unabhängige Variablen gilt weiter:

$$P(Y = y) = \sum_{k_0=1}^m \dots \sum_{k_{n-1}=1}^m [P(X_n = \frac{2 \cdot y}{\Delta t} - x_{k_0} - 2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} x_{k_j}) \cdot \prod_{i=0}^{n-1} P(X_i = x_{k_i})] \quad (2.109)$$

Damit hat die Trapezregel nach Abbildung 2.24 die Integrationsgleichung diskretisiert.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Nutzen der hergeleiteten Beziehungen entsprechend der Gleichungen (2.108) und (2.109) in Hinblick auf technische Systeme fragwürdig erscheint. Gleichung (2.109) setzt voraus, dass alle Werte für  $X_j$  für  $j = 0 \dots n$  stochastisch unabhängig sind, was bedeutet, dass im realen System sehr große Sprünge zwischen direkt aufeinanderfolgenden Werten möglich sind.

Eine alternative Möglichkeit wäre die Folgende: ausgehend von einem Startwert für  $X_0$  führt eine Zufallsänderung  $\Delta X_1$  zu einem neuen Wert für  $X_1$  von  $x_1 = x_0 + \Delta x_{k_1}$ . Dabei kann  $\Delta x_{k_1}$  unterschiedliche Werte annehmen,

sein Index läuft von  $k_1 = 1 \dots m$ . Der nächste Wert, also der Wert für  $X_2$ , ergibt sich anschließend aus  $x_2 = x_1 + \Delta x_{k_2}$ , usw. Die Zufallsvariablen  $\Delta X_j$  ( $j = 1 \dots n$ ) sind stochastisch unabhängig, aber ihr Wertebereich ist auf das technisch Mögliche abgestimmt. Konkrete Werte und deren Häufigkeitsverteilung findet man aus der Analyse der Messungen. Damit erzeugen sich hohe Anzahlen von Zeitreihen, für die jeweils über die Trapezregel der Wert des Integrals bestimmt und daraus die Verteilung der Werte für das Integral berechnet wird. Damit wird eine realistische Verteilung der Werte des Integrals erreicht. Allerdings ist auch dieser Ansatz sehr rechenintensiv. Daher wird im Verlauf dieser Arbeit eine weitere Vorgehensweise zur Berechnung der Integrale hergeleitet und angewendet. Die dafür notwendigen Rechenvorschriften werden in Kapitel 5.3.2 vorgestellt.

d) Skalarmultiplikation: Für die Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Zufallsvariablen, die mit einem Skalar multipliziert wurde, gelten andere Berechnungsregeln als bei der Multiplikation zweier Zufallsvariablen. Hier werden nicht die Wahrscheinlichkeiten multipliziert, sondern die Werte der Zufallsvariablen (z. B. eine physikalische Größe). In Abhängigkeit des skalaren Wertes  $\alpha$ , der mit der Zufallsvariablen  $X$  multipliziert wird, ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(\alpha \cdot X)$ .

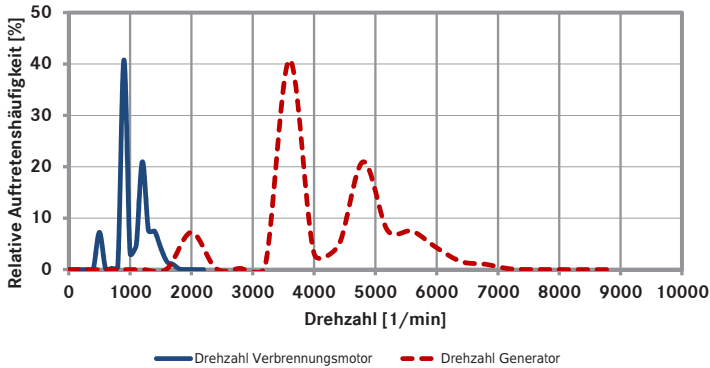
Dies findet beispielsweise bei der Berechnung der Häufigkeitsverteilung der Drehzahlen des Generators  $n_{\text{Gen}}$  Anwendung. Die Drehzahl des Generators ist über ein festes Übersetzungsverhältnis an die Drehzahl des Verbrennungsmotors  $n_{\text{VKM}}$  gekoppelt. Es gilt hier in Zusammenhang mit dem Übersetzungsverhältnis des Generators  $i_{\text{Gen}}$ :

$$n_{\text{Gen}} = i_{\text{Gen}} \cdot n_{\text{VKM}} \quad (2.110)$$

Dies bedeutet, dass hier lediglich die Zufallsvariable  $n_{\text{VKM}}$  mit dem skalaren Wert multipliziert werden muss. Dadurch erhöht sich die Klassenbreite  $\Delta n_{\text{Gen}_k}$  um den Faktor  $i_{\text{Gen}}$ . Abbildung 2.25 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der beiden Drehzahlen.

### 2.3.6 Optimierung in der Fahrzeugauslegung

Die meisten physikalischen, technischen oder wirtschaftlichen Fragestellungen, für die eine *optimale Lösung* gesucht wird, lassen sich unter Vereinfachungen und Annahmen in mathematische Probleme umwandeln, deren Lösung mithilfe von Computerprogrammen bestimmt werden kann. Ein



**Abb. 2.25:** Relative Häufigkeitsverteilungen der Motordrehzahl  $n_{VKM}$  und Generator-drehzahl  $n_{Gen}$ , Klassenbreite  $\Delta n_{VKM_k} = 100$  1/min. bzw.  $\Delta n_{Gen_k} = 400$  1/min.,  $i_{Gen} = 4$

Modell einer Fahrzeugsimulation enthält bereits die geforderten mathematischen Beschreibungen, so dass es hinsichtlich einer Problemstellung optimiert werden kann. Eine geeignete Optimierungsstrategie kann gewählt werden, um die Parametrierung einer Betriebsstrategie oder die Dimensionierung von Bauteilen so zu wählen, dass das gewünschte Ergebnis maximal oder minimal wird. Mögliche Optimierungskriterien können hierbei der Kraftstoffverbrauch oder die Kosten eines neuen Systems zur Verbrauchsreduktion sein. Ob es sich bei den Optimierungsverfahren um die Suche nach einem Minimum oder einem Maximum handelt, hängt von der Fragestellung bzw. von der Formulierung der Zielfunktion ab.

Die Aufgabe der Mathematik ist es, bei einem Optimierungsproblem das Minimum einer reellen Funktion zu finden. Allgemein formuliert heißt das, dass zu einer gegebenen reellwertigen Funktion mit mehreren ( $n$ ) Veränderlichen

$$f : D \longrightarrow \mathbb{R}, \quad D \subseteq \mathbb{R}^n \quad (2.111)$$

ein Vektor  $\vec{x} = [x_1, \dots, x_n]$  im Definitionsbereich  $D$  mit den folgenden Eigenschaften gesucht wird:

$$\vec{x} \in D : \quad f(\vec{x}) \leq f(\vec{z}) \quad \text{für alle } \vec{z} \in D. \quad (2.112)$$

Der Funktionswert  $f(\vec{x})$  wird *globales Minimum* genannt, sofern der Ausdruck in Gleichung (2.112) erfüllt ist [56]. Das bedeutet, dass es außer dem

Punkt  $\vec{x}$  keinen Punkt  $\vec{z} \in D$  gibt, der einen kleineren Funktionswert hat als  $\vec{x}$ . Die Funktion  $f$  ist hierbei die Zielfunktion. Nach

$$\max_{x \in D} f(x) = -\min_{x \in D} (-f(x)) \quad (2.113)$$

entspricht die Negierung einer zu minimierenden negativen Zielfunktion der Maximierung dieser.

In den wenigsten Fällen kann eine exakte analytische Lösung der jeweiligen Problemstellung gefunden werden. Die Verwendung von Computeralgorithmen zur iterativen Lösung von Optimierungsproblemen schränkt die erreichbare Genauigkeit der Lösung ein, da deren Rechengenauigkeit von vielen Faktoren abhängt. Mit zunehmender Komplexität der Optimierungsfunktion steigt die Anzahl der möglichen Lösungen und damit der Rechen- und Zeitaufwand der meisten Optimierungsverfahren exponentiell an. Bei gegebener Rechenleistung muss eventuell auf eine genaue Annäherung an das Optimum zugunsten kürzerer Rechenzeiten verzichtet werden. Greift der Nutzer bei der mathematischen Modellierung eines Problems auf Messdaten zurück, ist mit einem Fehler bei der Bestimmung des globalen Minimums zu rechnen [9, 77]. Es ist somit nicht gewährleistet, dass das globale Optimum gefunden werden kann. Es ist daher zu definieren, welche Werte eine Lösung darstellen und welche nicht.

Es sei eine mögliche Lösung durch den Näherungswert  $\vec{x}_N$  vorhanden, der nicht das tatsächliche globale Optimum darstellt, sondern unter vorgegebenen Rahmenbedingungen eine möglichst gute Annäherung an das Optimum  $\vec{x}^*$  ist. Der Funktionswert dieses Näherungswertes darf dann um die vorher definierte Toleranz  $\epsilon$  vom Optimum abweichen, wobei in der praktischen Anwendung das Optimum in den seltensten Fällen bekannt ist.

$$\vec{x}_N \in D : \quad \|f(\vec{x}_N) - f(\vec{x}^*)\| \leq \epsilon \quad (2.114)$$

Die Aufgabe eines *Suchalgorithmus* ist es, aus einer Anzahl möglicher Lösungskandidaten in möglichst kurzer Zeit das beste Ergebnis zu finden. Dies funktioniert für einen Suchraum mit einer nur geringen Anzahl an Lösungen durch eine Betrachtung aller möglichen Kandidaten und der anschließenden Ausgabe des Besten. Bei steigender Komplexität oder einem großen Suchraum wird dies sehr zeitaufwändig oder liefert keine brauchbaren Ergebnisse. Daher ist das Grundprinzip jedes Optimierungsalgorithmus die effiziente Zuweisung knapper Ressourcen.

In [12] und [107] wird eine Klassifizierung von bekannten *Optimierungsverfahren* durchgeführt. Demnach werden die Verfahren zunächst in die

lineare und die nichtlineare Optimierung aufgeteilt. Die nichtlinearen Verfahren kann man weiter in numerische und kombinatorische Optimierung sowie die exakten Berechnungsverfahren aufteilen. In der Theorie kann jede mathematische Optimierung auf alle wissenschaftlichen und technischen Disziplinen angewendet werden. Für den Anwendungsfall der Optimierung einer Fahrzeugsimulation eignen sich die linearen Lösungstechniken nicht, da die Zielfunktion als nichtlinear zu erwarten ist. Zu jedem Optimierungsschritt einer Fahrzeugsimulation muss diese komplett durchlaufen werden. Aus diesem Grund können die Verfahren von Lagrange und Kuhn-Tucker, die zu den Verfahren der exakten Berechnung gehören, nicht verwendet werden. Für die Optimierung einer Computersimulation stehen nach diesen Einschränkungen folgende verbleibenden Gruppen von Verfahren zur Verfügung:

- Gradientenbasierte Verfahren
- Kombinatorische Verfahren
- Heuristische Verfahren

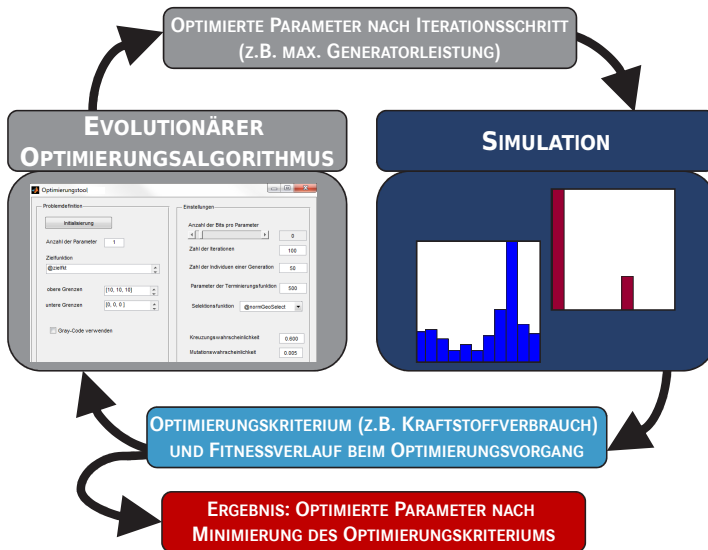
In [103] wurden anhand definierter Bewertungskriterien verschiedene Optimierungsverfahren gegenübergestellt. Es sollte dabei untersucht werden, welches der Verfahren in seiner Anwendung auf eine längsdynamische Gesamtfahrzeugsimulation am besten geeignet ist. Die sechs Bewertungskriterien, die hauptsächlich betrachtet wurden, sind:

- Universelle Anwendbarkeit des Verfahrens auf Optimierungsfragestellungen einer Gesamtfahrzeugsimulation
- Möglichkeit, mehrere freier Parameter zu optimieren
- Geringe Ansprüche an die Rechenleistung
- Vermögen, ein lokales Minimum zu verlassen
- Überprüfbarkeit des Optimierungsergebnisses
- Verfügbarkeit lizenzfreier Quellcodes

Anhand der durchgeführten Nutzwertanalyse konnten die „Evolutionären Algorithmen“ als geeignetes Verfahren für längsdynamische Simulationen identifiziert werden. Neben den Evolutionären Algorithmen wurden in der Bewertung kombinatorische und gradientenbasierte Verfahren sowie *Simulated Annealing* als Vertreter der heuristischen Verfahren berücksichtigt. Insbesondere vorteilhaft stellte sich bei diesem Verfahren die Anpassbarkeit

auf verschiedene Fragestellungen und die nur linear steigende Rechenzeit über der Komplexität der Problemstellung dar.

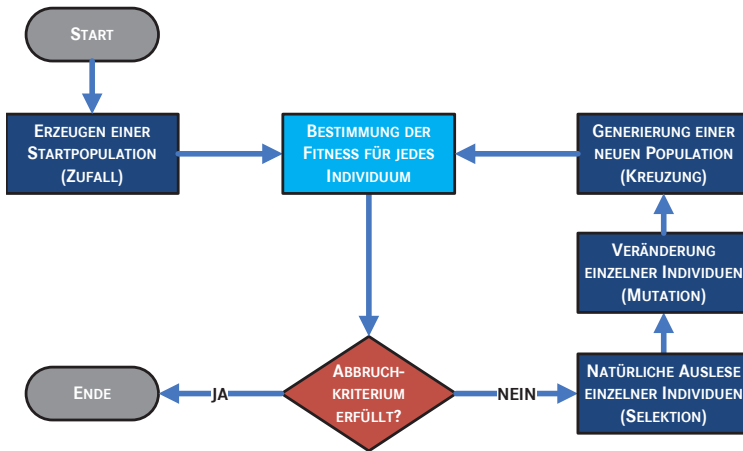
Das Optimierungsverfahren der Evolutionären Algorithmen wird auf Basis dieser Recherche in der vorliegenden Arbeit dazu verwendet, freie Parameter der Simulation hinsichtlich eines Optimierungskriteriums (z. B. minimaler Kraftstoffverbrauch oder minimale Kosten) innerhalb eines definierten Wertebereichs zu verändern. Dazu steht nach Abbildung 2.26 für den Anwender eine grafische Benutzeroberfläche bereit, in der die Zielfunktion sowie die Anzahl der freien Parameter sowie ihre oberen und unteren Grenzen eingegeben werden können.



**Abb. 2.26:** Vorgehensweise bei der Optimierung freier Parameter einer Simulation unter Anwendung Evolutionärer Algorithmen, nach [103]

Der hinterlegte Programmcode der Evolutionären Algorithmen bestimmt mit jedem Optimierungsschritt die neuen Werte der freien Parameter und stößt anschließend einen Berechnungsdurchlauf der Längsdynamiksimulation an. Die Simulation berechnet mit Hilfe des Fahrzeugmodells das Optimierungskriterium (z. B. den Kraftstoffverbrauch), das mittels des Optimierungsverfahrens zu minimieren ist. Nach dem Durchlauf einer Simulation werden die freien Parameter neu berechnet und führen nach

Erreichen des Abbruchkriteriums zum optimalen Ergebnis. Das Ablaufdiagramm eines Optimierungsalgorithmus ist in Abbildung 2.27 dargestellt.



**Abb. 2.27:** Ablaufdiagramm eines evolutionären Optimierungsalgorithmus, nach [103]

Der Evolutionäre Algorithmus orientiert sich an der Lösungsmethodik der Natur, da jede der auf der Erde lebenden Arten (Menschen, Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen, usw.) eine auf den Lebensraum angepasste Form darstellt. Aufgrund der Tatsache, dass sich deren Lebensraum ständig ändert, muss ständig eine Anpassung (also Optimierung) erfolgen. Die Evolution löst in der Natur das Optimierungsproblem mit der Zielfunktion, die Überlebenswahrscheinlichkeit aller Individuen zu erhöhen. Sowohl in der Natur als auch in der mathematischen Optimierung werden dafür die Operationen Selektion, Kreuzung und Mutation angewendet [130].

Nach Abbildung 2.27 wird nach Beginn des Optimierungsverfahrens zunächst nach dem Zufallsprinzip eine Startpopulation  $\vec{x}$  erzeugt. Würde mit dieser Population bereits das Abbruchkriterium erfüllt sein (z. B.  $\vec{x} = \vec{x}_N$ ), wäre der Optimierungsvorgang bereits beendet. Ist das Kriterium nicht erfüllt, so werden mittels der drei Mechanismen Selektion, Mutation und Kreuzung neue Generationen gebildet. Die Selektion ist mit der natürlichen Auslese einzelner Individuen zu vergleichen. Sofern ein Lebewesen sich gut an seine Umwelt angepasst hat, stehen die Chancen gut, dass seine angepassten Gene weitergegeben werden können. Unter Mutation ist die zufällige Veränderung des Erbguts zu verstehen. Dies

kann sowohl durch eine schädigende (z. B. chemische oder physikalische Einwirkungen) als auch eine positive Wirkung auf die Gene geschehen. Durch eine Kreuzung vermischen sich die Merkmalskombinationen zweier Individuen. Es kommt somit zu neuen Merkmalsausprägungen in der neuen Generation.

Der Quellcode für die Evolutionären Algorithmen, der in dieser Arbeit verwendet wird, stammt von M. G. Kay (North Carolina State University) und wurde von O. Beucher (Hochschule Karlsruhe) modifiziert. Die Erstellung einer grafischen Oberfläche und Benutzerschnittstelle erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von A. Sehi [103].

In dieser Arbeit wird der evolutionäre Optimierungsalgorithmus in Kombination mit der verwendeten Simulationsmethodik verwendet.

### 2.3.7 Ergebnis: Stochastisches Lösungsverfahren

Nach diesem Unterkapitel stehen nun Verfahren der ein- und mehrdimensionalen Statistik bereit, um wesentliche Informationen aus umfangreichen Messdaten zu generieren. Dies dient dazu, Verhaltensmuster physikalischer Größen zu erkennen und Fahrzeuge somit auf häufig vorkommende Ereignisse zu bewerten. Eine beispielhafte Anwendung dieser Verfahren auf Messdaten ausgewählter Nutzfahrzeugkunden findet in Kapitel 4 statt.

Um die statistisch ausgewerteten Mess- und Simulationsdaten in einer Simulation zu verwenden, müssen stochastische Berechnungsverfahren vorhanden sein, die die Operationen „Addition“, „Multiplikation“ und „Integration“ im zeitunabhängigen Bereich bereitstellen. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Rechenoperationen ist das Vorhandensein der stochastischen Unabhängigkeit. Es ist oftmals nicht klar, ob und inwieweit die stochastische Unabhängigkeit erfüllt ist. Daher werden die vorgestellten Testverfahren angewandt und die Fehler, die bei Missachtung dieser Bedingung entstehen, durch den Vergleich mit anderen Simulationsverfahren abgeschätzt.

Unter den Optimierungsverfahren steht mit den Evolutionären Algorithmen ein Verfahren zur Verfügung, das sich für die Anwendung auf längsdynamische Simulationen besonders eignet. Unter Variation mehrerer freier Parameter kann hier ein optimales Ergebnis erreicht werden.



# 3 Energiemanagementsysteme

## – Stand des Wissens

Das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationsverfahren soll es ermöglichen, mechatronische Systeme zur Kraftstoffverbrauchsreduktion hinsichtlich ihres Potenzials im Nutzfahrzeug zu untersuchen. Ein mechatronisches System ist in der Lage, den Leistungsbedarf einer Funktion nach definierten Kriterien und Randbedingungen zu steuern. Soll diese Funktion aus Gesamtfahrzeugsicht energieoptimal betrieben werden, kann man von einem Energiemanagementsystem sprechen. In dieser Arbeit wird angestrebt, die Leistungsanforderung von Verbrauchern nach Energieeffizienzkriterien zu bedienen. Dazu benötigt ein Energiemanagementsystem nach Möglichkeit steuerbare Verbraucher, Energiewandler, Speicher, einen oder mehrere Energiepfade und eine Betriebsstrategie.

In diesem Kapitel sollen zuerst die Grundlagen und Begriffsdefinitionen der Worte Energiemanagement und Energiemanagementsystem erläutert werden. Im weiteren Schritt wird ein Verständnis von Leistungs- und Energiefluss geschaffen und am Beispiel von Nutzfahrzeugen diskutiert. Anschließend werden die grundsätzlichen Stellhebel eines Energiemanagementsystems vorgestellt und beispielhaft an Nutzfahrzeugen angewendet. Am Ende des Kapitels stehen einige Energiemanagementkonzepte bereit, die im weiteren Verlauf zur Anwendung und Validierung der neuen Methodik benutzt werden.

### 3.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Seit Mitte der 90er Jahre wird der Begriff *Energiemanagement* (*EnM*) immer häufiger in Verbindung mit Kraftfahrzeugen verwendet. Die Anfänge von *Energiemanagementsystemen* (*EnMS*) finden sich in elektrischen Bordnetzen verbrennungsmotorisch betriebener Personenkraftwagen. Das EnMS hatte hier nicht die Aufgabe, die Energie effizient bereit zu stellen, sondern

primär „... die Erfüllung der dem Bordnetz gestellten Aufgaben ...“ [48] zu sichern. Aufgrund des steigenden Leistungsbedarfs elektrischer Verbraucher und einem nicht äquivalenten Anstieg der Energiebereitstellung sollte das Ziel eines EnMS die hundertprozentige Funktionsverfügbarkeit und die Gewährleistung des Motorstarts sein. Das EnMS wird allerdings nur als Notmaßnahme bezeichnet, da es die benötigte Energie laut seiner Aufgabe verwalten (z. B. durch das Anheben der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors), aber keine zusätzliche Energie bereitstellen kann [48].

In [19] wird unter dem Begriff *elektrisches Energiemanagement (EEM)* neben der Funktionsverfügbarkeit [48] die Energiewandlungskette zur Erzeugung elektrischer Energie betrachtet. Das EEM wird hier systematisch in die effiziente Bereitstellung und die effiziente Nutzung elektrischer Energie getrennt. Als Stellhebel zur effizienten Nutzung elektrischer Energie werden der bedarfsgerechte Einsatz von Funktionen und die Minimierung der Verluste im Nutzprozess genannt.

Das Ziel eines *ganzheitlichen EnMS* ist die Ausweitung der effizienten Bereitstellung und effizienten Nutzung von Energie auf alle Energieformen im Kraftfahrzeug. Die Verwendung z. B. eines hybriden Antriebsstrangs ermöglicht durch die Systemtopologie zum einen die Zwischenspeicherung von Energie, um die Energiebereitstellung und -nutzung zeitlich zu trennen. Zum anderen hat das EnMS durch die Integration eines elektromotorischen Antriebs nun zwei Energiepfade zur Überwindung der auftretenden Fahrwiderstände. Dies ergibt nach [3] ein komplexes zweidimensionales Optimierungsproblem, das z. B. mit Hilfe einer Online-Optimierung gelöst werden kann.

### 3.1.1 Energiemanagement nach ISO 50001

Mit der Norm *DIN EN 16001* ist im August 2009 ein Leitfaden entstanden, der den Aufbau eines betrieblichen Energiemanagementsystems zum Zwecke der langfristigen Steigerung der Energieeffizienz beschreibt. Dabei beinhaltet die Norm formell Anforderungen an ein Energiemanagementsystem und orientiert sich dabei an einigen Anforderungen der Umweltmanagementnorm ISO 14001. In dieser Norm sind die Begriffe Energiemanagement und Energiemanagementsystem erstmalig definiert [22]:

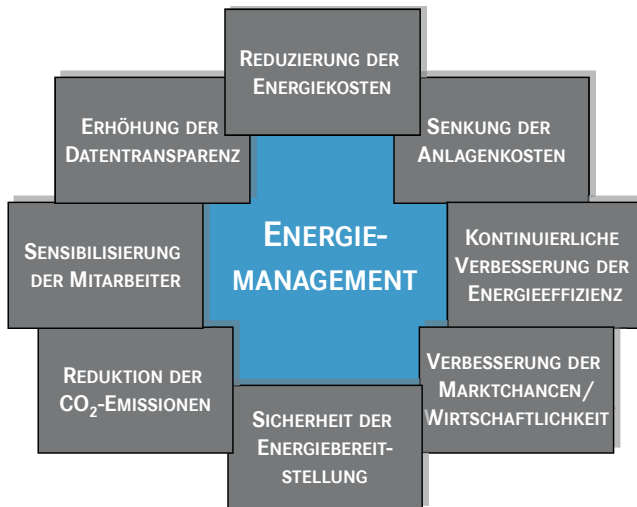
a) Das *Energiemanagement*

- „... umfasst die Summe aller Maßnahmen, die geplant und durchgeführt werden, um bei geforderter Leistung einen minimalen Energieeinsatz sicherzustellen.“
- „... nimmt Einfluss auf organisatorische und technische Abläufe sowie Verhaltensweisen ...“

b) Ein *Energiemanagementsystem*

- „... dient der systematischen Erfassung der Energieströme ...“
- „... dient als Basis zur Entscheidung für Investitionen zur Verbesserung der Energieeffizienz.“

In Abhängigkeit der Aufgabenstellung wird das Energiemanagementsystem gegebenenfalls durch technische Lösungen zur optimierten Steuerung und Regelung sowie durch Aktuatorik-, Wandler- und Speichersysteme ergänzt.



**Abb. 3.1:** Vorteile eines Energiemanagements, nach [36]

Die Vorteile bei der Verwendung eines Energiemanagementsystems beschreibt [36] nach Abbildung 3.1 mit der Reduzierung der Energiekosten, der Senkung der Anlagenkosten, der kontinuierlichen Verbesserung

der Energieeffizienz, der Verbesserung der Marktchancen/Wirtschaftlichkeit, der Sicherheit in der Energiebereitstellung, der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Sensibilisierung der Mitarbeiter und der Erhöhung der Datentransparenz.

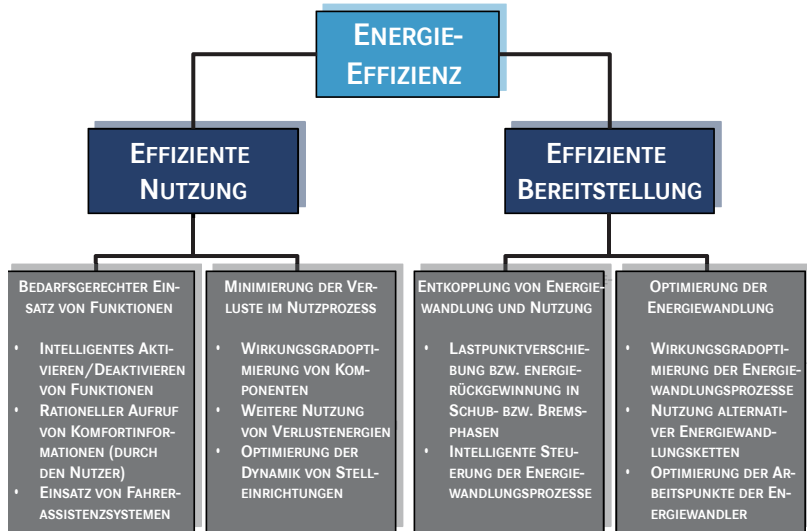
Im Dezember 2011 wurde die Norm EN 16001 durch die EN ISO 50001 ersetzt. In Deutschland gilt diese als DIN-Norm *DIN EN ISO 50001*. Sie soll durch Vorgaben für ein systematisches Energiemanagement Organisationen dabei helfen, Energiekosten, Treibhausgase und andere Umweltauswirkungen zu reduzieren.

### 3.1.2 Energiemanagement in Kraftfahrzeugen

Eine Übertragung der Ansätze aus dem Energiemanagement in der Gebäudetechnik auf Kraftfahrzeuge ist einfach realisierbar, da die Struktur von Energiequellen, Energiewandlern und Energiesenken sowie das generelle Vorgehen der technischen Problembeschreibung und der Lösungsmethoden vergleichbar sind.

In [19] werden die *Ziele und Randbedingungen eines Energiemanagementsystems* vorgestellt, das seine Anwendung im elektrischen Bordnetz findet. Die Zielfunktion des Energiemanagementsystems ist dabei in der Regel ein Kompromiss zwischen zuverlässiger Energiebereitstellung und deren effizienter Wandlung. Die Funktion „Bereitstellung elektrischer Energie & Laden der Batterie“ wird nun durch zwei Teilfunktionen ersetzt. Eine der Teilfunktionen steuert die Energiewandlung aus mechanischer in elektrische Energie und deren Speicherung. Die Steuerung kann nach Energieeffizienzkriterien in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen (z. B. Betriebspunkte Verbrennungsmotor oder Generator, Topografie der Fahrstrecke, Fahrerverhalten etc.) geschehen. Die zweite Teilfunktion teilt die im Systemverbund aus Speicher und Wandler bereitstehende Energie entsprechend der Leistungsanforderung einzelner Verbraucher zu. Auch hier kann die Zuteilung nach Kriterien der Wirkungsgradoptimierung in Abhängigkeit von gesetzten Randbedingungen (z. B. Generatorauslastung oder Speicherstand) nach einer festgelegten Priorität erfolgen.

Abbildung 3.2 stellt *Maßnahmen zur effizienten Bereitstellung* von elektrischer Energie und deren effizienter Nutzung dar. Der Grundgedanke der Erhöhung der Kraftstoffeffizienz teilt sich hierbei auf in Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs einer Funktion bzw. Komponente und zur Bereitstellung der Endenergieform (in diesem Fall elektrischer Energie).



**Abb. 3.2:** Strategien zur effizienten Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie, nach [103]

Die grundsätzliche Gliederung der Maßnahmen lässt sich auch auf andere Energieformen (z. B. mechanische, hydraulische oder pneumatische Energie) übertragen.

### 3.1.3 Versorgungssicherheit und Energieeffizienz

Inbesondere *Nebenaggregate* sind nach [100] in der Regel für den höchsten Lastfall bei geringer Antriebsdrehzahl dimensioniert. Dies führt dazu, dass in diesem Betriebspunkt die Wandlerleistungen der Nebenaggregate geringer als die angegebenen Nennleistungen ausfallen. Das Bordnetz ist in seiner herkömmlichen Aufbauweise durch die Energiequellen Generator und Batteriespeicher in seiner Energieversorgung redundant ausgelegt. Im Fehlerfall des Generators oder der Batterie (außer Kurzschluss) und im Falle zu geringer Leistungsfähigkeit einer dieser Komponenten kann jeweils das andere Bauteil die Funktion der Energieversorgung übernehmen. Dies kann allerdings nur dann geschehen, wenn die Energiequellen auf einen solchen Fall ausgelegt und konditioniert sind, was eine ausreichende Wand-

lerleistung des Generators und einen ausreichenden Batterieladezustand voraussetzt.

Ein *Energiemanagementsystem für das Bordnetz* ist in der Lage, die Wandlerleistung des Generators zu verändern und somit im Bedarfsfall Energie der Batterie zu entnehmen oder sie zu laden. Da die Versorgung der Verbraucher nun durch die Energieentnahme aus dem Batteriespeicher nicht mehr von einer Energiequelle abhängt, könnte auf der einen Seite die Dimensionierung des Generators neu berechnet werden und der Generator theoretisch in seiner maximalen Leistungsfähigkeit reduziert werden. Auf der anderen Seite könnte die maximale Leistungsfähigkeit des Generators erhöht werden, um in energetisch günstigen Phasen viel Energie in den elektrischen Speicher zu wandeln. Beide dieser Lösungen können für einige Anwendungsfälle die jeweils energieeffizientere Variante sein. Ein Energiemanagementsystem muss daher in der Lage sein, den Leistungsbedarf der Verbraucher zu detektieren und entsprechend die Energie aus der bevorzugten Energiequelle bereitzustellen.

Durch die Möglichkeit, das Verhalten der Komponenten im Fahrbetrieb zu beeinflussen, ergeben sich für ein mechatronisches System im Bordnetz *potenzielle Fehlerfälle*, die nicht gewünscht sind. Diese sind die langfristige Schädigung der Batterie durch zu hohe Ladespannungen und starke Zyklisierung, sowie die ungewollte Entladung der Batterie. Die Entladung oder Schädigung des Batteriespeichers reduzieren das redundante System mit zwei Energiequellen um den chemischen Speicher. Softwareseitige Fehler können durch eine ungewollte Entregung des Generators das System um den Generator reduzieren. In der bisherigen Systemauslegung waren diese Fehlerfälle nicht möglich.

Mit der Umsetzung der Methoden der ISO-Norm *ISO 26262* („Road vehicles - Functional Safety“) soll die Sicherheit eines Systems mit elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Kraftfahrzeug gewährleistet werden. Durch die zunehmende Komplexität und die damit steigende Möglichkeit von Fehlfunktionen besteht im Falle einer Fehlfunktion die Gefahr, dass Menschen zu Schaden kommen [63]. Von der ISO 26262 wird gefordert, ab einem gewissen Sicherheitslevel eine unabhängige Instanz hinzuzuziehen, die die funktionale Sicherheit eines Produkts gewährleistet [64].

Die funktionale Sicherheit sowie die Qualitätsziele des Fahrzeugherstellers (z. B. Gewährleistung der Startfähigkeit durch Erhöhung des Ladezustands vor dem Abstellen des Fahrzeugs) reduzieren das Verbrauchspotenzial einer Energiemanagementmaßnahme. Umso wichtiger ist es, diese

Einschränkungen in der Betriebsstrategie zu berücksichtigen und in die Bewertung der Maßnahme zu integrieren.

## 3.2 Energie und Leistung

Um ein Verständnis der *Energieverteilung* in einem Kraftfahrzeug zu gewinnen, findet an dieser Stelle eine Betrachtung der Energie- und Leistungsflüsse anhand der Systemarchitektur eines Nutzfahrzeugs statt. Ein einheitliches Systemverständnis ist wichtig, da sich das stochastische Simulationsverfahren sowohl an der komponentenorientierten Abbildung eines Nutzfahrzeugs (vgl. Kapitel 2) als auch an dessen hierarchischer Energieverteilungsstruktur orientiert.

### 3.2.1 Definition von Energie und Leistung

Die physikalische Größe „Energie“ mit der SI-Einheit Joule beschreibt in der klassischen Mechanik die Fähigkeit eines Systems, mechanische Arbeit zu leisten [74]. Dabei wandelt nach der Definition die Arbeit Energie zwischen unterschiedlichen Energieformen um. Die am häufigsten verwendeten Energieformen werden im Folgenden genannt.

Die *potenzielle Energie* eines Körpers der Masse  $m$  ist abhängig von der Gravitationsbeschleunigung  $g$  und der Höhe  $h$ , die relativ zum Gravitationszentrum gemessen wird. Aus der Definition

$$E = \int F \cdot dx \quad (3.1)$$

leitet sich die potenzielle Energie  $E_{\text{pot}}$  ab:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad [\text{J}] \quad (3.2)$$

Die *kinetische Energie*  $E_{\text{kin}}$  beschreibt die Energie des Bewegungszustands eines Körpers in einem Bezugssystem. Sie ist proportional zur Masse  $m$  und dem Quadrat der Geschwindigkeit  $v$ . Die Rotationsenergie  $E_{\text{rot}}$  bestimmt sich durch das Trägheitsmoment  $J$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ .

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (3.3)$$

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad [\text{J}] \quad (3.4)$$

Die *Leistung* berechnet sich durch die Ableitung der Energie nach der Zeit.

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (3.5)$$

Für den Spezialfall einer zeitlich konstanten Energieänderung oder für den Fall, dass nur der arithmetische Mittelwert der Änderung über den Zeitraum  $\Delta t$  betrachtet werden soll, ergibt sich die Leistung durch die Division von aufgewendeter Energie  $\Delta E$  oder verrichteter Arbeit  $\Delta W$  und der dafür benötigten Zeit  $\Delta t$ .

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

Kraftstoffe in ihrer Verwendung als Primärenergieträger sind ebenfalls in ihren energetischen Eigenschaften definiert. Ihre chemische Energie wird durch Verbrennung in Verbrennungskraftmaschinen in weitere Energieformen umgewandelt. Für deren Kennzeichnung werden die Eigenschaften Heizwert und Brennwert angegeben.

Der *Heizwert*  $H_i$  ist die bei der Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge ohne Kondensationswärme, weshalb er auch mit Energiegehalt oder Energiewert bezeichnet wird. Der *Brennwert*  $H_s$  beschreibt die im Kraftstoff enthaltene thermische Energie. Mit ihm wird die Wärmemenge beschrieben, die bei Verbrennung und Abkühlung der Abgase auf 25° C sowie deren Kondensation entsteht [26].

Für Dieselkraftstoff, der für Kraftfahrzeuge die DIN-Norm DIN EN 590 erfüllen muss, ergibt sich ein Heizwert von

$$H_{i,\text{Diesel}} = 42,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 11,8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \quad (3.7)$$

Mit einer Dichte von  $0,83 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$  (15° C) ergibt sich der auf das Volumen bezogene Heizwert von

$$H_{i,\text{Diesel}} = 9,8 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \quad (3.8)$$

Mit diesem Zusammenhang kann die Beziehung zwischen getanktem Kraftstoff und Primärenergie hergestellt sowie die Bewertung von weiteren Energieformen (Sekundär- oder Nutzenergie, z. B. potentielle und kinetische Energie oder elektrochemische Energie in Energiespeichern) über die Verluste der Energiewandlung durchgeführt werden.



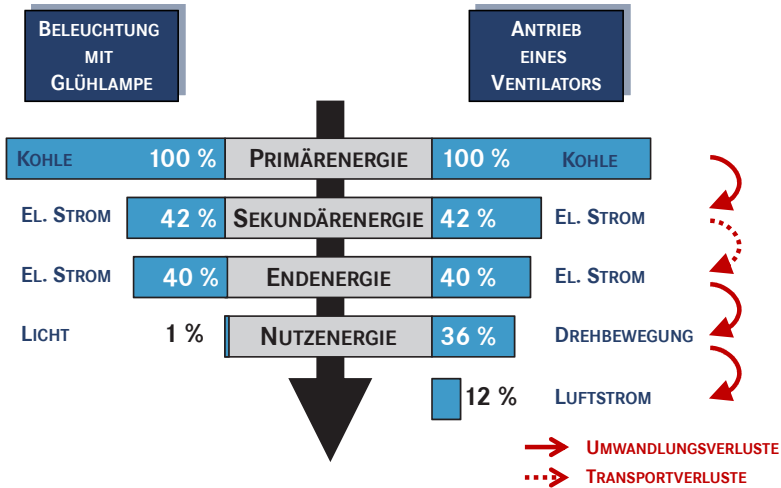
Die Begriffe „Energiefluss“ und „Leistungsfluss“ sind in der Literatur unterschiedlich definiert. In der Regel verwendet man den Begriff Energiefluss weitgehend synonym zum Begriff „Leistung“, da die Leistung als die zeitliche Ableitung der Energie beschrieben ist.

Für diese Arbeit werden die folgenden Definitionen verwendet:

1. Die Energie  $E$  sei als Integral aus Kraft- und Bewegungsgröße definiert (z. B. nach Gleichung (3.1)).
2. Die Leistung  $P$  wird als zeitliche Änderung der Energie nach Gleichung (3.6) festgelegt.
3. Der Energiefluss bezeichnet die räumliche Verschiebung von Energie.
4. Der Leistungsfluss ist als die räumliche Verschiebung von Energie pro Zeit definiert.

### 3.2.2 Primär- und Sekundärenergie

Die Basis der technischen Energieversorgung stellen nach [80] in der Natur vorkommende Energieträger. Die Energie, die daraus zur Verfügung steht, wird als Primärenergie bezeichnet. Als *Primärenergieträger* gelten Stein- und Braunkohle, Kernenergie, Rohöl, Erdgas, Wind- und Wasserkraft, Sonnenenergie und Erdwärme sowie die Meeresströmung [39, 52]. Eine weitere Unterteilung kann hierbei in sich erneuernde und sich aufbrauchende Primärenergien gemacht werden. In den wenigsten Fällen kann die Energie dem Verbraucher direkt zugeführt werden, so dass die Energie in andere Energieformen umgewandelt werden muss. Nach der verlustbehafteten technischen Umwandlung der Primärenergie wird sie als *Sekundärenergie* bezeichnet [20]. Beispiele hierfür sind die elektrische Energie, Briketts, Heizöl oder Benzin. Die Umwandlung erfolgt deswegen, um eine gute Lager- und Transportfähigkeit sowie hohe Energiedichten und günstige Herstellkosten zu erreichen. Die *Endenergie* ist die nach Abzug von Umwandlungs- und Transportverlusten bereitstehende Energie, die der Verbraucher nutzen kann. Nach weiterer Umwandlung oder Anwendung der Endenergie steht dem Endnutzer die sogenannte *Nutzenergie* bereit, die die eigentlich gewünschte Funktion erfüllt. Formen der Nutzenergie können Licht, Schallwellen, Wärme, Kälte oder mechanische Arbeit sein. Die Nutzenergie ist meist kleiner als die Endenergie. Beim Betrieb einer Glühbirne werden ca. 95 % der Energie in Wärme umgesetzt.



**Abb. 3.3:** Definition von Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie, nach [16]

In Abbildung 3.3 sind zwei Beispiele dargestellt: die Bereitstellung von Nutzenergie zum Antrieb eines Ventilators und zum Betrieb einer Glühlampe. Beim Stromversorger wird für den Haushalt Endenergie eingekauft, die in Nutzenergie gewandelt wird [15]. Die *Energiewertschöpfungskette* beschreibt, wieviel der ursprünglich eingesetzten Primärenergie für die Nutzenergie übrig bleibt [88]. Die anschaulichste Darstellungsform hierfür ist das Sankey-Diagramm.

Eine Übertragung der hier angegebenen Definition auf eine Kraftfahrzeugarchitektur ist möglich. Sobald die Systemgrenze um das Nutzfahrzeug definiert wird, kann man aus Fahrzeugsicht die Kraftstoffenergie (z. B. Diesel) als die vorherrschende Primärenergie betrachten. Plug-In-Fahrzeuge weisen zwei Primärenergiequellen auf, da sie durch das Stromnetz zusätzlich gespeist werden können. Die Wandlung in Sekundärenergie erfolgt im Verbrennungsmotor (mechanische Energie) sowie den Nebengaggregaten (elektrische, hydraulische, ..., Energie). Der Funktion steht nach Abzug der Übertragungsverluste (elektr. Verluste – Spannungsabfall, Druckluft – Leckagen, ...) Endenergie zur Verfügung, die sie nutzen kann (Nutzenergie).

Optimierungsansätze können nicht nur an der Sekundärenergie ansetzen, sondern direkt in der Übertragung von Primärenergie auf die

Nutzenergie, wo sämtliche Freiheitsgrade der Energiewandlung (sog. Energiepfade) bereitstehen.

### 3.2.3 Energiebilanzierung

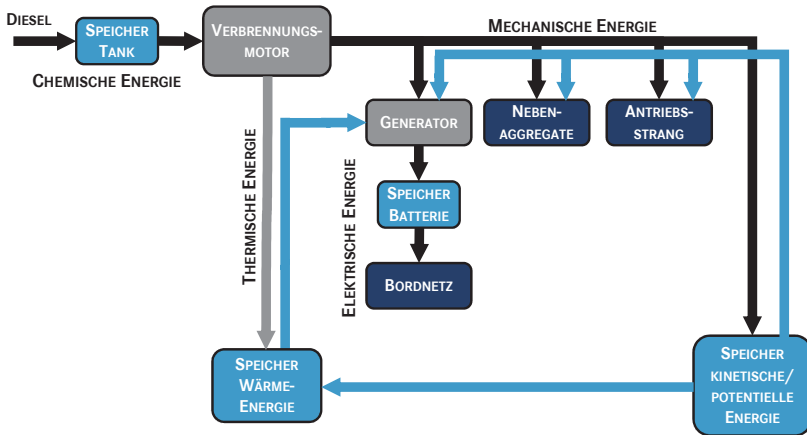
Eine *Energiebilanzierung* kann um eine definierte Systemgrenze getätigt werden. Handelt es sich dabei um ein geschlossenes System<sup>1</sup>, bleibt innerhalb dieses Systems die Gesamtenergie aufgrund des *Energieerhaltungssatzes* konstant und kann sich daher auch nicht mit der Zeit ändern [67]. Energie kann allerdings zwischen verschiedenen Energieformen gewandelt werden, wie z. B. zwischen chemischer, elektrischer, potentieller, kinetischer oder thermischer Energie. Nach der physikalischen Definition gibt es die Begrifflichkeiten Energieerzeugung und Energieverbrauch nicht, obwohl diese im täglichen Sprachgebrauch sehr häufig verwendet werden. Im technischen und wirtschaftlichen Umfeld spricht man in der Regel von Energieverbrauch, wenn ein Primärenergieträger (z. B. Dieselkraftstoff) in eine Energieform gewandelt wird, die nicht mehr genutzt werden kann (z. B. Wärme). In der Physik kann man diesen Prozess durch die Änderung der thermodynamischen Zustandsgröße „Entropie“ charakterisieren. Die *Entropie* wird im Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik definiert, der mit seiner Aussage die Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit, wie sie im Ersten Hauptsatz beschrieben wird, einschränkt [133]. Wärme kann somit sowohl nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden als auch nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen [117].

Geht man vom primären Energieträger Kraftstoff aus, wird Energie durch Energiewandlung in verschiedene Formen im Fahrzeug gewandelt, um schließlich als Endenergie für eine Komponente zur Erfüllung einer Funktion (Nutzenergie) bereitzustehen. In Abhängigkeit der Fahrzeugarchitektur sind verschiedene Flussrichtungen möglich.

Abbildung 3.4 zeigt schematisch einige dieser Wege: Dem Fahrzeug wird von außen Energie in Form von Dieselkraftstoff zugeführt. Anschließend durchläuft diese Energie verschiedene *Umwandlungsprozesse*. Jede Energiewandlung ist dabei mit Verlusten behaftet, in der Regel ist dies eine Energiewandlung in Wärmeenergie, die nur schwer genutzt werden kann.

---

<sup>1</sup> z. B. dadurch realisiert, dass die Systemgrenze stets so gesetzt wird, dass kein Energieaustausch mehr mit der Umgebung des Systems stattfindet



**Abb. 3.4:** Energie-Wege im Fahrzeug (ohne elektrische Antriebsmöglichkeit), nach [97]

Die Beschleunigung des Fahrzeugs führt zur Energiewandlung in kinetische Energie. Diese Energie wird in der Regel durch einen Bremsvorgang in Wärmeenergie gewandelt und verlässt hauptsächlich über Konvektion die Systemgrenze Fahrzeug. Einige Ansatzmöglichkeiten zur Verbrauchsreduktion stellen die blauen Pfeile dar: Eine weitere Energiewandlung der kinetischen Energie in Nutzenergie, z. B. durch die Nebenaggregate oder die Fahrwiderstandsenergie (durch Ausrollen des Fahrzeugs), führt dazu, dass die direkte Energiewandlung in Wärmeenergie entfällt.

Sowohl die Anzahl als auch die Form der Energiewandlungen sind stark an die Funktions- und Systemarchitektur eines Fahrzeugs gekoppelt. Da jede Energiewandlung mit Verlusten verbunden ist, kann man davon ausgehen, dass die Nutzenergie mit zunehmender Wandlungsanzahl abnimmt, was bedeutet, dass die Effizienz des Wandlungsprozesses bezogen auf die Primärenergie sinkt. Die Berechnung der Energiebilanz hat einen stark hierarchischen Charakter. Die elektrische Wandlungsenergie des Generators teilt sich auf die einzelnen Energiebedarfe seiner Verbraucher und die Verluste bei der Energieübertragung auf. Die mechanische Energie des Generators berechnet sich aus seiner elektrischen Energie und der Verlustenergie bei der Energiewandlung. Die mechanische Energie des Verbrennungsmotors addiert sich aus der mechanischen Energie des Generators und der Energie für die weiteren Nebenaggregate sowie der Fahrwiderstandsenergie und der Verlustenergie innerhalb des Fahrzeugs (insbesondere hervorgerufen durch den

Antriebsstrang). Die Kraftstoffenergie addiert sich aus der mechanischen Energie des Verbrennungsmotors, der Wärmeenergie bei der Energiewandlung und weiterer Energiesenken, z. B. zum Betrieb einer Standheizung. In Abbildung 3.5 ist diese Energie-Hierarchie für ein Nutzfahrzeug schematisch dargestellt. Die Energiewandlung ist hier in beide Richtungen der Energiewandlungsebenen möglich. Die hellblaue Färbung kennzeichnet die Energiespeicher für Druckluft, elektrische Energie, Kraftstoffenergie sowie kinetische und potenzielle Energie. In ihnen kann gewandelte Kraftstoffenergie gespeichert werden und nach einer definierten Zeitdauer in weitere Energieformen gewandelt werden. Die Nebenaggregate lassen eine Energiewandlung in nur eine Richtung — nämlich in zunehmender Wandlungsebene — zu. Zur Vereinfachung werden an dieser Stelle sowohl Neben- als auch Hilfsaggregate mit dem Begriff Nebenaggregate bezeichnet. In dunkelblauer Farbe ist die Energie dargestellt, die zum Betrieb von Komponenten und Funktionen benötigt wird.

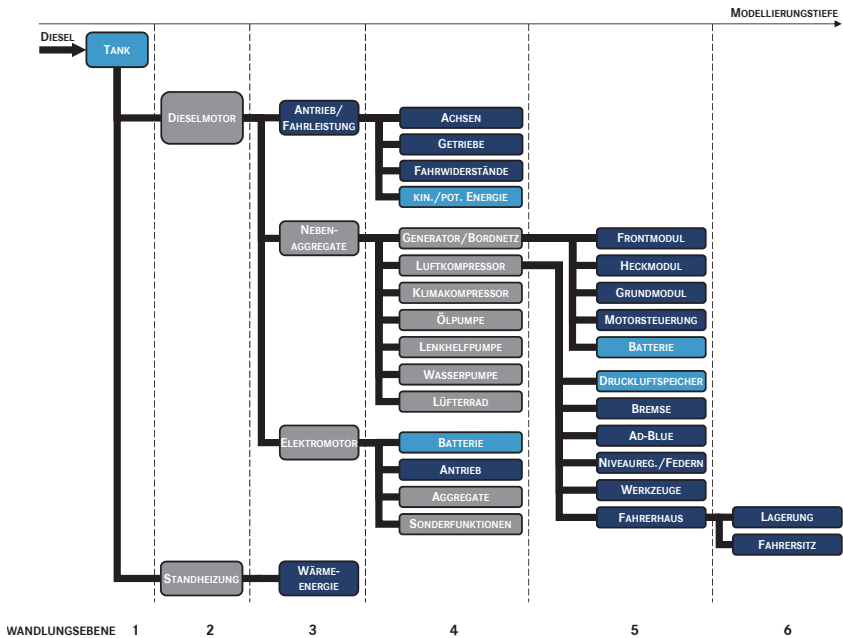


Abb. 3.5: Energie-Hierarchie anhand der Fahrzeugarchitektur, nach [97]

Anhand dieser *Energie-Hierarchie* ist die Erstellung einer Energiebilanz und deren Darstellung in Form eines Sankey-Diagramms möglich. Im Sankey-Diagramm wird ausgehend von der eingesetzten Kraftstoffenergie (100 %) die prozentuale Energieverteilung aufgeführt. So lässt sich über eine gefahrene Strecke die Energiewandlung in verschiedene Bereiche darstellen. Diese Darstellung hat allerdings keine Aussagekraft über die aufgetretenen Leistungen.

Für die *Energiebilanzierung* und die Simulation von Leistungsflüssen kann die Hierarchieebene der Nutzenergie als Systemgrenze für die Wahl des Detaillierungsgrads dienen. Die Grundlage für die Untersuchung und Bewertung von Energiemanagementsystemen ist das Gleichungssystem der Energie- und Leistungsbilanz. Anhand der Hierarchieebene kann bestimmt werden, welchen Detaillierungsgrad die Simulation annehmen soll. Dabei bestimmt die Hierarchieebene mit der höchsten Nummer die Nutzenergie. Bei der Auswahl von Hierarchieebene 6 nach Abbildung 3.5 ist die Nutzenergie von Lagerung und Fahrersitz zu bestimmen. Diese wird durch die Primärenergie Diesel bereitgestellt. Zur Systemoptimierung können nun verschiedenste Energiepfade (z. B. Zwischenspeicherung, Nutzung von kinetischer Energie usw.) genutzt werden, um die entsprechende Nutzenergie zu gewährleisten. Wird die Betrachtung der Hierarchieebene 3 gewählt, so ist die Nutzenergie die mechanische Energie, die der Verbrennungsmotor bereitstellt. Die mechanische Energie bedient hier sowohl die Anforderung von Nebenaggregaten als auch der Fahrwiderstände. Wird einer dieser Anwendungsfälle zur Durchführung einer simulativen Bewertung herangezogen, so muss die Modellierungstiefe jeweils bis zur Hierarchieebene 3 bzw. 6 erfolgen.

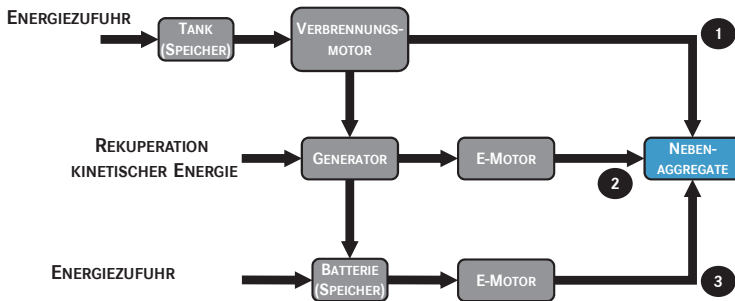
Eine *Energie- oder Leistungsbilanz* berechnet sowohl den Bedarf an Primärenergie als auch an Endenergie bzw. die notwendige Leistung für den jeweils betrachteten Betriebspunkt [6]. Wird die Energiewandlungskette zwischen Primär- und Endenergie verändert, so ergeben sich zwangsläufig Veränderungen am Energiebedarf der Primär- oder der Endenergie. Verändert man daher innerhalb einer definierten Systemgrenze z. B. den Wirkungsgrad einer Komponente, die Energie innerhalb dieses Systems wandelt, so ändert sich zwangsläufig der Energiebedarf der Primär- oder der Endenergie, da ansonsten die Bilanzierungsgleichung der Energie innerhalb des Systems nicht erfüllt ist. Fügt man also in ein bereits bilanziertes System eine Änderung ein, so ist zunächst die Gesamtenergiebilanz nicht erfüllt.

In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass bei Energiemanagementsystemen die Nutzenergie gleichbleiben soll. Eine Verbesserung oder auch Verschlechterung des Wirkungsgrads führt dazu, dass die Energiebilanz zunächst nicht erfüllt wird. Um die Energiebilanz zu erfüllen, muss daher die Primärenergie neu berechnet werden.

Für die Leistungsbilanz gilt zunächst der selbe Ansatz. Dies bedeutet, dass z. B. ein Generator zu einem beliebigen Zeitpunkt nicht mehr elektrische Leistung wandeln kann, als elektrische Verbraucher und die Batterie zu diesem Zeitpunkt aufnehmen bzw. ebenfalls wandeln können. Bei der Energiebilanz handelt es sich also um eine Beschreibung aller zu- und abfließenden Energien pro Zeit sowie die pro Zeit gespeicherten Energieanteile. Eine Übertragung auf die Kostenbilanzierung des Systems ist ebenfalls nach dem gleichen Ansatz möglich. Hier können sowohl eine Veränderung der Komponentenkosten als auch eine Kraftstoffersparnis dazu führen, dass der monetäre Aufwand, der zum Betrieb eines Fahrzeugs zu leisten ist, reduziert wird.

### 3.2.4 Energiepfade

Die Vergleichsgröße zur Bewertung unterschiedlicher Energieeffizienzkonzepte ist ihre Endenergie. Diese wird über die Bewertungsgröße Primärenergie (Kraftstoff) bereitgestellt. Die Energieform(en) der Sekundärenergie(n) sowie die zeitliche Verteilung der Leistungsflüsse sind Freiheitsgrade der Systemoptimierung. In Abbildung 3.6 ist die Endenergie als mechanische Energie zum Antrieb der Nebenaggregate gewählt.



**Abb. 3.6:** Mögliche Energiepfade (1, 2 oder 3) zur Versorgung der Nebenaggregate, nach [62]

Die Energiewandlung kann nun ausgehend von der Primärenergie des Kraftstoffs über mindestens drei verschiedene *Energiepfade* geschehen. Die drei Pfade sind nicht notwendigerweise gleichzeitig vorhanden, sondern werden durch geeignete Systeme geschaffen. Der erste Energiepfad beschreibt die Energiewandlung über den Verbrennungsmotor direkt in mechanische Energie. Der zweite Energiepfad wählt die Wandlung der mechanischen Energie aus dem Verbrennungsmotor und/oder die Wandlung kinetischer und potentieller Energie in elektrische Energie mit anschließender Wandlung in mechanische Energie. Der dritte Weg geht von der mechanischen Energie über elektrische in chemische Energie und über elektrische zurück in mechanische Energie. Die Energiewandlung in chemische Energie kann dabei zusätzlich durch externe Energiezufuhr (z. B. Laden am Ladegerät) erfolgen. Folgende Vor- und Nachteile ergeben sich in den drei Energiepfaden:

1. Aufgrund von Verlusten bei jeder Energiewandlung erscheinen die Energiepfade 2 und 3 zunächst weniger effizient zu sein als Energiepfad 1. Dies ist in der direkten Leistungswandlung tatsächlich der Fall. Jedoch ergeben sich über einen Bewertungszeitraum  $t$  Vorteile der Systeme 2 und 3.
2. Der Energiepfad 2 ermöglicht die mechanische Entkopplung des Antriebs der Nebenaggregate und somit die Reduktion von auftretenden Leerlaufverlusten, die nicht Bestandteil der Nutzenergie sind. Eine mechanische Entkopplung im Energiepfad 1 wäre eine weitere Lösung, die ein identisches Verhalten wie Energiepfad 2 aufweist, allerdings mit dem Vorteil, dass keine zusätzlichen Wandlungsverluste über die elektrische Energieform vorliegen.
3. Energiepfad 3 zeigt bei der direkten Leistungswandlung ein noch schlechteres Verhalten des Gesamtwirkungsgrads auf. Aber die Möglichkeiten, kinetische Energie zu einem Zeitpunkt zu speichern, in dem die Nebenaggregate nicht angetrieben werden müssen und sie später mit der rückgewonnenen Energie zu speisen sowie die externe Energiezufuhr über Ladestationen, ergeben Zustände, die den Energiepfad 3 zu einer interessanten Alternative machen.

Die Aufgabe eines Energiemanagementsystems ist es, die Energiewandlung durch die zeitliche Steuerung der Leistungsabfolge aller Energiewandlungen zu einer maximalen Effizienz hin zu planen und anschließend zu steuern oder zu regeln.



## 3.3 Stellhebel des Energiemanagements

Die Steuerung der Leistungsflüsse scheint neben einer Effizienzsteigerung der jeweiligen Energiewandler eine sinnvolle Möglichkeit zu sein, um den Wirkungsgrad zwischen Endenergie und Primärenergie zu erhöhen. In Abbildung 3.7 sind auf Basis eines verbrennungsmotorischen Wirkungsgradkennfelds fünf grundsätzliche *Stellhebel des Energiemanagements* dargestellt.

Diese Stellhebel sind nach [106]:

1. Reduzierung des Endenergiebedarfs: z. B. Verbesserung von Aerodynamik, Rollwiderständen, Reibungsverlusten, Wärme- und Kaltstartverlusten, ...
2. Energie effizient und bedarfsgerecht bereitstellen: z. B. geregelte mechanische bzw. elektrifizierte Nebenaggregate, Motor-Stopp-Start, ...
3. Energie zurückgewinnen: z. B. durch Generatormanagement, rekuperatives Bremsen, thermoelektrische Generatoren, ...
4. Optimierte Gesamtfahrzeugintegration: z. B. energieeffiziente Betriebsstrategien, optimiertes Zusammenwirken von Teilsystemen
5. Fahrerunterstützung: z. B. Fahrtanalysen, Eco-Funktionen, Eco-Tempomat



**Abb. 3.7:** Stoßrichtungen des Energiemanagements, nach [106]

In dieser Arbeit sollen die Stellhebel 1-4 betrachtet werden.

### 3.3.1 Reduzierung des Endenergiebedarfs

Die höchste Ersparnis an Primärenergie ergibt sich in der Vermeidung der Nutzenergie, da in diesem Fall keine Primärenergie bereitgestellt werden

muss. Für die Erhaltung der Vergleichbarkeit muss bei der Bewertung einer solchen Maßnahme die maßgebliche Funktion eines Fahrzeugs beachtet werden. Eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit z. B. bedeutet zunächst eine Reduktion der Endenergie zur Bewältigung der Fahrwiderstandsleistungen und damit in der Regel auch eine Reduktion der Primärenergie, sofern in den resultierenden Betriebspunkten keine Wirkungsgradverschlechterung stattfindet. Gleichzeitig reduziert sich die Funktion des Fahrzeugs, die darin besteht, eine Transportaufgabe in einer definierten Zeit zu leisten.

In der Regel sind diese Maßnahmen aufgrund der Hersteller- und Kundenmeinungen auszulegen und zu parametrieren. Zur Quantifizierung verschiedener Systeme mit einer Endenergieabsenkung ist eine technische Simulation geeignet. Für die Bewertung subjektiver (z. B. das Temperaturempfinden nach Abschalten des Klimakompressors) oder objektiver Eigenschaften (z. B. die Verlängerung der Transportzeit durch niedrigere Fahrgeschwindigkeiten) sind ggf. weitere Bewertungsgrößen in das Fahrzeugmodell einzufügen. Eine Verlängerung der Transportzeit kann z. B. durch monetäre Größen mit einer Verbrauchssimulation gekoppelt werden, um zu bestimmen, welche Geschwindigkeit die höchste Wirtschaftlichkeit nach sich zieht. Hierbei sind u. a. Personalkosten sowie die Auftragsbindung des Fahrzeugs (keine Möglichkeit zur Beförderung weiterer Auftragsgüter) ebenfalls zu berücksichtigen.

### **3.3.2 Effiziente und bedarfsgerechte Bereitstellung von Energie**

Muss eine geforderte Endenergie bereitgestellt werden, bieten sich bei den notwendigen Energiewandlungsvorgängen aus Primärenergie einige Ansatzpunkte zur Verbrauchsreduktion. Durch die Verwendung verbesserter Technologien oder Materialien kann beim Betrieb eines Energiewandlers (z. B. Verbrennungsmotor) eine Anhebung seines Wirkungsgrads erzielt werden. Eine weitere Maßnahme ergibt sich in der Verschiebung des Betriebspunktes aus einem Bereich mittleren Wirkungsgrads in einen Bereich hoher Wirkungsgrade. Erreicht werden kann dies bei mechanisch angetriebenen Komponenten z. B. durch die Variation des Übersetzungsverhältnisses. Bei stark unterschiedlichen Betriebspunkten ist über den Einsatz variabler Übersetzungen nachzudenken, um somit die Energie zu jedem Zeitpunkt in einem guten Wirkungsgradbereich zu wandeln. Weiterhin ist es hier denkbar, ein Kennfeld in seiner Ausprägung zu deformieren, um so möglichst viele Betriebspunkte in den Bereich guter Wirkungsgrade zu verschieben.

Die Änderung an der Komponente durch geeignete Maßnahmen sollte dabei auf die späteren Betriebspunkte im Fahrzeug ausgelegt sein.

Schlechte Gesamtwirkungsgrade ergeben sich bei hohen Leerlaufanteilen, bei denen keine Endenergie abgenommen wird. Über eine Abkopplung des Systems in nicht genutzten Bereichen (wie z. B. bei Stopp-Start-Systemen) lassen sich hier Verluste minimieren. Bei mehrfacher Energiewandlung ist die Wirkungsgradkette zu betrachten. Hier sind die Betriebspunkte der Endenergie so zu wählen, dass die Multiplikation der Wirkungsgrade aller einzelnen Wandler im Bereich des Bestpunktes liegt.

### 3.3.3 Rekuperation von Energie

Dieser Ansatz unterscheidet sich von einer direkten Energiewandlung in die Endenergie und der damit verbundenen Energiekette. Bereits die Möglichkeit, ein Fahrzeug in Bewegung zu setzen und damit chemische Energie in kinetische Energie zu wandeln, eröffnet zu einem späteren Zeitpunkt die Möglichkeit, diese kinetische Energie in Endenergie z. B. für Nebenaggregate zu wandeln, ohne dafür weitere Kraftstoffenergie einzusetzen.

Der Stellhebel nutzt Energie, die bisher nicht als Endenergie eingesetzt wird, und daher umgangssprachlich als Verlust bezeichnet wird, da sie die Systemgrenze in der Regel als Wärme verlässt. Neben der Energiewandlung der nutzbaren Wärmeenergie in weitere Energieformen (z. B. durch einen thermoelektrischen Generator in elektrische Energie) lässt sich durch Vermeidung der Energiewandlung in Wärme Primärenergie sparen. Dies ist z. B. beim Brems- und Schubetrieb eines Fahrzeugs möglich. Anstatt die kinetische Energie in Wärme zu wandeln, kann der Fahrerwunsch „Geschwindigkeit verringern“ durch die Energiewandlung in andere Energieformen geschehen, so wie es z. B. bei der Bergauffahrt durch Wandlung in potentielle Energie geschieht. Dies ist z. B. durch die energetische Kopplung von Nebenaggregaten und Speichern während der Abbremsung des Fahrzeugs möglich. Des Weiteren kann bei einer Fahrpedalanforderung von 0 % der Antriebsstrang von der Straße entkoppelt werden, um nicht durch die Schleppleistung des Motors kinetische Energie des Fahrzeugs in Wärme zu wandeln. Wird der Verbrennungsmotor während der Entkopplung weiter befeuert, ergeben sich allerdings an dieser Stelle wieder Wärmeverluste.

Ein derzeit eingesetztes System zur Rekuperation von kinetischer und potentieller Energie ist das Druckluftsystem von Nutzfahrzeugen [127].

Dieses priorisiert die Energiewandlung und -speicherung in den Schubphasen. Auch immer mehr Personenkraftwagen nutzen die Entkopplung des Antriebsstrang in der sogenannten „Segelfunktion“.

Die zeitliche Trennung von Energiewandlung und Bereitstellung der Endenergie eignet sich in Kombination mit der Errichtung mehrerer Energiepfade. Um die Leistungsflüsse energieeffizient zuteilen zu können, bedarf es hierfür steuer- und regelbarer Energiewandler sowie einer Speichermöglichkeit zur temporären Zwischenspeicherung der gewandelten Energie.

### 3.4 Ansatzmöglichkeiten für effiziente Nutzfahrzeuge

An dieser Stelle sollen Möglichkeiten der Bereitstellung jeder einzelnen Energieform im Nutzfahrzeug untersucht werden. Nach Abbildung 3.8 benötigt ein Energiemanagementsystem Steuerungsmöglichkeiten zur energieeffizienten Bereitstellung der Zielenergieform.

| Enabler<br>Ziel | keine<br>Regelung | regelbar |            |           | elektrifizierte | hybrid<br>(el./mech.) |
|-----------------|-------------------|----------|------------|-----------|-----------------|-----------------------|
|                 |                   | 1/0      | mehrstufig | stufenlos |                 |                       |
| Generator       | ●                 |          |            |           |                 |                       |
| Wasserpumpe     |                   |          | ●          |           |                 |                       |
| Ölpumpe         | ●                 |          |            |           |                 |                       |
| Lenkhilfpumpe   |                   |          |            | ●         |                 |                       |
| Kraftstoffpumpe | ●                 |          |            |           |                 |                       |
| Luftpresser     |                   | ●        |            |           |                 |                       |
| Motorlüfter     |                   |          |            | ●         |                 |                       |
| Klimakompressor |                   | ●        |            |           |                 |                       |

Abb. 3.8: Mögliche Stellhebel für ein Energiemanagementsystem mit Nebenaggregaten und Stand der Technik bei Nutzfahrzeugen

Die Möglichkeiten der Beeinflussung der Energiewandlungsvorgänge bestehen über eine Steuerbarkeit, Regelbarkeit, eine Elektrifizierung oder eine

hybride Energieversorgung. Bei der hybriden Energieversorgung erfolgt die Energiebereitstellung durch eine Kombination aus mehreren Energiepfaden (z. B. durch mechanische und elektrische Energie).

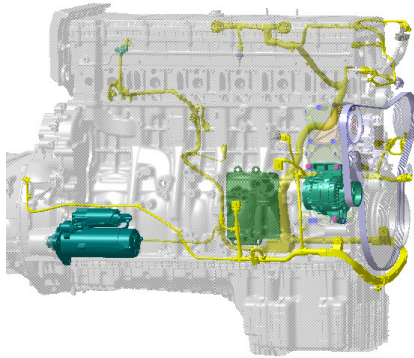
In Abbildung 3.8 ist ebenfalls der Stand der Technik bei Nutzfahrzeugen eingezeichnet. Demnach bestehen bei den Aggregaten Generator, Öl- und Kraftstoffpumpe derzeit keine Möglichkeiten der gezielten Beeinflussung der Energiewandlung. Diese geschieht bedarfsorientiert durch eine Anforderung seiner Verbraucher. Die Wasserpumpe wird bereits über eine mehrstufige Übersetzung angetrieben. Heute eingesetzte Lenkhilfpumpen können ihr Fördervolumen in Abhängigkeit der Antriebsdrehzahl variieren. Der Ausgang des Luftpressers ist schaltbar. Er kann wahlweise in das Druckluftsystem (also gegen den bestehenden Systemdruck) oder gegen die Umgebung (gegen Umgebungsdruck) fördern, sofern keine Druckerhöhung im Luftsystem gefordert ist. Durch eine Ansteuerung in den Bremsphasen führt dies zu einer merklichen Kraftstoffersparnis. Der Motorlüfter ist über eine Visco-Kupplung stufenlos in seiner Drehzahl regelbar, während der Klimakompressor situationsgerecht über eine Magnetkupplung zu- und abschaltbar ist.

Die matrixförmige Darstellung nach Abbildung 3.8 bietet die Möglichkeit, Energiemanagementmaßnahmen für Nebenaggregate zu generieren. Eine denkbare Maßnahme für den Generator ist dessen situationsabhängige Regelung mit Hilfe einer Schnittstelle, die den Erregerstrom beeinflussen kann. So kann der Energiefluss nicht in Abhängigkeit der Verbraucheranforderung, sondern nach energetischen Gesichtspunkten des Gesamtfahrzeugs gesteuert werden. Im Falle des Motorlüfters scheint die hybride Ansteuerung eine sinnvolle Variante zu sein. In diesem Fall wird eine Grundlast durch mechanische Energie und einen mechanisch gekoppelten Lüfter bereitgestellt. Bei Spitzenlasten kann mit Hilfe der elektrischen Energie und weiteren elektrisch angetriebenen Lüftern eine zusätzliche Kühlleistung erzeugt werden. Durch diese Maßnahme reduziert sich die Verlustleistung der Visco-Kupplung im mechanisch angetriebenen Lüfter, die in diesem Fall nicht mehr benötigt wird. Für den Klimakompressor stellt sich die Regelbarkeit oder die Elektrifizierung als denkbare Möglichkeit heraus.

In den folgenden Unterkapiteln sollen die einzelnen Subsysteme im Nutzfahrzeug auf Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion untersucht werden.

### 3.4.1 Elektrische Energiebereitstellung

In Abbildung 3.9 ist ein Teil des *elektrischen Systems* eines Nutzfahrzeugs dargestellt, das aus den Komponenten Generator, Starter, dem elektrischen Netz sowie zahlreichen elektrischen Verbrauchern (z. B. dem Motorsteuergerät) besteht. Zusätzlich besteht das System aus einem Batteriesatz, der als Energiespeicher dient (nicht abgebildet).



**Abb. 3.9:** Energiewandlung und -verteilung von elektrischer Energie im Nutzfahrzeug [31]

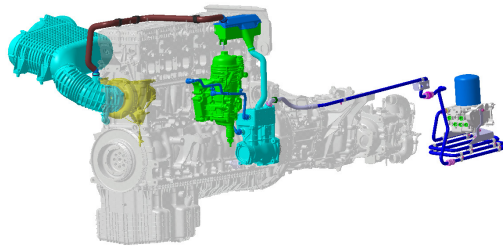
Die Bereitstellung der Energie erfolgt über den Generator, der durch einen Riemenantrieb konstanter Übersetzung mit mechanischer Energie versorgt wird. Die Batterie dient lediglich als Energiespeicher für Phasen, in denen der Verbrennungsmotor ausgeschaltet ist, zum Starten und im Stützfall, falls die maximale Leistung der Verbraucher die des Generators übersteigt. Maßnahmen zur effizienteren Bereitstellung der elektrischen Energie sind die folgenden:

- Rekuperation: Energiewandlung durch den Generator in den Brems- bzw. Schubphasen und Zwischenspeicherung der Energie in elektrischen Energiespeichern
- Drehzahlanpassung des Generators zur Wirkungsgraderhöhung
- Variation der Last der elektrischen Verbraucher
- Verbraucherabschaltung, taktender Verbraucherbetrieb
- Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors: Zuschaltung des Generators bei guter Wirkungsgradkette

- Thermoelektrische Energiewandlung aus dem Abgaswärmestrom
- Integration zusätzlicher Energiequellen (z. B. Solarzellen o. Ä.)

### 3.4.2 Pneumatische Energiebereitstellung

In Abbildung 3.10 ist das *Luftsystem* eines Nutzfahrzeugs dargestellt. Im Wesentlichen besteht dies aus den Komponenten Luftpressor, Lufttrockner, Druckregler, Vierkreisschutzventil und den Vorratsbehältern. Der Ausgang des Luftpressers kann schaltbar entweder gegen das angeschlossene Luftsystem oder gegen den Umgebungsdruck fördern. Die Umschaltung erfolgt entweder bedarfsgerecht bei Unterschreiten einer bestimmten Druckschwelle oder in Verbindung mit den Bremsphasen des Motors.



**Abb. 3.10:** Energiewandlung und -verteilung von pneumatischer Energie im Nutzfahrzeug [31]

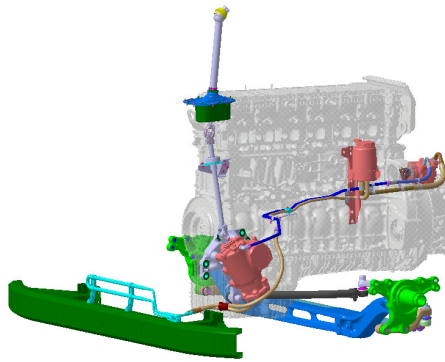
Es bestehen auch hier einige Maßnahmen, die für eine Verbrauchsreduktion sorgen können:

- Rekuperation: Energiewandlung bzw. Zuschaltung des Luftpressers in Brems- bzw. Schubphasen
- Reduktion der Leerlaufverluste durch mechanische Entkopplung (Kupplung o. Ä.)
- Variable Übersetzung der Antriebsdrehzahl des Luftpressers
- Veränderung von Funktionsweise (Turboverdichter/Verdrängerverdichter) und Verdichtungsprinzip (einstufig/zweistufig)
- Reduktion ungewollter Leckagen

- Elektrifizierter und damit bedarfsgerechter und drehzahlunabhängiger Kompressorantrieb

### 3.4.3 Hydraulische Energiebereitstellung

In Abbildung 3.11 ist das *hydraulische System* eines Nutzfahrzeugs dargestellt. Dieses besteht aus einer Lenkhilfpumpe, den Druck- und Saugleitungen sowie einem Lenkgetriebe. Die Lenkhilfpumpe ist mit einer festen Übersetzung an die Drehzahl des Verbrennungsmotors gekoppelt.



**Abb. 3.11:** Energiewandlung und -verteilung von hydraulischer Energie im Nutzfahrzeug [31]

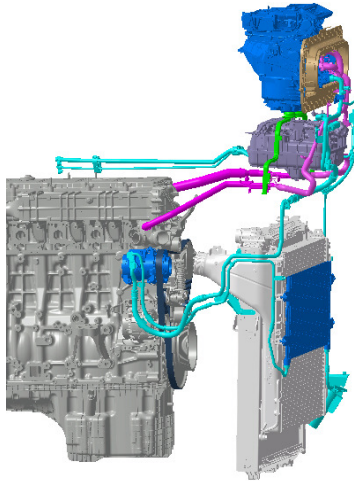
Durch die konstante Förderung eines Volumenstroms entstehen im hydraulischen System permanent Verluste, die den Gesamtwirkungsgrad reduzieren. Es bestehen hier zahlreiche Ansätze zur Verbrauchsreduktion:

- Variation des Fördervolumenstroms in der Lenkhilfpumpe
- Verwendung einer variablen Pumpenübersetzung
- Reduktion des Umlaufvolumenstroms im System nach der Lenkhilfpumpe
- Elektrischer und damit bedarfsgerechter Antrieb der Lenkhilfpumpe
- Reduktion des Lenkunterstützungsmoments bei hohen Fahrgeschwindigkeiten



### 3.4.4 Klimatisierungskonzepte

In Abbildung 3.12 ist das *Klimasystem* eines Nutzfahrzeugs dargestellt. Der Klimakompressor wird hierbei über denselben Riementrieb wie Generator und Wasserpumpe angetrieben. Die weiteren Komponenten sind hier u. a. Kondensator, Verdampfer, Expansionsventil und Wärmetauscher.



**Abb. 3.12:** Das Klimasystem im Nutzfahrzeug [31]

Es bestehen auch hier einige Ansätze zur Verbrauchsreduktion:

- Einsatz eines regelbaren Klimakompressors
- Vermehrte Nutzung des Umluftbetriebs zur Reduktion der Kälteleistung
- Nutzung von Kältespeichern zur Zwischenspeicherung von Kälteenergie
- Zuschaltung des Kompressors in energetisch günstigen Phasen (vgl. Rekuperation)
- Nutzung solarer Energie zur Vorkonditionierung des Fahrzeugs
- Nutzung der Abwärme des Verbrennungsmotors zur Kälteerzeugung

### 3.4.5 Systemübergreifende Ansätze

Natürlich darf bei einem ganzheitlichen Energiemanagement nicht nur in der Zielenergieform und auf Teilsystemebene optimiert werden. Dies reduziert den ganzheitlichen Gedanken. Für die Bereitstellung der Endenergie muss nicht immer die bisherige Sekundärenergieform zur Energieübertragung genutzt werden. Es bestehen viele kombinierte Ansätze, einige davon seien hier aufgezählt:

- Elektrifizierung von Nebenaggregaten zum bedarfsgerechten Betrieb der einzelnen Aggregate und zur effizienten Gewinnung und Zwischenspeicherung der elektrischen Energie durch Rekuperation
- Gekoppeltes System zwischen mehreren Energieformen (z. B. pneumatische und elektrische Energie), das diese Energieformen zentral verwaltet, wandelt und den jeweiligen Verbrauchern zuteilt
- Motorabschaltung im Segelbetrieb und Betrieb aller benötigten Funktionen aus den zwischengespeicherten Energieformen

### 3.4.6 Hybrider Antriebsstrang

Der *hybride Antriebsstrang* löst sich erstmals vom Gedanken, dass der Verbrennungsmotor die einzige Energiequelle zur Überwindung der Fahrwiderstände ist. Mit Hilfe der elektrischen Energie als zweite Energiequelle kann in Abhängigkeit von der Fahraufgabe die Energie von jeweils einem der beiden oder beiden Energiequellen gemeinsam genutzt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, kinetische und potenzielle Energie elektrisch zu speichern und den Wirkungsgrad der Energiewandlung des Verbrennungsmotors zu erhöhen. Es bestehen dabei folgende Ansätze zur Verbrauchsreduktion:

- Rekuperation bzw. Energiewandlung von kinetischer und potenzieller Energie
- Lastpunktverschiebung der Betriebspunkte im Kennfeld des Verbrennungsmotors
- Integration eines Motor-Stopp-Start-Betriebs
- Rein elektrisches Fahren mit Hilfe rekuperativ gewonnener Energie (heute überwiegend für leichte Nutzfahrzeuge sinnvoll realisierbar)

### 3.4.7 Ausgewählte Konzepte für diese Arbeit

Folgende Maßnahmen werden im Verlauf dieser Arbeit mit Hilfe der neuen Entwicklungsmethodik bewertet, ausgelegt und optimiert:

- Integration von Solarzellen in die bestehende Bordnetzarchitektur
- Generatormanagement zur Rekuperation elektrischer Energie
- Reduktion des hydraulischen Volumenstroms im Lenksystem
- Rekuperation im Klimasystem mit und ohne zusätzlichen Kältespeicher
- Optimierung der Systemparameter eines hybriden Fahrzeugs

## 3.5 Zusammenfassung: Energiemanagementsysteme

Ein Energiemanagementsystem, das im Echtzeitbetrieb in einem Kraftfahrzeug eingesetzt wird, steuert in Abhängigkeit der Leistungsanforderung einer Fahrzeugfunktion die entsprechende zeitabhängige Leistungswandlung aus den Energiepfaden, die es bedienen kann. Das Energiemanagementsystem verwirft dabei die antriebsstrangabhängige Betrachtungsweise und sieht jede Primär- und Sekundärenergieform als Energiequelle zur Wandlung in die gewünschte Nutzenergie an. Der Verbrennungsmotor verliert somit seine geschwindigkeits- und antriebsstrangabhängige Kopplung an die längsdynamische Bewegung des Fahrzeugs und steht nun als zeitlich zu steuernde mechanische und thermische Energiequelle mit regelbarer Leistung zur Verfügung.

Die Bewertungsgröße eines Energiemanagementsystems ist der Wirkungsgrad der Energiewandlung von Primär- in Nutzenergie. Der Betrachtungshorizont bezieht sich dabei auf einen Fahrzyklus, der einen längeren Zeitraum andauert und somit sehr viele Energiewandlungsvorgänge zulässt.

Dieses Verständnis von Energie und Leistung bildet die Grundlage der späteren stochastischen Simulation. Nach Abbildung 3.5 erfolgt eine Betrachtung der Energiewandlung im Fahrzeug nach hierarchischem Ansatz. Zur Beantwortung einer simulativen Fragestellung wird zunächst die Hierarchiestufe der Funktion definiert, deren Energieeffizienz erhöht werden soll. Dies kann sowohl die Bereitstellung mechanischer Energie durch den

Verbrennungsmotor (geringe Detaillierungsstufe) als auch die Energieversorgung einer Lichtquelle sein (hohe Detaillierungsstufe).

Mit dem stochastischen Simulationsansatz geht man nun von einem bestehenden Fahrzeug aus, das verbessert werden soll. Für dieses Fahrzeug sind für die von einer Verbesserungsmaßnahme betroffenen Energiepfade alle Energieverteilungen und -flüsse aus Versuch oder deterministischer, zeitbasierter Simulation bekannt. Mittels der stochastischen Simulationsmethode werden nun für ein geändertes System die zu erwartenden Energieverteilungen und -flüsse berechnet und die Änderung bezüglich Energieverbrauch und Kosten optimiert.

Nachdem an dieser Stelle Fahrzeugmodell, Lösungsverfahren und die Grundlagen für den stochastischen Berechnungsansatz in Kapitel 5 vorgestellt wurden, erfolgt im nächsten Kapitel die Datenanalyse der Eingangsgrößen.

# 4 Analyse der Betriebszustände schwerer Nutzfahrzeuge

Zur *Identifikation der auftretenden Betriebszustände* eines Nutzfahrzeugs beschreibt dieses Kapitel eine Vorgehensweise zur Analyse und Filterung der relevanten Informationen zeitlich aufeinanderfolgender Daten. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise resultiert in einem weiteren Baustein der Entwicklungsmethodik nach Abbildung 2.4 — den Eingangsgrößen der Simulation.

Die Datenverarbeitung ist notwendig zur:

- Identifikation wesentlicher Merkmale eines Fahrtabschnitts (z. B. Geschwindigkeitsbereiche)
- Vorsortierung von Fahrten oder Fahrtabschnitten aufgrund von Hauptmerkmalen (z. B. „Fahrgeschwindigkeit“, „Fahrzeugkonfiguration“ oder „Gesamtgewicht“)
- Zuordnung weiterer Merkmalshäufigkeiten (z. B. Leistungsbedarfe von Nebenaggregaten) zu den gewählten Hauptmerkmalen
- Ableitung einer statistischen Datenbasis für die zeitunabhängige bzw. stochastische Simulation

Nach der *Anwendung der Datenvorverarbeitung* stehen die Daten nicht mehr als zeitbasierte Größen zur Verfügung, da sie auf Wahrscheinlichkeitsmaße reduziert wurden.

Die Grundlage der Eingangsdaten der Simulation bilden aus Feldversuchen gewonnene Messdaten von Fahrzeug-, Fahrer- und Umgebungszuständen, gezielten Fahrversuchen unter definierten Randbedingungen mit messtechnisch ausgestatteten Fahrzeugen sowie partielle längsdynamische Simulationen von Fahrzeugsubsystemen.

Im Anschluss an die *Datenaufbereitung und Berechnung von Kenngrößen* erfolgt eine spezifische Betrachtung der Datenbasis unter Hinzunahme von

Systemwissen über die Fahrzeugstruktur, mit der nun ein energetisches Abbild des Nutzfahrzeugs erstellt werden kann.

Aus dieser Betrachtung lassen sich relevante Parameter für eine *Sensitivitätsanalyse* bestimmen. Unter Variation der sensitiven Parameter können Kraftstoffeffizienzpotenziale erkannt werden, die aus einer Veränderung des Energiepfades oder der Betriebsstrategie resultieren.

## 4.1 Zugrundeliegende Datenquellen

Die Verwendung unterschiedlicher *Datenquellen*, bestehend aus Flottenversuchen, Kundenfahrerproben, kundennahen Fahrerproben und Simulationsergebnissen, ergeben in ihrer späteren Zusammensetzung ein Betrachtungsprofil kundenrepräsentativer Merkmale von Fahrzeug, Fahrumgebung und Fahrer.

- *Flottenversuche* dienen dazu, einzelne Maßnahmen (z. B. die Integration eines hybriden Antriebsstrangs) bei ausgewählten Kunden in Kombination mit Referenzfahrzeugen hinsichtlich ihres absoluten Einsparpotenzials zu untersuchen.
- Eine *Kundenfahrerprobung* über die Gesamtheit oder eine repräsentative Auswahl an Kunden gibt das Einsatzprofil der Fahrzeuge wieder, blendet aber aufgrund fehlender messtechnischer Ausstattung die interne Fahrzeugenergiebilanzierung aus.
- Die *kundennahe Fahrerprobung* ergänzt diese Kundendaten durch messtechnisch ausgestattete Fahrzeuge, die mit der identischen Konfiguration (Fahrzeugtyp und -ausstattung, Beladung, Streckenwahl, Fahrerverhalten usw.) den Energiebedarf einzelner Fahrzeugfunktionen ermittelt. Sie unterstützt somit den Detaillierungsgrad der Kundenfahrerprobung.

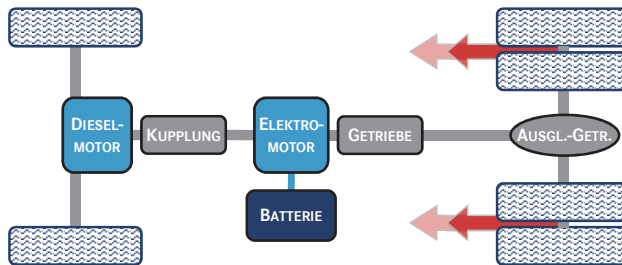
### 4.1.1 Flottenversuche

In den Jahren 2009 und 2010 befanden sich über einen Zeitraum von 20 Monaten an vier verschiedenen Standorten des Paket- und Brief-Expressdienstleisters DHL fünf prototypische *Hybrid-Fahrzeuge* sowie vier Referenzfahrzeuge ohne hybriden Antriebsstrang.

|  |  |
|--|--|
| <b>Fahrzeug-<br/>bezeichnung</b>                     | MB Atego BlueTec-Hybrid 1222 L 4x2   |
| <b>Leistung/<br/>Drehmoment</b><br>Verbrennungsmotor | 160 kW (218 PS) bei 2200 min <sup>-1</sup> (Nennleistung),<br>810 Nm bei 1200 – 1600 min <sup>-1</sup> |
| <b>Leistung/<br/>Drehmoment</b><br>Elektromotor      | 44 kW/420 Nm Spitzenleistung,<br>29 kW/252 Nm Nominalleistung  |
| <b>Getriebe/<br/>Schaltung</b>                       | MB G85-6 (Übersetzungsverhältnis 6,7 – 0,73),<br>6-Gang Telligent Schaltautomatik                      |
| <b>Gewicht</b>                                       | zGG: 11,99 t, VA: 4,4 t, HA: 8,1 t   |

**Tab. 4.1:** Konfiguration der hybriden Versuchsfahrzeuge (Mercedes-Benz Atego)

Die *Ziele* waren neben der Absicherung des neuartigen Antriebskonzepts die Verifikation der Verbrauchspotenziale und der Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten im Praxiseinsatz. Dazu wurden in die Fahrzeuge *Datenlogger* eingebaut, die alle relevanten Messdaten von Fahrzeug und Hybrid-System nach Aktivierung über den Zündstartschalter (Klemme 15) mit einer Abtastrate von 10 Hz aufgezeichnet haben.



**Abb. 4.1:** Hybrider Antriebsstrang im Flottenversuch (vereinfacht, 4x2), nach [97]

Bei den Hybrid-Fahrzeugen handelt es sich um das Modell Mercedes-Benz Atego BlueTec Hybrid 1222, das nach Abbildung 4.1 als Vollhybrid in der Konfiguration P2 ausgeführt ist. Das Fahrzeug kann in dieser Bauweise rein elektrisch fahren, da sein Elektromotor nicht starr mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Für den Flottenversuch war dies allerdings nicht vorgesehen. Tabelle 4.1 beschreibt die technischen Daten des Hybridfahrzeugs.

Das quasi baugleiche Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang dient als Referenz zu den Erprobungsfahrzeugen und sollte die Basis für die Bewertung des Hybridsystems, der Betriebsstrategie und des Kraftstoffverbrauchs sein. Dazu wurde im wöchentlichen Wechsel jeweils ein Nicht-Hybrid- und ein Hybrid-Fahrzeug bewegt. Das Einsatzgebiet war der klassische Verteilerverkehr. So ist im kompletten Flottenversuch eine Gesamtlauflistung von knapp 100.000 Kilometern erreicht worden. Die Messdaten der Versuche liegen als Zeitreihen vor.

### 4.1.2 Kundenfahrerprobung

Im Rahmen der sogenannten *Kundenfahrerprobung* übergibt ein Fahrzeughersteller ausgewählten Speditionen Erprobungsfahrzeuge, um sie einem Praxistest zu unterziehen. In der Regel ist das der letzte Schritt, bevor ein neu entwickeltes Fahrzeug in die Serienproduktion geht. Nach einem ausgiebigen Zeitraum, in dem das Fahrzeug im alltäglichen Speditionsbetrieb teilnimmt, erhält der Fahrzeughersteller von den Fahrern und Speditionen Rückmeldungen über die Erfahrungen und Eindrücke des neuen Fahrzeugs [85].

Da die Fahrzeuge im Besitz des Herstellers verbleiben, ist es während der Fahrerprobung möglich, Messdaten des Fahrbetriebs aufzunehmen. Eine elegante Möglichkeit bietet die Erfassung von fahrzeugeigenen Daten über das Fahrzeugmanagement der Fleetboard GmbH. Dieses System greift über den CAN-Bus auf Fahr- und Fahrzeugdaten zu und übermittelt diese via GSM/GPRS an einen FleetBoard-Server. Die ermittelten Daten werden dem Kunden über einen Internetzugang und der Möglichkeit der Datenkonvertierung in ein Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung gestellt. Neben klassischen Messgrößen wie z. B. Fahrzeuggewicht, Fahrgeschwindigkeit, Fahr- und Gesamtverbrauch, Fahrstrecke, Fahr- und Standzeit, Schubanteil, Anteil der Tempomatnutzung sowie Einsatz von Retarder und Betriebsbremse bietet Fleetboard zusätzlich eine Bewertung der Fahrweise an und verteilt Noten für z. B. Fahrweise, Vorausschau, Fahrpedalbewegung und gleichmäßiges Fahren [32].

Für eine spätere Fahrzeugsimulation interessieren ausschließlich die Messgrößen des Fahrzeugs. Hierbei ist zu beachten, dass diese Messdaten aufgrund der Datenreduktion für die Übertragung vom Fahrzeug zum Fleetboard-Server bereits auf relative und absolute Häufigkeiten reduziert sind. Für diese Daten besteht somit kein Zeitbezug mehr. Aller-



dings kann ihre statistische Relevanz über einen definierten Zeitraum ausgewertet werden.

Zur Entwicklung und Validierung des neuen Simulationsverfahrens wurden *94 Fahrzeuge im Speditionsbetrieb* über einen Zeitraum von 16 Monaten betrachtet. Die erfasste Gesamtkilometerleistung der Fahrzeuge beträgt 10,35 Millionen Kilometer. Eine differenzierte Betrachtung der Fahrzeugflotte kann durch den geschwindigkeitsabhängigen Vergleich der Streckenleistung und der zeitlichen Anteile erfolgen. Die Auswertung der Flottendaten ergibt nach Tabelle 4.2 die absoluten Streckenanteile in  $10^3$  km und diese in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsklasse und des Baumusters. Bei den Referenzfahrzeugen handelt es sich hierbei um Sattelzugmaschinen (Achsformel 4x2) und 3-Achs-Fahrzeuge (Achsformel 6x2) der Marke Mercedes-Benz Actros.

| Geschwindigkeit              | Fahrleistung           | Anteile    |            |
|------------------------------|------------------------|------------|------------|
|                              |                        | Actros 6x2 | Actros 4x2 |
| $v < 15$ km/h                | $59,7 \cdot 10^3$ km   | 35,7 %     | 64,3 %     |
| $15$ km/h $\leq v < 45$ km/h | $449,7 \cdot 10^3$ km  | 25,8 %     | 74,2 %     |
| $45$ km/h $\leq v < 55$ km/h | $357 \cdot 10^3$ km    | 23,3 %     | 76,7 %     |
| $55$ km/h $\leq v < 65$ km/h | $546,7 \cdot 10^3$ km  | 25,2 %     | 74,8 %     |
| $65$ km/h $\leq v < 75$ km/h | $1013,3 \cdot 10^3$ km | 28,3 %     | 71,7 %     |
| $75$ km/h $\leq v < 85$ km/h | $2144,6 \cdot 10^3$ km | 36,2 %     | 63,8 %     |
| $v \geq 85$ km/h             | $5781,5 \cdot 10^3$ km | 24,0 %     | 76,0 %     |

**Tab. 4.2:** Kilometerleistung der Kundenfahrerprobungsfahrzeuge in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Baumusters

Die *Klassierung der Geschwindigkeiten* ist zunächst aufgrund der Vorgabe der Auswertearithmetik der FleetBoard GmbH vorgegeben. Sie wird für diese Arbeit auf vier Klassen reduziert. Es besteht dabei jeweils ein Bereich, der für das Geschwindigkeitsprofil Rangieren, Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt repräsentativ ist. Es gilt für die Geschwindigkeit  $v$  des Nutzfahrzeugs die folgende Klassierung:

1. Rangierbetrieb:  $v < 15$  km/h
2. Stadtfahrt:  $15$  km/h  $\leq v < 45$  km/h
3. Überlandfahrt:  $45$  km/h  $\leq v < 75$  km/h
4. Autobahnfahrt:  $v \geq 75$  km/h

Die Aufteilung der Messdaten nach den Geschwindigkeitseigenschaften des Kunden sieht selbstverständlich vor, die weiteren Merkmalswerte (z. B. Zug-/Schub-Anteile, Gewicht usw.) und die relativen Häufigkeiten entsprechend ihres Vorkommens innerhalb einer Geschwindigkeitsklasse zu hinterlegen.

### 4.1.3 Erprobungsfahrzeuge

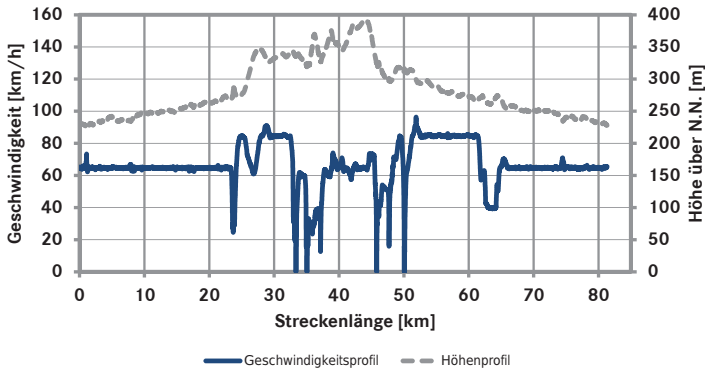
Zur Erstellung einer *Energiebilanz über alle Fahrzeugfunktionen* (vgl. Kapitel 3.2.3) werden Erprobungsfahrzeuge eingesetzt, die mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet sind. Diese werden im kundennahen Fahrbetrieb eingesetzt. Ausgehend von den Geschwindigkeitsmerkmalen der Kundenfahrerprobung werden die Energie- und Leistungsbilanzen auf den Referenzstrecken für Autobahn-, Überland- und Stadtfahrt, sowie dem Rangierbetrieb berücksichtigt. In Tabelle 4.3 sind einige Eigenschaften der Referenzstrecken aufgeführt. Hierbei sind die Streckenlänge, die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit und die maximale Höhendifferenz von höchstem und niedrigstem Punkt über den Streckenverlauf angegeben.

| Referenzstrecke | Länge   | Mittl. Geschw. | Höhendifferenz |
|-----------------|---------|----------------|----------------|
| Autobahn        | 1517 km | 82,7 km/h      | 782 m          |
| Überland        | 82 km   | 58,2 km/h      | 166 m          |
| Stadt           | 22 km   | 15,2 km/h      | 92 m           |
| Rangieren       | 4 km    | 6,8 km/h       | 17 m           |

**Tab. 4.3:** Kundennahe Referenzstrecken und ihre Eigenschaften

Abbildung 4.2 zeigt das Geschwindigkeits- und Höhenprofil der Referenzstrecke „Überland“.

Die *Energiebilanz des Fahrzeugsystems* wird durch messtechnische Bestimmung der leistungsrelevanten Größen (z. B. Drehmoment und Drehzahl, Strom und Spannung usw.) und ihrer zeitlichen Auftretensdauer bestimmt. Die Energie- und Leistungsbilanz einer höheren Energieebene (vgl. Abbildung 3.5) kann aus der Summe der Energieanteile der niedrigeren Ebene berechnet werden. Gleichzeitig werden die Leistungen der höheren Energieebene messtechnisch erfasst. Somit ist das Gleichungssystem unter Anwendung eines Fahrzeugmodells in diesem Fall überbestimmt.



**Abb. 4.2:** Geschwindigkeits- und Höhenprofil der Referenzstrecke „Überland“

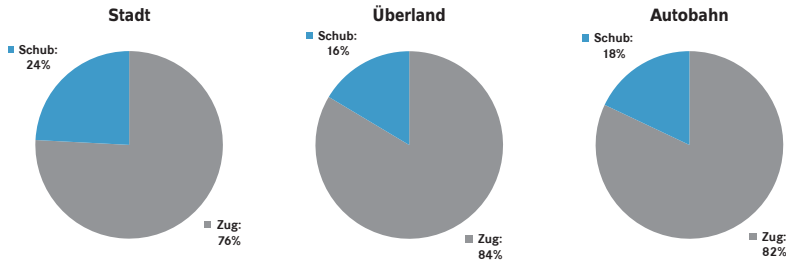
Die *Gesamtenergie*, die über die Systemgrenze dem Fahrzeug zugeführt wird, kann sowohl über den gemessenen Kraftstoffverbrauch (oberste Hierarchieebene) als auch durch die zeitliche Integration der Motorleistung nach einer Division durch die jeweiligen Wirkungsgrade erfolgen.

Die Informationen über den zeitlichen Verlauf der physikalischen Größen sind in Anlehnung an das hierarchische und objektorientierte Fahrzeugmodell zugeordnet. Sie werden nach der Messung in einer Strukturvariablen  $S$  gespeichert. Tabelle 4.4 zeigt die Gliederung der Strukturvariablen anhand der Funktions- und Energiearchitektur des Fahrzeugs. Der Zahlenwert in Klammern steht hier für die Anzahl der Messkanäle des jeweiligen Subsystems. Da die Variablen der Fahrumgebung Eingangsgrößen für die spätere Simulation sind, werden sie separat erfasst. Sie gliedern sich in streckenbedingte (z. B. Höhenprofil) und fahrzeugbedingte Umgebungsparameter (z. B. Soll-Geschwindigkeitsverlauf). Der Geschwindigkeitsverlauf ist hierbei als Umgebungsvariable zu sehen, da er von außen als Fahraufgabe dem Fahrzeug vorgegeben wird.

Der *Abgleich der Geschwindigkeitsklassierung* aus Kapitel 4.1.2 mit hier betrachteten Referenzprofilen für „Stadt“, „Überland“ und „Autobahn“ ergibt eine gute Überdeckung. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten liegen mit 15,2 km/h, 58,2 km/h und 82,7 km/h jeweils im Bereich der definierten Geschwindigkeitsklasse. Auffällig ist bei den hier betrachteten Messungen der Vergleich der Anteile von Schub- und Bremsphasen. Abbildung 4.3 stellt dazu die Zug- und Schubanteile auf den vermessenen Referenzstrecken dar.

| <b>Hauptgliederung</b> | <b>Komponente/<br/>Funktion</b><br>Anzahl Messkanäle                                | <b>Messkanäle (Auswahl)</b>  |
|------------------------|---|--|
| Antriebsstrang         | Motor (22)<br><br>Getriebe (16)<br><br>Fahrregelung (10)<br><br>Retarder (6)        | Motordrehmoment/-drehzahl,<br>Kraftstoff-/AdBlue-<br>Verbrauch,<br>Drehzahl/-moment Motor-<br>lüfter, ...<br>Status Kupplung,<br>Eingangs-/Ausgangsdrehzahl,<br>Getriebeübersetzung, ...<br>Fahrpedalstellung,<br>Vorgabe Tempomat, ...<br>Drehmoment/Drehzahl |
| Nebenaggregate         | Bordnetz (38)<br><br>Luftsystem (12)<br><br>Lenksystem (10)<br><br>Klimasystem (16) | Strom/Spannung/Tempe-<br>ratur Generator/Batterie/<br>Komponenten, ...<br>Status Luftpresse,<br>Vorratsdrücke, ...<br>Lenk-/Lenkradwinkel,<br>Druck/Temperatur Lenk-<br>system, ...<br>Status Klimakompressor,<br>Temperaturverteilung, ...                    |
| Fahrdynamik            | Längsdynamik (16)<br><br>Querdynamik (8)  | Abstand/Relativgeschwindig-<br>keit Vordermann, ...<br>Abstand Spurmarkierung, ...   |
| Umgebung               | Fahrzeug (16)<br><br>Strecke (22)   | Geschwindigkeit,<br>Antriebsbremsmoment, ...<br>Fahrbahnsteigung, Global-<br>strahlung, Außentem-<br>peratur, ...  |

**Tab. 4.4:** Aufbau der Messstruktur und Messkanäle (Auswahl) der Erprobungsträger



**Abb. 4.3:** Zug- und Schubanteil auf den Referenzstrecken Stadt, Überland und Autobahn

Im Bereich von Überland und Autobahn befindet sich der Schubanteil der Erprobungsfahrzeuge mit knapp unter 20 % relativem Anteil deutlich unter den Werten der Kundenfahrerprobung (25 – 35 %). Einige Fahrzeuge haben sogar Schubanteile von bis zu 40 %. Die Bremsanteile der Erprobungsfahrzeuge sind sogar überproportional geringer, ihr Anteil ist kaum feststellbar. Dies ist darin begründet, dass die Referenzstrecken der Erprobungsfahrzeuge möglichst unter Ausschluss von Umgebungseinflüssen wie z. B. Verkehr durchgeführt werden, um das Fahrzeug in seiner neuen Konfiguration mit einer alten zu vergleichen. Daher finden so gut wie keine verkehrsbedingten Bremsmanöver statt.

Im Stadtverkehr treten aufgrund des Verkehrsflusses und dem Auftreten von Lichtzeichenanlagen keine großen Unterschiede auf.

## 4.2 Datenaufbereitung, -analyse und -zuordnung

Wie in Kapitel 4.1 vorgestellt, entstammen die Kollektivdaten der Fahrzeuge aus verschiedenen Datenquellen. Sie unterscheiden sich sowohl in ihren technischen Bezugspunkten (relative und absolute Messgrößen) als auch in der mathematischen Darstellungsweise (Wertereihen mit definierter Abtastrate oder relative Häufigkeiten) und im Einsatzprofil (Verteilerverkehr bis schwerer Fernverkehr).

Für ein *repräsentatives Lastkollektiv* benötigt man nun eine Kombination aus allen Datenquellen. Das Ziel hierbei ist eine Datenbasis, die sowohl das technische Fahrzeugverhalten als auch die Art der Kundenanwendung abbildet. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle eine Datenauswahl erfolgen.

Nach der Datenauswahl wird das *Betriebsverhalten* der Fahrzeuge anhand der Kriterien „Fahrgeschwindigkeit“ und „Fahrzeugbeschleunigung“ als Repräsentanten für den Einsatzfall, sowie „Baumuster“ und „Fahrzeuggesamtgewicht“ als Repräsentanten für die Fahrzeugkonfiguration dargestellt. Weitere Betriebsbedingungen der Fahraufgabe (z. B. elektrische Verbraucherlasten) werden entsprechend der Aufteilung in Einsatzfall- und Konfigurationskriterien zugeordnet.

### 4.2.1 Kriterien der Vorsortierung

Die *Auswahl relevanter Daten* beginnt bei den zeitbasierten Messdaten aus Flottenversuch (FV) und Kundenfahrerprobung (KFE). Hierbei ist das Hauptbetrachtungskriterium jeder Messung der Geschwindigkeitsverlauf sowie seine zeitliche Dauer. Aus Geschwindigkeit und Zeit ergibt sich die Transportaufgabe, die vorsieht, eine Nutzlast von A nach B innerhalb eines gewissen Zeitraums zu transportieren. Ebenfalls lässt sich die Streckendistanz von A nach B ermitteln. Jede Messung beginnt und endet mit dem Ein- und Ausschalten des Zündungsschalters. Unter Betrachtung des Zeitstempels jeder Messung findet die Überführung in ein relatives Zeitsystem statt. Dies bedeutet, dass der Zeitstempel zu Beginn jeder Messung auf Null gesetzt wird. Die Charakterisierung jedes Messabschnitts und seine spätere anteilige Gewichtung findet so nur noch über den Parameter „Zeitdauer des Messabschnitts“ statt.

Aufgrund der *Durchschnittsgeschwindigkeit* des jeweiligen Messabschnittes werden die Fahrprofile zunächst den Profilen Autobahn, Überland, Stadt und Rangierbetrieb (siehe Kapitel 4.1.2) zugeordnet. Dabei wird jedem Messabschnitt eine fortlaufende Nummer zugeteilt. Aufgrund ihrer Abstammung erfolgt die Namenszusammensetzung durch die Datenquelle (KFE oder FV) und fortlaufender Nummer. Der Messungsbezeichnung werden nun die beschreibenden Parameter Messungsdauer, Durchschnittsgeschwindigkeit, Baumuster und Fahrzeuggesamtgewicht hinzugefügt. Die weiteren Messdaten sowie die zeitliche Reihenfolge bleiben in der Messdatei zunächst erhalten, bevor zu einem späteren Zeitpunkt ein Verlassen der Zeitbasis durch eine statistische Darstellung der Betriebspunkte erfolgt.

In den Tabellen 4.5 und 4.6 sind jeweils die Zuordnung der Messungen aufgrund der Durchschnittsgeschwindigkeit und die Eigenschaften einer Messung dargestellt. Zur systematischen Ablage eignet sich die Verwendung eines datenbankbasierten Systems.

| Autobahn | Überland | Stadt    | Rangieren |
|----------|----------|----------|-----------|
| KFE_0001 | FV_0017  | FV_0387  | KFE_1199  |
| KFE_0765 | FV_8497  | KFE_4501 | KFE_99    |

**Tab. 4.5:** Zuordnung der Fahrprofile aufgrund der Durchschnittsgeschwindigkeit

| <b>KFE_0001</b>              |            |
|------------------------------|------------|
| Messungsdauer                | 15984 s    |
| Durchschnittsgeschwindigkeit | 83 km/h    |
| Baumuster                    | Actros 934 |
| Gesamtgewicht                | 39,8 t     |

**Tab. 4.6:** Eigenschaften einer vorsortierten Messung

Der *Vergleich der Geschwindigkeit* aufgrund des arithmetischen Mittels kann dazu führen, dass Messungen durch die Vorsortierung falsch zugeordnet werden, weil ihr Geschwindigkeitsprofil aus einem Mischprofil mehrerer Geschwindigkeitsklassierungen besteht. Die Betrachtung eines Mischprofils mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von z. B. 45 km/h würde dazu führen, dass dieses Profil dem Stadtverkehr zugeordnet werden würde, obwohl sich hier Streckenabschnitte kurzer zeitlicher Dauer verbergen können, die sich durch eine höhere Fahrgeschwindigkeit und damit auch differierenden Fahrwiderständen auszeichnen. Die kleinere zeitliche Gewichtung der hohen Geschwindigkeitsanteile führt in diesem Falle zum niedrigen Durchschnittswert. Abbildung 4.4 zeigt beispielhaft ein solches Mischprofil, das eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 47,7 km/h aufweist.

Abhilfe kann hier durch die Anwendung statistischer Mittel auf den Geschwindigkeitsverlauf der noch zeitbasierten Messdaten geschaffen werden. Mit Hilfe der Merkmale der deskriptiven Statistik kann hier bestimmt werden, wie viele der Messwerte im vordefinierten Geschwindigkeitsbereich liegen. Als Gütekriterium gilt hier, dass 90 % der Merkmalswerte innerhalb des definierten Geschwindigkeitsbereichs liegen müssen.

Um dieses *Gütekriterium* zu erreichen, wird – sofern notwendig – die Messung in ihrer Dauer beschnitten, so dass das Gütekriterium von maximal 10 % der Häufigkeiten außerhalb des definierten Bereichs erreicht wird. Die weiteren Messabschnitte werden entsprechend den anderen Bereichen zugeordnet. Dabei darf ihre zeitliche Reihenfolge und die Zuordnung der

weiteren Datenwerte nicht unterbrochen werden. In Abbildung 4.4 ergibt sich durch diese Vorgehensweise ein Autobahnprofil im grau gefärbten Bereich. Weitere zusammenhängende Bereiche können dem Stadt- und Überlandverkehr zugeordnet werden.

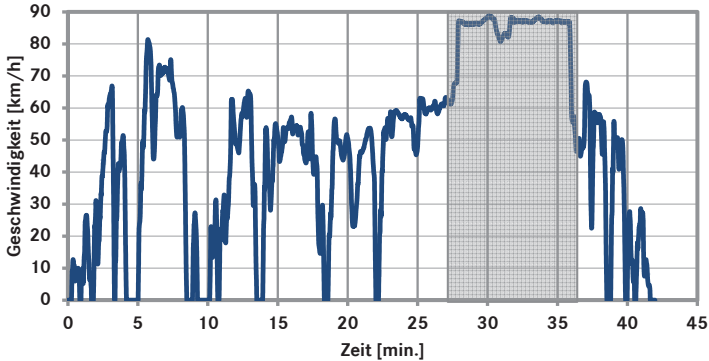


Abb. 4.4: Mischprofil mit Stadt-, Überland- und Autobahnanteilen,  $\bar{v} = 47,7$  km/h

## 4.2.2 Mustererkennung

Insbesondere wenn Fahrzeuge auf *ähnlichen Streckenverläufen* fahren, kann man durch deren Detektion Messdaten auf ein Fahrprofil reduzieren und diesem anhand der Häufigkeit des Abfahrens eine stärkere Gewichtung geben. Eine weitere Möglichkeit nach deren Identifikation ist der Vergleich unterschiedlicher Fahrzeug- und Antriebsstrangkonfigurationen (z. B. konventionelles und hybrides Antriebskonzept) auf den identisch zu fahrenden Streckenverläufen.

Das Hauptmerkmal zur *Detektion* soll hier die Fahrgeschwindigkeit sein, da sie maßgeblichen Einfluss auf die geleistete Transportaufgabe hat. Für eine weitere Untergliederung steht die Betrachtung der Beschleunigung als Ableitung der Geschwindigkeit repräsentativ für die Fahrzeugbelastung und die Antriebsstrangkonfiguration.

Um ein Muster zu erkennen, benötigt man ein Werkzeug, um ähnliche Wertefolgen zu identifizieren. Die *Mustererkennung* soll hier als Auffinden von Daten in Messreihen verstanden werden, die einen ähnlichen Verlauf haben. Man spricht dabei auch von einer eindimensionalen Mustererkennung.



Für die Mustererkennung benötigt man eine *Datenreihe*, die durchsucht werden soll und eine Datenreihe, die gesucht wird. Da die Zahlenwerte einer Datenreihe in einer Reihenfolge stehen, wäre es möglich, die verschiedenen Datenreihen direkt und elementweise zu vergleichen. Sobald die Summe der Einzelabweichungen zu groß ist, wird dann die Datenreihe um einen Indexwert verschoben und wiederholt verglichen. Mögliche Verzerrungen können dabei nicht berücksichtigt werden. Ist in der gesuchten Datenreihe also eine gleiche Abfolge vorhanden, von der ein Teil um einen Indexwert verschoben ist, findet keine Erkennung statt. Daher gibt es Algorithmen, die sowohl eine Abweichung des Wertes als auch die Abweichung der Position berücksichtigen können, was allerdings zu iterativen Vorgängen und mehrmaligem Durchlaufen von Schleifen führen kann.

Als Berechnungsansatz wird hier die Methode der Kreuzkorrelation gewählt, die zur Beschreibung der Korrelation zweier zeitdiskreter Signale mit zeitlichem Versatz herangezogen wird [54, 87, 118]. Mit der hier gewählten Methode ist es möglich, ein eigens definiertes Toleranzband um die Fahrgeschwindigkeit zu legen, in der die Zeitverläufe noch als ähnlich gelten. Auf diese Weise können Umwelteinflüsse und Verkehr, die den Geschwindigkeitsverlauf beeinflusst haben, eliminiert werden.

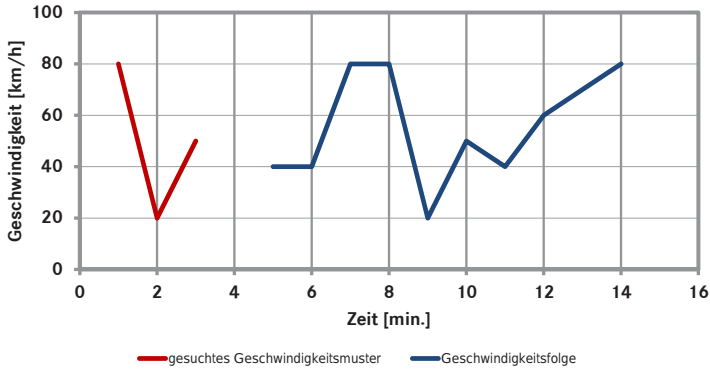
Die *Vorgehensweise* der hier verwendeten Mustererkennung basiert auf der Anwendung des gleitenden Mittelwertes der Datenreihe, der mit einer Vorgabe verglichen wird. Die gleiche Vorgehensweise wird für die Differenzenfolge der Datenreihe durchgeführt. Die Teilmenge gilt dann als ähnlich, sofern beide Mittelwerte innerhalb eines vorgegebenen Toleranzbereichs liegen.

In Abbildung 4.5 ist die Fragestellung dargestellt. Ein Geschwindigkeitsmuster soll innerhalb einer weiteren Geschwindigkeitsfolge gesucht werden. In der Regel sind die Geschwindigkeitsfolgen dabei zeitlich verschoben. Die Geschwindigkeitsfolge  $a$  sei eine Folge reeller Zahlen  $a_i$  mit  $m$  Elementen. Das gesuchte Geschwindigkeitsmuster  $b$  ist eine Folge mit  $n$  Elementen  $b_k$ . Die Elemente der Differenzenfolge von  $a_i$  sind definiert als  $c_i$  mit

$$c_i = a_i - a_{i-1} \quad i = 2, \dots, m \quad (4.1)$$

Für die Mustervorgabe  $b$  wird ebenfalls die Differenzenfolge  $d$  gebildet.

$$d_k = b_k - b_{k-1} \quad k = 2, \dots, n \quad (4.2)$$



**Abb. 4.5:** Gesuchtes Geschwindigkeitsmuster innerhalb einer weiteren Geschwindigkeitsfolge

Das Muster  $b$  muss dabei eine Mindestlänge von  $n = 3$  haben. Der gleitende Mittelwert  $\bar{a}_i$  lässt sich auf folgende Weise errechnen:

$$\bar{a}_i = \frac{a_i + a_{i-1}}{2} \quad i = 2, \dots, m \quad (4.3)$$

Die gleitende Mittelwert der Differenzen berechnet sich nach:

$$\bar{c}_i = \frac{c_i + c_{i-1}}{2} \quad i = 3, \dots, m \quad (4.4)$$

Entsprechend dieser Vorgehensweise werden die gleitenden Mittelwerte für die Wertefolgen  $b$  und  $d$  berechnet.

Im gleitenden Mittelwert  $\bar{a}_i$  werden nun alle diejenigen Werte  $\bar{a}_x$  gesucht, die in einer definierten Umgebung  $\epsilon$  um den gesuchten Mittelwert  $\bar{b}_k$  liegen, um kleine Abweichungen nicht auszuschließen. Das gleiche Verfahren gilt für die Werte der Wertefolge  $\bar{c}$  in einer  $\zeta$ -Umgebung von  $\bar{d}$ . Hierfür werden die binären Index-Vektoren  $I_1$  und  $I_2$  gebildet. Es gilt

$$I_{1_{ik}} = \begin{cases} 1, & \text{für } (\bar{b}_k - \epsilon) \leq \bar{a}_i \leq (\bar{b}_k + \epsilon) \\ 0 & \end{cases} \quad (4.5)$$

$$I_{2_{ik}} = \begin{cases} 1, & \text{für } (\bar{d}_k - \zeta) \leq \bar{c}_i \leq (\bar{d}_k + \zeta) \\ 0 & \end{cases} \quad (4.6)$$

Sich überlagernde Intervalle  $I_1$  und  $I_2$  sind als Bereiche zu interpretieren, in denen das Muster liegen kann. Um das Ergebnis genauer einzugrenzen, sind die Werte für  $\epsilon$  und/oder  $\zeta$  zu verkleinern. Bei der hier gewählten Vorgehensweise deckt das Intervall zwei Toleranzen ab:

- Die Unterschiede zwischen den Werten der Vektoren  $a$  und  $b$ .
- Die Indexverschiebungen des Musters. Durch den gleitenden Mittelwert wird der Verlauf der Zeitreihe geglättet. Die Toleranz für die Verschiebung steht in Abhängigkeit der Werte für  $\epsilon$  und  $\zeta$ .

Für jeden Schritt, mit dem  $\bar{b}$  gegenüber  $\bar{a}$  (bzw.  $\bar{d}$  gegenüber  $\bar{c}$ ) verschoben wird, werden über die gesamte Länge des Vektors  $\bar{b}$  (bzw.  $\bar{d}$ ) die Anzahl der Übereinstimmungen bestimmt. Für die Ähnlichkeit müssen die Bedingungen für den Mittelwert und für den Mittelwert der Differenzen erfüllt sein. Bei der Verschiebung, bei der die meisten Übereinstimmungen auftreten, ist eine Gleichheit zu vermuten. Sie wird immer sicherer, je höher die Anzahl der Übereinstimmungen ist. Maximal können alle Werte aus  $\bar{b}$  (bzw.  $\bar{d}$ ) übereinstimmen.

Da mehrere übereinstimmende Elemente in  $\bar{b}$  und  $\bar{d}$  auftreten können, muss ein Bezugspunkt angegeben werden, der die Verschiebung zwischen  $a$  und  $b$  abgibt. Dazu wird der Indexwert  $i_{\bar{u}}$  definiert:  $i_{\bar{u}}$  bezeichnet den Index der Wertereihe  $\bar{c}$ , der an der Position von  $\bar{d}_3$  liegt, wenn  $I_{ik}$  die maximale Anzahl von Übereinstimmungen aufweist.

Die Definition für das Index-Intervall ähnlicher Werte  $D$  lautet:

$$D = [i_{\bar{u}} - 2, i_{\bar{u}} - 3 + n] \quad (4.7)$$

Im angeführten Beispiel sind zwei Vektoren  $a$  und  $b$  gegeben, mit:

$$\begin{aligned} a &= [40, 40, 80, 80, 20, 50, 40, 60, 70, 80] \\ b &= [80, 20, 50] \end{aligned}$$

Das Muster  $b$  soll nun in  $a$  gesucht werden. Für das gesuchte Muster ergeben sich Mittelwerte von  $\bar{b}_2 = 50$ ,  $\bar{b}_3 = 35$ , und für die Differenzen  $\bar{d}_3 = -15$ . In Anwendung von Gleichung (4.5) identifiziert der Vergleich mit den gesuchten Werten von 50 und 35 ohne  $\epsilon$ -Umgebung bei einer Verschiebung von  $i_{\bar{u}} = 6$  die maximale Anzahl an Übereinstimmungen (vgl. Tabelle 4.7). Die Berechnung für die Differenzen-Folge findet in Tabelle 4.8 statt. Es ergibt sich an dieser Stelle nur eine Verschiebung für  $\bar{d}_3$ , die dem gesuchten Mittel von  $-15$  entspricht. Damit ergibt sich aus beiden

| Index $i$                            | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $a_i$                                | 40 | 40 | 80 | 80 | 20 | 50 | 40 | 60 | 70 | 80 |
| $\bar{a}_i$                          | 0  | 40 | 60 | 80 | 50 | 35 | 45 | 50 | 65 | 75 |
| $I_{1_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 3$ |    | 0  | 0  |    |    |    |    |    |    |    |
| $I_{1_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 6$ |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |
| $I_{1_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 9$ |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 0  |    |

**Tab. 4.7:** Mustererkennung (gleitender Mittelwert), Vorgehensweise nach [97]

| Index $i$                            | 1 | 2 | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   | 8  | 9  | 10 |
|--------------------------------------|---|---|----|----|-----|-----|-----|----|----|----|
| $c_i$                                |   | 0 | 40 | 0  | -60 | 30  | -10 | 20 | 10 | 10 |
| $\bar{c}_i$                          |   |   | 20 | 20 | -30 | -15 | 10  | 5  | 15 | 10 |
| $I_{2_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 3$ |   |   | 0  |    |     |     |     |    |    |    |
| $I_{2_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 6$ |   |   |    |    |     | 1   |     |    |    |    |
| $I_{2_{ik}} \mid i_{\mathbf{u}} = 9$ |   |   |    |    |     |     |     |    | 0  |    |

**Tab. 4.8:** Mustererkennung mittels gleitendem Mittelwert (Differenzen), Vorgehensweise nach [97]

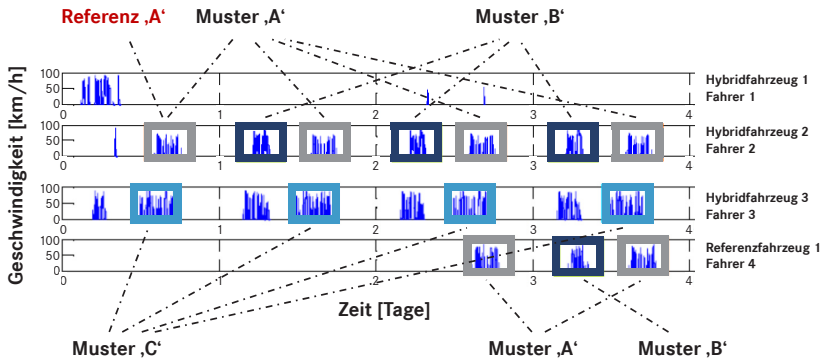
Indexvektoren ein Wert  $i_{\mathbf{u}} = 6$  als Lösung für gesuchte Intervalle in  $a$ , die dem Vektor  $b$  ähnlich sind. Die Lösungsmenge für  $D$  berechnet sich nach Gleichung (4.7) zu:

$$D = [6 - 2, 6 - 3 + 3] = [4, 6]$$

### 4.2.3 Ableitung repräsentativer Muster

Die Messabschnitte sind an dieser Stelle bereits nach den statistischen Werten ihres Geschwindigkeitsverlaufs den Klassen „Autobahn“, „Überland“, „Stadt“ und „Rangieren“ zugeordnet und erfüllen die Forderung, dass 90% ihrer Werte innerhalb der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse liegen. Die Messabschnitte sind basierend auf den durchgeführten Messungen von unterschiedlicher Zeitdauer.

Innerhalb der Messabschnitte, die einer Geschwindigkeitsklasse zugehören, sollen nun vergleichbare Fahrprofile sowie vergleichbare *Fahrertypen* identifiziert werden. Die Identifikation der unterschiedlichen Eigenschaften ist deswegen wichtig, weil sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Energiewandlungsvorgänge im Fahrzeug und das Verhalten einer Betriebsstrategie auf Basis von Fahrer- und Streckenmerkmalen haben. Zur deren Erkennung wird die Mustererkennung auf Basis der gleitenden Mittelwerte eingesetzt.



**Abb. 4.6:** Mustererkennung anhand Geschwindigkeitsprofilen verschiedener Fahrzeuge und Fahrer, nach [97]

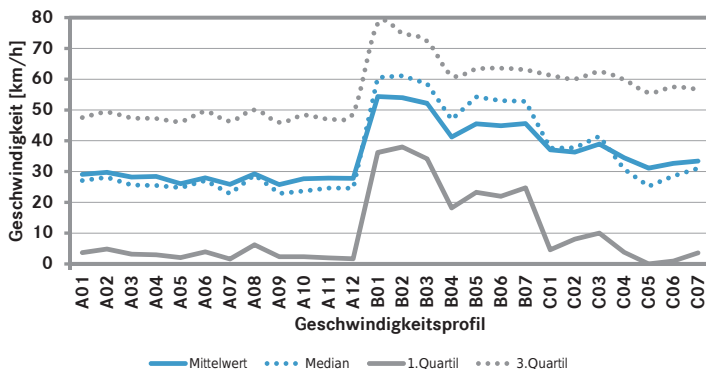
In Abbildung 4.6 ist der Geschwindigkeitsverlauf von vier Fahrzeugen, die mit unterschiedlichen Fahrern besetzt wurden, über die Zeit dargestellt. Aus diesen Daten sollen an dieser Stelle Geschwindigkeitsmuster erkannt werden. Für die Erkennung des Musters wird ein erster Verlauf angenommen und in den weiteren Daten gesucht. Als Referenzmuster soll an dieser Stelle ein zusammengehörender Messabschnitt aus dem Flottenversuch dienen. Aus den Messdaten ist ersichtlich, dass pro Tag immer zwei Fahrzeugbewegungen durchgeführt werden. Jeder dieser Messabschnitte soll als Referenzmuster dienen, sofern er nicht bereits einem vorhergehendem Muster zugeordnet wurde. Das Toleranzband der Mustererkennung und damit die Berechnung der Parameter  $\epsilon$  und  $\zeta$  basiert auf der Differenz der maximalen und der minimalen Geschwindigkeit der zu durchsuchenden Daten, die mit einem konstanten Faktor multipliziert wird [97]:

$$\epsilon = \zeta = (v_{\max} - v_{\min}) \cdot 0,001 \quad (4.8)$$

Nach Abbildung 4.6 werden hier aufgrund ihres Geschwindigkeitsverlaufs drei Muster A, B und C wiederkehrend in den zugrunde gelegten Messdaten erkannt. Es ist sehr vorteilhaft, dass hier für unterschiedliche Antriebskonzepte (hybrider und konventioneller Antriebsstrang) gleiche  $v=v(t)$ -Muster erkannt werden.

Nach Bestimmung des arithmetischen Mittelwerts können die Profile A und C mit mittleren Geschwindigkeiten von 27,8 km/h und 34,6 km/h dem Stadtverkehr zugeordnet werden. Der Mittelwert von Geschwindigkeitsprofil

B (Überlandverkehr) liegt bei 47,8 km/h. Abbildung 4.7 vergleicht einige Messabschnitte, die den Profilen A, B und C zugeordnet werden können, aufgrund der Merkmale Mittelwert, Median, 1. und 3. Quartil. Jedes erkannte Muster wurde hier fortlaufend nummeriert (z. B. A01, A02, ...).



**Abb. 4.7:** Statistische Merkmale erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97]

Innerhalb einer Geschwindigkeitsklasse (z. B. Autobahn) sind nun mehrere Fahrgeschwindigkeitsmuster (z. B. A, B, C, ...) bekannt. Für ein erkanntes Fahrgeschwindigkeitsmuster (z. B. „A“) wird nun anhand der Messgröße „Fahrpedalstellung“ eine weitere Mustererkennung durchgeführt. Dies führt zu einer weiteren Untergliederung der Geschwindigkeitsprofile in eine Geschwindigkeits-Fahrer(G-F)-Gliederung (z. B. „AA“, „AB“, ...). Varianzen, die durch unterschiedliche Fahrer zustände kommen, können so allerdings nicht von denen unterschieden werden, die durch unterschiedliche Streckenabschnitte hervorgerufen werden. Aufgrund fehlender Sensorik zur Erfassung dieser Varianzen wird dieser Unterschied daher nicht berücksichtigt.

Das Referenzmuster wird analog zur Ermittlung der Geschwindigkeitsmuster durch einen Messabschnitt definiert und in den weiteren Messdaten gesucht. In Tabelle 4.9 sind die erkannten G-F-Gliederungen dargestellt. Die Betrachtung von fünf Fahrzeugen über einen Zeitraum von sechs Kalendermonaten ergibt eine hohe Anzahl von vergleichbaren Datenverläufen.

| G-Profil | F-Profil | Profile gesamt | G-F-Profil |
|----------|----------|----------------|------------|
| A        | A        | 69             | <b>AA</b>  |
| A        | B        | 76             | <b>AB</b>  |
| A        | C        | 42             | <b>AC</b>  |
| B        | A        | 29             | <b>BA</b>  |
| B        | B        | 36             | <b>BB</b>  |
| C        | D        | 102            | <b>CD</b>  |
| C        | E        | 49             | <b>CE</b>  |

**Tab. 4.9:** Zuordnung einzelner Fahrprofile, Vorgehensweise nach [97]

Diese können nun zum einen dazu genutzt werden, die Energiebilanz und die Betriebspunkte der verschiedenen Antriebskonzepte (Hybrid- und konventionelles Fahrzeug) miteinander zu vergleichen. Zum anderen kann auf diese Weise die hohe Anzahl an Messdaten deutlich reduziert werden sowie eine relative Häufigkeitsverteilung der Streckenabschnitte gebildet werden, die diese Fahrzeuge beim Kunden abfahren.

#### 4.2.4 Gliederung der Messdaten

Die Zuordnung der Messdaten zu Fahrzeugtyp bzw. Antriebssystem, dem Verlauf der Geschwindigkeit sowie dem Fahrerverhalten bietet die Möglichkeit, eine Datenbank  $M$  (Messwerte) zu erstellen, deren Einträge zunächst noch auf die zeitbasierten Messverläufe referenzieren. In Abbildung 4.8 ist die Struktur der möglichen Kategorien zu sehen. Die erste Untergliederung erfolgt aufgrund der statistischen Geschwindigkeitsmerkmale in die vier Spalten Autobahn, Überland, Stadt und Rangieren. Eine weitere Unterteilung findet nun innerhalb der vier Spalten wiederum anhand der gefundenen Muster des Fahrgeschwindigkeitsprofils statt. Die gefundenen Muster werden anhand fortlaufender Indizes mit  $G_i$  bezeichnet. Nicht erkannte Muster bleiben dem obersten Gliederungsbereich (z. B.  $A$ ) zugeordnet.

Nach der *Anwendung der Mustererkennung* auf alle Fahrprofile wird jedes anhand der Namenskonvention Hauptgliederungsbereich\_Geschwindigkeitsmuster\_Fahrermuster\_Messungsnummer gekennzeichnet. Die vorgenannten Bezeichner können die im Folgenden genannten Werte annehmen. Dabei steht der Index 0 für Musterverläufe, die nicht zu Referenzverläufen zugeordnet werden können.



**Abb. 4.8:** Struktur der Datenbank M zur Gliederung des Datenmaterials

1. Hauptgliederungsbereich:  $\{A, \ddot{U}, S, R\}$
2. Geschwindigkeitsmuster:  $\{G_1, G_2, \dots, G_0\}$
3. Fahrermuster:  $\{F_1, F_2, \dots, F_0\}$
4. Messungsnummer:  $\{1, 2, 3, \dots\}$

Jeder Datenbankeintrag (z. B.  $S_{G_3-F_1-0734}$ ) beinhaltet eine Folge kennzeichnender Größen:

- Verknüpfung zum zeitbasierten Messabschnitt mit den Zeitreihen aller physikalischen Messwerte
- Zeitdauer des Messabschnitts  $t$  [s]
- Arithmetisches Mittel des Geschwindigkeitsverlaufs  $\bar{v}$  [km/h]
- Fahrzeugkonfiguration  $K$  [-]
- Fahrzeugmasse  $m$  [kg]

Dabei gilt für die Konfigurationsklasse K:

- A: Nennleistung  $P \leq 210$  kW
- B:  $210 \text{ kW} < P \leq 310$  kW



- C:  $310 \text{ kW} < P \leq 350 \text{ kW}$
- D:  $350 \text{ kW} < P \leq 420 \text{ kW}$
- E:  $420 \text{ kW} < P$

und für die Fahrzeugmassenklasse M:

- S: Gesamtmasse  $m \leq 12 \text{ t}$
- M:  $12 \text{ t} < m \leq 22 \text{ t}$
- L:  $22 \text{ t} < m \leq 32 \text{ t}$
- XL:  $m > 32 \text{ t}$

Diese Nomenklatur wird auf alle zeitbasierten Messdaten angewendet.

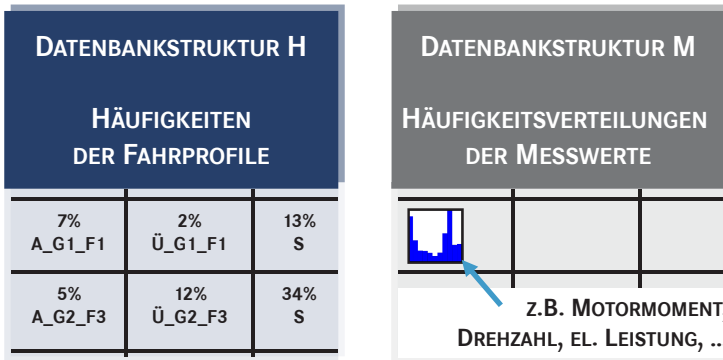
## 4.3 Wissensbasis

In der Wissensbasis sollen alle Messdaten aus den drei herangezogenen Datenquellen nur noch als statistisch ausgewertete Größen vorliegen. Alle Daten werden dazu nach ihrer statistischen Auswertung in zwei Datenbanken H und M gespeichert. Die Datenbank M (Häufigkeitsverteilungen der Messwerte) nach Abbildung 4.8 (Kapitel 4.2) beinhaltet die statistisch ausgewerteten Messwerte aller Fahrzeugfunktionen. Die Datenbank H besitzt eine zu M identische Struktur und ist an den selben Stellen mit Einträgen versehen. In ihr ist die jeweilige Auftretenshäufigkeit der erkannten Fahrmuster hinterlegt. Hier ist somit dokumentiert, wie oft ein Fahrprofil zeitlich aufgetreten ist. Während M also die Häufigkeitsverteilungen aller Messwerte (z. B. Fahrgeschwindigkeit) innerhalb eines erkannten Fahrmusters beschreibt, wird in H dargestellt, wie oft dieses Fahrmuster bei allen betrachteten Kundenmessungen erkannt worden ist.

Dazu müssen alle Daten einer Messgröße einzelner Messabschnitte, die einem erkannten Muster zugeordnet sind (z. B.  $S_G3-F_1$ ), vereint und deren relative Häufigkeiten anhand der Zeitdauer ihres Auftretens bestimmt werden (siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2). Die Berücksichtigung der korrespondierenden relativen Häufigkeiten aus H mit den Messwerten aus M kann somit für eine zeitliche Gewichtung der in M hinterlegten Häufigkeitsverteilungen aller aufgetretenen Betriebspunkte eines jeweiligen Fahrprofils bzw. -musters verwendet werden. Werden z. B. die relativen Auftretenshäufigkeiten jedes Fahrprofils (alle Einträge von H) mit den korrespondierenden Messwerten der Geschwindigkeit aus der Datenbank M multipliziert und anschließend

aufsummiert, so ergibt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit aller betrachteten Kundenfahrzeuge (auf ca. 15 Millionen Kilometern).

Die Datenbank M wird hauptsächlich mit Hilfe der messtechnisch ausgestatteten Fahrzeuge aus den Flottenversuchen und den Erprobungsfahrzeugen befüllt, während die Datenbank H die statistischen Daten aus der Kundenfahrprüfung nutzt, um die Auftretenshäufigkeit der erkannten Fahrprofile zu bestimmen.



**Abb. 4.9:** Datenbankstrukturen H(Häufigkeiten) und M(Messwerte)

Der Anwender der Wissensbasis kann also anhand der Datenbank H ermitteln, wie häufig bestimmte Fahrmuster sowie dort auftretende Leistungen auftreten. Weiterhin kann er folgende Ableitungen treffen:

- Wie häufig wurde ein definiertes Fahrmuster der Datenbank M verwendet? Wie relevant ist dieses Fahrmuster für die Auslegung seines neuen Systems?
- Welche statistische Relevanz hat ein Geschwindigkeitsmuster (z. B. Autobahn) für eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration und/oder eine Massenklasse?
- Wie repräsentativ sind die Betriebszustände eines speziell ausgewählten Kunden in Bezug auf die breite Wissensbasis für die selbe Fahrzeug-/Massenkonfiguration?

Die mehrstufige Auswertung nach den verschiedenen Kriterien der letzten Unterkapitel erlaubt dabei die Zuordnung der Eigenschaften des Fahrzeugbetriebs nach den Kriterien

- a) Anteile aller/ausgewählter Kunden
- b) Baumusterspezifische Kriterien
- c) Fahraufgaben/fahrerspezifische Kriterien

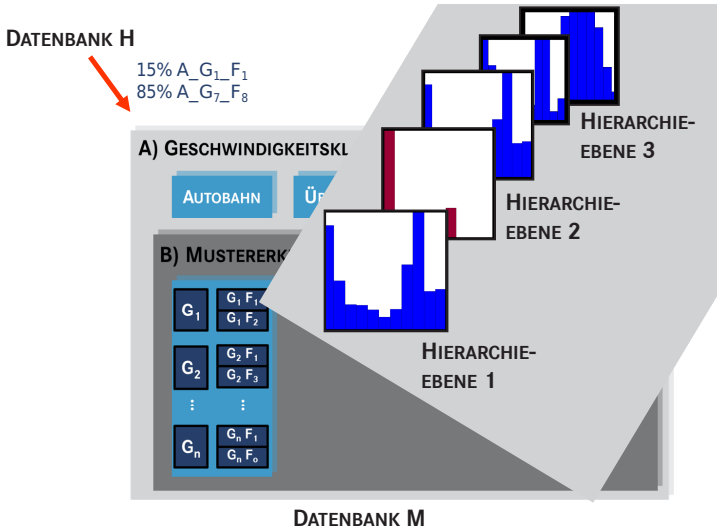
Aus diesen Datenbanken kann nun für eine Simulationsaufgabe entschieden werden, welche Daten als Basis für eine Simulation dienen. Der Anwender kann entscheiden, welches Datenmaterial er als Quelle für die Simulation verwendet. Unter anderem sind folgende Möglichkeiten gegeben:

- Verwendung aller Einträge der Datenbanken H und M: dies hat zur Folge, dass eine Simulation die Betriebspunkte aller Fahrzeugkonfigurationen in allen Betriebszuständen verwendet. Das Simulationsergebnis wäre repräsentativ für alle messtechnisch erfassten Kunden. Allerdings würde das Ergebnis der Simulation aufgrund der Eingangsgrößen aus weiten Wertebereichen sehr stark streuen. Eine solche Anwendung wäre z. B. dann denkbar, wenn man ein neues System auf alle Fahrzeuge anwenden möchte.
- Verwendung aller Einträge, die der Kategorie „Autobahn“ (erste Spalte der Datenbank H bzw. M, Abbildung 4.9) zugeordnet sind: dies würde dazu führen, eine Maßnahme simulativ für alle Fahrzeugkonfigurationen zu bewerten, deren Fahrer dieses Streckenprofil bedienen. Für einen Fahrzeughersteller scheint dies eher unpraktisch, da er schlecht vorhersehen kann, welcher Kunde seine Fahrzeuge entsprechend einsetzen wird.
- Verwendung eines spezifischen Musters (z. B.  $S_G3\_F1\_0734$ ): hier kann vorausgesagt werden, wie sich eine Energiemanagementmaßnahme unter definierten Bedingungen verhalten wird. Eine spätere Validierung mit Erprobungsfahrzeugen könnte somit erfolgen.

Nach der Vorsortierung liegen nun die Daten in den Datenbankstrukturen H (Häufigkeiten) und M (Messwerte) vor. Wählt der Anwender für sich ein Fahrprofil, das er simulieren möchte, kann er nun die relativen Häufigkeiten abrufen, die sich aus den Messwerten und der Gewichtung durch die Häufigkeit H ergeben. Abbildung 4.10 zeigt hierbei die prinzipielle Vorgehensweise.

In der Datenbank H sind die zeitlichen Anteilsdauern aufgeführt, mit denen ein bestimmtes Fahrmuster in der Kundenfahrerprobung erkannt wurde. Im vorliegenden Beispiel wurde das Fahrprofil  $A\_G1\_F1$  mit einem zeitlichen Anteil von 15 % und das Fahrprofil  $A\_G7\_F8$  zu 85% bei einem Kunden

detektiert. Dieses Fahrer- und Fahrzeugverhalten soll nun in der Simulation berücksichtigt werden. Dazu werden nun die Messwerte der Datenbank M anteilig zu 15 % und 85 % verwendet. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise kann vor Beginn der Simulation das abzubildende Fahrprofil erstellt werden.



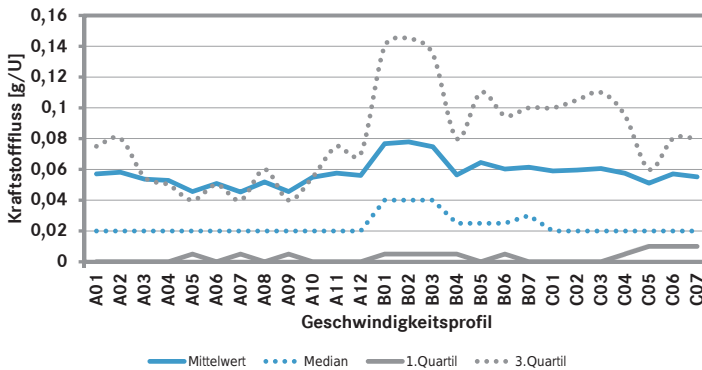
**Abb. 4.10:** Zuordnung der statistischen Messdaten zu den Datenbanken H und M

In Datenbank M sind die Häufigkeitsverteilungen der Messwerte (Leistungen, Energien, Betriebsmodi, usw.) der Fahrzeugfunktionen hinterlegt. Diese sind anhand der Energie-Hierarchie nach Abbildung 3.5 sortiert. In Hierarchieebene 1 werden Leistungs- und Energieanforderungen an die chemische Energie hinterlegt. Hierarchieebene 2 berücksichtigt die Energiebedarfe von Verbrennungsmotor und Standheizung, während Hierarchieebene 3 die Leistungshäufigkeiten von Fahrwiderständen, Nebenaggregaten und ggf. Elektromotoren des Hybridsystems beschreibt.

Im Folgenden wird erklärt, wie aus den gemessenen Zeitreihen die Häufigkeitsverteilungen und andere statistische Größen berechnet und anschließend in Datenbank M abgelegt werden.

### 4.3.1 Eindimensionale Merkmale

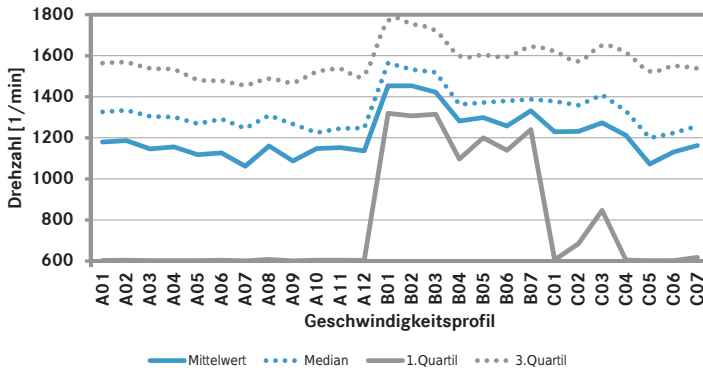
Die statistische Betrachtung von pyhsikalischen Messdaten verschiedener Fahrprofile, die nach der Fahrer-Fahrzeug-Mustererkennung (Kapitel 4.2.3) als identische Fahrer-Fahrzeug-Profile erkannt wurden, lässt erkennen, dass beim Übergang von einem Geschwindigkeitsprofil zu einem anderen sich die statistischen Kenngrößen (z. B. der Mittelwert) bestimmter Messgrößen in ähnlicher Weise verändern. In den Abbildungen 4.11 und 4.12 ist eine deutliche Korrelation der Merkmale von Motordrehzahl und Kraftstofffluss zu den Geschwindigkeitsmustern in Abbildung 4.7 zu erkennen.



**Abb. 4.11:** Statistische Merkmale des Kraftstoffverbrauchs erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97]

Aus diesem Grund ist es nach der hier beschriebenen Vorgehensweise zulässig, alle Messwerte eines erkannten Geschwindigkeitsprofils in einer Häufigkeitsverteilung zusammenzufassen. Die Messwerte jeder Fahrzeugmessung sind nach Kapitel 4.1.3 in einer Strukturvariablen  $S$  anhand des hierarchischen Fahrzeugmodells gespeichert.

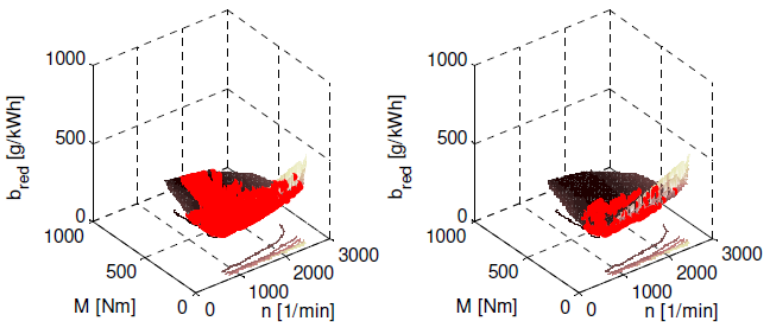
Für die relative Häufigkeit jeder Variablen  $S_m$  (z. B. die elektrische Leistung  $P_{el}$ ) berechnet sich die relative Häufigkeit anhand der Gleichungen (2.66) und (2.68). Für jede Variable  $S_m$  aus der Strukturvariablen  $S$  ergibt sich aus der Berücksichtigung der Einzelhäufigkeiten aller innerhalb des gleichen Fahrmusters durchgeführten Messungen eine relative Häufigkeitsverteilung, die in der Wissensbasis gespeichert wird.



**Abb. 4.12:** Statistische Merkmale der Motordrehzahl erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97]

### 4.3.2 Mehrdimensionale Merkmale

Mit Hilfe der mehrdimensionalen Zuordnung werden nach Abbildung 4.13 die Betriebspunkte des vorliegenden Falls auf Kennfelder abgebildet.



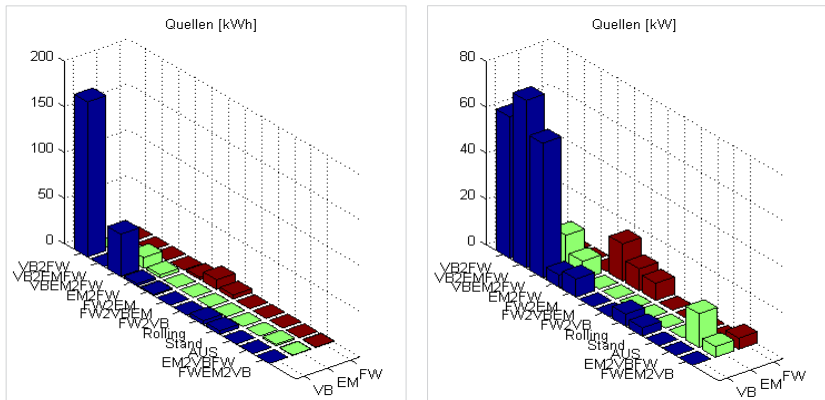
**Abb. 4.13:** Motorbetriebspunkte (rot) dargestellt auf einem Muscheldiagramm des Verbrennungsmotors während einer Stadt-(links) bzw. Überlandfahrt (rechts) [97]

Auf diese Art lässt sich der Zusammenhang abhängiger Größen später mit Hilfe der zeitunabhängigen Methodik beibehalten. Werden Maßnahmen zur Kraftstoffersparnis in der Simulation angewandt, ändern sich die Betriebspunkte im Motorkennfeld und sorgen so für eine Veränderung des Kraftstoffverbrauchs.

### 4.3.3 Leistungs- und Energiebilanz

Mit Hilfe der Wissensbasis kann unter Hinzunahme des Fahrzeugmodells eine Leistungs- und Energiebilanz erstellt werden. Abbildung 4.14 zeigt die Energien und Leistungen eines Hybridfahrzeugs, die aus der Wissensbasis entnommen sind.

Die Energiewandler Verbrennungsmotor (VB), Elektromotor (EM) und die Fahrwiderstände (FW) sind hierbei jeweils entweder als Quellen oder als Senken definiert. Die Namenskonvention sieht dabei vor, zuerst die Energiequelle und anschließend die Energiesenke zu benennen. Die Trennung zwischen Quelle und Senke erfolgt dabei mit Hilfe der Abkürzung „2“. Die Bezeichnung „VB2FW“ beschreibt hier jeweils die durchschnittliche Leistung bzw. die durchschnittliche Energie, die vom Verbrennungsmotor als Energiequelle zum Fahrwiderstand als Energiesenke gewandelt wird. Die Bezeichnung „VBEM2FW“ beschreibt den Zustand, in dem der Verbrennungsmotor und der Elektromotor die Fahrwiderstände als Energiesenke versorgen.



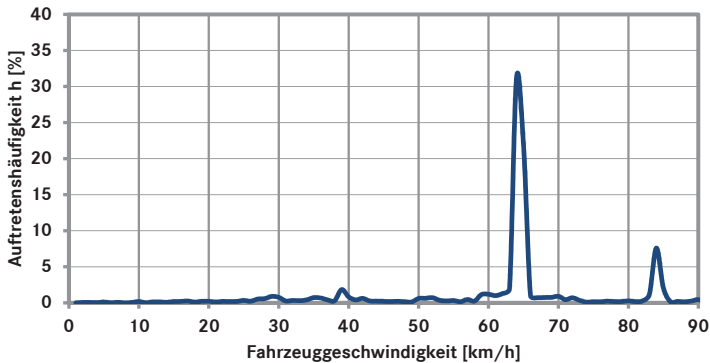
**Abb. 4.14:** Energie- (links) und Leistungsbilanz (rechts) eines Hybridfahrzeugs [97]

Im linken Bild ist anschaulich zu sehen, wieviel der Energie den Fahrwiderständen rein verbrennungsmotorisch zur Verfügung gestellt wird und wie groß der Anteil des kombinierten Betriebs von Verbrennungsmotor und Elektromotor ist. Auf der rechten Seite sind die Leistungen dargestellt. Diese unterscheiden sich von den Energien. Dies liegt daran, dass an dieser Stelle

die Zeitanteile der Wissensbasis nicht entnommen wurden. So ergibt sich die Energie (linkes Bild) durch eine Multiplikation der durchschnittlichen Leistungen aus dem rechten Bild mit der jeweiligen zeitlichen Dauer.

## 4.4 Energiebilanz des betrachteten Einsatzprofils

In diesem Abschnitt sollen die Energie- und Leistungsbedarfe eines definierten Fahrzeugs und seiner Teilkomponenten beschrieben werden. Die Basis für diese Berechnung stellt ein Fahrprofil dar, das mit Hilfe der Wissensbasis generiert wurde. Die Besonderheit dieses Fahrprofils ist seine anteilige Zusammensetzung aus mehreren Fahrmustern. Dabei stammen 80 % der relativen Häufigkeiten und damit der zeitlichen Anteile aus den Betriebspunkten einer Überlandfahrt, 10 % aus einer Stadtfahrt und jeweils 5 % aus einem Autobahn- und einem Rangierprofil. Im späteren Verlauf dieser Arbeit wird dieses Fahrprofil für die Bewertung der exemplarisch angewendeten Energiemanagementsysteme verwendet. Aus diesem Grund wird auch dieses gemischte Profil verwendet, da sich hier der Einfluss von Betriebsstrategien auf verschiedenen Fahrprofilen besonders gut demonstrieren lässt.



**Abb. 4.15:** Diskrete Häufigkeitsanteile der Fahrzeuggeschwindigkeit anhand des Streckenverlaufs, Klassenbreite  $\Delta v_k = 1 \text{ km/h}$



Das betrachtete Einsatzprofil des schweren Nutzfahrzeugs mit einem Gesamtgewicht von 40 Tonnen hat eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 60,8 km/h. Abbildung 4.15 stellt die relative Häufigkeitsverteilung seiner Fahrzeuggeschwindigkeit mit einer Klassenbreite von  $\Delta v_k = 1$  km/h dar.

Nach Abbildung 4.15 befinden sich ca. 54 % der anteiligen Häufigkeiten der Fahrgeschwindigkeit im Geschwindigkeitsband zwischen 64 und 66 km/h. Dies liegt darin begründet, dass der Fahrer aufgrund der für Nutzfahrzeuge gesetzlich maximal zugelassenen Geschwindigkeit von 60 km/h (außerorts) entweder eine Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) oder einen Geschwindigkeitsbegrenzer (Limiter) verwendet hat.

#### 4.4.1 Kenngrößen der Leistungs- und Energiebilanzen

Der messtechnisch erfasste Kraftstoffbedarf des Gesamtfahrzeugs und somit der Energieeinsatz für dieses Fahrprofil beträgt normiert auf die zurückgelegte Fahrstrecke  $E_{\text{Diesel,km}} = 39,01/100\text{km}$ . In Kombination mit der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit lassen sich der stündliche Kraftstoffverbrauch  $E_{\text{Diesel,h}}$  sowie die durchschnittliche Leistung des Energieträgers Diesel ( $\bar{P}_{\text{Diesel}}$ ) berechnen. Alternativ kann die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit auch aus der Division der Streckenlänge durch die dafür benötigte Zeitdauer erfolgen.

$$E_{\text{Diesel,h}} = E_{\text{Diesel,km}} \cdot \bar{v} = \frac{39,01}{100 \text{ km}} \cdot 60,8 \text{ km/h} = 23,71/\text{h} \quad (4.9)$$

$$\bar{P}_{\text{Diesel}} = E_{\text{Diesel,h}} \cdot H_i = 23,71/\text{h} \cdot 9,8 \text{ kWh/l} = 232,7 \text{ kW} \quad (4.10)$$

Der Einsatz des Verbrennungsmotors und seine Kopplung mit dem Antriebsstrang teilt sich vorrangig auf drei verschiedene Betriebsmodi auf. Im sogenannten Zugbetrieb ist der Verbrennungsmotor mit dem Antriebsstrang gekoppelt. Der Verbrennungsmotor wandelt in diesem Betriebszustand chemische Energie des Diesels in Energie, die im Antriebsstrang und in den Nebenaggregaten weiter gewandelt wird. Im Schubbetrieb ist der Verbrennungsmotor ebenfalls mit dem Antriebsstrang gekoppelt. Er wandelt in diesem Fall allerdings keine chemische Energie, sondern Energie aus dem Antriebsstrang in Wärmeenergie. Dieser Zustand wird auch als Schleppen oder Bremsen bezeichnet. Im Leerlaufbetrieb ist der Verbrennungsmotor nicht mit dem Antriebsstrang verbunden. Das Fahrzeug steht oder rollt in diesen Fällen. Der Verbrennungsmotor wandelt chemische Energie zur

Überwindung seiner eigenen Widerstandsleistung sowie der mechanischen Leistung der Nebenaggregate.

Die zeitlichen Anteile dieser drei Betriebsmodi auf dem betrachteten Fahrprofil sind in Tabelle 4.10 dargestellt. Sie teilen sich auf in einen Zuganteil von  $A_{\text{Zug}} = 73,3\%$  und einen Schlepp- und Bremsanteil von  $A_{\text{Schub}} = 16,4\%$ . Der restliche Anteil  $A_{\text{Leerlauf}} = 10,2\%$  besteht aus Rollphasen, Anteilen bei stehendem Fahrzeug und Zwischenzuständen (z. B. Schaltvorgängen). Weiterhin sind die Kraftstoffenergien  $E_{\text{Diesel,h}}$  sowie die Kraftstoffleistungen  $\bar{P}_{\text{Diesel}}$  für den jeweiligen Betriebsmodus und die gesamte Fahrstrecke dargestellt. Deren Werte sind der Messung entnommen.

| Betriebsmodus   | zeitlicher Anteil<br>$A$ | Kraftstoffenergie<br>$E_{\text{Diesel,h}}$ | Kraftstoffleistung<br>$\bar{P}_{\text{Diesel}}$ |
|-----------------|--------------------------|--|---|
| <b>Schub</b>    | 16,4 %                   | 0 l/h <sup>1</sup>                         | 0 kW  |
| <b>Leerlauf</b> | 10,2 %                   | 2,2 l/h                                    | 21,4 kW   |
| <b>Zug</b>      | 73,3 %                   | 32,1 l/h                                   | 314,4 kW  |
| <b>Gesamt</b>   | 100 %                    | 23,7 l/h                                   | 232,7 kW  |

**Tab. 4.10:** Verbrauchs- und Leistungsverhalten bezogen auf die chemische Energie

Anhand der drei Betriebsmodi kann die Gesamtenergie in Analogie zu den zeitlichen Anteilen der einzelnen Phasen aufgeteilt werden. Der stündliche Kraftstoffverbrauch  $E_{\text{Diesel,h}}$  ergibt sich aus der Beziehung

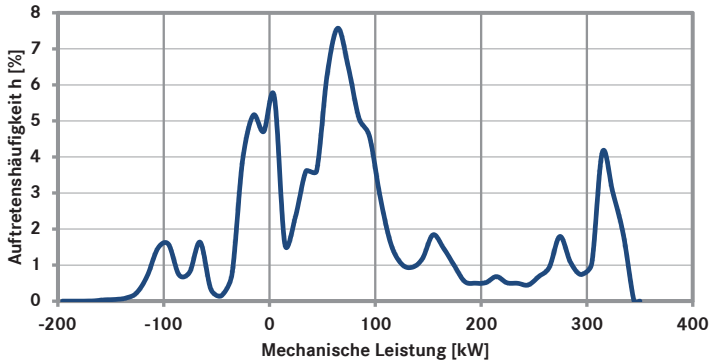
$$E_{\text{Diesel,h}} = A_{\text{Schub}} \cdot E_{(\text{Diesel,h})_{\text{Schub}}} + A_{\text{Leerlauf}} \cdot E_{(\text{Diesel,h})_{\text{Leerlauf}}} + A_{\text{Zug}} \cdot E_{(\text{Diesel,h})_{\text{Zug}}} \quad (4.11)$$

Für die spätere Ermittlung von Verbrauchseinsparungen werden die Häufigkeiten, mit denen die Betriebsmodi auftreten, im Berechnungsverfahren berücksichtigt.

In Abbildung 4.16 ist die relative Häufigkeitsverteilung der mechanischen Leistung des Verbrennungsmotors dargestellt. Die durchschnittliche Leistung des Verbrennungsmotors inklusive seiner Schlepp- und Bremsanteile für die hier betrachtete Transportaufgabe beträgt  $\bar{P}_{\text{VKM,gesamt}} = 87,2 \text{ kW}$ . Betrachtet man lediglich den Zuganteil, so ergibt sich der arithmetische Mittelwert der mechanisch abgegebenen Leistung  $\bar{P}_{\text{VKM,Zug}} = 131,0 \text{ kW}$ . Hierbei sind die Leerlaufanteile des Verbrennungsmotors bei stehendem

<sup>1</sup> Aus Gründen der Vereinfachung wird hier angenommen, dass im Schubbetrieb der Verbrennungsmotor grundsätzlich ohne Kraftstoffzufuhr arbeitet.

Fahrzeug oder Rollen bzw. Segeln nicht berücksichtigt. In der Energiebilanzierung der Nebenaggregate wird dieser Betriebszustand gesondert betrachtet.



**Abb. 4.16:** Häufigkeiten in diskreten Leistungsklassen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{VKM,mech}_k} = 10 \text{ kW}$

Aus mechanischer und chemischer Leistung lässt sich der durchschnittliche Wirkungsgrad ermitteln. Für den Zugbetrieb des Verbrennungsmotors ergibt sich folgender durchschnittliche Wirkungsgrad:

$$\bar{\eta}_{\text{Zug}} = \frac{\bar{P}_{\text{VKM,mech}} \text{ kW}}{\bar{P}_{\text{VKM,chem}} \text{ kW}} = \frac{131,0}{314,4} = 41,7\% \quad (4.12)$$

Im Schlep- und Bremsbetrieb ist der Wirkungsgrad nicht definiert, da in diesem Betriebszustand eine Energiewandlung von mechanischer Energie in chemische Energie nicht möglich ist. Im Leerlaufbetrieb ist die Ermittlung schwerer möglich, da hier durch die Umstellung von einer Momentenregelung (Einspritzmenge ist abhängig von einem Wunschkraftmoment, das über die Fahrpedalstellung oder die Tempomatenvorgabe angefordert wird) auf eine Drehzahlregelung (Zielgröße = konstante Solldrehzahl) das Energiewandlungsverhalten einem Mischbetrieb zwischen Zug und Schub entspricht. Um die erforderliche Drehzahl zu halten, wird der Motor beschleunigt oder abgebremst. Die variierenden Lastanforderungen der Nebenaggregate erfordern zusätzlich ihre Berücksichtigung.

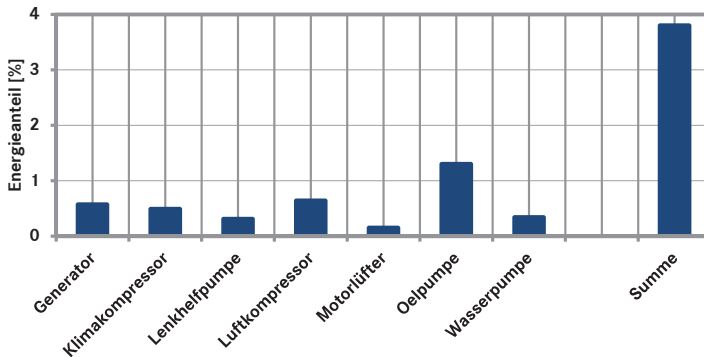
Der drehzahlgeregelte Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors regelt auf eine Solldrehzahl von  $n_{\text{VKM,Leerlauf}} = 560 \text{ 1/min}$ . In diesem Drehzahlbereich

treten unter variierender Leistungsanforderung der Nebenaggregate Wirkungsgrade im Bereich von  $\eta_{VKM,Leerlauf} = 23,8\% - 33,6\%$  auf (weiteren Messungen entnommen).

Insgesamt ist das Kennfeld des Nutzfahrzeugdieselmotors dadurch gekennzeichnet, dass bereits bei minimaler Momentenanforderung ein starker Anstieg des Wirkungsgrades folgt. Daher bringt eine Betriebspunktverschiebung während einer Momentenanforderung des Antriebsstrangs (z. B. durch hybride Fahrzeuge) weniger Vorteile als z. B. bei leichten Diesel- oder Benzinmotoren. Ein größerer Vorteil erbringt hier der Verzicht auf den Leerlaufbetrieb (z. B. durch Motor-Stopp-Start-Betrieb).

#### 4.4.2 Leistungsbedarfe der Nebenaggregate

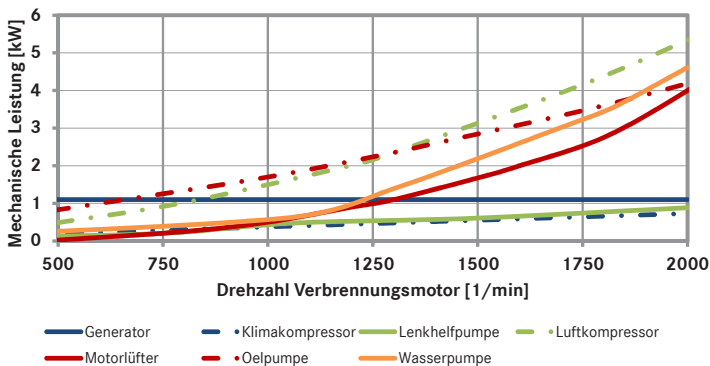
Betrachtet man die mechanischen Leistungsbedarfe der Energiewandlungsprozesse aller Nebenaggregate und summiert diese nach Multiplikation mit ihren jeweiligen zeitlichen Auftretenshäufigkeiten über das definierte Fahrprofil auf, so erhält man die streckenbezogenen Energiebedarfe für die jeweiligen Nebenaggregate. Durch Division dieser Werte durch den Gesamtenergieeinsatz des Fahrzeugs erhält man den Energieanteil aller Nebenaggregate bezogen auf den Gesamtenergieeinsatz des Fahrzeugs.



**Abb. 4.17:** Anteile der mechanischen Energie der Nebenaggregate am Gesamtenergieeinsatz des Fahrzeugs, nach [62]

Abbildung 4.17 stellt den jeweiligen Energieanteil für die Nebenaggregate Generator, Klimakompressor, Lenkhilfpumpe, Luftkompressor, Motorlüfter, Ölpumpe und Wasserpumpe dar. Die Summe der Energieanteile der Nebenaggregate beträgt auf dem herangezogenen Fahrprofil 3,8 %. Jeder Anteil stellt zugleich das Grenzpotenzial einer möglichen Verbrauchsreduktion dar, das sich aus der Vermeidung der Bereitstellung jeglicher Endenergie aus dem Kraftstoff ergibt. Diese Vermeidung ist mit dem in dieser Arbeit vorgestellten stochastischen Simulationsansatz allerdings nur dann zulässig, wenn die Nutzenergie der Funktion durch eine andere Energiewandlungskette erfüllt wird. Würde z. B. die mechanische Kopplung des Luftpressers an den Verbrennungsmotor entfallen, so müsste die Funktion „Druckluft erzeugen“ durch eine andere Energiewandlungskette erfolgen (z. B. über den elektrischen Energiepfad).

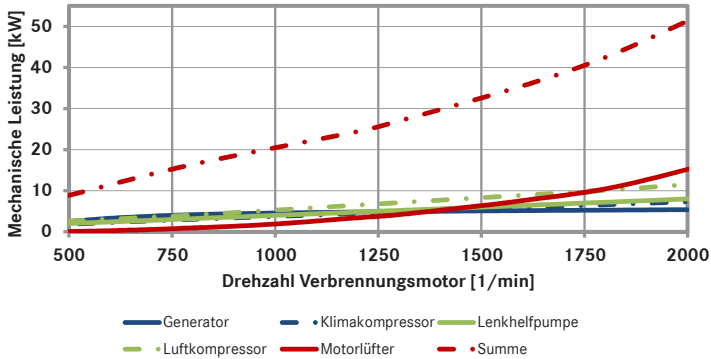
Betrachtet man die gewandelte Leistung der Nebenaggregate, so kann man in Abhängigkeit des zugrundegelegten Fahrprofils und ihrer Wirkungsgrade die dafür notwendigen mechanischen Leistungen in Abhängigkeit ihrer Antriebsdrehzahlen darstellen. In Abbildung 4.18 ist die drehzahlabhängige Leistung aller Nebenaggregate zu erkennen. Sie ist den vorliegenden Messdaten entnommen.



**Abb. 4.18:** Durchschnittliche drehzahlabhängige Leistung der Nebenaggregate in den Betriebspunkten des Fahrzeugprofils, nach [62]

In vorliegender Fahrzeugkonfiguration erfolgt die Energiewandlung durch die Nebenaggregate bedarfsgerecht in Abhängigkeit der geforderten Endleistung durch die Verbraucher, die sich der jeweiligen Energieform bedienen. Abbildung 4.19 stellt die maximal mögliche mechanische Leistungsaufnahme

me der Nebenaggregate in Abhängigkeit der Motordrehzahl dar. Ohne die Aggregate Öl- und Wasserpumpe ergeben sich hierbei Antriebsleistungen der Nebenaggregate von bis zu 50 kW.



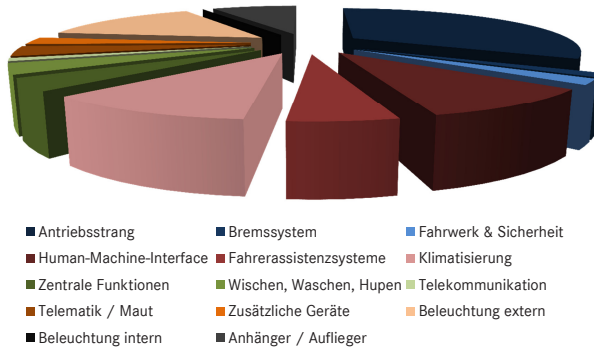
**Abb. 4.19:** Maximal mögliche mechanische Leistungsaufnahme der Nebenaggregate, nach [62]

Sofern die Möglichkeit für die Betriebsstrategie eines Energiemanagementsystems besteht, die Energiewandlung eines Nebenaggregats abhängig von günstigen Betriebszuständen des Verbrennungsmotors zu steuern, so ergibt sich hier aufgrund der geringen durchschnittlichen Auslastung ohne Veränderung der Nennleistung des Aggregats ein Potenzial zur Kraftstoffeinsparung. Die geringe durchschnittliche Auslastung ist nach Kapitel 2.2.3 darin begründet, dass Nebenaggregate nicht nach ihrer durchschnittlichen Wandlungsleistung, sondern nach der Leistung während des Worst-Case-Szenarios ausgelegt sind. Natürlich ist ebenfalls ein Speicher erforderlich, der die gewandelte Energie zwischenspeichert und in ungünstigen Betriebszuständen des Verbrennungsmotors, gekennzeichnet durch schlechte Wirkungsgrade, den Verbrauchern bereitstellt.

### 4.4.3 Energiebilanz des Bordnetzes

In Analogie zur Berechnung der mechanischen Energieanteile der Nebenaggregate (vgl. Kapitel 4.4.2) sind in Abbildung 4.20 die Energieanteile von Subsystemen bzw. Komponenten des elektrischen Bordnetzes am elektrischen Gesamtenergiebedarf dargestellt. Die größten Energiebedarfe auf diesem Fahrprofil fordern demnach die Subsysteme Antriebsstrang,

Human-Machine-Interface (u. a. Kombiinstrument und Infotainmentsysteme), Klimatisierung und externe Beleuchtung. Im messtechnisch erfassten

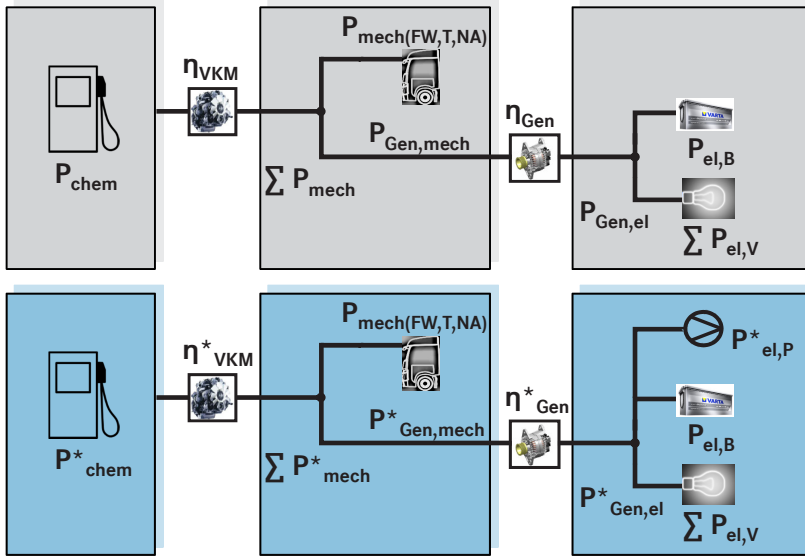


**Abb. 4.20:** Anteile der Komponenten bzw. Subsysteme am elektrischen Energiebedarf, nach [62]

System  $S$  ist grundsätzlich die *Leistungs- und Energiebilanz* jedes Teilsystems erfüllt. Dies bedeutet, dass die Summe aller zu- und abfließenden Leistungen und Energien betragsmäßig gleich sind (Energieabgabe hat stets positives, Energieaufnahme stets negatives Vorzeichen).

Fügt man dem System  $S$  nun im Modell eine Systemänderung  $S^*$  zu, ist bei unveränderter Verwendung der Messergebnisse weder die Leistungs- noch die Energiebilanz im neuen System  $S^*$  erfüllt. Sie muss daher neu berechnet werden. In Abbildung 4.21 ist ein Fahrzeugsystem  $S$  dargestellt, dessen elektrische Generatorleistung aus der Summe der Leistungen seiner elektrischen Verbraucher  $\sum P_{el,V}$  und der Leistung der Batterie  $P_{el,B}$  berechnet wird. Fügt man nun dem System einen weiteren elektrischen Verbraucher hinzu, in diesem Fall eine elektrisch angetriebene Pumpe mit der Leistung  $P_{el,P}^*$ , so führt die Leistungs- und Energiebilanzierung in Verbindung mit der messtechnisch erfassten Generatorleistung  $P_{Gen,el}$  nicht mehr zu betragsmäßig gleichen Leistungen und Energien innerhalb der elektrischen Systemgrenze. Um die Leistungsbilanz wiederum zu erfüllen, muss die Generatorleistung im neuen System  $S^*$  berechnet werden. Dies erfolgt gleichermaßen für den zeitdiskreten und den stochastischen Berechnungsansatz. Es gilt

$$P_{Gen,el}^* = - \sum P_{el,V} - P_{el,B} - P_{el,P}^* \quad (4.13)$$



**Abb. 4.21:** Energetische Systemabbildung vor (oben) und nach (unten) Integration eines zusätzlichen elektrischen Verbrauchers innerhalb des elektrischen Bordnetzes

Nach Bestimmung der neuen Betriebspunkte des Generators auf seinem Wirkungsgradkennfeld durch seine veränderte elektrische Leistung führt die daraus neu ermittelte mechanische Leistung des Generators  $P_{\text{Gen,mech}}^*$  die Leistungsbilanz des nächsten Teilsystems in ein Ungleichgewicht. Die Summe der mechanischen Leistungen  $\sum P_{\text{mech}}^*$  muss daher aus der Generatorleistung und der mechanischen Leistung für Fahrwiderstand, Trägheit und Nebenaggregate  $P_{\text{mech(FW,T,NA)}}$  berechnet werden. Die chemische Leistung  $P_{\text{chem}}^*$  berechnet sich anschließend mit Hilfe der neuen Wirkungsgrade  $\eta_{\text{VKM}}^*$  in den resultierenden Betriebspunkten des Verbrennungsmotors. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$P_{\text{Gen,mech}}^* = \frac{-P_{\text{Gen,el}}^*}{\eta_{\text{Gen}}^*} \quad (4.14)$$

$$\sum P_{\text{mech}}^* = -P_{\text{Gen,mech}}^* - P_{\text{mech(FW,T,NA)}} \quad (4.15)$$

$$P_{\text{chem}}^* = \frac{-\sum P_{\text{mech}}^*}{\eta_{\text{VKM}}^*} \quad (4.16)$$



Abbildung 4.21 stellt ebenfalls anschaulich die Energiewandlungskette dar, die zur Erzeugung elektrischer Energie aus chemischer Energie (Kraftstoff) durchlaufen wird. Im Verbrennungsmotor (VKM) findet die verlustbehaftete Energiewandlung von chemischer in mechanische Energie statt. Nach der ebenfalls verlustbehafteten Energieübertragung an den Generator erfolgt dort die wirkungsgradbehaftete Wandlung in elektrische Energie. Im Batteriespeicher findet wiederum eine Energiewandlung in elektrochemische Energie statt.

Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen chemischer und elektrischer Leistung:

$$P_{\text{chem}} = \frac{-P_{\text{el}}}{\eta_{\text{Gen}} \cdot \eta_{\text{VKM}}} \quad (4.17)$$

Der aus dem in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Fahrprofil resultierende durchschnittliche Wirkungsgrad für den Verbrennungsmotor beträgt  $\eta_{\text{VKM}} = 41,7\%$ . Für den Generator kann ebenfalls für dieses Fahrprofil ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von  $\eta_{\text{VKM}} = 70,6\%$  angenommen werden. Mit Hilfe von Gleichung (4.17) ergibt sich nun der quantitative Zusammenhang zwischen elektrischer und chemischer Leistung.

$$P_{\text{el}} = 0,2944 \cdot (-P_{\text{chem}}) \quad (4.18)$$

Dies bedeutet Folgendes:

- Die Einsparung von 1 W elektrischer Energie resultiert in einer Einsparung von 3,4 W chemischer Leistung.
- Mit idealen Energiewandlern könnte ca. 71 % Energie bei gleicher Endleistung eingespart werden.



# 5 Stochastischer Berechnungsansatz zur einsatzorientierten Simulation

Dieses Kapitel stellt die *grundlegende Vorgehensweise* des in dieser Arbeit beschriebenen stochastischen Simulationsverfahrens vor. Nach einer Definition und Erläuterung der einzelnen Ablaufschritte wird die Methodik anhand von ausgewählten Energiemanagementsystemen angewandt und diskutiert. Für die beispielhafte Anwendung der Energiemanagementsysteme werden ausschließlich Maßnahmen verwendet, die elektrische Energieflüsse beeinflussen.

Die *zu bewertenden Maßnahmen* betreffen somit die Energiewandlung von mechanischer in elektrische Energie, die Energieübertragung der Sekundärenergieform elektrischer Energie und die Beeinflussung des Endenergiebedarfs. Das elektrische Bordnetz, das aus Energiewandlern, Energiespeichern, Leitungen und elektrischen Verbrauchern besteht, bietet die Möglichkeit, die grundsätzlichen Stellhebel des Energiemanagements umzusetzen:

1. Veränderung des Energieflusses in zeitlicher Abfolge oder Leistung
2. Nutzung unterschiedlicher Energiequellen und -pfade
3. Erhöhung der Einzelwirkungsgrade der Komponenten oder des Wirkungsgrades des Gesamtsystems
4. Energiewandlung in andere (möglichst hochwertige<sup>1</sup>) Energieformen

Anhand der in diesem Kapitel beschriebenen *Grundlagen und Anwendungsbeispiele* ist es möglich, die methodische Vorgehensweise auf weitere Fragestellungen zu übertragen, da Energiemanagementsysteme bei anderen Teilsystemen ein vergleichbares Verhalten aufweisen, sofern sie nicht

---

<sup>1</sup> Umso höherwertiger eine Energieform ist, desto leichter lässt sie sich in andere Energieformen wandeln.

adaptiv auf das Fahrerverhalten und den Verkehrszustand eingehen. Ein Fahrzeug mit einem hybriden Antriebsstrang verhält sich sowohl in seinen Energiewandlungsvorgängen als auch in seiner Betriebsstrategie ähnlich zu der bereits in Kapitel 3.4 beschriebenen Maßnahme „Rekuperation im elektrischen Bordnetz“, weswegen letztere auch als Micro-Hybridisierung bezeichnet wird. Für das Vollhybrid-System muss lediglich eine Anpassung der Parametrierung seiner Hybridkomponenten und ggf. seiner Betriebsstrategie erfolgen. Die Übertragbarkeit beruht hierbei auf der Annahme, dass aufgrund des Verkehrsflusses auch ein hybridisiertes Fahrzeug keine stark veränderte Bewegungstrajektorie gegenüber einem rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug haben wird.

Aufbauend auf der beispielhaften Anwendung der Methodik in diesem Kapitel erfolgt die Umsetzung konkreter Fragestellungen in Kapitel 6.

Für die beispielhaften Anwendungen werden in den folgenden Kapiteln die Vorzeichen von Energie und Leistung nach folgendem Kriterium definiert: Energie oder Leistung, die von einer Komponente abgegeben wird, wird immer positiv gezählt (Energiequelle). Wird sie aufgenommen, ist sie immer negativ (Senke). Die vom Generator abgegebene elektrische Leistung ist daher mit einem positiven Vorzeichen zu versehen. Die Energie, die zum Laden einer Batterie benötigt wird, wäre nach der verwendeten Definition mit einem negativen Vorzeichen zu berechnen.

In diesem Kapitel werden weiterhin unterschiedliche Bezeichnungen für gemessene (Häufigkeitsverteilung  $h$ ) und berechnete (Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p$ ) Verteilungen verwendet. Es gilt dabei:

- Relative Häufigkeitsverteilung  $h(P_K)$ : Leistungsverteilung einer Komponente  $K$ , entnommen aus der Wissensbasis (basierend auf gemessenen oder simulativ ermittelten Werten einer bestehenden Komponente)
- Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_K^*)$ : Berechnete Leistungsverteilung einer modifizierten Komponente  $K^*$  nach stochastischen Rechenoperationen

Zur besseren Unterscheidung zwischen Wahrscheinlichkeit und Leistung, die beide durch das Formelzeichen  $P$  definiert sind, wird in diesem und den folgenden Kapiteln für die Wahrscheinlichkeit das Formelzeichen  $p$  verwendet.

## 5.1 Ablaufplan und Vorgehensweise

Der *Entwickler* einer Energiemanagementmaßnahme gilt an dieser Stelle als potentieller Anwender der hier vorgeschlagenen Methodik. Er will im Regelfall die relevanten energetischen Auswirkungen seines neuen Systems auf eine definierte Anzahl von Fahrzeugkonfigurationen und Kundenprofile anwenden und bewerten. Eine weitere Anforderung kann die Optimierung wesentlicher Parameter der Betriebsstrategie hinsichtlich Kraftstoffeinsparung oder Wirtschaftlichkeit sein. Dazu definiert der Entwickler für die Simulation eine *Bewertungs- und Optimierungsaufgabe*.

Die *Frage*, die er mit Hilfe der Methodik beantworten will, ist die Auswirkung eines neuen Systems  $S^*$  auf den Bedarf an chemischer Energie  $E_{\text{chem}}^*$  oder auf die jährlichen Gesamtkosten  $K_{\text{TCO},\text{Jahr}}^*$  des Kunden. Die Bewertung ist dabei durch den relativen, quantitativen Vergleich zwischen dem konventionellen Fahrzeugsystem  $S$  und dem System mit der Energiemanagementmaßnahme  $S^*$  gekennzeichnet. Somit ergeben sich für die möglichen Bewertungsgrößen  $\Delta E_{\text{chem}}^*$  (Verbrauchsdifferenz) und  $\Delta K_{\text{TCO}}^*$  (Kostensparnis des Kunden) in Abhängigkeit der Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen des heutigen Systems (z. B.  $h(E_{\text{chem}})$  oder  $h(K_{\text{TCO}})$ ) folgende Möglichkeiten des Vergleichs beider Fahrzeugsysteme:

1. Relativer Vergleich der Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen von entsprechenden Systemgrößen des heutigen und des modifizierten Systems
2. Ermittlung von Kenngrößen (Median, Modul, Mittelwert, oberes und unteres Quartil, ...) der Zustandsgrößen beider Systeme und anschließende Berechnung der prozentualen Veränderung

Für den relativen Vergleich einer zu bewertenden Größe wird die Verteilung dieser Größe im Ausgangssystem von der Verteilung der entsprechenden Größe im modifizierten System abgezogen und durch die Verteilung des Ausgangssystems dividiert. Die Durchführung dieser Operationen anhand der Rechenregeln nach Kapitel 2.3.5 kann in manchen Fällen zu einer Erhöhung der Streubreite der Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen führen. Damit ist es schwer, dieses Ergebnis zu interpretieren. Aus diesem Grund wird empfohlen, den Vergleich der Fahrzeugsysteme anhand der Kenngrößen bzw. Lagemaße der Verteilungen vorzunehmen.

Verwendet man das gewogene arithmetische Mittel der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Gleichung (2.50), so lässt sich der relative Vergleich der

beiden Systeme durch die folgenden Gleichungen darstellen. Für weitere Lagemaße der Verteilungen erfolgt die Berechnung analog hierzu.

$$\Delta E_{\text{chem}}^* = \frac{\bar{E}_{\text{chem}}^* - \bar{E}_{\text{chem}}}{\bar{E}_{\text{chem}}} \cdot 100 \% \quad [\%] \quad (5.1)$$

$$\Delta K_{\text{TCO},\text{Jahr}}^* = \frac{\bar{K}_{\text{TCO},\text{Jahr}}^* - \bar{K}_{\text{TCO},\text{Jahr}}}{\bar{K}_{\text{TCO},\text{Jahr}}} \cdot 100 \% \quad [\%] \quad (5.2)$$

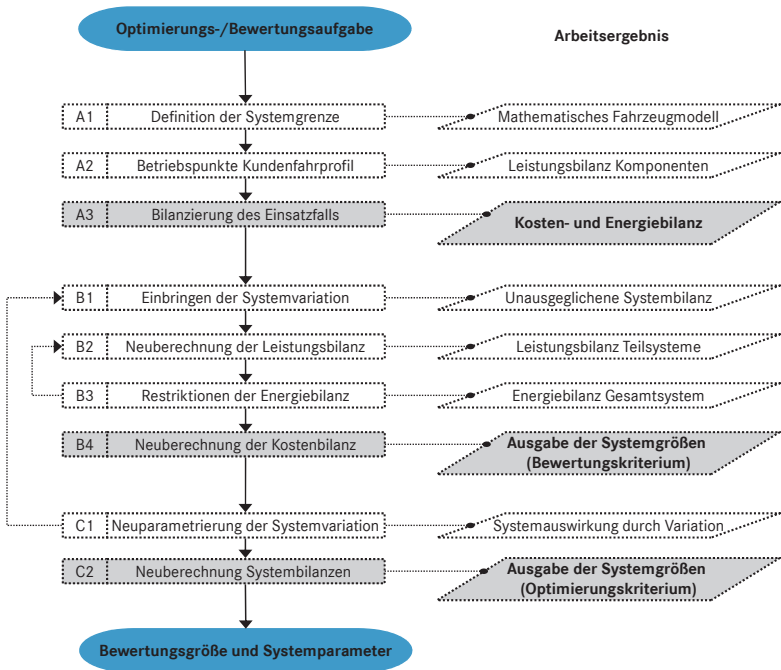
Sowohl für die Definition von Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen als auch für die stochastischen Berechnungsverfahren sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.3 verwiesen.

Als *Eingangsparameter* stellt der Entwickler die Parameter  $V_n^*$  des neuen Systems bereit. Durch eine Veränderung dieser Systemparameter (z. B. die Variation der maximalen Generatorleistung) kann er das neue System entsprechend der Entwicklungszielsetzung (z. B. Kraftstoffverbrauch oder Systemkosten) gestalten. Diese Parameter verändern im realen (also zeitkontinuierlichen) Fahrzeugsystem den zeitlichen Ablauf der Energiewandlungsprozesse. Im stochastischen Ansatz verändern sie Art und Form der Verteilung einer im System S auftretenden Leistungsgröße und führen im Ergebnis zum neuen Fahrzeugsystem S\*. Aus der Verteilung der relativen Auftretenshäufigkeiten  $h$  der Leistungsaufnahme  $P_K$  einer beliebigen Komponente K ergibt sich durch einen neuen Systemparameter  $V_n^*$  eine Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_K^*)$  der für das neue System veränderten Leistung  $P_K^*$ . Damit ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistung der Komponente im neuen System eine Funktion des Systemparameters und der Leistungsaufnahme des Ausgangssystems.

$$p(P_K^*) = f(V_n^*, h(P_K)) \quad (5.3)$$

Unter *Anwendung aller neuen Systemparameter* auf die Häufigkeitsverteilungen der Leistungsgrößen des Ausgangssystems S ergeben sich die resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Systemvariante S\*, deren Leistungs- und Energiegrößen nun durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $p(Z^*)$  beschrieben werden können. Die Zufallsvariable  $Z$  steht hier für eine physikalische Größe des Fahrzeugsystems. Sie kann jeder Variablen des mathematischen Fahrzeugmodells entsprechen (z. B. der elektrischen Generatorleistung  $P_{\text{Gen,el}}$ ).

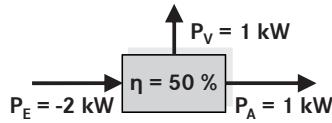
Die *Vorgehensweise der stochastischen Entwicklungsmethodik* ist in Abbildung 5.1 als Ablaufplan dargestellt. Das Ziel der Methodik ist es, die Größe,



**Abb. 5.1:** Ablaufplan der stochastischen Entwicklungsmethodik

mit der das neue System bewertet werden soll (z. B. der Energieverbrauch auf 100 Kilometer Fahrstrecke), zu quantifizieren. Dies geschieht mit Hilfe mehrerer Berechnungsschritte, die dabei teilweise iterativ durchgeführt werden müssen. Im Falle einer gewünschten Systemoptimierung sind der Entwicklungsmethodik zusätzlich freie Systemparameter  $K_i$  zu überlassen, die hinsichtlich des Bewertungskriteriums optimiert und ausgegeben werden. Der Ablaufplan der Entwicklungsmethodik teilt sich dabei in drei Abschnitte auf, die nacheinander durchlaufen werden:

- A: Erstellen der Energiebilanz des Referenzsystems. In diesem Schritt werden Energien und Leistungen des Fahrzeugsystems und seiner Teilsysteme anhand des mathematischen Fahrzeugmodells berechnet. Abbildung 5.2 zeigt diese Vorgehensweise am Beispiel eines Energiewandlers. Ausgehend von seiner ausgehenden Leistung  $P_A$  und seines Wirkungsgrades  $\eta$  werden hier seine Verlustleistung  $P_V$  und seine eingehende Leistung  $P_E$  berechnet.



**Abb. 5.2:** Abschnitt A: Energiebilanz des Referenzsystems

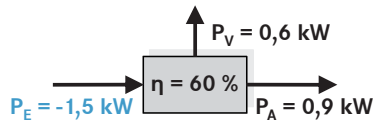
- B: Neuberechnung der Systembilanz nach einer Veränderung des Referenzsystems. Eine Systemänderung — hervorgerufen durch einen oder mehrere Systemparameter  $V_n^*$  (z. B. durch eine Veränderung des Wirkungsgrades der Energiewandlung) — führt zu einer Veränderung der Energieverteilungen im System. Dadurch ist die Systembilanz nicht erfüllt, da sich die Summe der zu- und abgeführten Leistungen nicht mehr entsprechen (vgl. Abbildung 5.3 (links)). Daher müssen an dieser Stelle die Leistungen und Energien des Systems neu berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3 (rechts) zu erkennen. Um die Leistungs- und Energiebilanz zu erfüllen, kann es sein, dass die Schritte B2 und B3 (vgl. Abbildung 5.1) mehrfach durchlaufen werden müssen.



**Abb. 5.3:** Abschnitt B: Unausgeglichene Systembilanz nach Veränderung des Referenzsystems (links) sowie nach anschließender Neuberechnung der Leistungen (rechts)

- C: Ausgabe der optimalen Systemeigenschaften. Hier wird das Optimierungskriterium (z. B. eine Minimierung der Eingangsleistung  $P_E$ ) in Abhängigkeit der zu optimierenden freien Systemparameter  $K_i$  (z. B. Variation der Parameter einer Betriebsstrategie) berechnet und ausgegeben. Da im Optimierungsprozess die Systembilanz verändert wird, muss eine Neuberechnung aller Größen im System erfolgen. Daher stößt nach Abbildung 5.1 die Optimierung (Schritt C1) einen Berechnungsdurchlauf der Energiebilanz (Schritt B1) an. Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis nach der Optimierung der Leistungen.





**Abb. 5.4:** Abschnitt C: Optimierung der Systemeigenschaften

Die Methodik bedient sich hierbei der Grundlagen, die im Verlauf dieser Arbeit vorgestellt worden sind. In der folgenden Aufzählung sind die einzelnen Ablaufschritte der Abschnitte A, B und C nach Abbildung 5.1 erläutert:

- A1: Ausgehend von der gestellten Simulationsaufgabe erfolgt die Definition der Systemgrenze. Das technische System wird anschließend modelliert und mit Hilfe eines mathematischen Gleichungssystems beschrieben. Die Grundlagen dafür bilden die Kapitel 2.1 und 2.2. In Abbildung 5.2 wird die Systemgrenze ausschließlich um einen Energiewandler definiert. Es resultieren hierbei seine ein- und ausgehenden Leistungen. In der Regel wird die Systemgrenze um das Gesamtfahrzeug definiert.
- A2: Das Fahrzeugmodell wird auf gemessene oder zeitbasiert simulierte Fahr- und Nutzungsprofile angewandt. Diese sind der Wissensbasis (Kapitel 4) zu entnehmen. Im Beispiel nach Abbildung 5.2 wird die Ausgangsleistung  $P_A$  eines gemessenen Betriebszustandes verwendet.
- A3: Mit Hilfe der Definitionen von Energie und Leistung (Kapitel 3.2) können aus den vorliegenden Daten die Leistungs- und Energiebilanzen, d. h. die Berechnung von Primär- und Endenergien bzw. -leistungen, erstellt werden. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an Kapitel 4.4. In Abbildung 5.2 werden an dieser Stelle die weiteren Leistungen berechnet.
- B1: Eine Variation der Leistungs- oder Energiebilanz eines Teilsystems (z. B. Verringerung der maximalen Wandlerleistung des Generators oder Verbesserung des Generatorwirkungsgrads) führt dazu, dass die Systembilanzierung des Gesamtsystems nicht mehr ausgeglichen ist, da der Primärenergiebedarf des Gesamtsystems sowie der Energiedurchsatz durch andere Komponenten (z. B. Batterie) sich verändern. Der Leistungs- und Energiebedarf einzelner Komponenten und somit die Energiebilanz des Gesamtsystems müssen neu berechnet werden (vgl. Kapitel 3.2.3). Dazu dienen die Berechnungsvorschriften des mathematischen Fahrzeugmodells (Kapitel 2.2).

- B2: Die Neuberechnung der Leistungsbilanz erfolgt durch Addition, Multiplikation oder Integration der häufigkeitsverteilten Leistungen aller Komponenten. Diese Operationen sind im mathematischen Fahrzeugmodell definiert. Die stochastischen Rechenoperationen finden sich in Kapitel 2.3.5.
- B3: Neben der Leistungsbilanz muss ebenfalls die Energiebilanz innerhalb der Systemgrenze und der Teilsystemgrenzen erfüllt sein. Randbedingungen von Energiespeichern, die eine zeitliche Abhängigkeit besitzen, müssen in die zeitunabhängige Berechnung übersetzt werden. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 5.3 vorgestellt.
- B4: Nach der Leistungs- und Energiebilanz werden die Systemkosten der Änderungen durch das neue System berechnet. Sowohl die Kosten durch zusätzliche oder in ihrer Leistungsfähigkeit erweiterte Komponenten als auch die im Regelfall negativen Kosten, die durch eine Einsparung von Kraftstoff erzielt werden, sind hierbei berücksichtigt. Die Grundlagen der Kostenberechnung aus Kundensicht finden sich in Kapitel 2.2.5.

In Abbildung 5.3 werden diese Schritte am Beispiel eines Energiewandlers durchgeführt.

- C1: Die Parameter, die in Abschnitt B1 eine Systemvariation hervorrufen, werden in diesem Schritt als freie Parameter definiert, die durch einen Optimierungsalgorithmus vor jedem Durchlauf einer stochastischen Simulation in einem vorgegebenen Wertebereich verändert werden können. Beispielsweise kann dies die Veränderung der maximal möglichen Generatorleistung sein. Somit ergibt sich die Möglichkeit, die Systemauswirkung und damit die Sensitivität dieses Parameters (z. B. Generatorgröße) auf das Bewertungskriterium (z. B. Kraftstoffverbrauch) zu erkennen. Der Algorithmus in Abschnitt C1 stößt somit bei einer Optimierungsaufgabe die Berechnungskette im Abschnitt B wiederholt an.
- C2: Eine Optimierung durch rein zufällige Variation eines oder mehrerer Parameter führt nur in seltenen Fällen zu einem optimalen Ergebnis. Der Einsatz eines Optimierungsverfahrens nach Kapitel 2.3.6 scheint an dieser Stelle sinnvoll. In dieser Arbeit werden Evolutionäre Algorithmen angewandt.

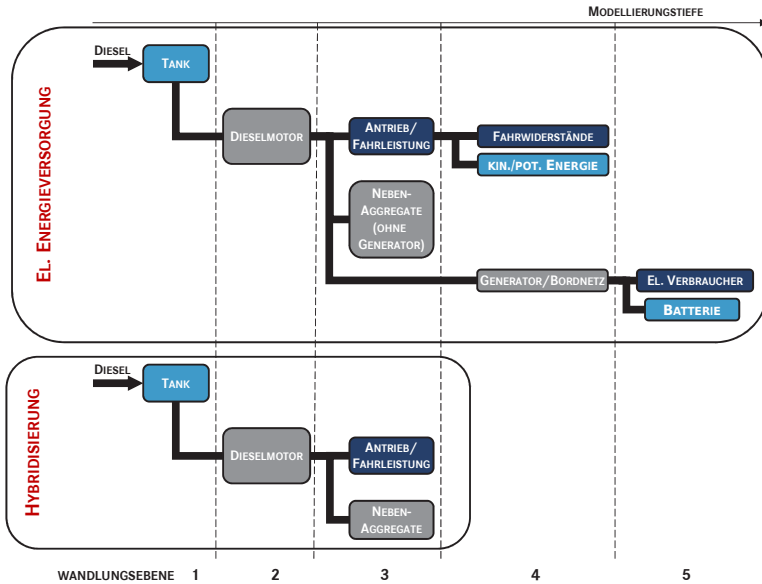
Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis am Beispiel eines Energiewandlers nach Durchlaufen der Schritte B und C.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Berechnungsabläufe innerhalb der jeweiligen Abschnitte erläutert.

## 5.2 Abschnitt A: Erstellen der Energiebilanz

In *Abschnitt A* muss zunächst anhand der gestellten Bewertungs- und Optimierungsaufgabe die Systemgrenze definiert werden. Je nach Art der Fragestellung wird die *Systemgrenze der Simulation* nur um den Bereich gezogen, den die Auswirkungen des neuen Systems betreffen. Nach Kapitel 3.2.3 muss die Systemgrenze die Endenergie, die Sekundär- und die Primärenergie enthalten. Anhand zweier Beispiele dieser Arbeit soll diese Vorgehensweise erläutert werden.

1. Betrachtung der Maßnahme „Nutzung kinetischer Energie zur elektrischen Energieversorgung“:  
Die Endenergieform beschreibt an dieser Stelle die Summe der elektrischen Verbraucherleistungen. Diese können in einer Häufigkeitsverteilung ihres gesamten Leistungsbedarfs dargestellt werden und müssen nicht detaillierter aufgeschlüsselt werden (z. B. in die Leistungsanforderungen ihrer einzelnen Komponenten). Die Primärenergie ist die Kraftstoffenergie. Die Komponenten innerhalb der definierten Systemgrenze sind in Abbildung 5.5 (oben) abgebildet.
2. Betrachtung der Maßnahme „Hybridisierung des Antriebsstrangs“:  
Die Endenergie ist hier durch die Summe der Antriebs- bzw. Fahrwiderstands- und Trägheitsleistungen sowie die Leistungsbedarfe der Nebenaggregate gegeben. Liegen diese aus den Messdaten vor, so reicht es aus, die ersten drei Hierarchieebenen in der Simulation zu betrachten. Da der Untersuchungszweck dieser Systemvariante die Kraftstoffersparnis durch Rekuperation von Energie im hybriden Antriebsstrang ermöglicht, ist eine detaillierte Modellierung weiterer Komponenten nicht notwendig (z. B. Druckluftbedarf, Lenkunterstützung, usw.). Abbildung 5.5 (unten) zeigt das zu verwendende Systemabbild.



**Abb. 5.5:** Systemgrenzen der elektrischen Energieversorgung (oben) und der Hybridisierung des Antriebsstrangs (unten)

Das hierarchisch aufgebaute mathematische *Fahrzeugmodell* wird entsprechend dem geforderten Detaillierungsgrad angepasst, so dass der Zusammenhang zwischen Bewertungsgröße  $Z$  und den Systemparametern  $V_n^*$  dargestellt werden kann. Ein *Systemparameter*  $V_n^*$  ist dadurch gekennzeichnet, dass er das Verhalten des Energieflusses von Komponenten beeinflussen kann. Die Bewertungsgröße  $Z$  (z. B. Kraftstoffverbrauch) bzw. die Häufigkeit der Werte, die der Systemparameter annimmt, stehen in funktionaler Abhängigkeit zu den Auftretenshäufigkeiten der Energieflüsse im Fahrzeugmodell  $h(P_K)$  (z. B. der Fahrwiderstandsleistung). Die Wahrscheinlichkeit einer Leistungsverteilung  $p(P_K^*)$  (z. B. Energiefluss in die Batterie) ist eine Funktion des Systemparameters  $V_n^*$  (z. B. Nennleistung des Generators). Durch Variation dieses Parameters ändert sich der Energiefluss in die Batterie. Ein Systemparameter kann neben Komponenteneigenschaften ebenfalls die Eigenschaften einer Betriebsstrategie (z. B. Regelparameter) beschreiben. Es gilt:

$$h(Z) = f(h(P_K)) \quad (5.4)$$

$$p(P_K^*) = f(V_n^*, h(P_K)) \quad (5.5)$$

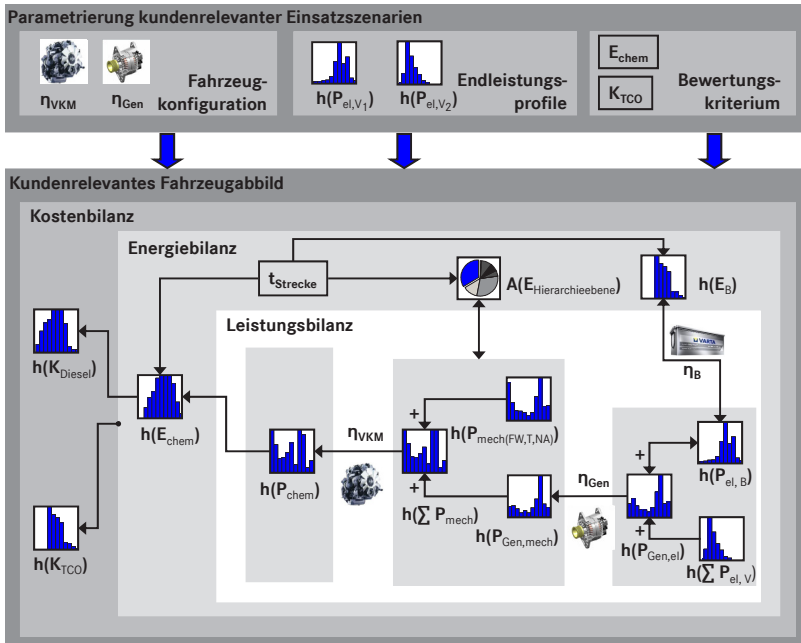
Damit ist beschrieben, dass die Form der Verteilung von Variablen des Systems in Abhängigkeit zum Energiefluss weiterer Komponenten sowie den Eigenschaften einer Betriebsstrategie stehen kann.

Unter Berücksichtigung der Systemgrenze wird nach den physikalischen Zusammenhängen des Kraftfahrzeugs aus Kapitel 2.2 ein quasistationäres mathematisches *Längsdynamikmodell* erstellt, dessen Fahrzeugkonfiguration (z. B. Eigenschaften des Verbrennungsmotors) und Eingangsgrößen (z. B. Verlauf der Geschwindigkeit über der Fahrstrecke bzw. die Merkmale der Geschwindigkeit) noch nicht definiert sind. Das Arbeitsergebnis von Schritt A1 ist die am Untersuchungsziel orientierte Festlegung der Systemgrenzen. Anschließend kann damit das mathematische Fahrzeugmodell auf die festgelegte Systemgrenze reduziert werden.

Der *Schritt A2* sieht vor, die Fahrprofile aus der fahrer- und einsetzungsfallabhängigen Wissensbasis nach Kapitel 4 heranzuziehen und auf sie das mathematische Fahrzeugmodell anzuwenden. Ebenfalls der Wissensbasis entnommen werden die noch fehlenden Informationen zur Fahrzeugkonfiguration und zu den Merkmalen der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Grundlage der späteren Berechnungsvorgänge ist die Leistungsbilanz, die jederzeit sowohl auf Komponenten- als auch auf Gesamtsystemebene erfüllt sein muss. Im Unterschied zu einem deterministischen Simulationsverfahren werden beim stochastischen Simulationsansatz die Leistung bzw. der Energiebedarf der Komponenten durch aus Messungen gewonnenen Häufigkeitsverteilungen ermittelt. Das deterministische Verfahren verwendet anstelle dessen eine schrittweise Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Zustandsgrößen.

Jede Veränderung der Betriebsstrategie oder der Bauteildimensionierung wirkt sich zunächst auf die Leistungsbilanz einer im Fahrzeugmodell beschriebenen Komponente aus. Wird die maximale Leistungsfähigkeit eines Energiewandlers erhöht, muss hier zusätzlich noch sein Verhalten beschrieben werden (z. B. Durchführung einer Energiewandlung zu jeder Zeit mit maximal möglicher Leistung oder bedarfsgerecht in Abhängigkeit seiner geforderten Verbraucherleistungen). Hieraus ergibt sich eine neue Verteilung der Leistung dieser Komponente, die ihrerseits eine Auswirkung auf die Leistungsbilanz in der Hierarchieebene hat, in der sie sich befindet. Die Energiebilanz der jeweiligen Hierarchieebene hat eine Auswirkung auf die anderen Hierarchieebenen sowie die Gesamtbilanz des definierten Systems. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise kann schrittweise die neue Leistungsbilanz bis zum Erreichen der Systemgrenze berechnet werden.

Nach der Leistungsbilanzierung kann im Schritt A3 die *Energie- und Kostenbilanz* des Systems berechnet werden. In Abbildung 5.6 ist die Kosten-, Energie- und Leistungsbilanz für das Systemabbild eines Nutzfahrzeugs dargestellt. Durch die Aufgabenstellung, die eine Betrachtung des elektrischen Systems vorsieht, ist die Systemgrenze hier um die Bereitstellung der elektrischen Energie definiert. Die Pfeile zwischen den Komponenten beschreiben dabei die Berechnungsreihenfolge. In der Regel beginnt die Berechnung bei der Endleistung und endet im finalen Berechnungsschritt bei der Primärleistung. Werden Energien berechnet (z. B. der Speicherzustand der Batterie), kann es notwendig sein, die Berechnung von Leistung und Energie in mehrfachen iterativen Berechnungsvorgängen durchzuführen.



**Abb. 5.6:** Kosten-, Energie- und Leistungsbilanz nach Abschnitt A

Das *Fahrzeugmodell* in Abbildung 5.6 beinhaltet die Summe der elektrischen Leistungen  $\sum P_{el,V}$  seiner Verbraucher  $V$ , die Leistungen der Batterie  $P_{el,B}$ , sowie die Kosten für den Kraftstoff  $K_{Diesel}$ . Die *Fahrzeugkonfiguration* ist durch die Auswahl der Komponenten „Verbrennungsmotor“ und „Generator“ beschrieben. Alle weiteren Fahrzeugkomponenten sind bereits

durch die hinterlegten Messdaten in der Wissensbasis berücksichtigt. Die beiden Bauteile sind in der Simulation deswegen explizit abgebildet, da an diesen in der späteren Simulation Änderungen vorgenommen werden. Die *Endleistungsprofile* sind durch das Verhalten der elektrischen Verbraucher dargestellt. Das Bewertungskriterium gibt vor, hinsichtlich welcher Zustandsgrößen das mathematische Gleichungssystem des Fahrzeugmodells aufgelöst werden soll. In diesem Fall sind diese die Häufigkeitsverteilung für Kraftstoffeinsetzung  $h(E_{\text{chem}})$  und die Verteilung für den monetären Gesamtaufwand des Fahrzeugbetriebs  $h(K_{\text{TCO}})$ .

In der Häufigkeitsverteilung mechanischer Energie  $h(P_{\text{mech(FW,T,NA)}})$  sind alle mechanischen Leistungen mit Ausnahme der Leistungen des Generators gesammelt aufgeführt. Dies beinhaltet also die Fahrwiderstände, die Trägheit und alle weiteren Hilfs- und Nebenaggregate. Da hier nur Änderungen innerhalb des elektrischen Systems simulativ abgebildet und bewertet werden sollen, könnte man theoretisch auf die Abbildung aller mechanischen Leistungen verzichten und diese erst in den Betriebspunkten des Verbrennungsmotors als Häufigkeit aufführen. Allerdings ist das nicht unbedingt sinnvoll, da durch die Überwindung des Steigungswiderstands und des Trägheitswiderstands die Masse des Fahrzeugs als Speicher mechanischer Energie arbeitet, die einerseits beim Rekuperieren vom elektrischen System genutzt werden kann (Verbesserung der Betriebsstrategie) und andererseits eine Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors erlaubt. Eine weitere Möglichkeit wäre es daher, das Fahrzeugmodell um einen Speicher für mechanische Energie zu ergänzen. Unter der Voraussetzung, dass der Geschwindigkeitsverlauf sowie das Höhenprofil und das Rekuperationspotenzial fest vorgegeben sind, kann dieser Speicher entfallen und vereinfacht so deutlich den Simulationsansatz. Das Rekuperationspotenzial ist über die gemessene Verteilung der Schubphasen bereits gegeben. Der Energieanteil der Komponenten einer Hierarchieebene  $A(E_{\text{Hierarchieebene}})$  ist als Kreisdiagramm dargestellt. Dieses beinhaltet die statistischen Größen (Median, Mittelwert, ...) des Energiebedarfs der Komponenten. Die Pfeilrichtungen stehen für die Bearbeitungsreihenfolge bei der Durchführung der Simulation.

Aus dem mathematischen Fahrzeugmodell ergeben sich die folgenden Zusammenhänge für die chemische Leistung  $P_{\text{chem}}$  des Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von den elektrischen Verbrauchern mit der Leistung  $\sum P_{\text{el,V}}$ , der elektrischen ( $P_{\text{Gen,el}}$ ) und mechanischen Leistung ( $P_{\text{Gen,mech}}$ ) des Generators sowie der mechanischen Leistung der weiteren Verbraucher  $P_{\text{mech(FW,T,NA)}}$ .

$$h(P_{\text{Gen,el}}) = -h(P_{\text{el,B}}) - h(\sum P_{\text{el,V}}) \quad (5.6)$$

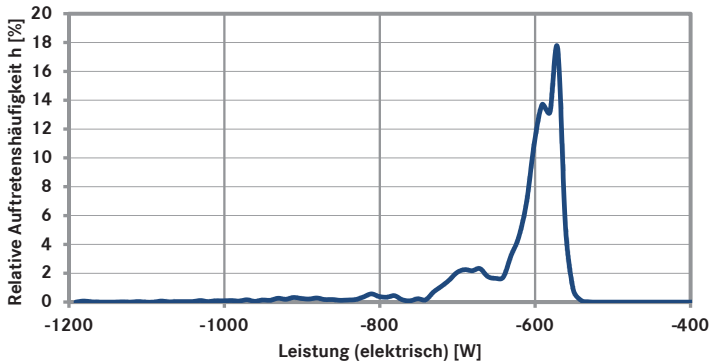
$$h(P_{\text{Gen,mech}}) = \frac{-h(P_{\text{Gen,el}})}{h(\eta_{\text{Gen}}(n_{\text{Gen}}, P_{\text{Gen,el}}))} \quad (5.7)$$

$$h(\sum P_{\text{mech}}) = -h(P_{\text{Gen,mech}}) - h(P_{\text{mech(FW,T,NA)}}) \quad (5.8)$$

$$h(P_{\text{chem}}) = \frac{-h(\sum P_{\text{mech}})}{h(\eta_{\text{VKM}}(n_{\text{VKM}}, \sum P_{\text{mech}}))} \quad (5.9)$$

Für eine *Zuordnung der Betriebszustände* zum mathematischen Fahrzeugmodell werden die Häufigkeitsverteilungen der Leistungen  $h(P_K)$  aus der Wissensbasis entnommen und mit den freien Parametern des Modells verknüpft. Diese sind sowohl die elektrischen Verbraucherleistungen als auch die gespeicherten Modellparameter (Nennleistungen von Verbrennungsmotor und Generator, Verbrauchskennfeld des Motors, ...).

Abbildung 5.7 zeigt die *Häufigkeitsverteilung* der Summe der Leistung elektrischer Verbraucher  $h(\sum P_{\text{el,V}})$  auf dem in Kapitel 4.4 definierten Fahrprofil eines schweren Nutzfahrzeugs.



**Abb. 5.7:** Häufigkeitsverteilung (diskret) der elektrischen Endleistung  $h(\sum P_{\text{el,V}})$ , Klassenbreite  $\Delta P_{\text{el,V}_k} = 10 \text{ W}$

Nun kann unter Anwendung der aus dem Fahrzeugmodell vorgegebenen mathematischen Operationen „Addition“, „Multiplikation“ und „Integration“ mit Hilfe der stochastischen Berechnungsvorschriften aus Kapitel

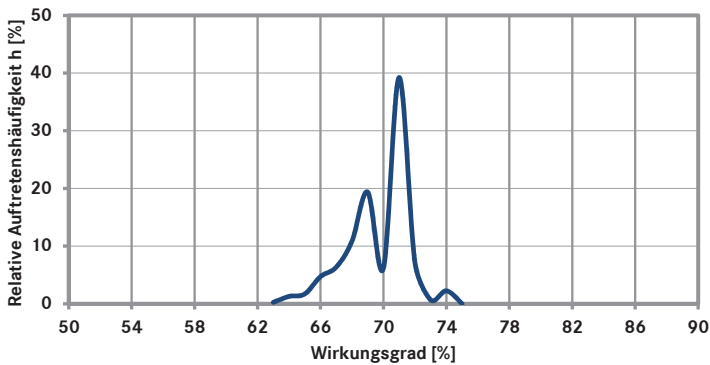


2.3.5 die Energiebilanz und die Kostenbilanz des Systems berechnet werden. Dieser Vorgang wird im Folgenden exemplarisch dargestellt.

Aufgrund dessen, dass im vorliegenden Fall die Batterie vollständig geladen ist und aufgrund der geringen Verbraucherleistungen nicht zur Unterstützung des Generators benötigt wird, vereinfacht sich Gleichung (5.6) zu

$$h(P_{\text{Gen,el}}) = -h(\sum P_{\text{el,v}}) \quad (5.10)$$

Abbildung 5.8 stellt die Häufigkeitsverteilung der Wirkungsgrade des Generators dar.

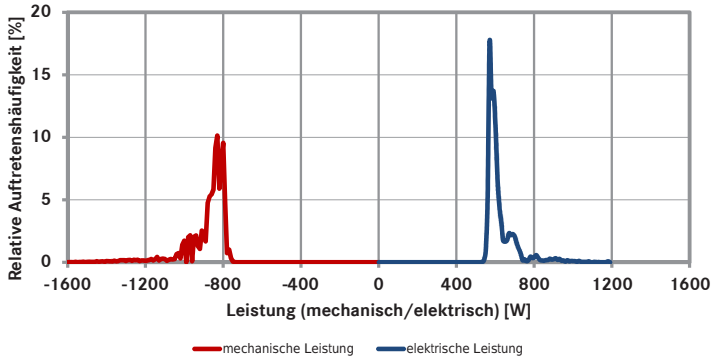


**Abb. 5.8:** Verteilung des Generatorwirkungsgrades  $\eta_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite  $\Delta\eta_{\text{Gen}_k} = 1\%$

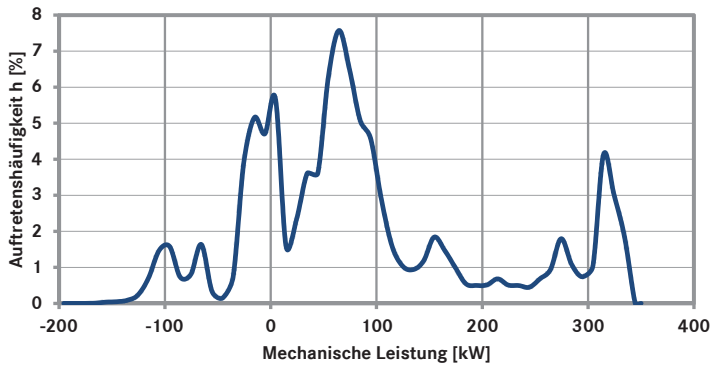
Die Berechnungsvorschriften sowie die Berechnungsschritte zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung wurden bereits in Kapitel 2.3.3 vorgestellt.

Mit Hilfe der Häufigkeitsverteilung der Wirkungsgrade des Generators kann nun die mechanische Leistungsverteilung des Generators mit Hilfe der stochastischen Rechenregeln und der Definition aus Gleichung (5.7) berechnet werden. Das Ergebnis der Multiplikation der Häufigkeitsverteilung der elektrischen Leistung des Generators mit dem reziproken Wirkungsgrad stellt Abbildung 5.9 dar.

Die Addition der mechanischen Leistungen des Generators zu den mechanischen Leistungen von Fahrwiderständen, Trägheiten und Nebenaggregaten  $h(P_{\text{mech}(\text{FW,T,NA})})$  führt zur Summe der mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors (Abbildung 5.10). Hier gehen auch negative Leistungen



**Abb. 5.9:** Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el/mech}_k} = 10 \text{ W}$

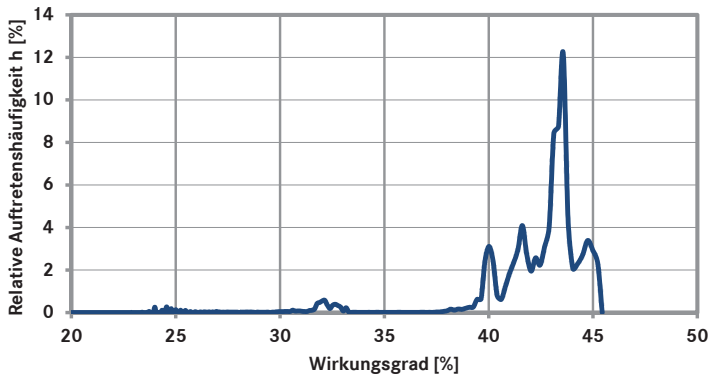


**Abb. 5.10:** Häufigkeiten der mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{VKM,mech}_k} = 10 \text{ kW}$

des Verbrennungsmotors während des Schubbetriebs ein. Die Verbreiterung der Verteilung entsteht daher nicht primär aufgrund der mehrfachen Additionen und Multiplikationen.

Abbildung 5.11 zeigt das Ergebnis der anschließenden Berechnung der Häufigkeitsverteilung des Motorwirkungsgrades.

Teilt man die mechanischen Leistungen durch die Motorwirkungsgrade, erhält man die Verteilung der chemischen Leistungen des Kraftstoffs. Das

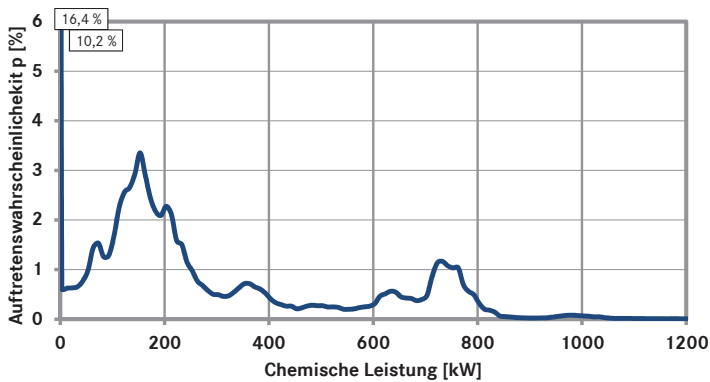


**Abb. 5.11:** Häufigkeitsverteilung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades  $\eta_{\text{VKM}}$ , Klassenbreite  $\Delta\eta_{\text{VKM}_k} = 0,2\%$

Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Anteile im Schub- (16,4 %) und im Leerlaufbetrieb (10,2 %) sind dabei außerhalb des maximalen Wertebereichs der y-Achse.

Hierbei beträgt die mittlere chemische Leistung:

$$\bar{P}_{\text{chem}} = 232,7 \text{ kW} \quad (5.11)$$



**Abb. 5.12:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der chemischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{chem, VKM}_k} = 10 \text{ kW}$

In Kombination mit einer Fahrzeit von 9 Stunden ergibt sich an dieser Stelle ein Primärenergieeinsatz von

$$\begin{aligned} E_{\text{chem}} &= \bar{P}_{\text{chem}} \cdot \Delta t \\ &= 232,7 \text{ kW} \cdot 9 \text{ h} = 2094,3 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Dies entspricht einem Kraftstoffeinsatz von

$$\begin{aligned} E_{\text{Diesel}} &= \frac{E_{\text{chem}}}{H_{1,\text{Diesel}}} \\ &= \frac{2094,3 \text{ kWh}}{9,8 \text{ kWh/l}} = 213,71 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Im Anschluss an die *Energiebilanzierung des Gesamtfahrzeugs* wird die Kostenbilanz des Systems erstellt. Aus der Kostenbilanz lässt sich das monetäre Bewertungskriterium (z. B. die jährlichen Kraftstoffkosten) ableiten. Es werden für die Berechnung folgende Zusammenhänge genutzt:

$$K_{\text{Diesel}} = E_{\text{chem,km}} \cdot K_{\text{Diesel,Liter}} \quad (5.14)$$

$$\Delta K_{\text{TCO}}^* = \Delta K_{\text{Diesel}}^* + \Delta K_{\text{Entwicklung}}^* + \Delta K_{\text{Komponenten}}^* \quad (5.15)$$

Hierbei berechnen sich die Kosten für den Kraftstoff  $K_{\text{Diesel}}$  aus dem Energieverbrauch  $E_{\text{chem,km}}$  des Fahrzeugs und den Kosten  $K_{\text{Diesel,Liter}}$  pro Liter Kraftstoff (Diesel).  $\Delta K_{\text{Entwicklung}}^*$  ist der auf das bei der Simulation verwendete Geschwindigkeitsmuster entfallende Anteil der Differenz an Entwicklungskosten, die der Kunde eines jeden Fahrzeugs als Mehrpreis für die Systemverbesserung beim Kauf des Fahrzeugs zu zahlen hätte. Aus den Kraftstoffkosten ergeben sich zusammen mit den Differenzen der Entwicklungskosten und den Komponentenkosten  $\Delta K_{\text{Komponenten}}^*$  die resultierende Gesamtkostendifferenz  $\Delta K_{\text{TCO}}^*$  des Systems.

In diesem Fall ergeben sich tägliche Kraftstoffkosten von

$$K_{\text{Diesel,Tag}} = E_{\text{Diesel,Tag}} \cdot K_{\text{Diesel,Liter}} \quad (5.16)$$

$$= 213,71 \cdot 1,30 \text{ Euro/l} = 277,82 \text{ Euro} \quad (5.17)$$

Mit Hilfe der *Berechnungsgrundlagen* von Abschnitt A wurde eine Energiebilanz eines Fahrzeugs in Kundenanwendung berechnet. Die Verwendung der statistischen Datenbasis ergibt hierbei bereits die Möglichkeit, einen gesamtheitlichen Blick auf die Betriebspunkte zu werfen und durch deren Projektion auf Wirkungsgradkennfelder bereits erste Verbesserungsansätze zu erkennen.

## 5.3 Abschnitt B: Änderung der Systembilanz

Nach Abbildung 5.1 sieht die methodische Vorgehensweise in Abschnitt B vor, die *Leistungs- und Energiebilanz* des veränderten Systems  $S^*$  zu lösen sowie dessen Kosten bezogen auf ein definiertes Fahrprofil zu berechnen. Die Leistungs- und Energiebilanz ist dann erfüllt, sobald auf jeder Hierarchieebene die Summen der zu- und abfließenden Energien und Leistungen betragsmäßig gleich sind. Dazu wird über das Einbringen modifizierter Systemparameter  $V_n^*$  zunächst eine Systemvariation vorgenommen. Die Parameter  $V_n^*$  verändern Art und Form der Häufigkeitsverteilungen  $h(P_K)$ . Die Veränderungen resultieren in neuen Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $p(P_K^*)$ . Ein Beispiel soll dies an dieser Stelle verdeutlichen.

Die Energiemanagementmaßnahme „Rekuperation elektrischer Energie“ ist dadurch gekennzeichnet, dass mehr elektrische Energie in Schubphasen des Verbrennungsmotors gewandelt und in der Batterie zwischengespeichert wird. Da in den Zugphasen die Batterie die Energie der elektrischen Verbraucher bereitstellt, muss in den Zugphasen keine Energie durch den Generator gewandelt werden, was zu einer Kraftstoffeinsparung führt. Die Häufigkeitsverteilung der elektrischen Leistung des Generators  $h(P_{\text{Gen,el}})$  im Fahrzeugsystem  $S$  ist nach Abbildung 5.7 durch eine relativ konstante Energiewandlung von mechanischer in elektrische Energie gekennzeichnet<sup>1</sup>. Mit der Kenntnis über Anteil und Länge der Zug- und Schubphasen wird anhand der vorgegebenen Betriebsstrategie die neue Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistung des Generators  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  erstellt. Diese künstlich generierte Verteilung sieht zwei Bereiche vor:

- In Abhängigkeit der relativen Anteile von Schubphasen soll der Generator basierend auf seiner vorherrschenden Drehzahl mit maximaler elektrischer Leistung seine Energie wandeln.
- Mit der relativen Häufigkeit des Auftretens von Zugphasen soll keine Energie gewandelt werden.

Die Häufigkeitsverteilung der Endleistung aller elektrischen Verbraucher  $h(\sum P_{\text{el,V}})$  soll hierbei nicht verändert werden.

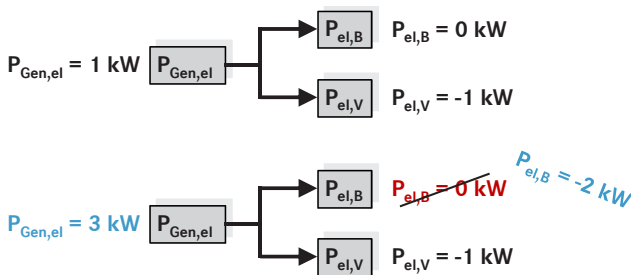
Dadurch ist die Summe der zu- und abfließenden Leistungen sowie der Energien betragsmäßig nicht mehr gleich. Durch eine Neuberechnung der Wahrscheinlichkeiten der Energieflüsse der Batterie  $p(P_{\text{el,B}}^*)$  könnte die

---

<sup>1</sup> Dies gilt unter der Annahme, dass die Generatorleistung  $h(P_{\text{Gen,el}})$  der Verbraucherleistung  $h(\sum P_{\text{el,V}})$  entspricht.

Leistungsbilanz wieder erfüllt sein. Ebenso muss mit der Energiebilanz verfahren werden. Ist die Leistungs- und Energiebilanz einer Hierarchieebene erfüllt, so kann anschließend die Bilanzierung der nächst höheren Ebene erfolgen. Am Ende können die Kosten für dieses System berechnet werden.

Abbildung 5.13 stellt diese Vorgehensweise exemplarisch dar. Im Referenzsystem (Abbildung 5.13 oben) wird die Leistung der elektrischen Verbraucher  $P_{el,V}$  durch den Generator bereitgestellt. Wird nun nach einer vorgegebenen Betriebsstrategie die Wandlerleistung des Generators erhöht, ist die Leistungsbilanz nicht erfüllt (Abbildung 5.13 unten). Aus diesem Grund muss die Leistungsaufnahme durch die Batterie  $P_{el,B}$  neu berechnet werden.



**Abb. 5.13:** Elektrische Leistungen des Referenzsystems (oben) und nach Erhöhung der Generatorleistung (unten)

Das Kriterium für die Erfüllung der Leistungs- und Energiebilanz muss dem Anwendungsfall entsprechend definiert werden. Als anschauliches Kriterium für eine nicht erfüllbare Energiebilanz kann die Kapazität der Batterie dienen, die ausreichend sein muss, um die hineinfließende Leistung über die gegebenen Zeiträume aufnehmen zu können. Der Ladezustand der Batterie (SOC) darf in diesem Fall zu keiner Zeit den relativen Wert von 100 % übersteigen. Bevor dieser Wert überschritten wird, müssen die elektrischen Leistungen der anderen Komponenten entsprechend reduziert werden. In der stochastischen Berechnung ist der Energiegehalt bzw. SOC der Batterie ebenfalls eine Verteilung. Daher kann es gewisse Wahrscheinlichkeiten für einen SOC geben, der größer als 100 % ist. Für die Grenze dieses Wertes sei auf Kapitel 5.3.2 verwiesen.

Für die Leistungsbilanz gilt als Kriterium die Bedingung, dass die maximale Leistungsfähigkeit (i. d. R. die Nennleistung) der Komponenten nicht überschritten werden darf. Im Besonderen gilt dies für elektrochemische

Energiespeicher, deren Aufnahmeleistung in Abhängigkeit zu den Randbedingungen (z. B. Speicherstand, Temperatur, ...) variiert. Das Kriterium korreliert zu den Gleichungen (5.6) bis (5.9).

In den folgenden Unterkapiteln wird die Bewertung von drei hauptsächlichen Arten der Systemmodifikation am Beispiel des elektrischen Bordnetzes vorgestellt.

### 5.3.1 Variation der Endleistung

In einer *bestehenden Fahrzeugtopologie* sollen elektrische Verbraucher hinsichtlich ihrer elektrischen Leistung  $P_{el,v}^*$  verändert werden. Im veränderten

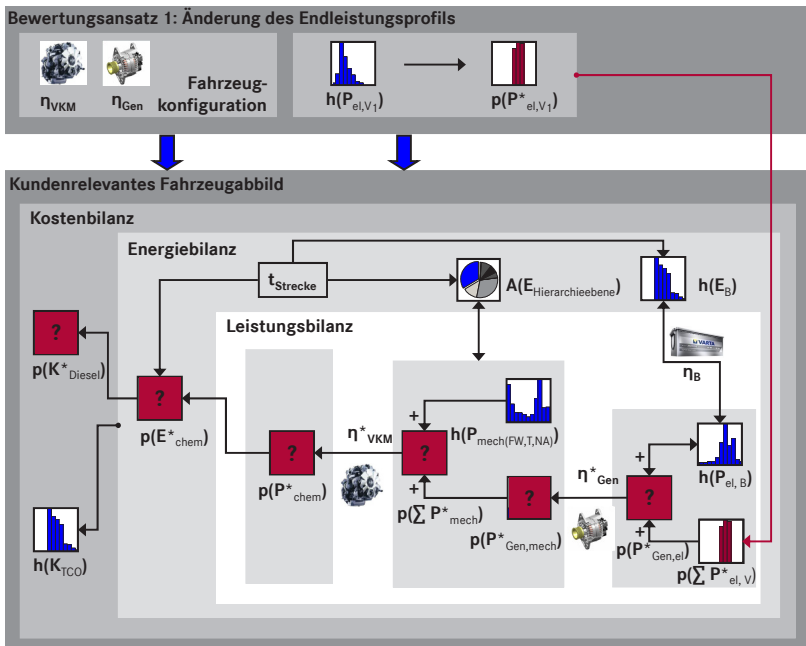


Abb. 5.14: Veränderung des Endleistungsprofils  $h(P_{el,v})$

System  $S^*$  wird daher nach Abbildung 5.14 das Endleistungsprofil der elektrischen Verbraucher  $h(\sum P_{el,v})$  durch das neue Profil  $p(\sum P_{el,v}^*)$  ersetzt. Durch die Verwendung der neuen Endleistungsverteilung ist die Leistungsbilanz des bestehenden Fahrzeugsystems  $S$  nun nicht mehr erfüllt. Aus diesem

Grund sind die betroffenen Verteilungen bereits mit einem Fragezeichen versehen. Nicht betroffene Verteilungen (gekennzeichnet durch bestehende Verteilungen) dürfen nicht verändert werden, da sonst die Vergleichbarkeit zum Referenzsystem nicht gegeben ist.

Die *neue Häufigkeitsverteilung* ist Bestandteil der untersten Hierarchieebene. Im iterativen Berechnungsschritt 1 muss daher zunächst die Leistungsbilanz dieser Hierarchieebene erfüllt sein. Es gilt für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Generators im neuen System  $S^*$ :

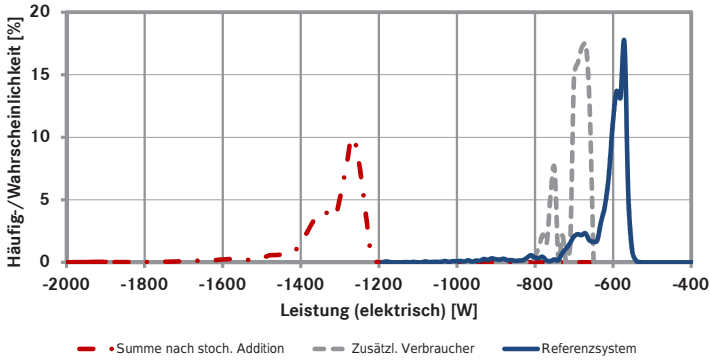
$$p(P_{\text{Gen,el}}^*) = -h(P_{\text{el,B}}) - p(\sum P_{\text{el,V}}^*) \quad (5.18)$$

Die *elektrische Leistungsbilanz* an der Systemgrenze zur nächsten Hierarchieebene ist durch den Generator beschrieben. Seine Betriebsstrategie sieht vor, die elektrische Leistungsanforderung der Verbraucher durch Wandlung aus mechanischer Energie zu erfüllen. Seine Wandlungsleistung ist allerdings drehzahl- und temperaturabhängig begrenzt. Unter Anwendung von Gleichung (5.18) kann sich somit eine punktuelle Anforderung  $P_{\text{Gen,el}}$  ergeben, die größer als die maximale Leistungsfähigkeit  $P_{\text{Gen,el,max}}$  ist. In diesem Fall sieht die Betriebsstrategie des Bordnetzes vor, die Leistung aus der Batterie zu entnehmen und die Batterie zum Zeitpunkt niedrigerer Verbraucherleistungen zu laden, so dass die Energiebilanz des Speichers ausgeglichen wird ( $\sum E_B = 0$ ). Dieser Stützfall wird in Kapitel 5.3.3 gesondert betrachtet.

In Abbildung 5.15 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der neuen elektrischen Verbraucherleistungen aufgeführt. Sie wurde aus der Addition der Leistungen eines zusätzlichen Verbrauchers zu den Leistungen des Referenzsystems ermittelt und entspricht den elektrischen Leistungen, die der Generator liefern muss.

In dem hier betrachteten Fall sei die Bedingung nach Gleichung (5.18) erfüllt. Somit muss die Häufigkeitsverteilung der Leistungen der Batterie  $h(P_{\text{el,B}})$  nicht verändert werden. Dies bedeutet, dass der Generator in der Lage ist, die höhere oder auch niedrigere von den Verbrauchern geforderte Leistung zu liefern. Somit ist sowohl die Leistungs- als auch die Energiebilanz dieser Hierarchieebene erfüllt. Wäre die Leistungsbilanz nach Gleichung (5.18) nicht erfüllt, so müsste die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistungen der Batterie neu berechnet werden. Dann könnte nicht mehr die Bezeichnung  $h(P_{\text{el,B}})$  verwendet werden. Die berechnete Wahrscheinlichkeitsverteilung im neuen System  $S^*$  würde die Bezeichnung  $p(P_{\text{el,B}}^*)$  tragen.





**Abb. 5.15:** Wahrscheinlichkeitsverteilung des neuen elektrischen Verbraucherprofils, ermittelt aus der Addition der Häufigkeitsverteilungen der Leistungen eines neuen Verbrauchers mit den Leistungen der bestehenden elektrischen Verbraucher, Klassenbreite  $\Delta P_{el,k} = 10 \text{ W}$

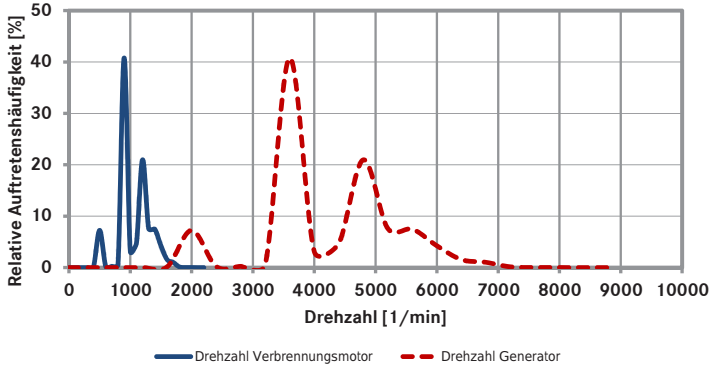
Über das Wandlerverhalten von elektrischer in mechanische Energie erfolgt die Betrachtung der nächsten Hierarchieebene. Die Berechnung der *mechanischen Leistung* des Generators erfolgt durch die Division der elektrischen Leistung durch den Wirkungsgrad der Energiewandlung. Bei Verwendung der stochastischen Berechnungsalgorithmik erfolgt dies in zwei Schritten.

Der erste Berechnungsschritt bestimmt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Wirkungsgrads  $p(\eta_{\text{Gen}}^*)$  mit Hilfe der Häufigkeitsverteilungen von Generatorzahl  $h(n_{\text{Gen}})$ , der elektrischen Leistung des Generators  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  und dem Wirkungsgradkennfeld des Generators. Die Drehzahl des Generators berechnet sich aus dem Übersetzungsverhältnis  $i_{\text{Gen}}$  (skalärer Wert) und der Motordrehzahl  $n_{\text{VKM}}$ . Der zweite Berechnungsschritt sieht die Division der Häufigkeitsverteilungen von elektrischer Leistung durch den Generatorwirkungsgrad vor. Er resultiert in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistung des Generators  $p(P_{\text{Gen,mech}}^*)$ .

$$h(n_{\text{Gen}}) = h(i_{\text{Gen}} \cdot n_{\text{VKM}}) \quad (5.19)$$

$$p(\eta_{\text{Gen}}^*) = p(h(n_{\text{Gen}}), p(P_{\text{Gen,el}}^*)) \quad (5.20)$$

$$p(P_{\text{Gen,mech}}^*) = \frac{-p(P_{\text{Gen,el}}^*)}{p(\eta_{\text{Gen}}^*)} \quad (5.21)$$



**Abb. 5.16:** Relative Häufigkeitsverteilungen der Motordrehzahl  $n_{\text{VKM}}$  und Generator Drehzahl  $n_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite  $\Delta n_{\text{VKM}_k} = 100 \text{ 1/min.}$  bzw.  $\Delta n_{\text{Gen}_k} = 400 \text{ 1/min.}, i_{\text{Gen}} = 4$

Abbildung 5.16 stellt die Skalarmultiplikation der Häufigkeitsverteilung der Motordrehzahlen (dem Fahrprofil entnommen) mit dem Übersetzungsverhältnis des Generators dar.

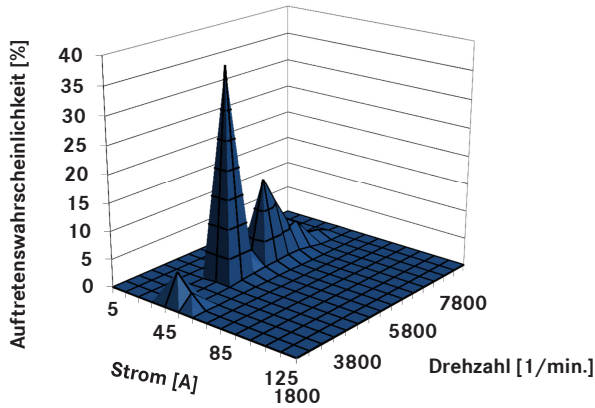
Da sich die Betriebspunkte des Generators aufgrund der veränderten elektrischen Leistungsabgabe des Generators verschieben, muss der resultierende Wirkungsgrad neu berechnet werden. Analog zu Kapitel 2.3.3 geschieht dies in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden nach Abbildung 5.17 die relativen Häufigkeitsverteilungen von Drehzahl und Strom dargestellt.

Im zweiten Schritt werden mit Hilfe des Wirkungsgradkennfeldes nach Abbildung 2.19 (vgl. Kapitel 2.3.3) die Wirkungsgrade jeder Klasse  $h_{ij}$  ermittelt und anschließend ihre Häufigkeiten aufaddiert.

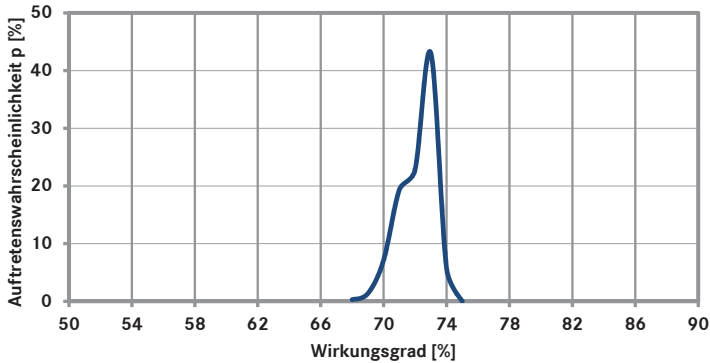
In Abbildung 5.18 ist als Ergebnis die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Wirkungsgrades dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der elektrischen sowie der mechanischen Leistungen des Generators sind in Abbildung 5.19 dargestellt.

In der Hierarchieebene der mechanischen Leistungen erfolgen die Neuberechnungen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von mechanischer Leistung  $p(\sum P_{\text{mech}}^*)$  und Wirkungsgrad  $p(\eta_{\text{VKM}}^*)$  des Verbrennungsmotors sowie der chemischen Leistung  $p(P_{\text{chem}}^*)$ . Dies geschieht unter der Prämisse, dass die maximale Motorleistung zu jeder Zeit größer ist als die Summe aus den mechanischen Leistungen  $P_{\text{mech}(\text{FW,T,NA})}$  und der Generatorleistung

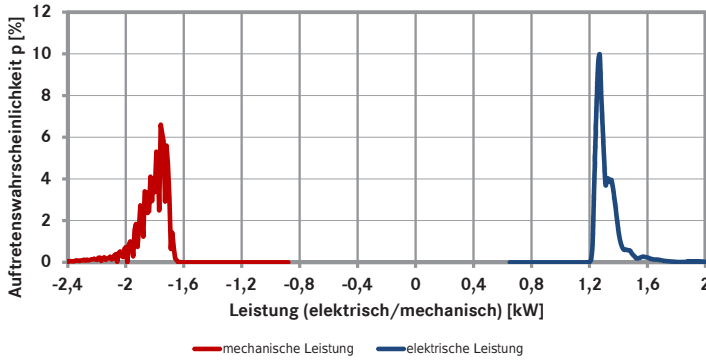


**Abb. 5.17:** Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators, Klassenbreiten  $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ ,  $\Delta I_j^* = 10 \text{ A}$



**Abb. 5.18:** Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generatorwirkungsgrades  $\eta_{\text{Gen}}^*$ , Klassenbreite  $\Delta \eta_{\text{Gen},k}^* = 1 \%$

$P_{\text{Gen,mech}}^*$ . Die Nichterfüllung der Leistungsbilanz hätte zur Folge, dass die Fahrmission, die u. a. von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, so nicht erfüllt werden könnte. Dadurch würde sich ein neues Fahrprofil sowie ebenfalls eine neue Verteilung der Motordrehzahl ergeben, die ihrerseits dann wieder einen Einfluss auf die Wirkungsgrade der Energiewandler Motor und Generator hätte. In diesem Fall müsste die Leistungs- und Energiebilanz bis in das elektrische System neu berechnet werden.



**Abb. 5.19:** Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el/mech}_k}^* = 10 \text{ W}$

Für die Hierarchieebene der mechanischen Leistungen wird angesetzt:

$$p\left(\sum P_{\text{mech}}^*\right) = -p\left(P_{\text{Gen,mech}}^*\right) - h\left(P_{\text{mech}}(\text{FW,T,NA})\right) \quad (5.22)$$

$$p\left(\eta_{\text{VKM}}^*\right) = p\left(h\left(n_{\text{VKM}}\right), p\left(\sum P_{\text{mech}}^*\right)\right) \quad (5.23)$$

$$p\left(P_{\text{chem}}^*\right) = \frac{p\left(\sum P_{\text{mech}}^*\right)}{p\left(\eta_{\text{VKM}}^*\right)} \quad (5.24)$$

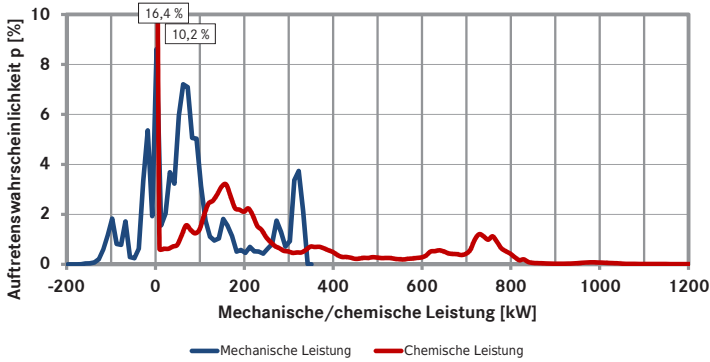
Abbildung 5.20 zeigt die Verteilungen der mechanischen und chemischen Leistungen des Verbrennungsmotors nach den jeweiligen Berechnungsvorgängen. Die Anteile im Schub- (16,4 %) und im Leerlaufbetrieb (10,2 %) sind dabei außerhalb des maximalen Wertebereichs der y-Achse.

Die Berechnung der neuen *Kosten- und Energiebilanz* ist in diesem Zusammenhang einfach durchzuführen, da hierzu lediglich die konstanten Faktoren der Betriebsdauer  $t_{\text{Strecke}}$  und der Kosten für Diesel verwendet werden müssen. Relevante Ausgangsgröße ist hierbei die Wahrscheinlichkeitsverteilung der resultierenden Kraftstoffkosten durch die Differenz der Basis  $p(K_{\text{Diesel}})$  und des neuen Systems  $p(K_{\text{Diesel}}^*)$ .

$$p\left(E_{\text{chem}}^*\right) = p\left(t_{\text{Strecke}} \cdot P_{\text{chem}}^*\right) \quad (5.25)$$

$$p\left(K_{\text{Diesel}}^*\right) = p\left(K_{\text{Diesel}} \cdot E_{\text{chem}}^*\right) \quad (5.26)$$

$$p\left(\Delta K_{\text{Diesel}}^*\right) = p\left(K_{\text{Diesel}}^*\right) - p\left(K_{\text{Diesel}}\right) \quad (5.27)$$



**Abb. 5.20:** Wahrscheinlichkeitsverteilungen der mechanischen und chemischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{VKM,mech/chem}_k}^* = 10 \text{ W}$

Analog zur Vorgehensweise bei den Gleichungen (5.1) und (5.2) ist hier ebenfalls die Möglichkeit der Vereinfachung durch die Verwendung von Lagemaßen (z. B. Mittelwerte, Perzentile o. Ä.) gegeben.

Durch die Veränderung der Bordnetzleistungen resultiert eine mittlere chemische Leistung

$$\bar{P}_{\text{chem}}^* = 234,4 \text{ kW} \quad (5.28)$$

Nach einer Fahrzeit von 9 Stunden ergibt sich dadurch ein Kraftstoffeinsatz von

$$E_{\text{Diesel}}^* = \frac{234,4 \text{ kW} \cdot 9 \text{ h}}{9,8 \text{ kWh/l}} = 215,31 \quad (5.29)$$

Die Kraftstoffkosten pro Tag betragen dabei

$$K_{\text{Diesel,Tag}}^* = 215,31 \cdot 1,30 \text{ Euro/l} = 279,84 \text{ Euro} \quad (5.30)$$

Dies entspricht Mehrkosten von

$$\Delta K_{\text{TCO}}^* = \frac{K_{\text{Diesel,Tag}}^* - K_{\text{Diesel,Tag}}}{K_{\text{Diesel,Tag}}} = 0,73 \% \quad (5.31)$$

### 5.3.2 Integration einer Betriebsstrategie

Die Vorgehensweise der Systembilanzierung nach Integration einer Betriebsstrategie zur Steuerung von Energieflüssen wird am Beispiel eines *Re-*

*kuoperationsystems* für elektrische Energie erläutert. Sogenannte Rekuperationssysteme (recuperare = wiedererlangen) wandeln in Motorschleppphasen kinetische und potentielle Energie in weitere Energieformen und speichern diese in Energiespeichern, um sie später in Endenergie zu wandeln. Obwohl die Bezeichnung „Energierückgewinnung“ wissenschaftlich nicht korrekt ist, verwendet man diese Bezeichnung umgangssprachlich sehr oft.

Die *Betriebsstrategie* ist für dieses Beispiel sehr einfach gehalten. Sie steuert die Bereitstellung von Endenergie nach zwei Bedingungen: ist der Verbrennungsmotor im Zugbetrieb, wird keine elektrische Energie über den Generator gewandelt und die elektrischen Verbraucher werden aus dem elektrischen Speicher (im Folgenden Batterie) versorgt. Ist er im Schlepp- oder Bremsbetrieb, wird die volle Wandlungsleistung des Nebenaggregats, also des Generators, gesteuert, um Endenergie bereitzustellen und den Speicher zu füllen.

Durch die Integration dieser Betriebsstrategie in das neue System  $S^*$  wird die *Häufigkeitsverteilung* der gewandelten elektrischen Leistungen des Generators  $h(P_{\text{Gen,el}})$  verändert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  der Generatorleistungen im neuen System  $S^*$  wird dabei aus den Betriebsmodi des Verbrennungsmotors bestimmt. Die Betriebsmodi des Verbrennungsmotors wiederum ergeben sich aus der relativen Häufigkeitsverteilung seiner mechanischen Leistungen  $h(P_{\text{VKM,mech}})$ .

Aus den mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors identifiziert die Betriebsstrategie Zug- und Schubphasen, in deren Abhängigkeit die Wandlerleistung des Generators gesteuert wird. Der relative Anteil der Betriebsmodi im Zugbetrieb  $A_{\text{Zug}}$  berechnet sich durch Aufsummieren der relativen Häufigkeiten  $h_{\text{Zug}}$ , bei denen die mechanische Motorleistung größer Null ist. Der Schubbetrieb ist definiert als Betriebszustand, in dem die mechanische Motorleistung kleiner oder gleich Null ist. Im Gegensatz zur Betrachtung der Betriebszustände in Kapitel 4.4.1 wird an dieser Stelle der Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors nicht gesondert betrachtet. Aufgrund seiner positiven Motorleistung werden seine zeitlichen Anteile zum Zugbetrieb gezählt. Der relative Anteil des Schubbetriebs ist mit  $A_{\text{Schub}}$  angegeben.

$$A_{\text{Zug}} = \sum_{i=1}^m h_i(P_{\text{VKM,mech}} \mid P_{\text{VKM,mech}} > 0) \quad (5.32)$$

$$A_{\text{Schub}} = \sum_{i=1}^n h_i(P_{\text{VKM,mech}} \mid P_{\text{VKM,mech}} \leq 0) \quad (5.33)$$

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel bestehen folgende Anteile an Zug- und Schubphasen:

$$A_{\text{Zug}} = 83,6\% \quad (5.34)$$

$$A_{\text{Schub}} = 16,4\% \quad (5.35)$$

Das Auftreten von Zug- und Schubphasen verändert die relative Auftretenshäufigkeit der elektrischen Leistung des Generators  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$ . Dabei soll nun der Generator mit der relativen Auftretenshäufigkeit von Zugbetrieb ( $A_{\text{Zug}}$ ) keine elektrische Leistung wandeln ( $P_{\text{Gen,el}}^* = 0$ ). Im Schubbetrieb soll der Generator mit seiner maximalen elektrischen Wandlungsleistung betrieben werden ( $P_{\text{Gen,el}}^* = P_{\text{Gen,el,max}}^*$ ). Hier bestimmen die Umgebungsbedingungen (v.a. Temperatur und Drehzahl) seine maximale elektrische Leistung. Zur Berechnung der verfügbaren Leistung im Schubbetrieb wird basierend auf den Auftretenshäufigkeiten der Drehzahlen des Verbrennungsmotors im Schubbetrieb  $h(n_{\text{VKM,Schub}})$  und dem Übersetzungsverhältnis des Generators  $i_{\text{Gen}}$  die Auftretenshäufigkeit der Generator Drehzahlen in den Schubphasen  $h(n_{\text{Gen,Schub}})$  berechnet.

$$p(P_{\text{Gen,el,Zug}}^*) = p(P_{\text{Gen,el}}^* | P_{\text{Gen,el}}^* = 0) = A_{\text{Zug}} \quad (5.36)$$

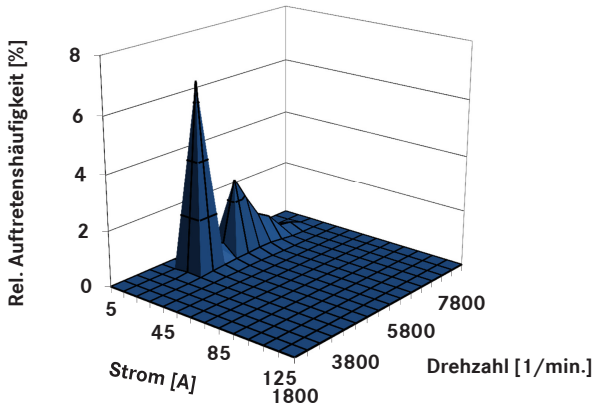
$$h(n_{\text{Gen,Schub}}) = h(i_{\text{Gen}} \cdot n_{\text{VKM,Schub}}) \quad (5.37)$$

$$p(P_{\text{Gen,el,max}}^*) = p(P_{\text{Gen,el,max}}^*(h(n_{\text{Gen,Schub}}), h(T_{\text{Gen,Schub}}))) \quad (5.38)$$

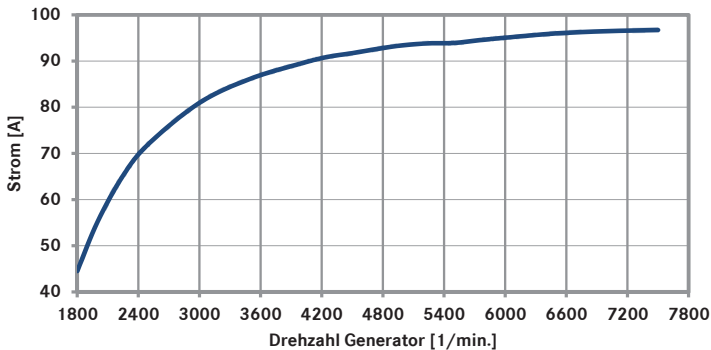
$$p(P_{\text{Gen,el,Schub}}^*) = p(P_{\text{Gen,el}}^* | P_{\text{Gen,el}}^* \neq 0) = p(P_{\text{Gen,el,max}}^*) \quad (5.39)$$

Anschließend wird aus den Auftretenshäufigkeiten der Generator Drehzahlen im Schubbetrieb sowie der dazugehörigen Temperaturverteilung des Generators die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistung des Generators in Schubphasen  $p(P_{\text{Gen,el,Schub}}^*)$  berechnet. Aus den beiden Verteilungen im Zug- und im Schubbetrieb des Verbrennungsmotors setzt sich die neue Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generators  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  zusammen. Diese ist durch die Betriebsstrategie nach kraftstoffoptimalem Gesichtspunkt gesteuert. Es ist aber noch nicht nachgewiesen, ob die Leistungs- und Energiebilanzen des Bordnetzes damit erfüllt werden können. Zunächst werden jedoch die hergeleiteten Beziehungen auf das Referenzsystem angewendet.

Abbildung 5.21 zeigt dazu die relative Häufigkeitsverteilung von Drehzahl und Strom des Generators während des Schubbetriebs des Motors. Abbildung 5.22 zeigt weiterhin die Vollastkennlinie des verwendeten Generatortyps bei einer Temperatur  $T_{\text{Generator}}$  von  $80^\circ\text{C}$ .



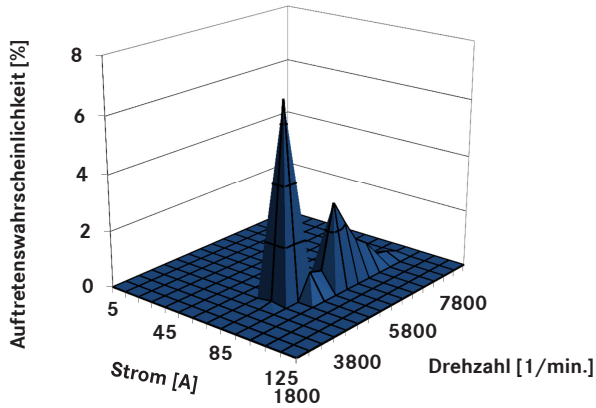
**Abb. 5.21:** Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators im Schubbetrieb, Klassenbreiten  $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ ,  $\Delta I_j = 10 \text{ A}$



**Abb. 5.22:** Volllastkennlinie des verwendeten Generators ( $T_{\text{Generator}} = 80^\circ \text{ C}$ )

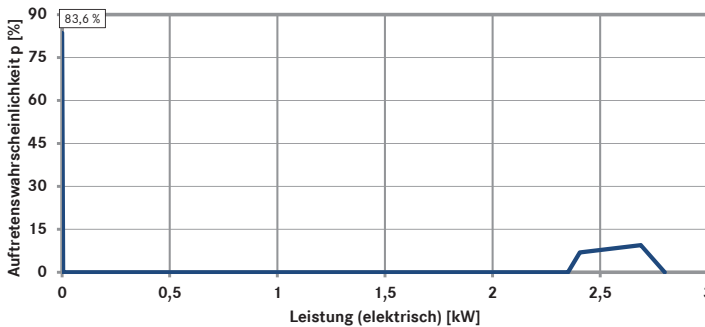
Nun werden die Häufigkeiten jeder Drehzahlklasse aufsummiert und dem Wert des maximalen Generatorstroms zugeordnet. In Abbildung 5.23 erkennt man die Wahrscheinlichkeiten des maximalen Generatorstroms. Durch Skalarmultiplikation des Generatorstroms mit der auf einen konstanten Wert von  $U_{\text{Generator}} = 28,3 \text{ V}$  geregelten Generatorspannung berechnet sich die abgegebene elektrische Generatorleistung.





**Abb. 5.23:** Wahrscheinlichkeitsverteilung von maximalem Generatorstrom des Generators in Abhängigkeit der Generator Drehzahl während des Schubbetriebs, Klassenbreiten  $\Delta n_i = 100$  1/min.,  $\Delta I_j^* = 10$  A

Nach diesen Zwischenberechnungen kann schließlich die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistungen  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  aus den einzelnen Berechnungsergebnissen zusammengesetzt werden. Sie besteht nach Abbildung 5.24 aus dem Anteil an Zugphasen, während dem keine elektrische Leistung gewandelt werden soll, und den Anteilen des Schubbetriebs, während denen die maximal mögliche elektrische Leistung in Abhängigkeit von Drehzahl und Temperatur gewandelt werden soll.



**Abb. 5.24:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistungen des Generators  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$ , Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,2$  kW

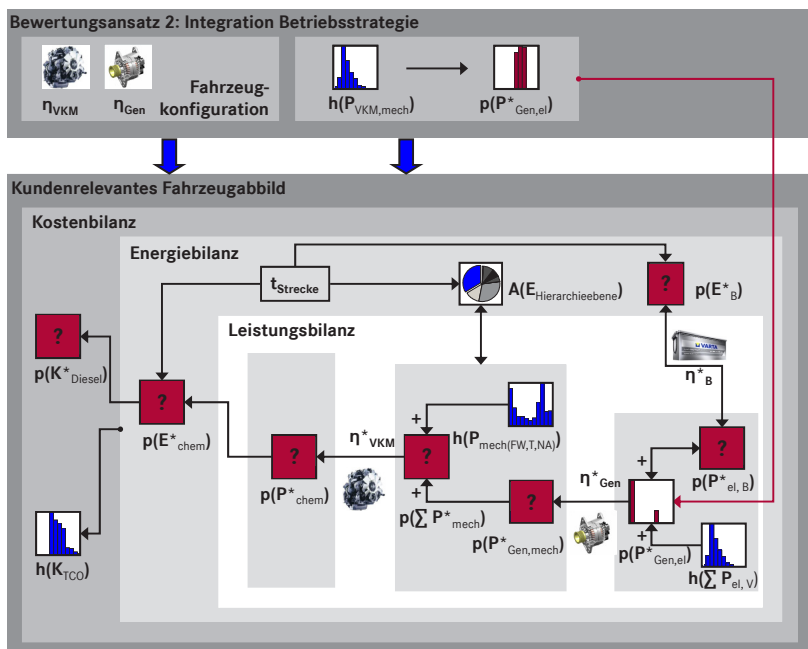


Abb. 5.25: Integration einer Betriebsstrategie

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{Gen,el}^*)$  wird nun nach Abbildung 5.25 in das Fahrzeugsystem integriert und führt damit die Systembilanz in ein Ungleichgewicht, da die zu- und abfließenden Energien betragsmäßig nicht mehr gleich sind.

Die Systembilanz muss nach der bereits geschilderten Vorgehensweise aufgelöst werden. Die Endleistung der elektrischen Verbraucher  $h(\sum P_{el,V})$  bleibt dabei konstant, so dass der elektrische Speicher die Leistungs- und Energiebilanz ausgleichen muss. Es gilt für die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Speichers  $p(P_{el,B}^*)$

$$p(P_{el,B}^*) = -p(P_{Gen,el}^*) - h(\sum P_{el,V}) \tag{5.40}$$

Die Verwendung des *elektrischen Speichers* unterliegt weiteren Einschränkungen. Der Speicher ist in seiner Leistungsaufnahme sowie der -abgabe begrenzt. Dies bedeutet, dass seine Leistung  $P_{el,B}$  eine minimale ( $P_{el,B,min}$ ) sowie eine maximale ( $P_{el,B,max}$ ) Leistung als physikalische Größe

für die Lade- und Entladeleistung nicht über- bzw. unterschreiten darf. Weiterhin ist der Verlauf seines relativen Speicherstands  $\Delta SOC_B$  sowohl nach unten als auch nach oben durch die minimal und maximal zulässigen Speicherstände  $\Delta SOC_{B,\min}$  und  $\Delta SOC_{B,\max}$  beschränkt. Dieses resultiert in folgenden Bedingungen:

$$P_{el,B,\min} \leq P_{el,B} \leq P_{el,B,\max} \quad (5.41)$$

$$\Delta SOC_{B,\min} \leq \Delta SOC_B \leq \Delta SOC_{B,\max} \quad (5.42)$$

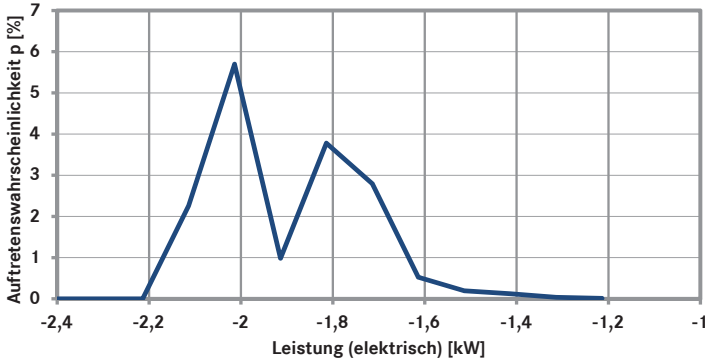
Diese beiden Bedingungen haben somit eine direkte Auswirkung auf die Energiewandlungsvorgänge des Bordnetzes. Aus Gründen der Vergleichbarkeit des Kraftstoffbedarfs unterschiedlicher Fahrzeugsysteme soll zudem nach dem Durchlaufen des Fahrzyklus der Speicherstand der Batterie  $E_{el,B}$  wieder dem ursprünglichen Speicherstand entsprechen. Diese Bedingung wird allerdings nicht von der Betriebsstrategie, die die Leistungen des Generators regelt, gefordert. Zum Vergleich des Gesamtenergieverbrauchs und der Kosten wird hierzu die am Ende des Zyklus vorhandene Batterieladezustandsdifferenz mit einem über die Simulationsdauer gemittelten Wirkungsgrad in ein Kraftstoffäquivalent umgerechnet.

Zur Vereinfachung der Berechnung wird für die nächsten Berechnungsschritte ein Batteriewirkungsgrad von 100 % angenommen.

Aus der Anwendung von Gleichung (5.40) resultiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistungsaufnahme  $p(P_{el,B,Laden}^*)$  durch die Batterie. Abbildung 5.26 stellt das Ergebnis dieses Berechnungsschrittes grafisch dar. Hierbei ergibt sich eine maximal zu erwartende elektrische Aufnahmeleistung, die die Batterie aufnehmen können müsste, von ca.  $-2,2$  kW. Dieser Wert ist dabei durch die maximale Wandlerleistung des Generators und den Leistungsbedarf der elektrischen Verbraucher begrenzt. Es ist an dieser Stelle allerdings noch nicht klar, ob die Batterie diesen Leistungsüberschuss aufnehmen kann.

In dem hier dargestellten Beispiel kann der verwendete Batteriespeicher nur einen kleinen Anteil der technisch maximal möglichen Wandlungsleistung des Generators aufnehmen. Die maximal mögliche Aufnahmeleistung  $P_{el,B,\min}$  beträgt hierbei  $-1$  kW. Um diese Anforderung in der Simulation abzubilden, muss zunächst die maximale Leistungsaufnahme des Batteriespeichers in seiner Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{el,B}^*)$  berücksichtigt werden.

Die Rechenvorschrift hierzu ist einfach gehalten. Wird dem Batteriespeicher eine größere Leistung als die maximale Aufnahmeleistung angeboten, so



**Abb. 5.26:** Theoretisch mögliche Leistungsaufnahme durch die Batterie  $p(P_{el,B,Laden}^*)$  in Schubphasen, Klassenbreite  $\Delta P_{el,B,k}^* = 0,1 \text{ kW}$

wird diese auf die maximal mögliche Leistung  $P_{el,B,min}$  begrenzt. In einem späteren Schritt muss in Analogie zur Leistungsbegrenzung durch die Batterie ebenfalls die Wandlerleistung des Generators reduziert werden.

In der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Batterieleistungen werden dazu die relativen Häufigkeitsanteile aller Klassen, deren Leistung kleiner ist als die minimal zulässige Leistung, zu dem Häufigkeitsanteil der Klasse minimal zulässiger Leistung addiert.

$$p(P_{el,B}^* \mid P_{el,B}^* > P_{el,B,Laden,min}^*) = p(P_{el,B}^*) \quad (5.43)$$

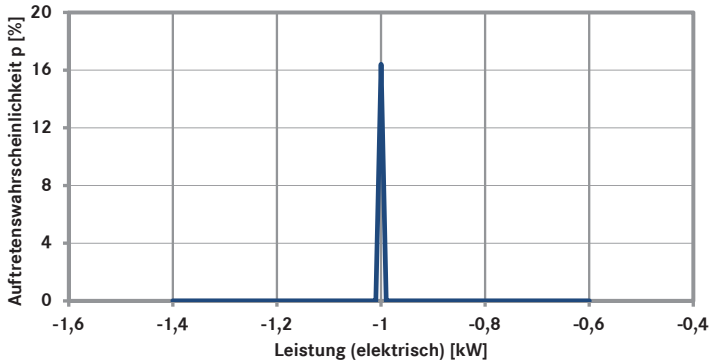
$$p(P_{el,B}^* \mid P_{el,B}^* = P_{el,B,Laden,min}^*) = \sum_{i=1}^n p_i(P_{el,B}^* \mid P_{el,B}^* \leq P_{el,B,Laden,min}^*) \quad (5.44)$$

Dabei sind die Anteile der Leistungen, deren Werte kleiner als die minimale Leistung sind, gleich Null zu setzen.

$$p(P_{el,B}^* \mid P_{el,B}^* < P_{el,B,Laden,min}^*) = 0 \quad (5.45)$$

Das Ergebnis dieses Berechnungsschrittes ist in Abbildung 5.27 dargestellt.

Durch die Restriktion des Speichers reduziert sich die elektrische Wandlerleistung des Generators in den Schubphasen, in denen er mit maximal möglicher Leistung den Speicher lädt und gleichzeitig die Verbraucher versorgt. Das schmälert das Potenzial der rekuperierbaren Leistung. Die



**Abb. 5.27:** Begrenzte Leistungsaufnahme  $p(P_{\text{el,B,Laden}}^*)$  durch die Batterie in Schubphasen, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{el,B,k}}^* = 0,1 \text{ kW}$

Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistung wird daher durch folgende Berechnungsvorschrift neu ermittelt:

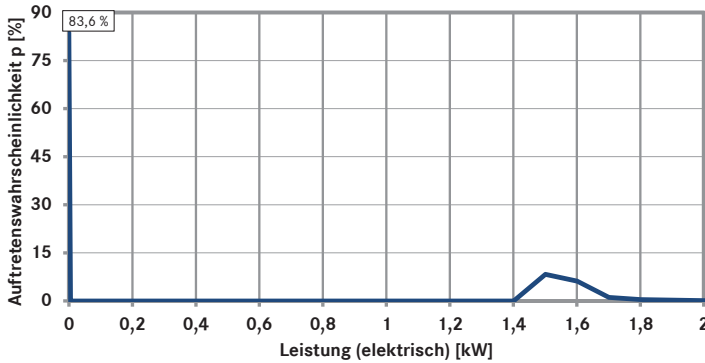
$$p(P_{\text{Gen,el}}^*) = -p(P_{\text{el,B}}^*) - h\left(\sum P_{\text{el,V}}\right) \quad (5.46)$$

Sie entspricht nun nicht mehr der idealen Generatorverteilung nach Abbildung 5.24, da die maximale Wandlerleistung durch die Einschränkungen des Batteriespeichers reduziert wurde. Abbildung 5.28 zeigt das Resultat der Berechnung.

Durch diese Berechnungsschritte wurde sichergestellt, dass die Leistungsbilanz im Bordnetz erfüllt wird. Allerdings ist unklar, ob durch diese Betriebsstrategie in den Schubphasen ausreichend Energie gewandelt wurde, um die Energie der elektrischen Verbraucher durch die Batterie bereitzustellen. Dabei muss u. a. die Randbedingung nach Gleichung (5.42) erfüllt werden.

Zur zeitunabhängigen Berechnung des *relativen Speicherstands* benötigt man aus der Wissensbasis die Häufigkeitsverteilung der zeitlichen Dauer der Zug- und Schubphasen  $h(t_{\text{Zug}})$  und  $h(t_{\text{Schub}})$ . Multipliziert man diese jeweils mit der Verteilung der Batterieleistung  $p(P_{\text{el,B}}^*)$  im Zug-<sup>1</sup> bzw. im

<sup>1</sup> Wahrscheinlichkeitsverteilung der Batterieleistung entspricht der Häufigkeitsverteilung der Verbraucherleistung  $h(\sum P_{\text{el,V}})$



**Abb. 5.28:** Generatorleistung nach Begrenzung durch den Batteriespeicher, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$

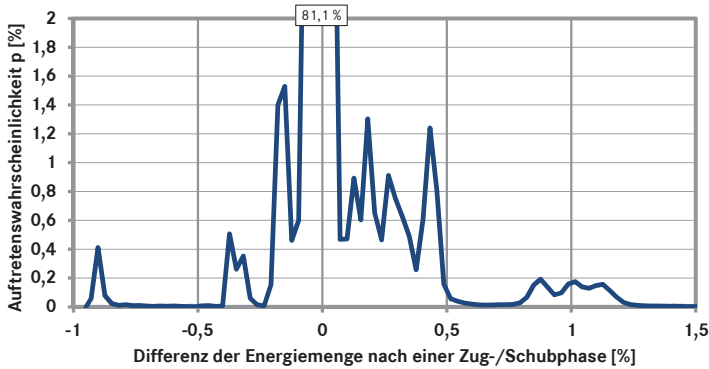
Schubbetrieb<sup>1</sup>, erhält man die Verteilung der elektrischen Energie  $p(\Delta E_{\text{el,B}}^*)$ , die die Batterie über alle Phasen (Zug- oder Schub) aufnimmt oder abgibt.

In Abhängigkeit von Zug- oder Schubphase ändert sich das Vorzeichen der Batterieleistung. Es ist dann negativ, wenn die Batterie geladen wird und positiv, wenn sie entladen wird. Es ist einleuchtend, dass bei Anwendung der beschriebenen Betriebsstrategie die Batterie nur in Schubphasen geladen wird, d. h. hier tritt eine negative Leistung an der Batterie auf. Bei positiven Leistungen an der Batterie ist dies nicht so eindeutig. Diese treten zwar überwiegend in Zugphasen auf, aber auch in Schubphasen ist dies nicht unmöglich. Anhand der vorliegenden Fahrzeugmessungen konnte hier gezeigt werden, dass dies praktisch nie auftritt. Daher werden Batterieentladungen während der Schubphasen vernachlässigt.

In Abbildung 5.29 ist das Ergebnis dieses Berechnungsvorgangs dargestellt. Es ergibt sich ein großer Anteil (81,1 %) einer sehr kleinen relativen Speicherstandsänderung im Bereich um  $\pm 0\%$  relativer Speicherstandsänderung. Dies liegt in den überwiegenden Fällen an einer kurzen Zeitdauer der betreffenden Zug- oder Schubphase.

Anhand dieser Berechnung muss ermittelt werden, ob die Randbedingung nach Gleichung (5.42) erfüllt wird. Dazu wird die zeitliche Abfolge des Speicherstands anhand der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens aufgenommener oder abgegebener Energiemengen abgeschätzt. Sollten die Anforderungen

<sup>1</sup>Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Batterieleistung nach Gleichungen (5.40), (5.44) und (5.45)



**Abb. 5.29:** Differenz der Energiemenge nach einer Zug-/Schubphase in Bezug auf die volle nutzbare Speicherkapazität der Batterie, Klassenbreite  $\Delta E_{el, B_k}^* = 0,02\%$

an die obere und untere Begrenzung des Speicherstands nicht erfüllt werden, so kann es sein, dass entgegen der zunächst vorgegebenen Betriebsstrategie die Energiewandlungen durch den Generator verändert werden müssen. Ist ein Wert im Verlauf des Speicherstands kleiner als die minimale Grenze, so muss dennoch elektrische Leistung in den Zugphasen gewandelt werden. Ist der Speicherstand größer als seine maximale Begrenzung, so muss die Leistung des Generators in Schubphasen weiter reduziert werden.

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller möglichen Verläufe von Speicherzuständen (Aneinanderreihung aller möglichen Kombinationen von Laden und Entladen) ist zwar möglich, aber sehr zeit- und ressourcenaufwändig. Außerdem kann das Ergebnis dabei sehr stark streuen. Eine Möglichkeit der vereinfachten Abschätzung ergibt sich durch eine Worst-Case-Betrachtung, die folgende Eigenschaften berücksichtigt:

- Auf eine Zugphase folgt immer einer Schubphase (ebenso umgekehrt).
- Innerhalb einer Zug- oder Schubphase wird eine bestimmte Energiemenge aus der Batterie entnommen oder eingebracht.
- Man bildet nun eine Wertefolge, in der jeweils die größte eingebrachte Energiemenge auf die kleinste entnommene Energiemenge folgt, die in der Häufigkeitsverteilung vorhanden ist. Damit ergibt sich der theoretisch maximale Speicherstandsverlauf über das Fahrprofil.

- Der minimale Speicherstandsverlauf ergibt sich durch die Folge der jeweils kleinsten eingebrachten Energiemenge auf die größte entnommene Energiemenge.

Folgende Vorgehensweise wird an dieser Stelle vorgeschlagen:

Abbildung 5.29 stellt dar, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Energiemenge bei einer Zugphase von der Batterie abgegeben wird und bei einer Schubphase von der Batterie abgenommen wird. Damit sind die dargestellten Energiemengen auf eine Phase bezogen. Nun muss definiert werden, wie die sequenzielle Addition zur Berechnung des Worst Cases bewerkstelligt werden kann. Dazu bietet es sich an, sowohl die Energie als auch die Wahrscheinlichkeiten zu diskretisieren. Für die Energie werden dafür Energieklassen gewählt. Bei den Wahrscheinlichkeiten wird anhand von Abbildung 5.29 festgelegt, welche kleinste Wahrscheinlichkeit noch in der sequenziellen Addition berücksichtigt werden soll. Alle anderen Energiemengen, die mit noch kleineren Wahrscheinlichkeiten auftreten, bleiben unberücksichtigt. Bei Energiemengen, die mit höherer Wahrscheinlichkeit auftreten, werden deren Wahrscheinlichkeiten jeweils durch die gewählte kleinste zu berücksichtigende Wahrscheinlichkeit geteilt. Die Ergebnisse werden jeweils auf ganze Zahlen gerundet. Jetzt sind sowohl die Energie als auch die Wahrscheinlichkeit diskretisiert und die sequenzielle Addition kann durchgeführt werden. Dabei werden Energiemengen, die eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit haben, mehrfach bei der Addition berücksichtigt, nämlich so oft, wie es die zuvor berechnete ganze Zahl vorgibt.

Die kleinsten Wahrscheinlichkeiten treten vor allem bei großen Energiemengen auf. Wird die kleinste noch zu berücksichtigende Wahrscheinlichkeit zu groß gewählt, werden große Energiemengen bei der sequenziellen Addition nicht berücksichtigt. Wird die kleinste zu berücksichtigende Wahrscheinlichkeit zu klein gewählt, ergibt sich eine feine Wahrscheinlichkeitsdiskretisierung. Dadurch sind viele Summanden zu addieren. Hier muss also ein geeigneter Kompromiss gefunden werden. Es kann aber leicht ermittelt werden, wie groß die Zahl der Summanden höchstens sein darf, nämlich nicht höher als die Summe der Schub- und Zugphasen im betrachteten Fahrzyklus.

Aus Abbildung 5.29 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Differenz des relativen Speicherstands nach einer Zug-/Schubphase  $p(\Delta E_{\text{el,B}}^*)$  bekannt. Diese Verteilung wird nun anhand des Vorzeichens ihrer Zufallsvariablen  $\Delta E_{\text{el,B}}^*$  in zwei Verteilungen unterteilt. Die Anteile der Zufallsvariablen, die kleiner Null sind, beschreiben die eingebrachte Energiemenge beim



Laden der Batterie in Schubphasen. Die Anteile größer Null beschreiben die entnommene Energiemenge beim Entladen in Zugphasen. Für jeweils einen Lade- und einen Entladevorgang wird nun jeweils eine Energiemenge mit dem selben Wahrscheinlichkeitsanteil  $p_k$  entnommen oder eingebracht. Für dieses Beispiel soll der Wahrscheinlichkeitsanteil

$$p_k = 0,5\% \quad (5.47)$$

betragen. Durch eine Aneinanderreihung aller eingebrachten und entnommenen Energiemengen erhält man eine Wertefolge mit jeweils einem Wert für die Energiemenge jeder Lade- oder Entladephase. Am hier gezeigten Beispiel ergeben sich 200 Lade- bzw. Entladephasen.

$$n_k = \frac{100\%}{p_k} = 200 \quad (5.48)$$

Für das Laden der Batterie berechnen sich anhand von Gleichung (5.49) die ganzzahligen Vielfachen  $n_{L_q}$  von  $p_k$ . Hier wird der Anteil der Wahrscheinlichkeiten jeder Klasse der Zufallsvariablen  $\Delta E_{\text{el},B}^*$  ermittelt, deren Werte kleiner oder gleich Null sind. Anschließend werden sie durch den Wert  $p_k$  geteilt und auf eine natürliche Zahl gerundet.

$$n_{L_q} \approx \frac{p_q(\Delta E_{\text{el},B_q}^* \mid \Delta E_{\text{el},B}^* \leq 0)}{p_k}, \quad n_{L_q} \in \mathbb{N} \quad (5.49)$$

Analog dazu erfolgt dies für die Klassen der Zufallsvariablen  $\Delta E_{\text{el},B}^*$ , deren Werte größer Null sind. Hieraus entstehen die Häufigkeiten für das Entladen  $n_{E_r}$ .

$$n_{E_r} \approx \frac{p_r(\Delta E_{\text{el},B_r}^* \mid \Delta E_{\text{el},B}^* > 0)}{p_k}, \quad n_{E_r} \in \mathbb{N} \quad (5.50)$$

Mit Hilfe der Häufigkeiten  $n_{L_q}$  und  $n_{E_r}$  werden nun  $q$  Wertefolgen  $w_{L_q}$  und  $r$  Wertefolgen  $w_{E_r}$  erstellt. Diese besitzen  $n_{L_q}$  bzw.  $n_{E_r}$  Einträge. Jeder Eintrag besteht aus dem Wert der Klassenmitte der jeweils betrachteten Klasse  $\Delta E_{\text{el},B_i}^*$ . Es gilt

$$\vec{w}_{L_q} = [\Delta E_{\text{el},B_{q(1)}}^*, \Delta E_{\text{el},B_{q(2)}}^*, \dots, \Delta E_{\text{el},B_{q(n_{L_q})}}^*] \quad (5.51)$$

$$\vec{w}_{E_r} = [\Delta E_{\text{el},B_{r(1)}}^*, \Delta E_{\text{el},B_{r(2)}}^*, \dots, \Delta E_{\text{el},B_{r(n_{E_r})}}^*] \quad (5.52)$$

Die einzelnen Wertefolgen werden nun aneinandergereiht. Jeder Eintrag der daraus entstehenden Wertefolge besitzt nun einen Wahrscheinlichkeitsanteil von  $p_k$  (für dieses Beispiel:  $p_k = 0,5\%$ ).

$$\overrightarrow{\Delta E}_{B,\text{Laden},0.5}^* = [\vec{w}_{L_1}, \vec{w}_{L_2}, \vec{w}_{L_3}, \dots] \quad (5.53)$$

$$\overrightarrow{\Delta E}_{B, \text{Entladen}, 0.5}^* = [\vec{w}_{E_1}, \vec{w}_{E_2}, \vec{w}_{E_3}, \dots] \quad (5.54)$$

Diese resultierenden Wertefolgen diskretisieren die jeweiligen Differenzen der Energiemenge nach einer Zugphase sowie nach einer Schubphase nach Abbildung 5.29.

Der kumulierte Verlauf der aneinandergereihten Energiemengen wird als möglicher zeitlicher Verlauf des relativen Speicherstands der Batterie  $\Delta SOC_B$  angesehen. Der jeweils maximale und minimale Wert des kumulierten Verlaufs des relativen Speicherstands ergibt den maximal ( $\Delta SOC_{B, \text{max}}$ ) bzw. minimal ( $\Delta SOC_{B, \text{min}}$ ) aufgetretenen relativen Füllstand des Speichers. Der relative Speicherstand zu Beginn der Simulation beträgt  $\Delta SOC_{B, \text{Beginn}} = 0\%$ . Der Wert des relativen Speicherstands kann sowohl zu- als auch abnehmen, also ein positives oder ein negatives Vorzeichen erhalten. Wie bereits beschrieben, sollen nun die Wertefolgen der zwei Worst-Case-Szenarien gebildet werden:

- $\Delta SOC_{B, \text{high}}$ : Die jeweils betragsmäßig größte eingebrachte Energiemenge folgt auf die betragsmäßig kleinste entnommene Energiemenge.
- $\Delta SOC_{B, \text{low}}$ : Die jeweils betragsmäßig kleinste eingebrachte Energiemenge folgt auf die betragsmäßig größte entnommene Energiemenge.

Beide Wertefolgen der kumulierten Energiemengen haben unterschiedliche Verläufe sowie unterschiedliche Minima und Maxima. Der letzte Wert beider kumulierter Wertefolgen  $\Delta SOC_{B, \text{Ende}}$  zum Ende der Simulation ist bei beiden Wertefolgen der selbe Wert, da in Summe über die gesamte Simulationsdauer die identischen Energiemengen zugeführt und entnommen werden.

Nun können aus diesen Wertefolgen die zwei kumulierten Wertefolgen  $\Delta SOC_{B, \text{high}}$  und  $\Delta SOC_{B, \text{low}}$  zusammengesetzt werden. Hier folgt jeweils eine Entladephase einer Ladephase. Wie bereits beschrieben, stellt  $\Delta SOC_{B, \text{high}}$  den Worst-Case bzw. den ungünstigsten Fall dar, in dem in kurzer Zeit eine große Energiemenge in die Batterie eingebracht wird.  $\Delta SOC_{B, \text{low}}$  stellt den Fall dar, bei dem dem Speicher in kurzer Zeit eine große Energiemenge entnommen wird. In diesem Beispiel wird wieder ein Wahrscheinlichkeitsanteil  $p_k$  von 0,5 % angesetzt.

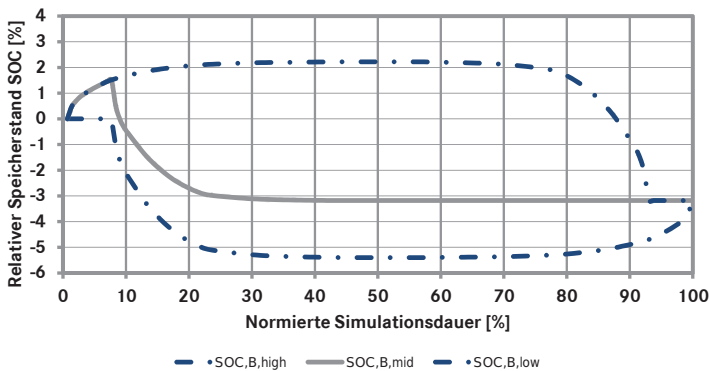
$$\begin{aligned} \Delta SOC_{B, \text{high}_i} &= - \left( \sum_{i=1}^{n_E} \Delta E_{B, \text{Entladen}, 0.5(i)}^* \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{n_L} \Delta E_{B, \text{Laden}, 0.5(i)}^* \right) \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$\Delta SOC_{B,low_i} = -\left(\sum_{i=1}^{n_E} \Delta E_{B,Entladen,0.5(n_E+1-i)}^* + \sum_{i=1}^{n_L} \Delta E_{B,Laden,0.5(n_L+1-i)}^*\right) \quad (5.56)$$

Ein weiterer Werteverlauf  $\Delta SOC_{B,mid}$  wird ebenfalls gebildet. Hier wird einer größten entnommenen Energiemenge mit einem Wahrscheinlichkeitsanteil von 0,5% die jeweils größte eingebrachte Energiemenge gegenübergestellt. Dabei gilt der folgende Zusammenhang.

$$\Delta SOC_{B,mid_i} = -\left(\sum_{i=1}^{n_E} \Delta E_{B,Entladen,0.5(n_E+1-i)}^* + \sum_{i=1}^{n_L} \Delta E_{B,Laden,0.5(i)}^*\right) \quad (5.57)$$

Es ergeben sich mögliche Verläufe des Speicherstands, die in Abbildung 5.30 dargestellt sind. Hier ist ersichtlich, dass sowohl die Worst-Case-Betrachtung als auch der ausgeglichene Verlauf des Speicherstands am Ende der Simulation im selben relativen Speicherstand  $\Delta SOC_{B,Ende}$  enden. Dieser beträgt für das in diesem Beispiel herangezogene Lastprofil ca. -3%. Der Speicher wird also durch diese Betriebsstrategie langfristig entladen. Dies ist darin begründet, dass die Energie, die in Schubphasen gewonnen wird, nicht ausreicht, um die Energiemenge, die in den Zugphasen entnommen wird, auszugleichen.



**Abb. 5.30:** Mögliche Verläufe des relativen Speicherstands über der Simulationsdauer

Auf diese Weise ist es möglich, abzuschätzen, in welcher Weise über das Bordnetz der Ladestand der Batterie beeinflusst wird. Wenn die Entwicklung nun fordern würde, dass für den vorliegenden Batterietyp die maximale Speicherstandsänderung für das Laden und das Entladen jeweils  $\pm 4\%$  betragen soll, kann das Ergebnis nach Abbildung 5.30 dafür herangezogen werden. Demnach wird diese Anforderung beim Ladevorgang selbst im Worst-Case-Fall eingehalten. Beim Entladevorgang wird die Anforderung nicht eingehalten, der relative Speicherstand kann Werte kleiner als  $-4\%$  annehmen.

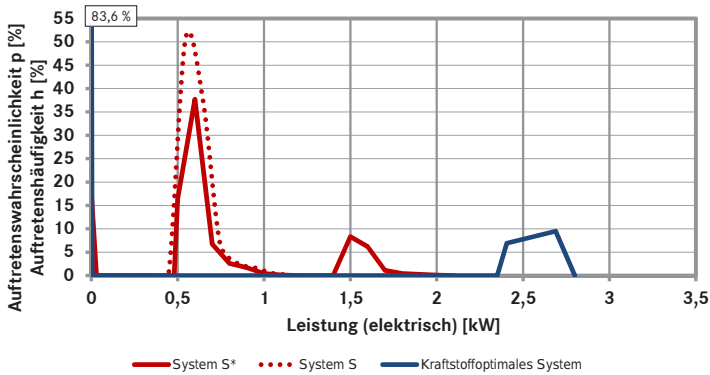
Um diese Anforderung an den Speicher einzuhalten, muss die entnommene Energiemenge reduziert werden. Die Energie berechnet sich aus dem Produkt der jeweiligen Werte für Leistung und Zeitdauer. Da die Zeitdauern für die Entladephasen mit dem gewählten Fahrprofil fest vorgegeben sind, kann an dieser Stelle für die Einhaltung der Energiebilanz ausschließlich die Leistung, die aus der Batterie entnommen wird, reduziert werden. Um die Leistungsanforderung der Verbraucher zu decken, muss nun in den Zugphasen der Generator zu Teilen die Leistung der Verbraucher bereitstellen.

Hierzu werden innerhalb der Verteilung  $p(P_{el,B,Entladen}^*)$  jeweils  $0,5\%$  der relativen Wahrscheinlichkeiten der maximalen Leistungsabgabe der Klasse der minimalen Leistungsabgabe (Nullleistung) hinzugefügt. Dies wird so oft wiederholt, bis die Anforderung an den minimalen Speicherstand erfüllt wird.

Mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{el,B}^*)$ , die nun alle Anforderungen sowohl an ihre Leistungsbilanz als auch an die Energiebilanz erfüllt, wird nun im letzten Berechnungsschritt in der Hierarchieebene des Bordnetzes die Generatorleistung  $p(P_{Gen,el}^*)$  nach Gleichung (5.46) final berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.31 dargestellt.

Zusätzlich ist der Vergleich der Verteilung der Generatorleistung vor der Integration der Betriebsstrategie zu sehen. Außerdem ist in dieser Abbildung die ideale Verteilung der Generatorleistung dargestellt. Vergleicht man an dieser Stelle das Berechnungsergebnis mit der idealen Verteilung, erkennt man, dass das Ergebnis nicht dem kraftstoffoptimalen Verlauf (zwei Peaks — einer bei Nullleistung, einer bei maximaler Generatorleistung) entspricht. Dies ist mit Hilfe der Einschränkungen der Batterie hinsichtlich ihrer Leistungs- sowie ihrer Energiebilanz zu begründen.

Zunächst begrenzt die maximale Aufnahmeleistung der Batterie die maximale Leistung des Generators in Schubphasen. Der Peak der Maximalleistung entfällt daher. Die Energiebilanz an zweiter Stelle beschränkt den Peak der



**Abb. 5.31:** Neue ( $S^*$ ) und konventionelle ( $S$ ) Generatorleistung sowie ideale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Generatorleistung, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$

Nullleistung. Der Generator muss zur Einhaltung der Energiebilanz auch in Zugphasen Energie in das System einbringen.

An dieser Stelle sei auf das Kapitel 6.1 verwiesen, in dem die Leistungsfähigkeit der verwendeten Komponenten gesteigert sowie die verwendete Batterietechnologie geändert wird.

Die Berechnung der weiteren Leistungen des Systems  $S^*$  erfolgt analog zu den Berechnungsvorschriften in Kapitel 5.3.1. Abbildung 5.32 stellt die Verteilungen der mechanischen Leistungen des Generators der Systeme  $S$  und  $S^*$  gegenüber. Hier ist deutlich die Reduktion der mechanischen Leistungen durch das Rekuperationssystem zu sehen.

Die Mittelwerte der mechanischen Leistungen betragen hierbei für die jeweiligen Systeme:

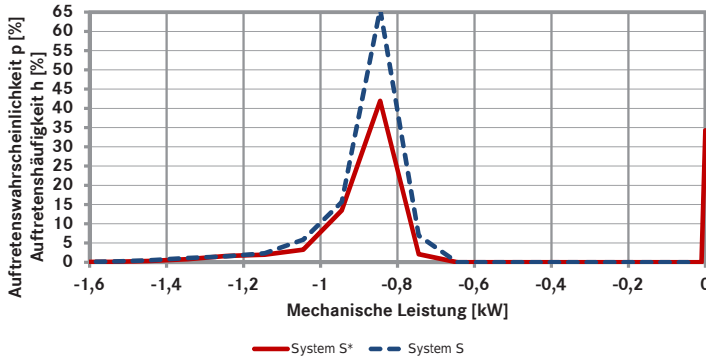
$$\bar{P}_{\text{Gen,mech}} = 0,89 \text{ kW} \quad (5.58)$$

$$\bar{P}^*_{\text{Gen,mech}} = 0,59 \text{ kW} \quad (5.59)$$

Die weiteren Berechnungsvorgänge werden in Analogie zu Kapitel 5.2 durchgeführt. Es ergeben sich folgende Mittelwerte der durchschnittlichen chemischen Leistungen beider Systeme.

$$\bar{P}_{\text{chem}} = 232,7 \text{ kW} \quad (5.60)$$

$$\bar{P}^*_{\text{chem}} = 232,4 \text{ kW} \quad (5.61)$$



**Abb. 5.32:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen des Generators, bezogen auf die Zugphasen des Fahrzeugs, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$

Der Mittelwert der Kraftstoffersparnis des neuen Systems  $S^*$  bezogen auf das Referenzsystem  $S$  beläuft sich daher auf  $-0,13\%$ . Es entstehen tägliche Kraftstoffkosten von

$$K_{\text{Diesel,Tag}} = 277,82 \text{ Euro} \quad (5.62)$$

$$K_{\text{Diesel,Tag}}^* = 277,46 \text{ Euro} \quad (5.63)$$

Mit diesem System könnten somit täglich  $0,36$  Euro an Kraftstoffkosten gespart werden. Bei  $200$  Einsatztagen des Fahrzeugs pro Kalenderjahr ergäbe dies eine jährliche Kosteneinsparung von  $72$  Euro.

### 5.3.3 Variation von Komponenteneigenschaften

Der dritte Stellhebel betrifft die *Veränderung eines Bauteils* in seinen energetischen Eigenschaften. Nach Abbildung 5.33 wird hierzu der im bisherigen System verbaute Generator gegen einen neuen Generator mit verringerter maximaler Wandlungsleistung getauscht. Dadurch wird die Leistungs- und Energiebilanz des neuen Systems verändert. Die grundlegende Bedingung für das neue System ist, dass Endenergie und Endleistung der elektrischen Verbraucher nicht verändert werden. Während die Veränderung des Wirkungsgradverhaltens lediglich eine Auswirkung auf den Primärenergieeinsatz hat, bewirkt eine Reduktion der maximalen Wandlerleistung eine Änderung der Systembilanz im elektrischen System.

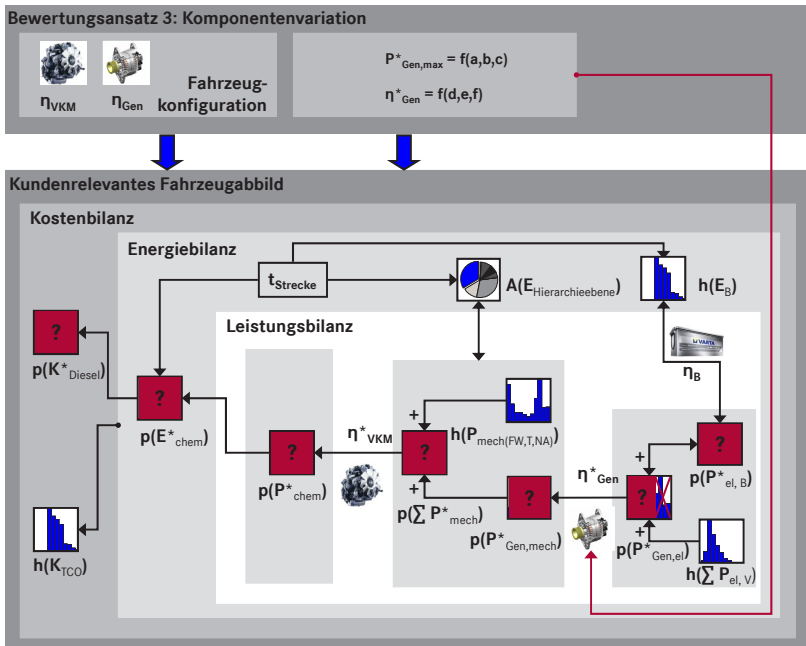


Abb. 5.33: Variation von Komponenteneigenschaften

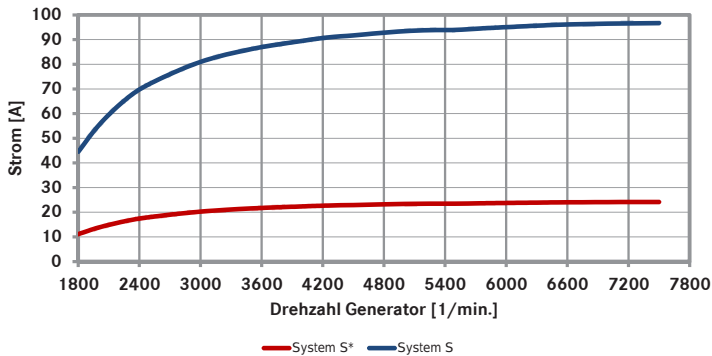
Die *höchste Priorität* der hier vorliegenden Fahrzeugbetriebsstrategie hat die Bereitstellung der elektrischen Endleistung  $h(\sum P_{el,V})$ . Aufgrund seiner Betriebsstrategie wandelt der Generator die elektrische Leistung direkt aus mechanischer Energie, sobald diese angefordert wird. Kann nicht genügend Leistung gewandelt werden, wird die verbleibende Leistung durch den elektrischen Speicher bereitgestellt. Zur Wahrung der ausgeglichenen Energiebilanz muss allerdings zu einem späteren Zeitpunkt die Batterie wieder geladen werden. Sowohl beim Laden als auch beim Entladen des Energiespeichers treten Wandlungsverluste auf, die in diesem Beispiel zusätzlich berücksichtigt werden.

Zunächst findet unter Restriktion durch die begrenzen Wandlerleistung des Generators  $P^*_{Gen,max} = f(\eta_{Gen}, T_{Gen})$  nach Abbildung 5.33 eine *Neuberechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung* der elektrischen Generatorleistung  $p(P^*_{Gen,el})$  statt. Dies geschieht durch Addition der relativen Häufigkeiten  $h_i(P_{Gen,el})$ , deren Leistung  $P^*_{Gen,el}$  größer als die maximale Leistung des Generators im neuen System  $P^*_{Gen,max}$  ist, zur relativen Häufigkeit der maximalen Generatorleistung  $p(P^*_{Gen,el} = P^*_{Gen,max})$ . Im

praktischen Beispiel entspricht diese Umverteilung einer Begrenzung der Generatorleistung auf seine maximale Leistungsfähigkeit. Es gilt:

$$p(P_{\text{Gen,el}}^* \mid P_{\text{Gen,el}}^* = P_{\text{Gen,max}}^*) = \sum_{i=1}^n h_i(P_{\text{Gen,el}} \mid P_{\text{Gen,el}} \geq P_{\text{Gen,max}}^*) \quad (5.64)$$

Für das begleitende Beispiel soll die maximal mögliche Generatorleistung 1/4 der Nennleistung des Generators im Referenzsystem betragen. Das Verhalten von Wirkungsgrad und Volllastkennlinie soll dem Generator des Referenzsystems entsprechen. Es ergibt sich damit eine Volllastkennlinie nach Abbildung 5.34.



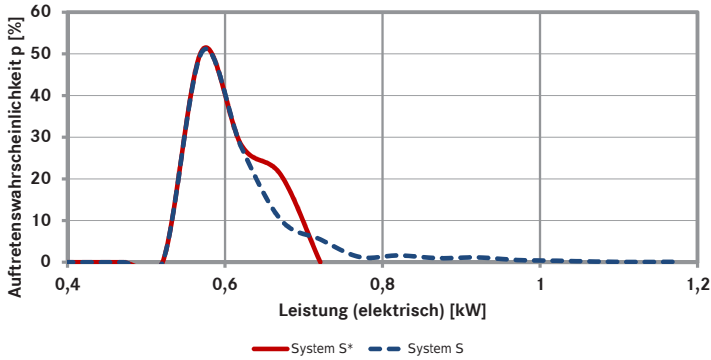
**Abb. 5.34:** Volllastkennlinie der Generatoren der Systeme  $S$  und  $S^*$   
( $T_{\text{Generator}} = 80^\circ \text{C}$ )

Begrenzt durch ihre maximalen Wandlerleistungen ergeben sich für beide Systeme die Verteilungen ihrer Generatorleistungen nach Abbildung 5.35.

Die *Reduktion der Generatorleistung* führt dazu, dass die Energiebilanz des Systems verändert wird. In Folge dessen verändert sich ebenfalls der Speicherstand der Batterie. Dies ist nicht erwünscht. Die Leistungen des Generators für eine ausgeglichene Energiebilanz sind daher nach der Betriebsstrategie neu zu berechnen.

Der folgende Berechnungsablauf hierbei ähnelt der Integration einer Betriebsstrategie nach Kapitel 5.3.2. Der einzige Unterschied ergibt sich in der Priorisierung der Energieflüsse.





**Abb. 5.35:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Generators, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$

In Kapitel 5.3.2 war gefordert, in Schubphasen die maximale Leistung für die Energiewandlung zu verwenden. In Zugphasen sollte die Leistung nach Möglichkeit  $P_{\text{Gen,el}} = 0$  betragen. In diesem Fall sieht die Betriebsstrategie vor, die elektrische Energie durch den Generator bedarfsgerecht in Abhängigkeit der geforderten Leistung von Batterie und Verbrauchern zu wandeln. Erst wenn die maximal mögliche Wandlungsleistung des Generators nicht zur Deckung der Leistungsbedarfe der Verbraucher ausreicht, soll die Leistung der Batterie entnommen werden. Für den ersten Schritt der Berechnung bedeutet dies, dass eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximal angeforderten Generatorleistungen ermittelt wird, die in Abhängigkeit von den Häufigkeitsverteilungen der Generator Drehzahlen  $h(n_{\text{Gen}})$  und der Temperaturen des Generators  $h(T_{\text{Gen}})$  stehen.

$$p(P_{\text{Gen,el}}^*) = h(P_{\text{Gen,max}}) = f(h(n_{\text{Gen}}), h(T_{\text{Gen}})) \quad (5.65)$$

Aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Leistungsanforderung an den Generator auf dem ausgewählten Fahrprofil kann nun die Leistungsbilanz im elektrischen System berechnet werden. Wird die elektrische Leistung der Verbraucher jederzeit gedeckt und ist die Batterie geladen, so kann in diesem Fall die Leistung des Generators reduziert werden. Reicht sie nicht aus, so muss die Batterie zusätzliche Energie bereitstellen.

Für die elektrische Leistungsbilanz der Batterie ergibt sich folgende Wahrscheinlichkeitsverteilung:

$$p(P_{\text{el,B}}^*) = -p(P_{\text{Gen,el}}^*) - h\left(\sum P_{\text{el,V}}\right) \quad (5.66)$$

Die Integration des Batteriewirkungsgrads erfolgt durch Multiplikation der Verteilung des Wirkungsgrads für Laden  $p(\eta_{\text{Laden,B}})$  und Entladen  $p(\eta_{\text{Entladen,B}})$  und resultiert in der elektrochemischen Leistung der Batterie  $p(P_{\text{ch,B}}^*)$ .

$$p(P_{\text{ch,B}}^* | P_{\text{ch,B}}^* < 0) = p(P_{\text{el,B}}^* | P_{\text{el,B}}^* < 0) \cdot p(\eta_{\text{Laden,B}}) \quad (5.67)$$

$$p(P_{\text{ch,B}}^* | P_{\text{ch,B}}^* > 0) = \frac{p(P_{\text{el,B}}^* | P_{\text{el,B}}^* > 0)}{p(\eta_{\text{Entladen,B}})} \quad (5.68)$$

Entscheidend für die Bewertung ist die Ladezustandsänderung des Speichers. Verläuft diese positiv (Ladezustand erhöht sich), so kann die Wandlungsleistung des Generators reduziert werden. Verläuft sie negativ (Ladezustand verringert sich), so kann nur Abhilfe durch Integration eines größeren oder mehrerer Generatoren geschaffen werden.

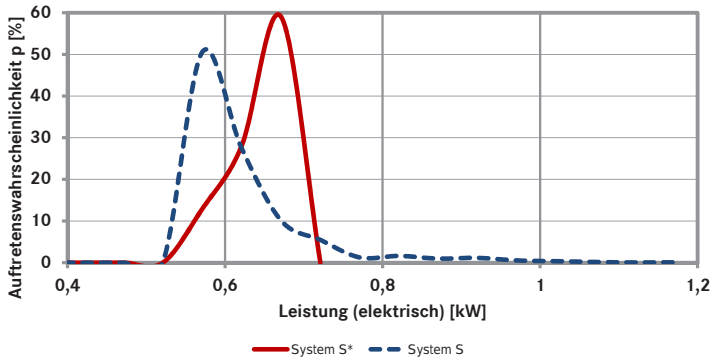
Die *Berechnung der Energiedifferenz des Speichers* erfolgt durch Summation der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Batterieleistungen und anschließender Multiplikation mit der Streckendauer  $t_{\text{Strecke}}$ .

$$\Delta E_{\text{Speicher}} = \bar{P}_{\text{ch,B}}^* \cdot t_{\text{Strecke}} \quad (5.69)$$

Die *Neubestimmung der Generatorleistung* im Falle einer positiven Ladezustandsänderung erfolgt durch schrittweise Reduktion der Generatorleistung, ausgehend von der neuen Generatorleistung, die maximal 1/4 der installierten maximalen Generatorleistung des alten Systems ist. Beginnend bei der Klasse der maximalen Leistung werden pro Iterationsschritt jeweils 0,5 % des relativen Wahrscheinlichkeitsanteils der maximalen Generatorleistungen in die Klasse der Nullleistung ( $P_{\text{Gen,el}} = 0$ ) umverteilt<sup>1</sup> (Berechnungsvorschrift analog zu Kapitel 5.3.3). Das Abbruchkriterium ist dabei die Erfüllung der Energiebilanz der Batterie mit  $\Delta E_{\text{Speicher}} = 0$ . Mit diesem Berechnungsschritt soll die kleinste maximale Generatorleistung gefunden werden, bei der die Energieversorgung noch sichergestellt ist und die Energiebilanz des Systems  $S^*$  erfüllt wird. Für die Berechnung werden konstante Batteriewirkungsgrade von  $\eta_{\text{Laden,B}} = \eta_{\text{Entladen,B}} = 0,9$  verwendet.

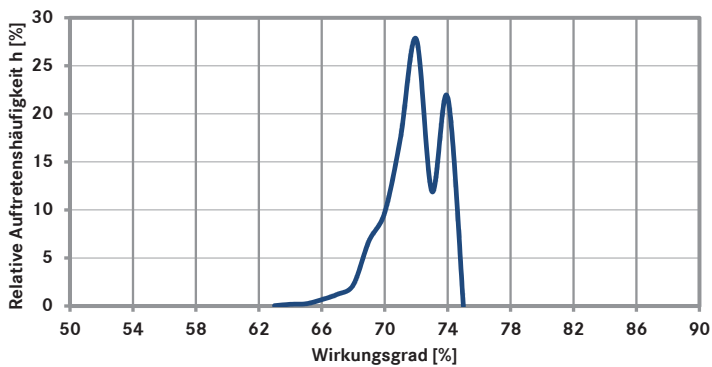
<sup>1</sup> Da der Generator nach Gleichung (5.65) mit maximaler Leistungsfähigkeit betrieben wird, wird für die Berechnung vorausgesetzt, dass die Ladezustandsänderung des Speichers positiv ist und somit seine Leistung bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums reduziert werden kann. Im anderen Fall (Ladezustandsänderung negativ) kann die Energiebilanz selbst bei maximaler Wandlungsleistung des Generators nicht erfüllt werden. Die Simulation wird in diesem Fall an dieser Stelle abgebrochen.

Unter Erfüllung der Leistungs- und Energiebilanz ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen durch den Generator nach Abbildung 5.36.



**Abb. 5.36:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistungen nach Berücksichtigung der Energiebilanz der Batterie, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$

Mit Hilfe der so ermittelten Leistungsverteilung des Generators kann der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs analog zu Kapitel 5.3.1 berechnet werden. Unter Verwendung des bekannten Wirkungsgradkennfeldes aus Kapitel 2 (Abbildung 2.19) resultiert die folgende Verteilung des Wirkungsgrades in Abbildung 5.37.

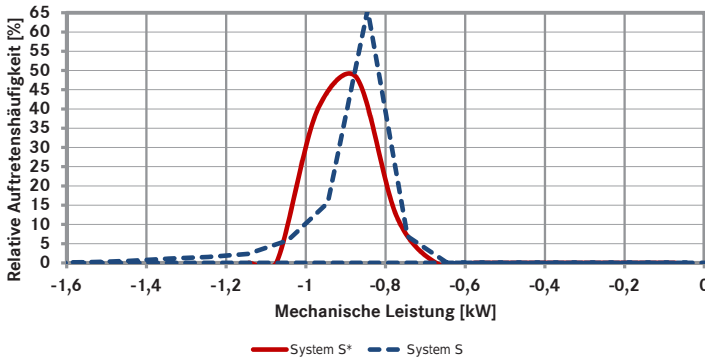


**Abb. 5.37:** Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generatorwirkungsgrades  $\eta_{\text{Gen}}^*$ , Klassenbreite  $\Delta \eta_{\text{Gen}_k}^* = 1 \%$

In Abbildung 5.38 sind die mechanischen Leistungen beider Systeme dargestellt. Es ergeben sich folgende Mittelwerte der durchschnittlichen chemischen Leistungen beider Systeme.

$$\bar{P}_{\text{chem}} = 232,7 \text{ kW} \quad (5.70)$$

$$\bar{P}^*_{\text{chem}} = 232,5 \text{ kW} \quad (5.71)$$



**Abb. 5.38:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Generatorleistungen beider Systeme, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$

Somit führt in diesem Fall die Reduktion der Nennleistung des Generators zu einer Kraftstoffeinsparung von  $-0,09\%$ . Zusätzlich können durch die Generatormodifikation Gewicht, Kosten und Bauraum eingespart werden. Es ist allerdings zu prüfen, ob diese Generatorauslegung sogenannte Worst-Case-Szenarien (z. B. hohe elektrische Verbraucherleistungen im Winter) erfüllen kann.

## 5.4 Abschnitt C: Ausgabe des Optimierungskriteriums

Nach der Vorgehensweise der Entwicklungsmethodik ist das Resultat nach Phase B aus Abbildung 5.1 das Bewertungskriterium  $Z$ , das unter der Systemvariation durch die Parameter  $V_n^*$  als gewünschtes Ausgabekriterium

definiert wurde. Die Erstausslegung dieser Parameter geschieht in der Regel durch eine Einschätzung des Entwicklers. Der Entwickler möchte allerdings nicht nur das Ergebnis seiner ersten Parameterabschätzung erfahren, sondern zusätzlich die *Sensitivität* des Gesamtsystems auf die Änderung der Parameter  $V_n^*$ . Durch eine *Optimierung* des Bewertungskriteriums (z. B. eine Minimierung des Kraftstoffverbrauchs) lassen sich in Abhängigkeit der Freiheitsgrade des Systems verbrauchsgünstige Fahrzeuge auslegen.

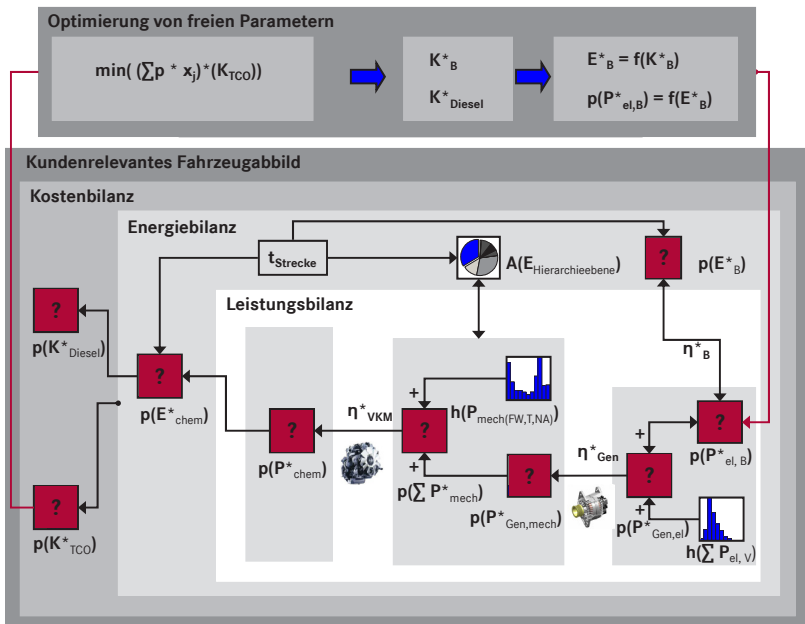


Abb. 5.39: Optimierung freier Parameter

Daher erscheint es sinnvoll, in einem neu entwickelten Fahrzeugsystem  $S^*$  die freien Systemparameter  $V_n^*$  mehrfach zu verändern und ihre Auswirkung auf das Bewertungskriterium zu beobachten. Abbildung 5.39 stellt die grundsätzliche Vorgehensweise an einem Beispiel des elektrischen Bordnetzes dar. Die zu optimierende Größe ist hierbei eine Kenngröße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kosten  $p(K_{TCO}^*)$  des neuen Fahrzeugsystems  $S^*$ . Einfluss auf dessen Kosten haben die Kosten für den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs  $K_{Diesel}^*$  sowie Komponentenkosten für den Batteriespeicher  $K_B^*$ . In diesem Beispiel wird das neue System  $S^*$  durch die in Kapitel 5.3.2

beschriebene Maßnahme definiert. Somit wirkt sich eine Veränderung der Batterieeigenschaften (z. B. ihre Kapazität) wiederum auf den Kraftstoffverbrauch aus. Verändert man also z. B. die Kapazität der Batterie, so ergibt ein Simulationsdurchlauf der stochastischen Simulation eine veränderte Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs und verändert damit, auch mit den veränderten Komponentenkosten, das Optimierungskriterium.

Grundsätzlich kann als *Optimierungskriterium* jede Variable des gleichungsbasierten beschriebenen Fahrzeugsystems gewählt werden. Nach jedem Simulationsdurchlauf ergeben die veränderten Systemparameter  $V_n^*$  einen neuen Wert für das Optimierungskriterium. Die Herausforderung bei der Systemoptimierung ist hierbei allerdings die Neubestimmung der Systemparameter, um das Optimierungskriterium zu einem Optimum konvergieren zu lassen. Bei Anwendung der stochastischen Simulation ist eine händische Optimierung durch den Entwickler und gleichzeitigen Anwender der Simulationsumgebung sicherlich denkbar, in dieser Arbeit soll allerdings ein Optimierungsalgorithmus die Systemparameter verändern und den stochastischen Simulationsdurchlauf anstoßen.

Nach Kapitel 2.3.6 werden in dieser Arbeit Evolutionäre Algorithmen verwendet. Nach Abbildung 2.26 wird im Programmcode des evolutionären Algorithmus ein Optimierungskriterium definiert. In diesem Fall ist dies der Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtkosten  $K_{\text{TCO}}^*$ . Als freier Parameter wird hier die maximale Gesamtenergie der Batterie  $E_{\text{B}}^*$  gewählt. Es können an dieser Stelle auch mehrere Parameter definiert werden. Als vorteilhaft erweist es sich hier, für den freien Parameter realistische obere und untere Grenzen festzulegen. Gerade bei Optimierungen hinsichtlich eines minimalen Kraftstoffeinsatzes werden ansonsten Komponenten mit höchster Wandlungsleistung und maximaler Speicherkapazität ausgewählt.

Nach Abbildung 2.27 erfolgt dieses Optimierungsverfahren dabei durch die Operatoren Selektion, Kreuzung und Mutation. Im ersten Schritt wird die Gesamtenergie der Batterie daher als Startpopulation zufällig ermittelt. Anschließend wird ein Simulationsdurchlauf der stochastischen Simulation durchgeführt. Nachdem der Wert für das Optimierungskriterium nach der ersten Simulation übergeben wurde, wird ein neuer Wert für den Systemparameter durch Kreuzung, Mutation und Selektion gebildet und die Simulation erneut angestoßen.

Zum Durchführen einer Optimierung anhand des vorgegebenen Beispiels muss die Kostenfunktion der Batterie generiert werden. Diese Bauteilkostenfunktion dient in der Optimierung als sogenannter „Strafterm“: Durch eine Erhöhung der Batteriekapazität kann auf der einen Seite der Kraftstoffverbrauch durch die Erhöhung rekuperierbarer Energie gesenkt werden. Dies senkt die Kosten für den Kraftstoffaufwand. Auf der anderen Seite steigen allerdings die Bauteilkosten. In der Kostenrechnung wird anschließend das Minimum aus sinkenden Kraftstoffkosten und steigenden Komponentenkosten ermittelt. Der Strafterm führt also dazu, dass ein realisierbares Ergebnis berechnet wird.

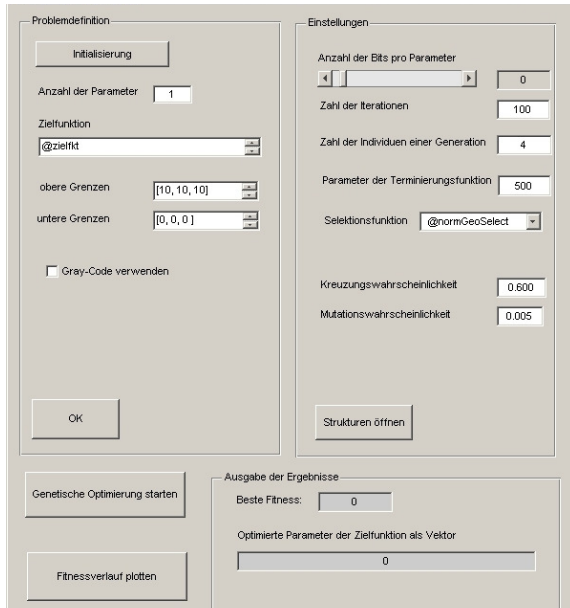
Die *Kosten der Batterie*  $K_B$  bestehen aus den Materialkosten und den Produktionskosten. Die Materialkosten  $K_{B,Mat}$  werden als lineare Funktion in Abhängigkeit der Batteriekapazität angenommen. Die Produktionskosten  $K_{B,Prod}$  werden als konstanter Kostenwert festgesetzt, der unabhängig von der Batteriekapazität ist. Basierend auf einer für den Vergleich herangezogenen Referenzbatterie mit einer Kapazität von  $C_{B,0} = 220$  Ah und ihren Materialkosten  $K_{Mat,0}$  ergibt sich die Kostenfunktion für eine Variation der Kapazitäten  $C_B$  mit:

$$K_B = K_{B,Prod} + K_{B,Mat} = K_{B,Prod} + C_B \cdot \frac{K_{Mat,0}}{C_{B,0}} \quad (5.72)$$

Im Rahmen der Masterarbeit von [103] wurde mit Hilfe der Programmiersprache Matlab [116] eine *grafische Oberfläche* nach Abbildung 5.40 erstellt. Diese verwaltet hierbei die Definition der Zielfunktion, die Ausgabe der Systemparameter sowie deren Begrenzung. Mit dem Betätigen der Eingabeaufforderung „Initialisierung“ werden die Parameter zur Problemdefinition und zur Optimierung im Hintergrund geladen. In der linken Spalte kann die Anzahl der freien Parameter vorgegeben werden, die hinsichtlich der gewünschten Zielfunktion optimiert werden soll. Jeder freie Parameter kann nach oben oder nach unten begrenzt werden.

Über den Schieberegler sowie die zahlreichen numerischen Eingabemöglichkeiten auf der rechten Seite von Abbildung 5.40 können verschiedene Einstellungen getätigt werden, die das Verhalten des Evolutionären Algorithmus beeinflussen. Zu deren detaillierten Beschreibung sei auf [103] verwiesen.

Der Evolutionäre Optimierungsalgorithmus wird nun auf das Rekuperationssystem aus Kapitel 5.3.2 angewandt. Wie Abbildung 5.31 gezeigt hat, reicht das System, bestehend aus konventionellem Generator und Batterie,



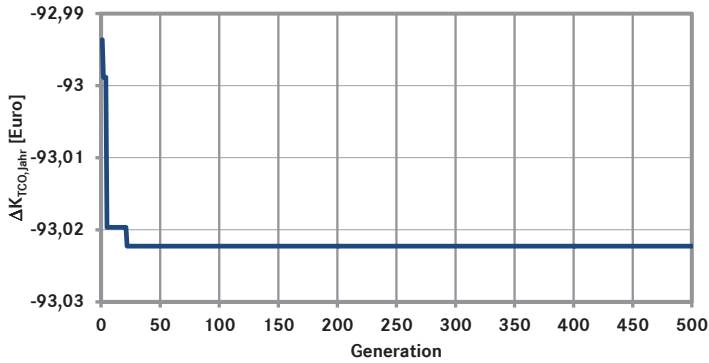
**Abb. 5.40:** Grafische Benutzeroberfläche zur Optimierung beliebiger Zielfunktionen, erstellt mit der Programmiersprache Matlab [103]

nicht aus, um eine optimale Kraftstoffersparnis zu erzielen. Diese würde sich in einer idealen Verteilung der Generatorleistung widerspiegeln. Einer der Gründe war die zu geringe Batteriekapazität, von der ein Teil davon für die Speicherung der Rekuperationsenergie verwendet wurde. Die Batteriekapazität soll nun als freier Parameter zur Optimierung dienen. Als obere und untere Grenze der maximal zulässigen Veränderung der Batteriekapazität des heutigen Systems werden jeweils +20 % und -20 % angesetzt.

Abbildung 5.41 zeigt den *Verlauf der jährlichen Kosteneinsparung durch den Kunden* während des Optimierungsvorgangs. Jede Generation entspricht hier einem Simulationsdurchlauf der stochastischen Simulation. Vor jedem Simulationsdurchlauf wurden der Parameter „Batteriekapazität“ durch den Evolutionären Algorithmus verändert und der stochastischen Simulation als freier Parameter zugeführt.

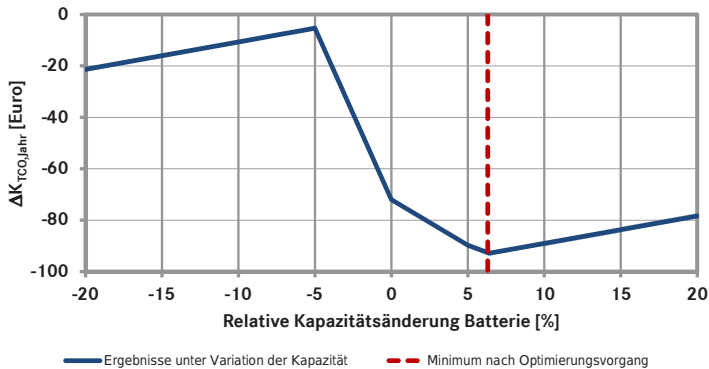
Hierbei ist zu erkennen, dass nach ca. 23 Simulationsdurchläufen (Generationen) kaum noch Veränderungen der minimalen Kosten stattfinden. Es scheint, als ob zu diesem Zeitpunkt der Wert des Systemparameters sehr





**Abb. 5.41:** Fitnessplot bei der Optimierung der Batteriekosten

nahe am Optimum liegen würde. Das Ergebnis des Optimierungsvorgangs ist eine Erhöhung der Batteriekapazität um 6,3%. Mit dieser Erhöhung der Batteriekapazität wird die durchschnittliche Kraftstoffersparnis um 0,05% erhöht. Die jährliche Kosteneinsparung für den Kunden beträgt damit 93 Euro.



**Abb. 5.42:** Jährliche Kosteneinsparungen des Kunden unter Variation der Batteriekapazität sowie Minimum nach dem Optimierungsvorgang

Abbildung 5.42 zeigt im Vergleich dazu einige Stützstellen, die aus jeweils einem Simulationsdurchlauf nach einer Variation der Batteriekapazität stammen. Diese Variation wurde manuell durch den Anwender der Simulation durchgeführt.

Das Optimum, das ebenfalls eingezeichnet ist, wurde also durch den Optimierungsalgorithmus sehr gut approximiert. Es stellt die für den Kunden wirtschaftlichste Lösung dar. Es könnte an dieser Stelle die Batteriekapazität weiter erhöht werden. Jedoch steigen damit die Kosten des Systems durch die Vergrößerung der Batteriekapazität. Damit wäre das Gesamtergebnis nicht wirtschaftlich.

Eine Verkleinerung der Batteriekapazität ist ein ebenfalls interessanter Ansatz. Zwar werden mit einer solchen Systemkonfiguration keine Kosten durch eine Verbrauchsreduktion eingespart. Allerdings sind dadurch andere Nachteile zu erwarten (z. B. hinsichtlich Energieversorgung bei Fahrzeugstillstand oder Startfähigkeit).

Grundsätzlich kann an dieser Stelle gesagt werden, dass die Anwendung von Evolutionären Algorithmen in Verbindung mit der stochastischen Simulation geeignet ist und plausible Resultate liefert. Es scheint eine sinnvolle Ergänzung zur Systemoptimierung zu sein, die innerhalb einer geringen Simulationsdauer Resultate liefert.

# 6 Maßnahmenbewertung und Parameteroptimierung

In diesem Kapitel erfolgt die *Anwendung der stochastischen Simulationsmethodik* auf die Verbrauchs- und Kostenbewertung von neuen Energiemanagementsystemen für schwere Nutzfahrzeuge. Dazu werden die in Kapitel 3.4.7 erarbeiteten Energiemanagementmaßnahmen in die Simulationsumgebung integriert und mit Hilfe des stochastischen Lösungsverfahrens bewertet. Zur besseren Vergleichbarkeit der streckenbezogenen Verbrauchsergebnisse werden alle Maßnahmen an der identischen Fahrzeugkonfiguration untersucht. Diese besteht aus einer Sattelzugmaschine der Marke Mercedes-Benz, Modell Actros 1846, in Verbindung mit einem 3-achsigen Sattelanhänger. Das Gesamtgewicht der Fahrzeugkombination beträgt 40 Tonnen.

Der zu bewertende Streckenverlauf für diese Fahrzeugkonfiguration stellt das Einsatzprofil nach Kapitel 4.4 dar, das einen typischen Kunden im mittelschweren Überlandverkehr berücksichtigt. Neben dem Überlandverkehr sind geringe zeitliche Anteile einer Stadt- (10 %), Autobahn- (5 %) und Rangierstrecke (5 %) enthalten. Der Einfluss des Fahrers auf das Verhalten des Fahrzeugs ist gering, da die Fahrzeugkombination zu 80 % mit Hilfe einer Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) gefahren wird.

Zum *Vergleich* der aus der stochastischen Simulation berechneten Verbrauchseinsparungen dient die zeitbasierte quasistationäre Längsdynamiksimulation. Diese bildet die identische Fahrzeugkombination ab und simuliert die Systemvariationen nach der festen zeitlichen Abfolge der Eingangsgrößen des vorgegebenen Fahrprofils.

Zur Bewertung hybrider Antriebsstränge wird ein Verteilerfahrzeug der Marke Mercedes-Benz Atego BlueTec Hybrid 1222 verwendet. Das Fahrprofil für diesen Fahrzeugtypen ist durch einen innerstädtischen Streckenverlauf gekennzeichnet, der aus der Kundenfahrerprobung stammt.

Der erste Schritt der stochastischen Simulation ist es, die Betriebszustände, Leistungshäufigkeiten und Energiebilanzen zu erstellen und darzustellen.

Im weiteren Schritt verändert eine Betriebsstrategie eines Energiemanagementsystems die Betriebspunkte der Komponenten und erzielt somit eine Verbrauchseinsparung. Der dritte Schritt variiert danach die Regelgrößen der Betriebsstrategie, was zu einer Auswirkung auf die Betriebspunkte und damit den Kraftstoffverbrauch führt. Anhand der ausgewählten Systeme sollen hier die Eigenschaften der stochastischen Simulation anschaulich dargestellt und hervorgehoben werden. Aus diesem Grund erfolgt nach jedem Simulationsdurchlauf einer Maßnahme ein Fazit, das ebenfalls einen Vergleich mit der zeitbasierten Simulation beinhaltet.

## 6.1 Aktives Generatormanagement

Mit Hilfe der *stochastischen Simulationstechnik* soll nun die Auswirkung der Betriebsstrategie aus Kapitel 5.3.2 auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugsystems untersucht werden. Nach einer ersten Bewertung sollen in einem weiteren Schritt die Auswirkungen der Variation der Nennleistung des Generators und der Vergrößerung der Kapazität des elektrischen Speichers auf das Verbrauchspotenzial untersucht werden. Danach soll mit der stochastischen Simulation dem Fahrzeughersteller eine Empfehlung abgegeben werden, welches System sich aus wirtschaftlicher Sicht für den Einsatz im Nutzfahrzeug eignet. Zum Vergleich der Berechnungsmethodik werden die Verbrauchspotenziale an dieser Stelle mit Hilfe der zeitbasierten Simulation validiert.

### 6.1.1 Berechnung des Verbrauchspotenzials

Der Simulationstechnik wird ein *elektrischer Energiebedarf*  $h(\sum P_{el,V})$  vorgegeben, den das Fahrzeug jederzeit bereitstellen muss. Die Betriebsstrategie sieht nun vor, in den Schubphasen des Verbrennungsmotors die Leistungsanforderung der Verbraucher zu erfüllen sowie den elektrischen Speicher zu laden. In Zugphasen soll die Energie aus dem elektrischen Speicher zur Verfügung gestellt werden. Diese zunächst idealisierte Annahme der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{Gen,el}^*)$  steht in einer Abhängigkeit zu der Verteilung der Zug- und Schubphasen sowie der Häufigkeitsverteilung der Drehzahl des Generators  $h(n_{Gen})$ . Sie ist begrenzt durch die maximale Leistungsfähigkeit des Generators  $P_{Gen,el,max}(n_{Gen}, T_{Gen})$ .

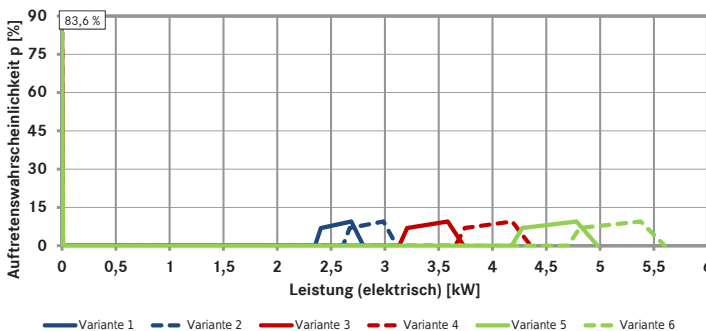
Für eine *Systemvariation* werden insgesamt 6 Generatorvarianten simuliert, die nach Tabelle 6.1 durch ihre maximale Leistung definiert sind.

| System     | Generatortyp<br>$\text{Gen}_k$ | Elektrische Nennleistung<br>$P_{\text{Gen,el,max}_k}$ |
|------------|--------------------------------|---|
| Referenz   | $\text{Gen}_{\text{Referenz}}$ | 2,7 kW  |
| Variante 1 | $\text{Gen}_1$                 | 2,7 kW  |
| Variante 2 | $\text{Gen}_2$                 | 3,0 kW  |
| Variante 3 | $\text{Gen}_3$                 | 3,6 kW  |
| Variante 4 | $\text{Gen}_4$                 | 4,2 kW  |
| Variante 5 | $\text{Gen}_5$                 | 4,8 kW  |
| Variante 6 | $\text{Gen}_6$                 | 5,4 kW  |

**Tab. 6.1:** Maximale Leistungsfähigkeit der Generatorvarianten

Die *Wirkungsgradkennfelder*  $\eta_{\text{Gen}}(I_{\text{Gen}}, n_{\text{Gen}})$  sowie die maximale elektrische Leistungsfähigkeit der Generatoren  $P_{\text{Gen,el,max}}(n_{\text{Gen}})$  basieren auf dem real verfügbaren Generator des Referenzfalls mit der maximalen Leistung von  $P_{\text{Gen,el,max}} = 2,7 \text{ kW}$ . Die Eigenschaften der weiteren Generatoren werden unter der Annahme des gleichen Bauteilverhaltens skaliert. Es wird für die Wirkungsgrade  $\eta_{\text{Gen}_k}$  der Generatoren  $\text{Gen}_k$  angenommen:

$$\eta_{\text{Gen}_k}(I_{\text{Gen}_k}, n_{\text{Gen}}) = \eta_{\text{Gen,Referenz}}(I_{\text{Gen}_k} \cdot \frac{P_{\text{Gen,el,max,Referenz}}}{P_{\text{Gen,el,max}_k}}, n_{\text{Gen}}) \quad (6.1)$$



**Abb. 6.1:** Wahrscheinlichkeitsverteilung im Schubbetrieb maximal möglicher Generatorleistungen  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$ , Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ , durchgeführt für alle Varianten

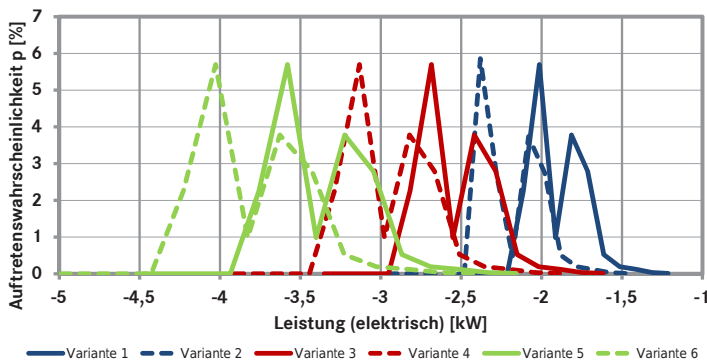
Für alle Systemvarianten kann im ersten Schritt analog zu Abbildung 5.24 die maximal mögliche Wandlerleistung des Generators in Schubphasen berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Das *Verbrauchspotenzial* ist nicht nur abhängig von der Leistungsfähigkeit des Generators, sondern zusätzlich von Leistungsfähigkeit und Kapazität des elektrischen Speichers. So werden analog zu den 6 Generatorvarianten nach Tabelle 6.2 sowohl Leistungsfähigkeit als auch Kapazität der Batterie gleichzeitig schrittweise erhöht.

| System     | Speicherart      | zyklisierbare Energiemenge |
|------------|------------------|----------------------------|
| Referenz   | Blei-Säure       | 0 kWh                      |
| Variante 1 | Blei-Säure       | 0,1 kWh                    |
| Variante 2 | Blei-Säure       | 0,2 kWh                    |
| Variante 3 | Blei-Säure (AGM) | 0,4 kWh                    |
| Variante 4 | Li-Ionen         | 1 kWh                      |
| Variante 5 | Li-Ionen         | 1 kWh                      |
| Variante 6 | Superkondensator | 1 kWh                      |

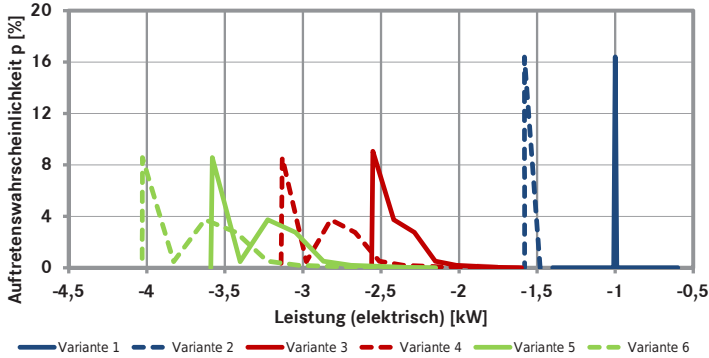
**Tab. 6.2:** Speicherart und Kapazität von Referenz- und Variantensystemen

Führt man die Berechnungsschritte analog zu den Berechnungsschritten durch, die zu Abbildung 5.26 führten, so erhält man die theoretisch möglichen Leistungsaufnahmen durch den Speicher  $p(P_{el,B,Laden}^*)$  für alle Systemvarianten. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.2 dargestellt.



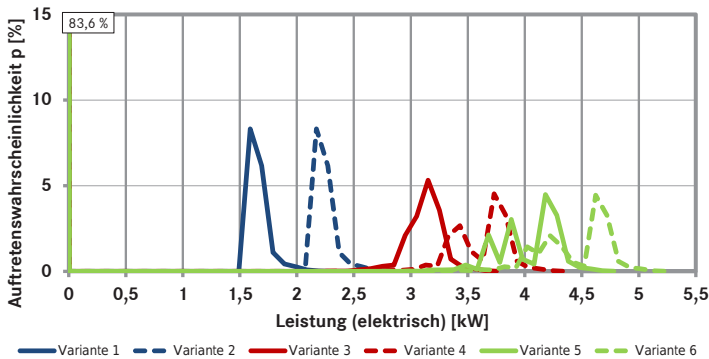
**Abb. 6.2:** Wünschenswerte Leistungsaufnahmen durch die Batterie  $p(P_{el,B,Laden}^*)$  in Schubphasen für alle Varianten, Klassenbreite  $\Delta P_{el,B_k}^* = 0,2 \text{ kW}$

Abbildung 6.3 zeigt im nächsten Schritt die Begrenzung der elektrischen Aufnahmeleistung durch den Speicher.



**Abb. 6.3:** Begrenzte Leistungsaufnahmen  $p(P_{el,B,Laden}^*)$  durch den Speicher in Schubphasen, Klassenbreite  $\Delta P_{el,B_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ , für alle Varianten

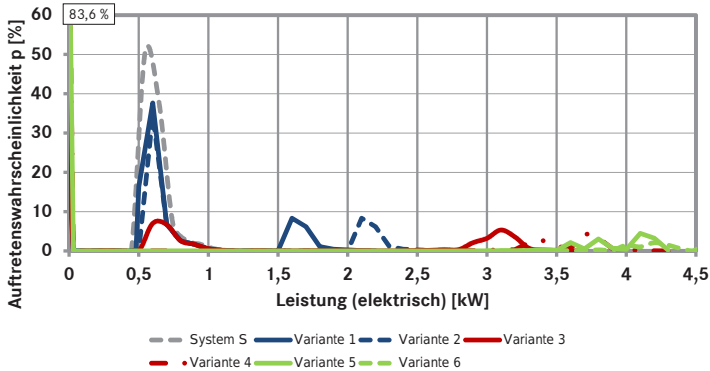
In Abbildung 6.4 sind die geforderten Generatorleistungen nach Erfüllung der Leistungsbilanz der Batterie aufgeführt.



**Abb. 6.4:** Generatorleistungen nach Begrenzung durch den Speicher, Klassenbreite  $\Delta P_{Gen,el_k}^* = 0,1 \text{ kW}$

Unter *Anwendung der Berechnungsalgorithmik* aus Kapitel 5.3.2 ergeben sich nach dem Ausgleichen von Leistungs- und Energiebilanz sechs neue Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Neuverteilung der Generatorleistung  $p(P_{Gen,el}^*)$ . Diese sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Dabei ist der

Unterschied der Häufigkeitsverteilung des Referenzsystems im Vergleich zu den Systemvarianten mit Rekuperation deutlich zu erkennen.



**Abb. 6.5:** Leistungsverteilungen der Generatorvarianten und Referenzfall,  $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$

Im neuen System  $S^*$  verändern sich bei allen 6 Varianten die Lage und Form der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der elektrischen Leistungen des jeweiligen Generators. Mit den Varianten 5 und 6 erzielt man die höchst mögliche Kraftstoffeinsparung, da hier der Generator in den Zugphasen keine Energie mehr wandeln muss.

Mit Hilfe der *Neuberechnung* der Wirkungsgrade des Generators, die sich durch seine neuen Betriebszustände nach Abbildung 6.5 ergeben, werden die Verteilungen der mechanischen Leistung des Generators berechnet.

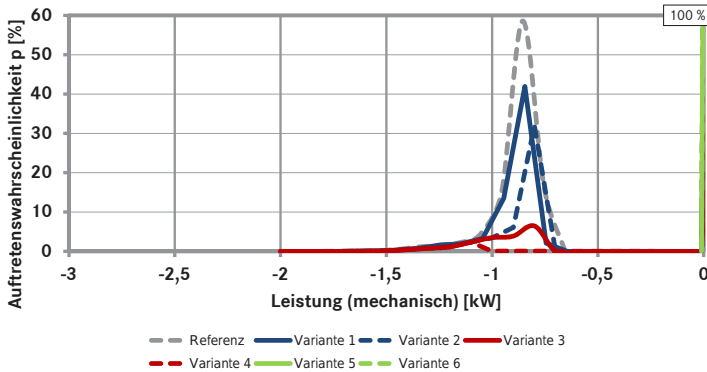
Anhand der Vorgehensweise nach Kapitel 5.2 werden anschließend schrittweise die Wahrscheinlichkeiten des Kraftstoffbedarfs aller Systemvarianten  $S_n^*$  berechnet und auf das Referenzsystem  $S$  bezogen.

Abbildung 6.6 zeigt die mechanischen Leistungen des jeweiligen Generators der verschiedenen Systemvarianten.

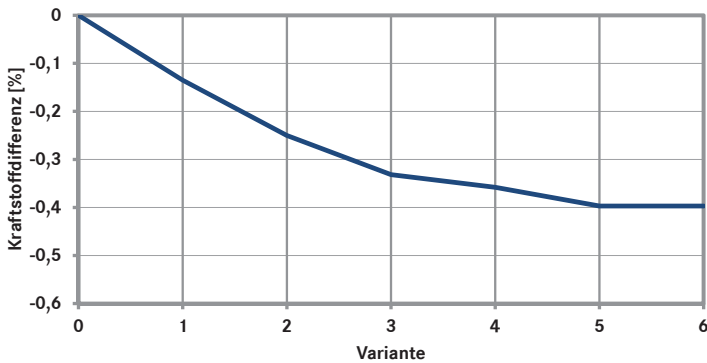
Abbildung 6.7 zeigt die ermittelte prozentuale Kraftstoffdifferenz der Systemvarianten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Zunahme der Leistungsfähigkeit aller Komponenten die mittlere Verbrauchersparnis ebenfalls zunimmt.





**Abb. 6.6:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen der Generatoren, bezogen auf die Zugphasen des Fahrzeugs, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$



**Abb. 6.7:** Kraftstoffverbrauchsdivergenz der Systemvarianten

## 6.1.2 Vergleich mit der zeitbasierten Berechnung

Zum Vergleich der absoluten Ergebnisse und zur Bewertung der stochastischen Methodik wird jede Generator-/Batterie-Variante zeitbasiert simuliert. Hierzu wird aus den Messdaten ein zeitlich abfolgender Streckenverlauf verwendet, der näherungsweise identisch zu den Häufigkeitsverteilungen der stochastischen Analyse ist. Hier wird wie in den vorangegangenen Beispielen das Fahrprofil aus Kapitel 4.4 verwendet.

Bei der zeitbasierten Simulation kann allerdings lediglich der vorgegebene Streckenverlauf simuliert werden, während die stochastische Simulation anhand der Vorgaben aus dem Fahrzeugmodell verschiedene Streckenverläufe in seiner Betrachtung zulässt. Deswegen sind die absoluten Ergebnisse differenziert zu betrachten. Zum besseren Vergleich wird von der stochastischen Simulation der Mittelwert verwendet.

In Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse durch die beiden Verfahren gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der zeitbasierten „Stichprobe“ liegen innerhalb des Korridors der stochastischen Zustandsanalyse. Der verwendete zeitbasierte Zyklus hat ein sehr ausgewogenes Verhältnis von Zug- zu Schubanteil über die ganze Strecke, d. h. sehr lange Zug- oder Schubanteile werden vermieden, weshalb das Potenzial grundsätzlich sehr nahe am maximalen Potenzial liegt, das die stochastische Zustandsanalyse berechnet.

| Systemvariation | Verbrauchsdifferenz |             |
|-----------------|---------------------|-------------|
|                 | stochastisch        | zeitbasiert |
| Variante 1      | -0,13 %             | -0,18 %     |
| Variante 2      | -0,25 %             | -0,29 %     |
| Variante 3      | -0,33 %             | -0,35 %     |
| Variante 4      | -0,35 %             | -0,38 %     |
| Variante 5      | -0,40 %             | -0,40 %     |
| Variante 6      | -0,40 %             | -0,42 %     |

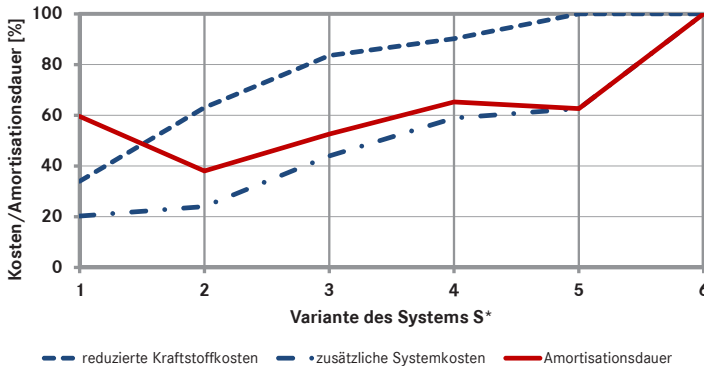
**Tab. 6.3:** Vergleich der Resultate beider Verfahren

### 6.1.3 Wirtschaftliche Bewertung der Varianten

Die simulative Ermittlung des Verbrauchspotenzials ergibt aus Sicht eines Nutzfahrzeugkundens durchaus Potenziale, die sich monetär lohnen. Eine Verbrauchseinsparung von 0,5 % bei einem Kraftstoffverbrauch des Gesamtfahrzeugs von 391/100km entspricht einer Reduktion von knapp 0,21/100km. Bei einer Jahresfahrleistung von 120.000 km ergibt dies eine beträchtliche Einsparung von ca. 240 Litern pro Jahr.

Allerdings bedingen einige dieser Maßnahmen den Einsatz teurer Speichertechnologien, wie z. B. Lithium-Ionen-Batterien oder Superkondensatoren, deren Kosten aufgrund des Neuheitsgrades noch sehr hoch sind.

Aus diesem Grund ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der einzelnen Maßnahmen sinnvoll.



**Abb. 6.8:** Relative Kosten/Amortisationsdauer der Systemvarianten bezogen auf die Variante 6

In Abbildung 6.8 wird das Ergebnis der Berechnung der Kosten und der Amortisationsdauer der 6 Varianten des neuen Systems S\* dargestellt. Alle Werte sind dabei auf die Variante 6 bezogen. Die Werte für die Amortisationsdauer basieren auf einem Kunden mit einer Jahresfahrleistung von 120.000 km, der einem Dieselpreis von 1,30 Euro pro Liter ansetzt.

Die zusätzlichen Systemkosten beziffern den finanziellen Mehraufwand für die Anpassung der Komponenten Generator und Batterie sowie die Entwicklung und Integration der Betriebsstrategie. Sie betragen bei Variante 1 ca. 20 % der Mehrkosten für die Systemvariante 6. Die reduzierten Kosten für den Kraftstoffeinsatz beschreiben den finanziellen Vorteil des Kunden durch das verbrauchsreduzierte System. Der Wert für Variante 1 beträgt hier anteilig 34 % der Variante 6.

Die Amortisationsdauer ergibt sich aus dem Quotienten der beiden Kostenverläufe. Variante 2 schneidet hier am besten ab. Sie hat sich bereits nach 38 % der Zeitdauer, die eine Kunde für Variante 6 benötigen würde, amortisiert.

Der Vorteil von Variante 2 liegt darin begründet, dass hier bereits mit dem vorhandenen Batteriespeicher in Verbindung mit einer effizienten Betriebsstrategie eine Kraftstoffersparnis erzielt werden kann. So muss die Batterietechnologie nicht verändert werden, was zusätzliche Kosten erspart.

Natürlich erreicht der Kunde mit der Variante 2, die für ihn heute die wirtschaftlichste Variante darstellt, auch nur 63 % der Kraftstoffersparnis, die er mit Variante 6 erreichen könnte.

### 6.1.4 Fazit: Systembetrachtungen und -vergleiche

Die *Bewertung eines Rekuperationssystems* mit Hilfe der stochastischen Methodik resultiert in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung über die erzielbare Kraftstoffeinsparung. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der neuen Betriebspunkte des Generators nach Abbildung 6.5 zeigen anschaulich, dass eine Rekuperationsstrategie in Kombination mit für sie günstigen Fahrprofilen zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs führen kann.

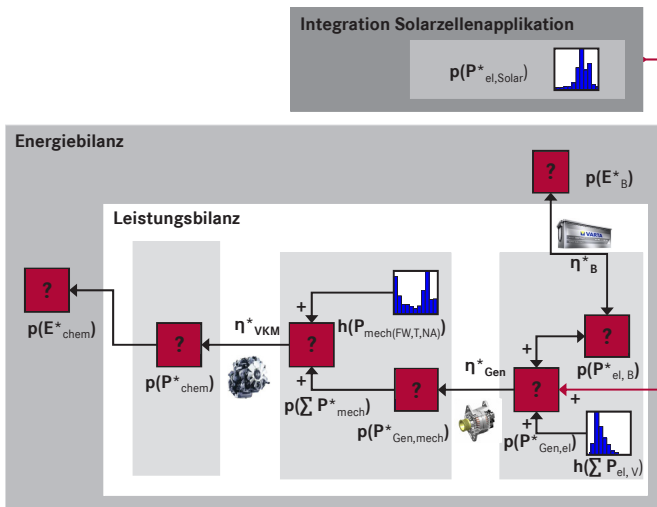
Eine zeitbasierte Simulation benötigt eine zeitlich vorgegebene Bewegungstrajektorie des Fahrzeugs, um mit Hilfe dieses Fahrprofils die vorgeschlagene Maßnahme bewerten zu können. Für jedes zeitbasierte Fahrprofil ist die Auftretenshäufigkeit beim Kunden zu klären und damit ihre Relevanz für den Auslegungs- und Bewertungsfall. Um alle relevanten Kunden bewerten zu wollen, müsste man ebenfalls ihre zeitlichen Streckenverläufe in der Simulation abbilden und anschließend den Kraftstoffverbrauch berechnen, was zu einem sehr hohen Aufwand führt.

Auf der anderen Seite werden mit dem stochastischen Ansatz alle möglichen Kombinationen zugelassen, es ist aber nicht bekannt, ob diese Kombinationen in der Realität wirklich auftreten können. Daher muss abgeschätzt werden, wie groß die Fehler bei der hier verwendeten Rechnung mit Verteilungen sind. Da hier von einer stochastischen Unabhängigkeit ausgegangen wird, die in der Realität nicht gegeben ist, erhöht sich der Fehlereinfluss. Im folgenden Kapitel soll aus diesem Grund eine Fehlerabschätzung durchgeführt werden.

## 6.2 Solarzellenintegration

Die *Nutzung solarer Energie* ist eine Maßnahme zur Kraftstoffverbrauchsreduktion durch die Nutzung einer externen Energiequelle. Für die Berechnung der Verbrauchseinsparung ist hierbei noch viel stärker auf die Randbedingungen zu achten, als bei Maßnahmen, die den Energiefluss innerhalb der Fahrzeugsystemgrenze steuern, da die Ersparnis sehr stark von der momentanen Sonneneinstrahlung und der Verschattung des Fahrzeugs abhängt.

Der *Vorteil* der stochastischen Berechnungsmethodik liegt darin, dass mit Hilfe eines Simulationsdurchlaufs der gewünschte Bewertungsumfang simuliert werden kann, indem die Merkmalswerte eines ganzen Jahres sowohl aus Sicht der Leistungs- als auch der Energiebilanz betrachtet werden können. Möchte man bewusst den Einsatz des Fahrzeugs auf die Tagfahrt und Fahrten im Sommer beschränken, kann dies mit Hilfe der Reduktion der Merkmalswerte der Sonneneinstrahlung um die Nacht- und Winteranteile geschehen.



**Abb. 6.9:** Integration einer Solarzelle mit priorisierter Abgabe elektrischer Leistung

Die *Integration einer Solarzelle* erfolgt nach Abbildung 6.9 als weitere Energiequelle zum Generator und zu der Batterie. Auf der elektrischen Seite des Generators berechnet sich seine zu wandelnde elektrische Leistung aus folgender Gleichung:

$$p(P_{\text{Gen,el}}^*) = -p(P_{\text{el,B}}^*) - h(\sum P_{\text{el,V}}) - p(P_{\text{el,Solar}}^*) \quad (6.2)$$

Die Leistung der Solarzelle berechnet sich aus der Globalstrahlung  $G$ , der Fläche der Solarzellen  $A_{\text{Solar}}$ , dem Wirkungsgrad der Solarzellen und der Orientierung der Solarzellenfläche im Raum. Zur Vereinfachung der

Berechnung werden die letzten beiden Eigenschaften zu einem Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{Solar}}$  zusammengefasst.

$$P_{\text{el,Solar}}^* = G \cdot A_{\text{Solar}} \cdot \eta_{\text{Solar}} \quad (6.3)$$

Für den Fall der teilweisen oder vollständigen Verschattung der Solarzellen ist ein zusätzlicher Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Verschattung}}$  vorzuhalten, der die solare Leistung entsprechend reduziert.

Die *Betriebsstrategie* sieht vor, die elektrische Leistung bevorzugt aus der Solarzelle zu entnehmen. Ist diese Leistung nicht ausreichend, wird sie dem Generator entnommen. Bei erneuter Nichterfüllung der Leistungsbilanz wird die elektrische Energie der Batterie entnommen. Bei Fahrzeugstillstand entfällt die Energiequelle Generator, so dass unter Versorgung der elektrischen Verbraucher die Batterie geladen oder entladen wird.

## 6.2.1 Energieeinsparung

Die *Basis der Berechnung* stellt die Globalstrahlung in Deutschland nach Abbildung 6.10 dar [121]. Unter Anwendung von Gleichung (6.3) kann daraus eine Häufigkeitsverteilung der elektrischen Solarleistung  $p(P_{\text{el,Solar}}^*)$  erstellt werden. Typische durchschnittliche Werte für den Wirkungsgrad heutzutage verfügbarer gewichtsarmer Dünnschichtsolarzellen betragen  $\eta_{\text{Solar}} = 14\%$ . Die Fläche der Solarzellenapplikation kann später als freier Parameter für die Systemvariationen und Optimierungsansätze dienen.

Das Verhalten der elektrischen Verbraucher wird aus der Häufigkeitsverteilung seiner auftretenden Leistungen nach Abbildung 5.7 definiert. Die Leistungsverteilung des Generators resultiert im ersten Schritt aus der Subtraktion der Häufigkeitsverteilungen der Verbraucher- sowie der Solarleistung.

$$p(P_{\text{Gen,el}}^*) = -h\left(\sum P_{\text{el,V}}\right) - p(P_{\text{el,Solar}}^*) \quad (6.4)$$

Da der Generator hierbei ein unidirektionaler Energiewandler ist, werden seine Wahrscheinlichkeiten mit negativer Generatorleistung  $p_i(P_{\text{Gen,el}}^* \mid P_{\text{Gen,el}}^* \leq 0)$  zu der Wahrscheinlichkeit der Nullleistung  $p(P_{\text{Gen,el}}^* \mid P_{\text{Gen,el}}^* = 0)$  addiert. Es gilt:

$$p(P_{\text{Gen,el}}^* \mid P_{\text{Gen,el}}^* = 0) = \sum_{i=1}^n p_i(P_{\text{Gen,el}}^* \mid P_{\text{Gen,el}}^* \leq 0) \quad (6.5)$$

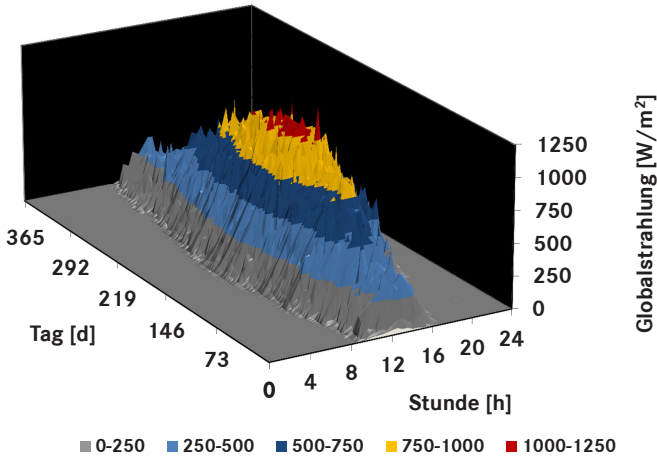


Abb. 6.10: Globalstrahlung in Deutschland [121]

Im nächsten Schritt ergibt sich die Leistungsverteilung der Batterie zu

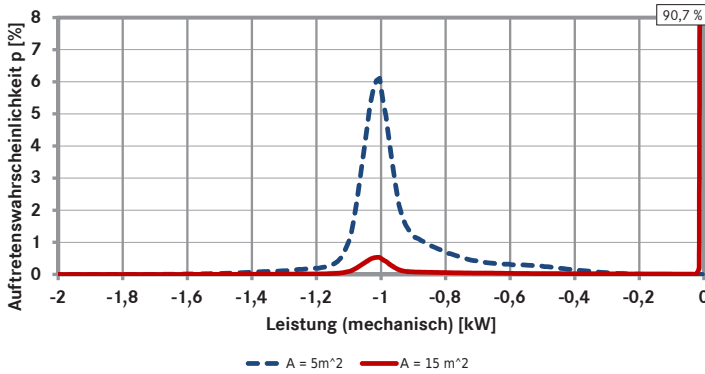
$$p(P_{\text{el,B}}^*) = -p(P_{\text{el,Solar}}^*) - h(\sum P_{\text{el,V}}) - p(P_{\text{Gen,el}}^*) \quad (6.6)$$

Für die *Vorgehensweise* zur Wahrscheinlichkeitsberechnung der Generatorleistung  $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$  unter der Bedingung, dass die Energiebilanz des Batteriespeichers erfüllt sein muss, sei auf Kapitel 5.3 verwiesen.

In der *Wahrscheinlichkeitsverteilung* der mechanischen Generatorleistung ergibt sich nach Abbildung 6.11 bereits mit einer Solarfläche von  $A_{\text{Solar}} = 5 \text{ m}^2$  eine Reduktion der aufzuwendenden mechanischen Energie. Eine Erhöhung der Solarzellenfläche auf  $A_{\text{Solar}} = 15 \text{ m}^2$  reduziert weiter die aufzubringende mechanische Energieversorgung des Generators. Da das System mit der größeren Fläche hauptsächlich den Energiebedarf der elektrischen Verbraucher decken kann, ergibt sich hier ein hoher Leerlaufanteil des Generators.

## 6.2.2 Amortisationsdauer

So verlockend eine mögliche Kraftstoffersparnis durch ein Solarzellensystem aufgrund seiner einfachen Integration auf ein Nutzfahrzeug ist, so dürfen nicht nur seine absolute oder relative Energieeinsparung, sondern



**Abb. 6.11:** Aufgenommene mechanische Leistung des Generators in Abhängigkeit der Solarfläche, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{Gen, mech}_k}^* = 0,01 \text{ kW}$ , nach [2]

auch seine zusätzlich aufzuwendenden Systemkosten betrachtet werden. Eine Abbildung der Systemkosten führt dazu, dass aus Kundensicht eine Amortisationsrechnung durchgeführt werden kann.

Für die *Amortisationsrechnung* muss ein typisches Kundenprofil dargestellt werden. Es gilt folgende Anforderungen zu definieren:

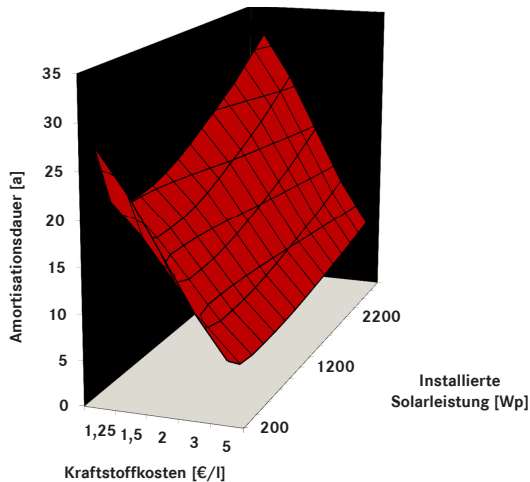
- „Fahrzeugkonfiguration“, „Geschwindigkeits-/Fahrprofil“, „Anzahl Start/Stop-Vorgänge“, „Grundstrombedarf“, „Zeitanteile von Fahrbetrieb, Beladungsvorgängen und Ruhephasen“, „Kosten der Solarzellenkonfiguration“.

Daraus sind folgende *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* zu berechnen:

- „Leistung/Energie Verbraucher, Generator, Solarzelle und Batterie“, „Kraftstoffverbrauchsreduktion“, „Erforderliche Fahrstrecke bis zur Amortisation“, „Erforderliche Fahrzeit bis zur Amortisation“.

In Abbildung 6.12 ist die *Amortisationsdauer* eines Solarzellensystems in Abhängigkeit der Kraftstoffkosten und der installierten Solarleistung aufgetragen. Dabei werden Kosten von vier Euro pro  $W_p$  (Watt Peak — abgegebene elektrische Leistung von Solarzellen unter Standard-Testbedingungen (STC)—) angesetzt. Die Darstellung zeigt sehr deutlich, dass diese Maßnahme für die meisten der potenziellen Kunden unter den gegebenen Randbedingungen nicht wirtschaftlich sein wird, da die Amortisationsdauer bis zu 35 Jahre betragen kann. Die Einführung von Strafzahlungen





**Abb. 6.12:** Amortisationsdauer eines Niedervolt-Solarsystems

für hohe Verbrauchsemissionen könnte diese wirtschaftliche Betrachtung verändern.

### 6.2.3 Fazit: Integration streuender Umgebungsgrößen

Die tatsächlich auftretenden Leistungen einer Solaranlage streuen aufgrund der Vielzahl auftretender Fahrzeugbetriebszustände in Kombination mit einer Vielzahl auftretender Witterungsbedingungen in einem Band. Dieses wird mit der stochastischen Simulation als Wahrscheinlichkeitsverteilung realitätsnah beschrieben. Eine zeitbasierte Simulation hingegen wird entweder einen ganz spezifischen Vorteil aufzeigen, der zu einer bestimmten Einzelfahrt bei ganz speziellen Witterungsverhältnissen gehört oder im besten Fall den Vorteil, der zu einer ganz spezifischen Fahrt und zu mittleren Witterungsbedingungen gehört.

Soll ein konkreter Streckenabschnitt mit definierten Strahlungsbedingungen simuliert werden, besitzt das stochastische Verfahren Nachteile, da es nach wie vor die Merkmale zufällig kombiniert und von einer stochastischen Unabhängigkeit der Merkmale ausgeht. Die Aufgabenstellung für eine sinnvolle Anwendung der stochastischen Simulation muss hier die Ermittlung eines Ergebnisses für eine größere Kundenanzahl mit vielen Fahrten über einen längeren Zeitraum sein.

## 6.3 Volumenstromreduziertes Lenksystem

Ein *Stellhebel* zur Reduktion der Leerlaufverluste, die während der Energie wandlung und -übertragung von mechanischer Energie in die hydraulische Energieform entstehen, ist die situationsabhängige Reduktion des hydraulischen Volumenstroms [132]. Mit Hilfe der Simulationsmethodik sollen an dieser Stelle Systemvariationen untersucht werden, die nach den folgenden Betriebsstrategien arbeiten:

- Reduktion des Volumenstroms während der Geradeausfahrt
- Lenkradwinkelabhängige Kompensation der hydraulischen durch eine elektromotorische Lenkunterstützung

Für die Leistungsbilanz des Lenksystems gelten die folgenden Zusammenhänge. Die hydraulische Leistung  $P_{\text{hydr}}$  berechnet sich aus dem Produkt der auftretenden Druckdifferenz an der Lenkhilfpumpe  $\Delta p$  und dem motordrehzahlabhängigen Volumenstrom  $\dot{V}$ . Die am Eingang des hydraulischen Systems von diesem aufgenommene mechanische Leistung  $P_{\text{mech,hydr}}$  ergibt sich aus der Division der hydraulischen Leistung  $P_{\text{hydr}}$  durch den Wirkungsgrad  $\eta_{\text{LHP}}$  des jeweiligen Betriebspunkts der Lenkhilfpumpe.

$$P_{\text{hydr}} = -\Delta p \cdot \dot{V} \quad (6.7)$$

$$P_{\text{mech,hydr}} = \frac{-P_{\text{hydr}}}{\eta_{\text{LHP}}} \quad (6.8)$$

Für die Berechnung des Kraftstoffesatzes für das Ausgangssystem und die Systemvarianten wird eine *Häufigkeitsverteilung* des Differenzdrucks an der Lenkhilfpumpe  $h(p_{\text{LHP}})$  und das Wirkungsgradkennfeld der Lenkhilfpumpe verwendet.

### 6.3.1 Volumenstromreduktion bei Geradeausfahrt

Die hier vorgeschlagene Maßnahme zur Verbrauchseinsparung sieht vor, den *Volumenstrom*  $\dot{V}$  bei Geradeausfahrt auf den Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{red}}$  zu reduzieren. Dies wird umgesetzt, sobald die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  größer als die Geschwindigkeit  $v_{\text{grenz}}$  ist. Die Geschwindigkeitsschwelle wird deswegen verwendet, weil die Lenkkraftunterstützung mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit abnimmt. Sie kann in Abhängigkeit der Lenkungsauslegung definiert werden.

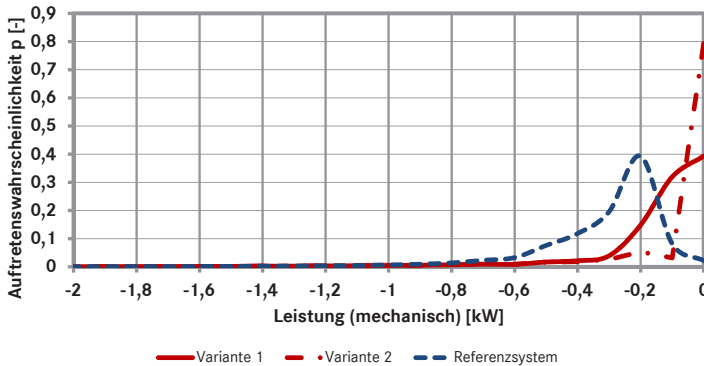
Im betrachteten hydraulischen System liegt in jedem Fall, selbst unter Anwendung des technisch minimal möglichen Volumenstroms von  $\dot{V}_{\min} = 41/\text{min}$ , eine turbulente Strömung vor [69]. Somit kann nach [120] zwischen Druckabfall  $\Delta p$  und der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit  $(\Delta \dot{V})^2$  ein näherungsweise quadratischer Zusammenhang angenommen werden.

$$\Delta p \sim (\Delta \dot{V})^2 \quad (6.9)$$

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Druckdifferenz an der Lenkhilfpumpe des neuen Systems  $p(p_{\text{LHP}}^*)$  setzt sich nun aus zwei Anteilen zusammen. Bei Fahrgeschwindigkeiten, die kleiner als die Grenzggeschwindigkeit  $v_{\text{grenz}}$  sind, entsprechen die Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeitsverteilung  $h(p_{\text{LHP}})$  im Referenzsystem S. Bei den Häufigkeitsanteilen, die bei Geschwindigkeiten  $v \geq v_{\text{grenz}}$  auftreten, wird der jeweilige Wert des Drucks mit dem Quotienten der Volumenströme  $(\frac{\dot{V}_{\text{red}}}{\dot{V}})^2$  multipliziert.

$$p(p_{\text{LHP}}^* | p_{\text{LHP}}^*(v \geq v_{\text{grenz}})) = h((\frac{\dot{V}_{\text{red}}}{\dot{V}})^2 \cdot p_{\text{LHP}} | p_{\text{LHP}}(v \geq v_{\text{grenz}})) \quad (6.10)$$

$$p(p_{\text{LHP}}^* | p_{\text{LHP}}^*(v < v_{\text{grenz}})) = h(p_{\text{LHP}} | p_{\text{LHP}}(v < v_{\text{grenz}})) \quad (6.11)$$



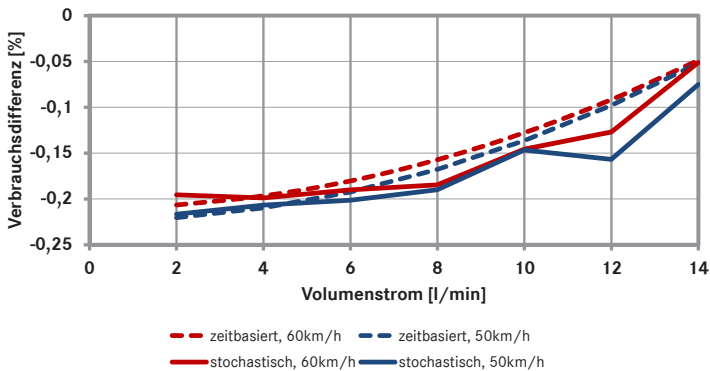
**Abb. 6.13:** Mechanische Leistungen der Lenkhilfpumpe, Klassenbreite  $\Delta P_{\text{LHP,mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$ , nach [1]

Die neuverteilte Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistung der Lenkhilfpumpe berechnet sich über ein Kennfeld, dessen Eingangswerte die Verteilungen des Gegendrucks und der Drehzahl sind:

$$p(P_{\text{mech,LHP}}^*) = p(p(p_{\text{LHP}}^*), h(n_{\text{LHP}})) \quad (6.12)$$

In Abbildung 6.13 sind die *Lenkleistungen* für eine Volumenstromreduktion ab einer Grenzgeschwindigkeit  $v_{\text{Grenz}} = 50 \text{ km/h}$  abgebildet. Systemvariante 1 reduziert den Volumenstrom auf einen Wert von  $\dot{V}_{\text{min},1} = 101/\text{min}$ , Systemvariante 2 auf einen Wert von  $\dot{V}_{\text{min},2} = 41/\text{min}$ . Darüber hinaus ist die Häufigkeitsverteilung des Referenzfalls zu sehen.

In Abbildung 6.14 ist die *Systembewertung* unter Variation von Grenzgeschwindigkeit und Zielvolumenstrom zu sehen. Die Simulation wurde analog zum Vorgehen in Kapitel 6.1.2 sowohl mit Hilfe der zeitbasierten als auch der zeitunabhängigen Simulationsmethodik durchgeführt.



**Abb. 6.14:** Kraftstoffverbrauchs-differenzen durch Reduktion des Volumenstroms bei verschiedenen Grenzgeschwindigkeiten unter Bewertung durch verschiedene Simulationsverfahren, linearer Zusammenhang basierend auf den Stützstellen der Simulation, nach [1]

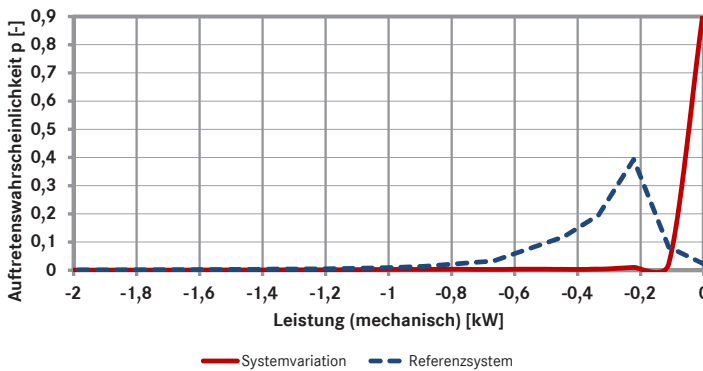
Wie im Verlauf der Kurven zu sehen ist, bewegt sich die Verbrauchsreduktion in der zeitbasierten Simulation beider Kurven in einer Korrelation zur Veränderung des Volumenstroms, während die stochastische Bewertungsmethodik hier bei geringerer Reduktion des Volumenstroms eine deutlich breitere Streuung ergibt. Die Ursachen für diese Abweichungen werden in Kapitel 7 diskutiert.

### 6.3.2 Elektromotorische Lenkunterstützung

Bei diesem Konzept ist am Lenkgetriebe ein *zusätzlicher Elektromotor* angebracht. Während der Geradeausfahrt mit Lenkradwinkeln  $-20^\circ < \phi_{LRW} < +20^\circ$  soll laut der neuen Betriebsstrategie die Lenkhilfepumpe keinen Volumenstrom fördern. Die notwendige Lenkunterstützung erzeugt in diesem Fall der Elektromotor.

Unter Anwendung der Methodik sind hierbei zwei Schritte notwendig. Der erste berechnet die Wahrscheinlichkeitsverteilung der reduzierten mechanischen Aufnahmeleistung an der Lenkhilfepumpe. Der zweite Schritt addiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Unterstützungsleistung am Lenkgetriebe zur elektrischen Endleistung aller Verbraucher. Für das hydraulische System gilt:

$$p(P_{\text{mech,LHP}} \mid P_{\text{mech,LHP}} = 0) = \sum_{i=1}^n h_i(P_{\text{mech,LHP}} \mid P_{\text{mech,LHP}}(-20^\circ < \phi_{LRW} < +20^\circ)) \quad (6.13)$$



**Abb. 6.15:** Resultierende mechanisch aufgenommene Leistung der hydraulischen Lenkhilfe nach Substitution durch elektrische Lenkkraftunterstützung für  $-20^\circ < \phi_{LW} < +20^\circ$ , Klassenbreite  $\Delta P_{LHP, \text{mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$ , nach [1]

In Verbindung mit der weiteren Vorgehensweise aus Kapitel 6.3.1 ergibt sich nach Abbildung 6.15 die Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistung der Lenkhilfepumpe. Die noch zu verrichtende mechanische Leistung über die Lenkhilfepumpe ist verschwindend gering, so dass hier nahezu das maximale Verbrauchspotenzial erreicht werden kann.

Um die gleiche Nutzleistung an der Lenkung zu erhalten, muss die verbleibende Leistung aus elektrischer Energie bereitgestellt werden. Es gelten hier folgende Zusammenhänge zur Berechnung der notwendigen mechanischen Leistungen durch die elektrische Lenkunterstützung  $P_{\text{mech}(\text{el}),\text{LG}}^*$ :

$$p(P_{\text{mech}(\text{el}),\text{LG}}^*) = h(P_{\text{mech},\text{LG}} \mid P_{\text{mech},\text{LG}}(-20^\circ < \phi_{\text{LW}} < +20^\circ)) \quad (6.14)$$

Eine Berechnung der *Kraftstoffpotenziale* ergibt eine mittlere Ersparnis von 0,1 % mit einer geringen Streuung in den positiven und den negativen prozentualen Anteilen der Verbrauchersparnis. Dieses Ergebnis war abzusehen, da die Wirkungsgradkette der Bereitstellung elektrischer Energie in den Punkten der Geradeausfahrt ähnlich deren der hydraulischen Energie ist.

### 6.3.3 Fazit: Ereignisbedingte Leistungsreduktion

Die Unterschiede zwischen den Werten für die erzielbare Kraftstoffeinsparung, die mit den zwei verschiedenen Simulationsmethoden berechnet wurden, sind erwartungsgemäß gering. Dies ist darin begründet, dass von der neuen Betriebsstrategie kaum Auswirkungen auf weitere Systeme erfolgen. Sobald ein Betriebspunkt erreicht ist, wird eine Leistung reduziert. Daher ergeben sich geringe Unterschiede im Resultat der Simulation, obwohl eine Streuung in den stochastischen Berechnungsergebnissen vorhanden ist.

Der Vorteil der stochastischen Methodik besteht hierbei darin, mit annehmbarer Genauigkeitsreduktion in kurzer Simulationszeit eine große Anzahl von Eingangsgrößen zu bearbeiten. Diese Genauigkeitsreduktion ist durch die Annahme stochastischer Unabhängigkeit begründet, die in manchen Fällen nur eingeschränkt richtig ist.

## 6.4 Klimatisierungskonzepte

Das *Klimasystem eines Nutzfahrzeugs* sorgt sowohl für die Temperaturkonditionierung des Innenraums als auch für die Verbesserung der Luftgüte, die durch ihre Feuchte und ihren CO<sub>2</sub>-Gehalt bestimmt ist. Für die Konditionierung dieser Parameter kann die Betriebsstrategie des Klimasystems den Klimakompressor über eine Magnetkupplung entkoppeln bzw. mit dem mechanischen Riementrieb verbinden. An einem sonnigen Tag mit durchschnittlichen Außentemperaturen von 24° C benötigt der Klimakompressor

eine durchschnittliche zeitliche Einschaltdauer von 28 % zur Konditionierung des Innenraums. Dies entspricht einer durchschnittlich abzuführenden Wärmeleistung von 2,1 kW, die permanent durch Wärmestrahlung und Konvektion eingebracht wird.

Die *geringe zeitliche Einschaltdauer* lässt hier einen großen Spielraum für die Effizienzsteigerung durch die Integration einer Betriebsstrategie, die die Zuschaltpunkte des Klimakompressors zeitlich verschiebt. In Abhängigkeit der Motordrehzahl ist das Klimasystem in der Lage, thermische Leistungen von bis zu 8 kW abzuführen.

Für die *simple Integration* einer Betriebsstrategie, die die Einschalt Dauern des Klimakompressors in den Schubphasen bevorzugt, wird das Fahrerhaus als bereits vorhandener thermischer Speicher verwendet. Um eine Verschiebung des Betriebszustandes innerhalb eines Temperaturbereichs, den der Fahrer akzeptiert, zu ermöglichen, wird in den Schubphasen eine um 2 K niedrigere Innenraumtemperatur zugelassen. In den Zugphasen darf die Temperatur um maximal 2 K steigen.

Die *Modellierung des Fahrerhauses* geschieht durch dessen Annahme als luftgefüllter Raum mit einem Volumen  $V_F$  von  $7,5 \text{ m}^3$ . Die spezifische Wärmekapazität für Luft  $c_{p,\text{Luft}}$  ist nach [124] mit  $1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  unter Normbedingungen ( $T_{\text{Norm}} = 0^\circ \text{C}$ ) angenommen. Da die spezifische Wärmekapazität abhängig von der Temperatur ist, handelt es sich hierbei um eine Näherung. Betrachtet man ausschließlich die Speicherkapazität durch die Raumluft, resultiert dies in einer konservativen Abschätzung des Potenzials, denn das Interieur der Kabine dient im Realfall ebenfalls als thermischer Speicher. Im Zeitbereich ergibt sich durch die ein- und abgehende thermische Leistung  $P_{\text{th}}$  der zeitliche Temperaturgradient  $dT/dt$  in Abhängigkeit der spezifischen Gaskonstante für Luft  $R_{s,\text{Luft}}$  sowie dem Druck  $p$  und der Temperatur  $T$  von

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{\text{th}} \cdot R_{s,\text{Luft}} \cdot T}{c_{p,\text{Luft, Norm}} \cdot p \cdot V_F} \quad (6.15)$$

Zur Vereinfachung der folgenden Berechnungsvorgänge werden einige Näherungen verwendet. Für den Druck  $p$  wird näherungsweise der Druck unter Normbedingungen ( $p \approx p_{\text{Norm}} = 1,01325 \text{ bar}$  [38]) herangezogen. Als Temperatur  $T$  wird die mittlere Temperatur des Innenraums verwendet ( $T \approx \bar{T}_I = 21^\circ \text{C}$ ). Dadurch ergibt sich folgende Näherung.

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{P_{\text{th}} \cdot R_{s,\text{Luft}} \cdot \bar{T}_I}{c_{p,\text{Luft, Norm}} \cdot p_{\text{Norm}} \cdot V_F} \quad (6.16)$$

Diese Gleichung gilt nur näherungsweise, da die Stoffmenge bei einer isobaren Erwärmung in der Kabine nicht konstant ist. Bei Temperaturerhöhung bleibt der Druck des Gases konstant, das Volumen dementsprechend nicht. Da aber das Innenvolumen der Kabine konstant bleibt, wird Luftmasse von innen nach außen verdrängt. Die dabei zu leistende Volumenarbeit wird durch die Verwendung der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  berücksichtigt.

Überträgt man diesen Zusammenhang auf den *zeitdiskreten Wertebereich*, so ergibt sich für die Temperaturänderung  $\Delta T$  näherungsweise ein linearer Zusammenhang zur thermischen Leistung  $P_{th}$  und der Zeitdauer  $\Delta t$ . Die als konstant angenommenen Werte, die die Eigenschaften der Raumluft beschreiben, können dabei zu einem Faktor  $k_{Luft}$  zusammengefasst werden.

$$k_{Luft} = \frac{R_{s,Luft} \cdot \bar{T}_I}{c_{p,Luft, Norm} \cdot p_{Norm} \cdot V_F} \quad (6.17)$$

$$\Delta T = k_{Luft} \cdot P_{th} \cdot \Delta t \quad (6.18)$$

Beim Übergang von einer infinitesimalen Differenz zu einer endlichen Differenz sind die Größen in Gleichung gemittelte Größen über  $\Delta t$ . Hier geht die Näherung ein,  $k$  als Konstante zu betrachten. Weiterhin ist  $P_{th}$  als konstant über  $\Delta t$  zu betrachten.

Nun kann eine Anpassung der Zusammenhänge auf den stochastischen Berechnungsansatz erfolgen. Aus der Wissensbasis sind die relativen Häufigkeiten der Zeitdauern einer jeweiligen Zug- oder Schubphase bekannt. Daher gilt für die Zeitdauer einer vorliegenden Phase (Zug oder Schub) ebenfalls der Zusammenhang nach Gleichung (6.18).

Für eine Häufigkeitsverteilung einer Zug- oder einer Schubphase ergeben sich in Verbindung mit der relativen Häufigkeitsverteilung der auftretenden thermischen Leistung die folgenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Temperaturänderung des Innenraums  $p(\Delta T_I^*)$  nach einer Zug- oder Schubphase:

$$p(\Delta T_I^* | \Delta T_I^* = \Delta T_I^*(Zugphase)) = h(k_{Luft} \cdot P_{th}) \cdot h(t_{Zugphase}) \quad (6.19)$$

$$p(\Delta T_I^* | \Delta T_I^* = \Delta T_I^*(Schubphase)) = h(k_{Luft} \cdot P_{th}) \cdot h(t_{Schubphase}) \quad (6.20)$$



Mit diesem Zusammenhang kann analog zur *Speicherstandsbestimmung* der Batterie (vgl. Kapitel 5.3) eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von einer Temperaturänderung im Innenraum  $p(\Delta T_I^*)$  berechnet werden.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der thermischen Leistung  $p(P_{th})$  folgt hier den Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung durch die Mechanismen Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Es gilt:

$$p(P_{th}) = h(P_{th,Konvektion}) + h(P_{th,Wärmeleitung}) + h(P_{th,Wärmestrahlung}) \quad (6.21)$$

In Analogie zur Rekuperation im elektrischen System soll im ersten Schritt der Klimakompressor ausschließlich in Schubphasen des Verbrennungsmotors mit maximaler möglicher Leistung das Fahrerhaus kühlen. Mit diesem Ansatz wird zunächst eine ideale Verteilung der Kompressoreinschaltdauern und damit der abführbaren thermischen Leistung durch das Klimasystem (AC)  $p(P_{th,AC}^*)$  gebildet. Dieser Leistungsverteilung steht die thermische Leistung  $h(P_{th})$  gegenüber, die das System abführen muss. Als Kriterium für die Temperaturbilanz müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Temperatur im Innenraum muss am Ende der Fahrstrecke mit der Temperatur zu Beginn der Fahrt übereinstimmen ( $T_{I,Ende}^* - T_{I,Beginn}^* = 0$ ).
- Während der Fahrt darf keine Änderung der Innenraumtemperatur den relativen Wert von +/- 2 Kelvin über- bzw. unterschreiten ( $\Delta T_I^* \leq +/- 2 \text{ K}$ )

Berechnet man nun die *Wahrscheinlichkeit der Temperaturabnahme* in den Schubphasen bei maximaler Kompressorleistung sowie die Temperaturzunahme bei entkoppeltem Kompressor in Zugphasen, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Temperaturdeltas nach einer Zug- oder Schubphase  $p(\Delta T_I^*)$  mit

$$p(\Delta T_I^* | \Delta T_I^* = \Delta T_I^*(\text{Zug})) = p(k_{\text{Luft}} \cdot P_{th}) \cdot h(t_{\text{Zugphase}}) \quad (6.22)$$

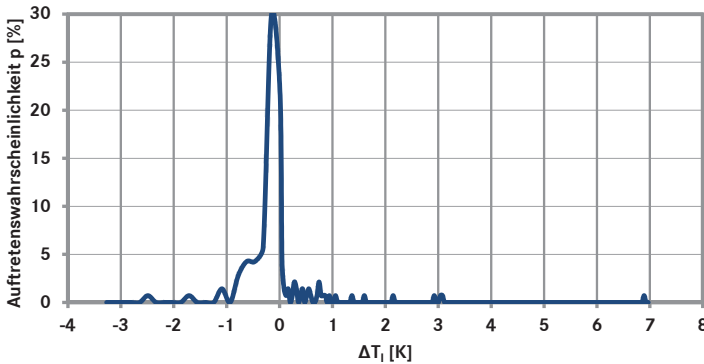
$$p(\Delta T_I^* | \Delta T_I^* = \Delta T_I^*(\text{Schub})) = (p(k_{\text{Luft}} \cdot P_{th,AC}^*) + p(k_{\text{Luft}} \cdot P_{th})) \cdot h(t_{\text{Schubphase}}) \quad (6.23)$$

Um die Temperatur der Luft im Fahrerhaus um 1 Kelvin zu erhöhen, wird die folgende Energiemenge benötigt:

$$\begin{aligned}
 E_F(\Delta T = 1 \text{ K}) &= m_F \cdot c_{p,\text{Luft}} \cdot \Delta T = V_F \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot c_{p,\text{Luft}} \cdot \Delta T \\
 &= 7,5 \text{ m}^3 \cdot 1,293 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 1 \text{ K} \\
 &= 9,75 \text{ kJ}
 \end{aligned} \tag{6.24}$$

Es ergibt sich die *Wahrscheinlichkeitsverteilung der Temperaturdifferenz* des Innenraums nach jeder Phase (Zug- oder Schubphase) nach Abbildung 6.16. Der Mittelwert der Temperaturdifferenz pro Phase beträgt dabei

$$\Delta \bar{T}_I^* = 0,7 \text{ K} \tag{6.25}$$



**Abb. 6.16:** Temperaturdifferenz des Innenraums pro Betriebsphase (Zug- oder Schubphase) aufgrund der rekuperativen Zuschaltung des Klimakompressors, Klassenbreite  $\Delta(\Delta T_I^*)_k = 0,05 \text{ K}$

Hierbei ist zu sehen, dass die Temperaturdifferenz pro Betriebsphase mit Ausnahme einiger sehr langer Phasen im Bereich der Vorgabe gehalten werden kann. Allerdings gilt dies für eine moderate Außentemperatur von  $24^\circ \text{C}$ , die nahezu der Solltemperatur der Klimaregelung entspricht. Somit muss in diesem Fall die konvektive Energie sowie die Strahlungsenergie der Sonne abgeführt werden. Der Betrieb des Klimakompressors während dieser Umgebungsbedingungen führt somit zu einer Kraftstoffeinsparung, bei der die Innenraumtemperatur innerhalb der Temperaturgrenzen von 2 Kelvin gehalten werden kann.

Es ist allerdings auch zu sehen, dass bereits an dieser Stelle die Grenze der maximalen Speichermöglichkeit der Luft im Fahrerhaus erreicht ist.

Für die Energiespeicherung bei höheren erzielbaren Leistungen muss daher auf andere Speichertechnologien mit höherer Wärmekapazität und höherer Dichte als Luft zurückgegriffen werden.

### 6.4.1 Fazit: Schnelle Übersicht

Wie dieses Anwendungsbeispiel anschaulich zeigt, ist das stochastische Verfahren dazu geeignet, eine schnelle Aussage über das Verhalten einer Maßnahme bei einer ausgewählten Kundengruppe zu treffen. Es kann weiterhin dargestellt werden, bei wieviel Prozent der betrachteten Kundengruppe diese Maßnahme ein geringes Potenzial aufweist bzw. von welcher Kundengruppe Reklamationen hinsichtlich des Komforts durch diese Betriebsstrategie zu erwarten wäre. Unter Anwendung einer zeitbasierten Simulation müssten zu dieser Bewertung einige Referenzfälle verschiedener Kunden herangezogen werden, um ein ähnliches Bewertungsbild zu erlangen.

Natürlich gelten auch hierbei wieder Einschränkungen. Die Methode ist aufgrund des Rechnens mit relativen Häufigkeiten, die nicht stochastisch unabhängig sind, fehlerbehaftet, denn es werden alle möglichen Kombinationen zugelassen, von denen nicht bekannt ist, ob diese alle in der Realität auftreten können. Für die Interpretation der Randklassen ist es erforderlich, die Größe der Fehler zu kennen.

Für eine Eingrenzung der Fehler sei auf das nächste Kapitel verwiesen.

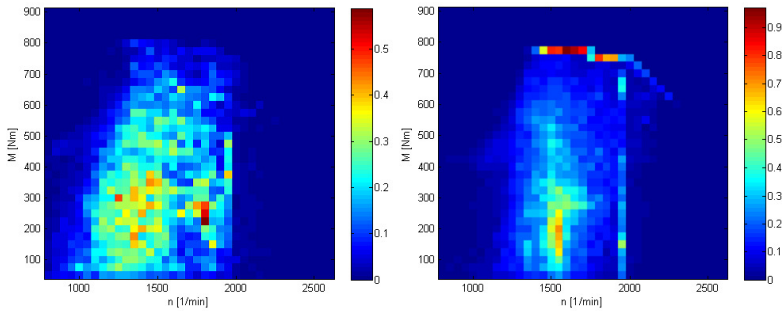
## 6.5 Hybrider Antriebsstrang

Die *Hybridisierung des Antriebsstrangs* setzt an zwei Stellhebeln der Wirkungsgradoptimierung an. Sie verbessert auf der einen Seite im Zugbetrieb den Wirkungsgrad der verbrennungsmotorischen Energiewandlung durch eine Betriebspunktverschiebung. Auf der anderen Seite versucht sie, in Phasen mit negativem Antriebsmoment kinetische Energie zu speichern, um sie zu einem späteren Zeitpunkt wieder dem Antriebsstrang zuzuführen.

Dass eine solche Betriebsstrategie im Realfall wirkungsvoll umgesetzt werden kann, zeigt Abbildung 6.17. Hier sind die *Häufigkeitsverteilungen der Betriebszustände* eines Verteilerfahrzeugs mit hybridem Antriebsstrang und einem baugleichen konventionellen Fahrzeug dargestellt. Mit Hilfe der

Mustererkennung sind die Fahraufgaben zuvor als vergleichbar bewertet worden.

Die Häufigkeiten der Momente des konventionellen Fahrzeugs bewegen sich hauptsächlich im Bereich von 200 - 300 Nm. Sie werden überwiegend zum Erfüllen der Transportaufgabe benötigt. Im hybriden Fahrzeug befindet sich ein großer Anteil der Häufigkeiten im Bereich des maximalen Motormoments.



**Abb. 6.17:** Häufigkeit der Betriebspunkte von hybridem (rechts) und konventionellem (links) Nutzfahrzeug [97]

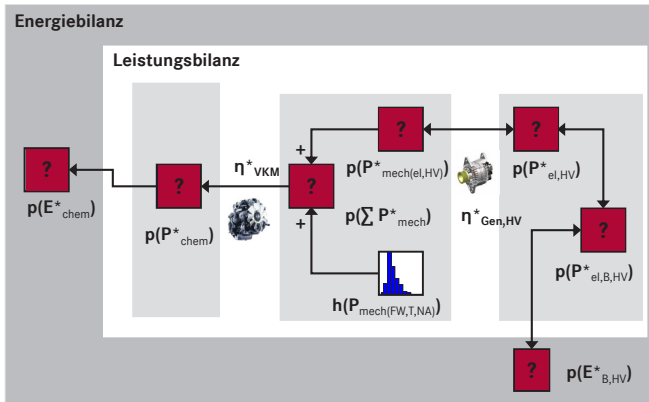
Mit Hilfe der vorgestellten Entwicklungsmethodik können die Fahrzeuge des Flottenversuchs (vgl. Kapitel 4.1.1) unter vergleichbaren Bedingungen bewertet werden. Weiterhin können neue Maßnahmen sowie die Verbesserung der Dimensionierung von Bauteilen und der Betriebsstrategie integriert werden. Es ergeben sich folgende Stellhebel, die einer Bewertung zugeführt werden können [97]:

1. Vergrößerung der Kapazität der Hybridbatterie
2. Erhöhung der maximalen Wandlungsleistung des Elektromotors
3. Integration von Motor-Start/Stop sowie rein elektrisches Anfahren
4. Absenkung des spezifischen Verbrauchs
5. Veränderung des Motorkennfeldes
6. Betriebspunktverschiebung der Zustände auf dem Motorkennfeld

Die Stellhebel 1. und 2. lassen sich analog zur Vorgehensweise des aktiven Generatormanagements berechnen. Der einzige Unterschied hierbei ergibt sich in der bidirektionalen Wandlungsfähigkeit des Generators. Daher wird

dieses Bauteil energetisch in zwei Bauteile aufgeteilt. Eine Teilkomponente gilt so als Energiewandler in das elektrische System, die andere als Energiewandler in den Antriebsstrang. Die Vorgehensweise soll in Kombination mit dem 6. Stellhebel erläutert werden, der einen Betrieb im Bestpunkt des Motors mit seinen veränderten Leistungen  $P_{\text{mech,VKM,opt}}^*$  vorsieht.

Nach Abbildung 6.18 wird an erster Stelle die Häufigkeitsverteilung der für das Hybridsystem nutzbaren mechanischen Leistung während des Zugbetriebs  $p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*)$  berechnet. Die Abkürzung „HV“ steht in diesem Fall für High Voltage und soll der Unterscheidung zwischen elektrischer Leistung des Hochvoltbordnetzes und dem herkömmlichen Niedervoltbordnetz dienen. Die Verteilung  $p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*)$  errechnet sich aus der Differenz



**Abb. 6.18:** Berechnungsvorgang unter Variation der hybriden Antriebsleistung

der Verteilung mechanischer Leistung im Bestpunkt des Verbrennungsmotors und der Verteilung der Leistung für Fahrwiderstände, Trägheiten und Nebenaggregate  $h(P_{\text{mech(FW,T,NA)}})$ . Nach der wirkungsgradbehafteten Energiewandlung in die elektrische Energieform steht anschließend die Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistung  $p(P_{\text{el,HV,Zug}}^*)$  bereit. Es gilt hierbei:

$$p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*) = -p(P_{\text{mech,VKM,opt}}^*(n_{\text{VKM}})) - h(P_{\text{mech(FW,T,NA),Zug}}) \quad (6.26)$$

$$p(P_{\text{el,HV,Zug}}^*) = -p(\eta_{\text{Gen,HV}}^*(n_{\text{Gen,HV}}, T_{\text{Gen,HV}})) \cdot p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*) \quad (6.27)$$

Dabei können ebenfalls negative Leistungen auftreten, da das System theoretisch durch eine Momentenreduktion in einen besseren Betriebszustand geführt werden kann. Die Leistungsbilanz im elektrischen System begrenzt z. B. durch eine geringere Leistungsaufnahme der Batterie den Leistungsfluss der elektrischen Energieform zu  $p(P_{\text{el,HV,Zug}}^*)$ .

In Schubphasen soll erreicht werden, dass mit maximaler Wandlerleistung Energie gewandelt wird. Hierbei gilt:

$$p(P_{\text{el,HV,Schub}}^*) = h(P_{\text{el,HV,max}}(n_{\text{Gen,HV}}, T_{\text{Gen,HV}})) \quad (6.28)$$

Die Leistungsbilanz des elektrischen Systems begrenzt an dieser Stelle ebenfalls den Schubanteil der elektrischen Energiewandlung zu der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(P_{\text{el,HV,Schub}}^*)$ .

Nun soll dem elektrischen System durch gezielte Leistungsabgabe an den Antriebsstrang Energie entnommen werden, um die Leistungsanforderungen der Fahrwiderstände, Trägheiten und Nebenaggregate ( $h(P_{\text{mech(FW,T,NA)}})$ ) durch beide Antriebsquellen zu decken (sog. „Boosten“). Dazu wird die Häufigkeitsverteilung  $p(P_{\text{el,HV,Supp}}^*)$  gebildet. Diese beschreibt die Entnahme elektrischer Leistung aus der Hochvolt-Batterie. Sie ist in den weiteren Berechnungsschritten zur Generierung einer ausgeglichenen Energiebilanz zu berücksichtigen. Zunächst ist die Energieübertragung durch die maximale Wandlerleistung des Elektromotors beschrieben:

$$p(P_{\text{mech,HV,Supp,Zug}}^*) = -p(P_{\text{mech(el,HV,max)}}^*)(n_{\text{E-Mot,HV}}, T_{\text{E-Mot,HV}}, \eta_{\text{E-Mot,HV}}) \quad (6.29)$$

Das *Ziel einer ausgeglichenen Energiebilanz* der Hochvolt-Batterie bestimmt für diesen Anwendungsfall den Berechnungsvorschlag für den nächsten Schritt. Es gilt hierbei die Vorgehensweise nach Kapitel 5.3.2. Im Falle einer positiven Energiebilanz an der Batterie wird beginnend bei der Häufigkeitsklasse mit der minimal auftretenden Leistung der Batterie pro Iterationsschritt jeweils 1 % der relativen Wahrscheinlichkeit in die Klasse der Nullleistung umverteilt. Das Abbruchkriterium ist dabei die Erfüllung der Energiebilanz der Batterie ( $\Delta E_{\text{Speicher}} = 0$ ).

Nach *Erfüllung der Leistungs- und Energiebilanz* berechnet sich die neue Wahrscheinlichkeitsverteilung der verbrennungsmotorischen Leistung zu

$$p(P_{\text{mech,VKM}}^*) = -h(P_{\text{mech(FW,T,NA),Zug}}) - p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*) - p(P_{\text{mech,HV,Supp,Zug}}^*) \quad (6.30)$$

Das Hochvoltsystem kann an dieser Stelle sowohl als Energiequelle  $p(P_{\text{mech,HV,Supp,Zug}}^*)$  als auch als Energiesenke  $p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*)$  eingesetzt werden.

Die Integration des Start-Stopp-Systems als 3. Stellhebel lässt sich durch die Reduktion des Kraftstoffbedarfs während der Betriebspunkte  $h(S_{\text{Leerlauf}})$ , in denen der Motor im Leerlauf betrieben wird, einfach erzielen. Allerdings ist hierbei die benötigte Energie der Nebenverbraucher, die zu diesen Zeitpunkten aus Energiespeichern entnommen wird, den Zug- und Schubphasen hinzuzufügen.

Für Stellhebel 4. wird der Wirkungsgrad des Motorkennfelds konstant um 1 % angehoben. Die Anhebung des Wirkungsgrades in allen Betriebspunkten soll an dieser Stelle dazu dienen, die Ergebnisse beider Simulationsverfahren (zeitbasiert und stochastisch) zu vergleichen. Es gilt

$$\eta_{\text{VKM}}^*(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) = \eta_{\text{VKM}}(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) + 0,01 \quad (6.31)$$

Der Stellhebel 5. sieht eine Verbesserung des Wirkungsgradkennfelds für einen mittleren Betriebspunkt bei der Fahrt vor. Die Verbesserung des Wirkungsgrades wird dafür mit der Funktion  $z$  gewichtet [97]. Die Gewichtungsfunktion entstammt der Auswertung der Betriebspunkte der Kundenfahrerprobung. Sie bildet ein elliptisches Paraboloid, das eine Verbesserung des Wirkungsgrades um den häufigst vorkommenden Betriebspunkt vorsieht. Umgebende Punkte werden allerdings verschlechtert, wodurch das Kennfeld des Motors mehr Profil und höhere Gradienten bekommt.

$$\begin{aligned} z(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) = & 0,97 + ((n_{\text{VKM}} - 1500 \text{ U/min})^2 \\ & + (M_{\text{VKM}} - 238,97)^2) \cdot \frac{1}{14,56} \end{aligned} \quad (6.32)$$

Für den Wirkungsgrad gilt:

$$\eta_{\text{VKM}}^*(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) = (\eta_{\text{VKM}}(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) + 0,02) \cdot z(n_{\text{VKM}}, M_{\text{VKM}}) \quad (6.33)$$

Die Ergebnisse der vier Maßnahmen sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Während sich im Vergleich der stochastischen und zeitbasierten Berechnungsmethoden die Maßnahmen der Wirkungsgradanpassung und des Motor-Start/Stopps nahezu identisch verhalten, fällt das Resultat bei der Lastpunktverschiebung sehr unterschiedlich aus.

| Systemvariation       | Verbrauchsdivergenz |             |
|-----------------------|---------------------|-------------|
|                       | stochastisch        | zeitbasiert |
| Lastpunktverschiebung | -5,3 %              | -4,2 %      |
| Motor-Start/Stop      | -1,7 %              | -1,7 %      |
| Wirkungsgraderhöhung  | -1,1 %              | -1,0 %      |
| Kennfeldanpassung     | -1,2 %              | -1,3 %      |

**Tab. 6.4:** Vergleich der Resultate mit Hilfe stochastischer und zeitbasierter Simulation, Vorgehensweise in Anlehnung an [97]

Dieses Verhalten scheint erklärbar zu sein: Die Verbrauchsreduktion durch das Abschalten des Verbrennungsmotors oder die Verbesserung seiner Wirkungsgrade resultiert aus den Auftretenshäufigkeiten dieser Betriebspunkte, während bei der Lastpunktverschiebung das zeitliche Verhalten von Verbrennungsmotor, Elektromotor und Energiespeicher eine Rolle spielt. Das stochastische Verfahren berücksichtigt dabei alle möglichen Kombinations- und Auftretensfolgen. Das zeitliche Verfahren betrachtet im Gegensatz dazu einen fest vorgegebenen Verlauf, der die selben Merkmale der stochastischen Simulation beinhaltet.

### 6.5.1 Fazit: Auswirkung großer Systemänderungen

Die Bewertung der *Lastpunktverschiebung* zeigt einen großen Unterschied zwischen stochastischem und zeitbasiertem Verfahren. Diese Unterschiede sind aufgrund der verschiedenen Simulationsansätze gegeben: während die zeitbasierte Simulation einen festen Trajektorienverlauf berücksichtigt, baut sich das stochastische Verfahren seine Trajektorie aus Einzelmerkmalen und Systemverhalten zusammen und bildet alle kombinatorisch möglichen Abfolgen ab. Ob diese auch technisch alle möglich sind, ist zunächst nicht bekannt.

Es muss daher abgeschätzt werden, wie groß die Fehler bei der hier verwendeten Rechnung mit Verteilungen sind. Es wird hier von einer stochastischen Unabhängigkeit ausgegangen, die in der Realität nicht gegeben ist. Daher muss untersucht werden, ob diese Kombinationen in der Realität wirklich auftreten können.

Im stochastischen Simulationsverfahren werden Verteilungen erzeugt, die aus gemessenen Häufigkeiten über bestimmte Einsatzfälle gewonnen wurden. Wenn dies die Bandbreite der Kunden abdecken soll, müssen auch die



Messungen von einer repräsentativen Kundenbasis stammen. Selbst wenn das gegeben ist, kommt jedoch hinzu, dass das stochastische Simulationsverfahren durch die Annahme stochastischer Unabhängigkeit der verknüpften Größe zu einer starken Verbreiterung der Verteilungen führt. Diese wird im Allgemeinen nicht identisch sein mit der Streuung der Betriebszustände, wie sie durch verschiedene Nutzer und Umgebungsbedingungen entstehen.

## 6.6 Gezielte Optimierung freier Systemparameter

An dieser Stelle wird die Methodik dazu genutzt, um eine *auslegungsspezifische Optimierung* der Fahrzeuge auf die energetisch oder wirtschaftlich günstigste Variante zu untersuchen. Dazu werden zwei Systemansätze betrachtet.

Für das *erste System* soll der minimale Kraftstoffverbrauch unter Anwendung einer Rekuperationsstrategie ermittelt werden. Dazu kann der Optimierungsalgorithmus die Parameter „Generatorleistung“, „Batteriekapazität“, „Volumen Pneumatikspeicher“ und „Masse Kältespeicher“ innerhalb vorgegebener Grenzen frei verändern.

Im *zweiten System* sind die Komponenten Klimakompressor und Luftpresser elektrifiziert und so vom mechanischen Antriebsstrang entkoppelt. Damit können sie jederzeit innerhalb ihres maximalen Wandlerwirkungsgrades betrieben werden. Zusätzlich besitzt das elektrische System die Möglichkeit der Speicherung wirkungsgradgünstig erworbener Energie in Schubphasen. Die Optimierung soll hier auf Basis der Dimensionierung von Generator und elektrischen Speichern geschehen.

### 6.6.1 Optimale Dimensionierung von Bauteilen

In *Analogie zum aktiven Generatormanagement* (vgl. Kapitel 6.1) sollen neben dem Bordnetz das Klimasystem und der Luftpresser mit der gleichen Betriebsstrategie gesteuert werden. Diese sieht vor, in Phasen negativer Antriebsstrangleistung die Zielenergieform mit maximal möglicher Wandlerleistung zu erzeugen und in den Energiespeichern zu speichern. In Phasen mit positiver Antriebsstrangleistung soll über die sekundären Energiewandler kein Energiefluss stattfinden. Statt dessen erfolgt die Energieversorgung durch die Speicher.

Das *Auslegungskriterium* für einen Energiespeicher sind hierbei die auftretenden Werte von Leistung und Energie in Zug- (Speicher füllen) und in Schubphasen (Speicher leeren). Für eine ausgeglichene Energiebilanz sorgen hier die angepasste Dimensionierung von maximaler Wandlerleistung sowie die Kapazität des Speichers. Wird im Fahrbetrieb die minimale oder maximale Grenze des Speicherstands erreicht, so wechselt die Betriebsstrategie zur konventionellen Betriebsstrategie, die vorsieht, die Energiewandlung bedarfsgerecht in Abhängigkeit der Energieverbraucher durchzuführen.

Für die Auslegung des Pneumatikspeichers ist es wichtig, die Eigenschaften des Luftsystems zu kennen. In Tabelle 6.5 sind die wichtigsten Verbrauchs- und Förderwerte des Systems abgebildet.

| Systemparameter    | Größe  | Einheit        |
|--------------------|--------|----------------|
| Speichervolumen    | 0,125  | m <sup>3</sup> |
| Druckverlust       | 0,0098 | bar/s          |
| Verlustmassenstrom | 0,0018 | kg/s           |
| Druckerhöhung      | 0,0307 | bar/s          |
| Füllmassenstrom    | 0,0055 | kg/s           |

**Tab. 6.5:** Kenngrößen des Pneumatiksystems, nach [103]

Der Druckverlust  $\Delta p$  entspricht unter Anwendung einer ausgeglichenen Massenbilanz im Luftsystem der Druckerhöhung, die durch den Luftkompressor in die Druckbehälter gefördert wird. Die Umrechnung des Druckverlusts in die benötigte Luftmasse kann über die thermische Zustandsgleichung (Gleichung (6.34)) idealer Gase berechnet werden [124].

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad (6.34)$$

Die Energiebilanzierung im Druckspeicher erfolgt hier über den zu- und abfließenden Massenstrom bei einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur. Relevant für die Betriebsstrategie ist allerdings der Verlauf des Systemdrucks  $p$ , dessen obere und untere Grenzen den Arbeitsbereich des Speichers bestimmen. Der Stellhebel für die Optimierung ist hierbei das Speichervolumen  $V$ , das bei jedem Start eines Simulationsdurchlaufs neu vorgegeben wird.

Für das Klimasystem gelten die Annahmen aus Kapitel 6.4. Aufgrund der niedrigen Wärmekapazität des Fahrerhauses wird an dieser Stelle allerdings ein Speicher mit dem Medium Wasser verwendet. Damit ändert sich die Wärmekapazität auf  $c_p = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Der Stellhebel für die Optimierung ist hier die Masse  $m$  des Speichermediums Wasser.

Das Bordnetz ist mit den Eigenschaften aus Kapitel 5.3.2 hinterlegt. Die freien Parameter sind die maximale Leistung des Generators und die Batteriekapazität.

Alle der 4 freien Parameter werden für die Optimierung mit 20 bits pro Parameter codiert. Die Wahrscheinlichkeiten für Kreuzung und Mutation liegen bei 0,6 und 0,01. Pro Generation werden sechs Individuen berechnet. Nach 500 Generationen wird die Berechnung automatisch abgebrochen.

Das Ergebnis mehrerer Optimierungsdurchläufe ist in Tabelle 6.6 dargestellt. Es wird deutlich, dass jeder Optimierungsvorgang ein leicht differierendes Ergebnis bereitstellt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Gradient der Zielfunktion sehr niedrig ist. Es ist somit für den Optimierungsalgorithmus schwer, das Minimum der Funktion zu finden.

| Lfd. Nr. | Generator<br>$P_{el}$ [kW] | Batterie<br>$E$ [kWh] | Druckspeicher<br>$V$ [m <sup>3</sup> ] | Wärmespeicher<br>$W$ [kg] | Differenz<br>$D$ [%] |
|----------|----------------------------|-----------------------|--|---------------------------|----------------------|
| 1        | 6,0                        | 1,3                   | 0,8                                    | 52                        | -1,6                 |
| 2        | 6,5                        | 1,5                   | 0,9                                    | 48                        | -1,7                 |
| 3        | 5,7                        | 1,3                   | 0,9                                    | 44                        | -1,6                 |

**Tab. 6.6:** Kraftstoffverbrauchs­differenz in Abhängigkeit von vier freien Parametern, Vorgehensweise in Anlehnung an [103]

## 6.6.2 Elektrifizierung von Nebenaggregaten

Die Nebenaggregate Klima- und Luftkompressor werden nun unter Ausnutzung der elektrischen Energieform angetrieben. Sie sind dazu nach Abbildung 6.19 vom Riementrieb entkoppelt und damit an keine feste oder variable Drehzahlübersetzung gebunden.

Hierbei besteht nun die Möglichkeit, das aktive Generatormanagement in Verbindung mit einer wesentlich größeren Menge an benötigter elektrischer Endenergie zu betreiben, da die Komponenten nun elektrisch angetrieben werden. Dafür sinkt die mechanische Endenergie bei erfolgreicher Elektrifizierung stärker ab, als die elektrische Endenergie angewachsen ist. Tabelle 6.7 zeigt die Auswirkung der Generator- und Speichergröße auf die Kraftstoffersparnis.

Es ist zu sehen, dass die reine Elektrifizierung der mechanischen Komponenten aufgrund der zusätzlichen Wirkungsgradverluste zunächst in einem



**Abb. 6.19:** Energiepfadvariation durch riemengetriebene und elektrisch angetriebene Nebenaggregate [103]

Mehrverbrauch (0,5 %) resultiert. Die Steigerung von maximal wandelbarer Leistung und speicherbarer Energiemenge des elektrischen Systems führen dazu, dass während Bremsvorgängen kinetische und potentielle Energie des Fahrzeugs zur Energiewandlung und damit zum Laden des Energiespeichers verwendet werden können. Diese Veränderung ergibt ein großes Potential zur Verbrauchseinsparung.

| Lfd. Nr. | Generator<br>$P_{el}$ [kW] | Batterie<br>$E$ [kWh] | Differenz<br>$D$ [%] |
|----------|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1        | 5,1                        | 0,1                   | 0,5                  |
| 2        | 8,0                        | 1                     | -0,1                 |
| 3        | 34,7                       | 2,5                   | -1,6                 |

**Tab. 6.7:** Kraftstoffverbrauchsdifferenz durch Variation von Generatorleistung und Batteriegröße, Vorgehensweise in Anlehnung an [103]

### 6.6.3 Fazit: Automatisierte Optimierung von Systemen

Die *Integration eines Optimierungsalgorithmus* in eine zeitbasierte oder stochastische Simulation ist problemlos möglich, da der Algorithmus selbst einen Simulationsdurchlauf mit freien Parametern anstößt. Während die Optimierung eines Parameters durch Probieren möglich scheint, ist es bei mehreren freien Parametern sinnvoll, dies automatisiert durchführen zu lassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Variation vieler Parameter mehrere Lösungen vorhanden sind, die nahe eines globalen Optimums liegen. Hier ist es sinnvoll, durch Kostenfunktionen Strafterme zu integrieren, um so ein wirtschaftliches Ergebnis zu erhalten. Weitere Restriktionen, z. B. hinsichtlich des Gewichts oder des Bauraums einer Komponente, sind ebenfalls möglich.

## 7 Bewertung des stochastischen Verfahrens

An dieser Stelle wird das stochastische Simulationsverfahren einer *Bewertung* unterzogen. Dazu werden zuerst objektive und danach subjektive Kriterien für die Bewertung einer Längsdynamiksimulation abgeleitet und im späteren Verlauf angewendet.

Die *objektiven Aspekte* lassen sich anhand der jeweils definierten Kriterien bewerten und mit bestehenden Simulationsverfahren vergleichen, die ebenfalls nach diesen Kriterien bewertet wurden. Als Referenzverfahren dient hierzu die zeitbasierte quasistationäre Längsdynamiksimulation.

Die Maßnahme „Rekuperation im elektrischen Bordnetz“ wird hauptsächlich als Beispielanwendung zur Bewertung des Simulationsverfahrens herangezogen, da sie die höchste simulative Komplexität aufgrund der bidirektionalen Energieflüsse und der hohen Systemtiefe besitzt. Um das Bewertungsergebnis auf eine breitere Basis zu stellen, werden ebenfalls Energiemanagementmaßnahmen des Lenksystems und des pneumatischen Systems sowie die simulative Abbildung eines hybriden Antriebsstrangs in der Bewertung berücksichtigt.

Basierend auf den Eingangsgrößen der Simulation, die nach Kapitel 4 als Häufigkeitsverteilung vorliegen, kann neben der zeitbasierten Längsdynamiksimulation ein *weiteres Simulationsverfahren zur Validierung* herangezogen werden. Bildet man aus den häufigkeitsbasierten Merkmalen zufällig generierte zeitliche Verläufe von Eingangsgrößen der Simulation, so können diese mit Hilfe zeitbasierter Verfahren verarbeitet werden. Wiederholt man diesen Vorgang häufige Male, so erhält man als Ergebnis eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die mit dem stochastischen Berechnungsergebnis verglichen werden kann.

Das stochastische Verfahren beruht auf der Annahme, dass jede Variable, deren Häufigkeitsverteilung mit einer anderen verrechnet wird, *stochastisch unabhängig* ist. Diese Annahme wird nicht immer erfüllt. Anhand der

Bewertung verbrauchsreduzierender Maßnahmen des elektrischen Bordnetzes soll daher ermittelt werden, wie stark der Einfluss der stochastischen Abhängigkeit einzelner Systemvariablen auf die Streuung und damit die Ungenauigkeit des Berechnungsergebnisses ist.

Die *subjektive Bewertung* beruht hauptsächlich auf der Einschätzung von Experten. Dazu werden die Anwendungsbeispiele aus den vorangegangenen Kapiteln jeweils parallel mit der zeitbasierten Methodik simuliert, um Anwendbarkeit und Aussagekraft einschätzen zu können.

Am Ende des Kapitels findet eine *abschließende Gütebewertung* des stochastischen Verfahrens statt, die das Verfahren als effizientes Mittel für definierte Simulationsaussagen einschätzt und es gegenüber den zeitbasierten Simulationsverfahren abgrenzt.

## 7.1 Bestimmung der Bewertungskriterien

Die *Validierung von Simulationen* ist nach der VDI-Richtlinie 3633 [123] als eine Überprüfung hinsichtlich der Übereinstimmungsmerkmale von Modell und Original definiert. Das Kriterium für die Übereinstimmung ist dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Modell das reale Systemverhalten ausreichend genau wiedergeben kann. Es ist weiterhin nicht erforderlich, dass das von der Realität abstrahierte Modell alle Aspekte und Einflussgrößen beinhaltet. Dazu dient ein Toleranzrahmen, der die Übereinstimmung als akzeptabel oder nicht akzeptabel bewertet.

### 7.1.1 Validierungsarten

In [79] werden drei Bereiche identifiziert, mit denen eine Simulation validiert werden kann. Die sogenannten *Stützen der Simulation* bestehen aus einem intrinsischen Bereich, einem extrinsischen Bereich und einem ökonomischen Bereich.

Der *intrinsische Bereich* entspricht dabei den software-internen Bedingungen, die die Software erfüllen muss. Es sollen vor allem

- physikalische Fehler
- numerische Fehler
- Diskretisierungsfehler

- Programmierfehler
- Eingabefehler

vermieden oder zumindest minimiert werden.

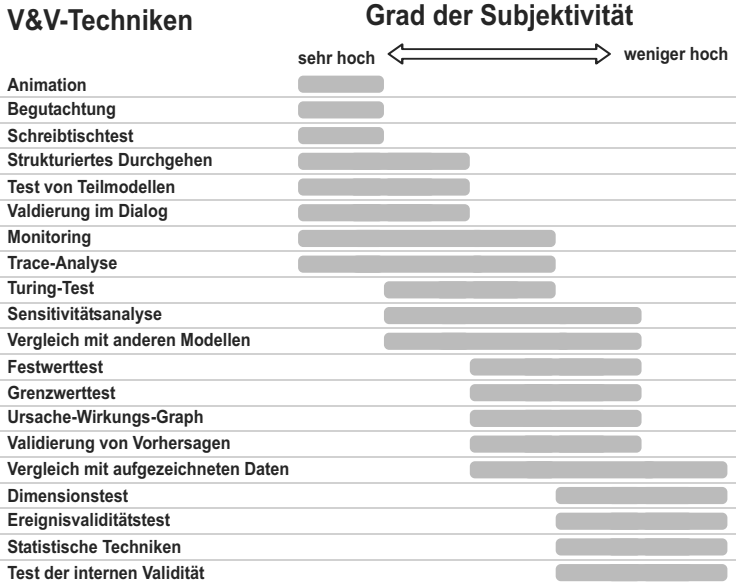
Die *extrinsischen* oder software-externen Bedingungen sind nicht Bestandteil der Simulationssoftware. Sie werden allerdings benötigt, um eine Simulation anzuwenden. Extrinsische Bedingungen können Umgebungsbedingungen sowie Messdaten zur Kalibrierung des abzubildenden Modells sein. Diese Bedingungen haben Einfluss auf die Modellierung und die für die Simulation notwendigen Ressourcen.

Die *ökonomischen* oder auch software-unabhängigen Bedingungen stellen die Frage nach dem Nutzen der Simulation, den Kosten der Integration der zu bewertenden Simulationsumgebung in die Produktentwicklung und das Risiko bei der Investition in die neue Methodik.

In [90] wird der *Subjektivitätsgrad* von Verifikations- und Validierungstechniken (V & V) dargestellt. Nach Abbildung 7.1 ist die Validierung eines mathematischen Modells bzw. einer Simulation tendenziell stark subjektiv, da beim Verständnis eines Problems und der Problemlösung stets die persönliche Betrachtung und die Meinung von Fachexperten eine wesentliche Rolle spielen. Die objektiven Techniken sind in der Regel Methoden, die auf mathematischen Verfahren aufbauen, wie z. B. statistische Techniken.

In dieser Arbeit werden die sowohl rein subjektiven als auch rein objektiven Validierungstechniken angewendet, um zwischen der Güte mathematischer Berechnungsverfahren (objektiv) und anwendungsspezifischen Kriterien (subjektiv) zu unterscheiden.

Die in Abbildung 7.1 aufgeführten Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben [90]. Die *Animation* ist eine Methode, bei der anhand der Beobachtung von grafischen Verläufen der Systemparameter herausgefunden wird, ob das Systemverhalten im Zeitraum korrekt ist. Die *Begutachtung* stellt sicher, dass die vereinbarten Ziele oder Randbedingungen mit der Simulationsstudie korrelieren. Beim *Schreibtischtest* werden entwicklungsunbeteiligte Personen beauftragt, die Korrektheit, Eindeutigkeit und Vollständigkeit der Simulation zu überprüfen. Mit dem *strukturierten Durchgehen* prüfen Experten die Richtigkeit der Softwareumgebung. Der *Test von Teilmodellen* ist dann möglich, wenn ein Teilmodell in seiner Struktur mit dem realen System vergleichbar ist. Er dient als Ergänzung zu anderen Validierungstechniken. Bei der *Validierung im Dialog* überprüfen Fachexperten die Ergebnisse der Simulation auf Gültigkeit. Das *Monitoring*



**Abb. 7.1:** Verifikations- und Validierungstechniken (V & V) nach Grad der Subjektivität [90]

betrachtet ähnlich wie bei der Animation Werte und Werteverläufe. Hier können allerdings nur in der Realität sichtbare Größen beobachtet werden. Die *Trace-Analyse* sieht die Beobachtung verschiedener Objekte in einem Modell vor, das auf Plausibilität geprüft wird.

Beim *Turing-Test* werden Fachexperten die gefilterten Ergebnisse, die anschließend die gleichen Größen wie die Simulation darstellen, zur Bewertung vorgelegt. Die *Sensitivitätsanalyse* untersucht die Auswirkung der Veränderung der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter, die mit den Auswirkungen des realen Systems übereinstimmen müssen. Beim *Vergleich mit anderen Modellen* wird ein Modell mit gleichen Eingangsdaten mit einem weiteren unabhängigen und ausführbaren Modell verglichen. Der *Festwerttest* sieht vor, konstante Werte als Eingangs- und Testparameter zu verwenden. Beim *Grenzwerttest* werden Extremwerte, die im Gültigkeitsbereich der Simulation liegen, als Eingangsparameter eingesetzt, um ihre Auswirkung auf das Resultat zu beobachten. Mit dem *Ursache-Wirkungs-Test* wird die Beziehung von Ursache und deren Wirkung im System untersucht. Der Ursache-Wirkungs-Graph wird dabei von Fach-



experten anhand des realen Systems erstellt. Bei der *Validierung von Vorhersagen* wird eine Vorhersage des Modells am realen System geprüft. Der *Vergleich mit aufgezeichneten Daten* validiert ein Modell anhand von Messdaten. Diese Daten können gleichzeitig dazu benutzt werden, um Modellparameter anzupassen.

Mit dem *Dimensionstest* werden die Einheiten jeder Größe bestimmt und miteinander verrechnet. Sobald die verrechneten Einheiten übereinstimmen, gilt die physikalische Dimension des Ergebnisses als korrekt. Der *Ereignisvaliditätstest* sieht vor, das Auftreten von Ereignissen in der Simulation mit der Realität zu vergleichen. Des Weiteren wird zusätzlich die zeitliche Abfolge der Ereignisse aus der Simulation am realen System auf Übereinstimmung geprüft. Die *statistischen Techniken* geben durch verschiedene Tests eine Aussage über die Sicherheit, mit der Modell- und Simulationsergebnisse mit dem realen System übereinstimmen. Beim *Test der internen Validität* werden basierend auf einem stochastischen Modell Simulationsläufe mit gleichen Parametern, aber mit zufällig ermittelten Startwerten durchgeführt.

### 7.1.2 Bewertungsansatz

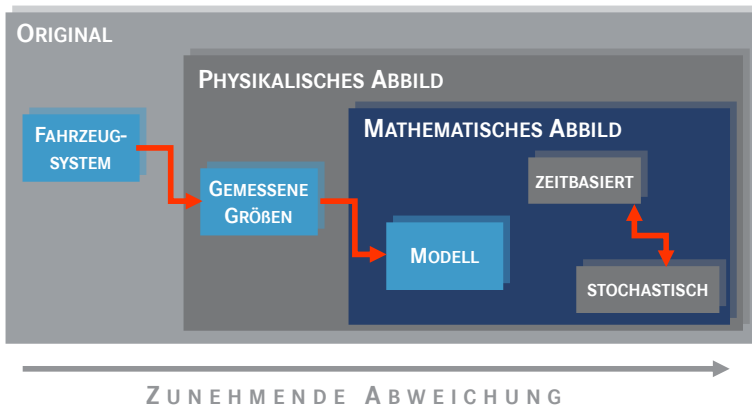
Die *Aufgliederung der Validierungsarten* in den intrinsischen, extrinsischen und ökonomischen Bereich lässt sich sehr gut auf die Validierung der vorgestellten Entwicklungsmethodik übertragen. Die Validierung des intrinsischen Bereichs findet Anwendung am quasistationären Fahrzeugmodell sowie am stochastischen Berechnungsverfahren. Der extrinsische Bereich gilt der Datenaufbereitung sowie der Übergabe der stochastischen Variablen an die Simulationsumgebung. Mit der ökonomischen Bewertung ergibt sich die Nutzen-Aufwand-Schätzung der Methodik im betrachteten Einsatzgebiet bei der Bewertung von Energiemanagementsystemen im Nutzfahrzeug.

Die *subjektiven und objektiven Bewertungskriterien* müssen dazu auf unterschiedliche Teilbereiche angewandt werden, um ein gesamtheitliches Bild des stochastischen Simulationsverfahrens zu erhalten. Als Referenz für das Fahrzeugmodell gelten die jeweils abgebildeten Fahrzeuge. Hier können die Betriebspunkte sowohl in der Simulation als auch in der Realität nachgebildet werden. Für den Vergleich der Modellgüte wird ein Versuchsfahrzeug eingesetzt, das messtechnisch erfasst wurde. Das Modell wird dazu mit Hilfe der zeitbasierten Simulationsmethodik evaluiert.

Nach der *Validierung des Fahrzeugmodells* unter Anwendung der zeitbasierten Simulationsmethodik wird im nächsten Schritt die Güte des stochastischen Modells und seines Berechnungsverfahrens bewertet. Dies geschieht im ersten Schritt durch den Vergleich einzelner stationärer Betriebszustände des Fahrzeugs, deren Zustandsgrößen jeweils durch die zeitbasierte und die stochastische Simulationsmethodik ermittelt wurden. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, um die Einflüsse der beiden Berechnungsverfahren miteinander zu vergleichen. Verwendet man hierzu einen Messabschnitt, kann die Qualität des Berechnungsverfahrens nicht bestimmt werden, da das zeitbasierte entgegen dem stochastischen Verfahren eine feste Abfolge der Zustandsgrößen des Fahrzeugs vorsieht.

Im letzten Validierungsschritt werden ausgewählte Messabschnitte mit beiden Verfahren bewertet. Der Vergleich beider Verfahren erfolgt anschließend anhand der Betrachtung der Simulationsergebnisse.

Nach dem Vergleich der Teilmerkmale der Simulationsumgebung folgt eine Ausweitung der Betrachtung auf den *Gesamtnutzen der Methodik*. Hier gehen sowohl subjektive als auch objektive Kriterien in die Bewertung mit ein. Zu den subjektiven Kriterien zählen Anwendbarkeit, Nutzen und Variabilität, während die objektiven Kriterien aus den Bewertungsmethoden hervorgehen.



**Abb. 7.2:** Validierungskonzept zur Bewertung der Entwicklungsmethodik, nach [1]

Abbildung 7.2 stellt die Vorgehensweise bei der *objektiven Bewertung* dar. Ausgehend vom realen Fahrzeugsystem besteht bereits bei der messtechni-

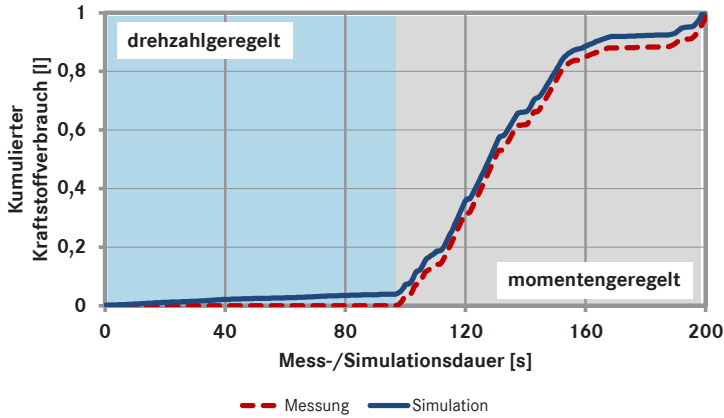
schen Erfassung der physikalischen Größen eine Abweichung vom abzubildenden System. Die messtechnische Erfassung stellt allerdings die Daten- und gleichzeitig die Bewertungsgrundlage des zu simulierenden Systems dar und ist daher als Referenz zu sehen. Das mathematische Fahrzeugmodell kann in verschiedenen Systemzuständen punktuell mit dem messtechnisch erfassten System verglichen werden. Hier spielt die Art der Simulation zunächst keine Rolle. In der zeitlichen Abfolge wird anschließend die vorhandene zeitbasierte Simulation mit einem Fahrzyklus des messtechnisch erfassten Fahrzeugs verglichen. Die dann in ihrer Genauigkeit beschriebene zeitbasierte Simulation kann schließlich dazu verwendet werden, die stochastische Methodik zu bewerten.

## 7.2 Validierung des Fahrzeugmodells

Der *Vergleich und die Genauigkeitsbewertung des Fahrzeugmodells* mit dem Originalsystem erfolgt sowohl unter Anwendung stationärer Betriebszustände als auch durch Messabschnitte mit zeitlicher Abfolge. Das Original stellt hierbei ein Erprobungsfahrzeug dar, das zur Erfassung der Gesamtenergiebilanz eine Kraftstoffverbrauchsmessanlage besitzt. Durch die Verwendung weiterer Messtechnik (z. B. zur Erfassung mechanischer Leistungen des Verbrennungsmotors oder mechanischer/elektrischer Leistungen des Generators, ...) ist es weiterhin möglich, die Teilmodelle des Fahrzeugsystems in Analogie zur hierarchischen und objektorientierten Struktur (vgl. Kapitel 3.2) zu untersuchen.

Über eine zeitbasierte Messstrecke hinweg können anhand der Messwerte des Fahrzeugs die Genauigkeiten der verwendeten Fahrzeug(teil-)modelle untersucht werden.

Der Vergleich der absolut gemessenen Kraftstoffverbräuche mit der zeitbasierten Simulation zeigt im momentengeregelten Fahrbetrieb eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 7.3, rechts). Im drehzahleregelten Betrieb (i. d. R. Leerlaufbetrieb) ergeben sich größere Abweichungen zwischen zeitbasierter Simulation und Messung (siehe Abbildung 7.3, links). Vergleicht man Messung und Simulation anhand des herangezogenen Referenzfahrprofils (vgl. Kapitel 4.4) ergibt sich hierfür ein relativer Verbrauchsunterschied von 0,08 %. Obwohl die Abweichung im drehzahleregelten Betrieb relativ hoch ist, begründen sich die geringen Unterschiede bezogen auf die Gesamtstrecke in zwei Ursachen:



**Abb. 7.3:** Vergleich zwischen zeitbasiert simuliertem und gemessenem Kraftstoffverbrauch, nach [1]

1. Der zeitliche Streckenanteil unter Leerlaufbetrieb des Motors beträgt nach Kapitel 4.4.1 10,2 %.
2. Verglichen mit dem Kraftstoffdurchsatz bei momentenregelmäßigem Betrieb wird im drehzahlregelmäßigem Betrieb sehr wenig Kraftstoffenergie umgesetzt.

Die weitere Genauigkeitsanalyse erfolgt nun anhand der *hierarchischen Modellierung des technischen Fahrzeugsystems*. Dabei wird jeweils ein untergeordnetes Teilmodell (z. B. der Generator und die elektrischen Verbraucher) betrachtet und als eigenes System gegenüber der Realität (z. B. dem Bordnetz) bewertet. Der Fehler des Gesamtsystems berechnet sich dann mit Hilfe der Rechenregeln zur Verknüpfung von Einzelfehlern (Fehlerfortpflanzung, [37]). In Tabelle 7.1 sind die maximalen relativen Abweichungen einiger Teilmodelle abgebildet.

Aufgrund der *Fehlerfortpflanzung* ergibt sich für das Generatorsystem eine theoretische Abweichung von  $\pm 1,3\%$ , da sich die Abweichungen des Motormodells ( $\pm 0,1\%$ ) und des Bordnetzmodells ( $\pm 1,2\%$ ) nach [37] addieren. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass in Abhängigkeit der Aufgabenstellung der Detaillierungsgrad des Fahrzeugsystems (vgl. Kapitel 5) reduziert werden kann. So ist es gängige Praxis, dass man z. B. einen elektrischen Einzelverbraucher nicht abbilden muss. Wird in der Simulation lediglich der gesamte Leistungsbedarf eines elektrischen Systems betrachtet,

| Teilmodell        | Maximale Abweichung |
|-------------------|---------------------|
| Verbrennungsmotor | +/- 0,1 %           |
| Fahrwiderstände   | +/- 6,5 %           |
| Fahrer            | +/- 10 %            |
| Bordnetz          | +/- 1,2 %           |
| Klimasystem       | +/- 1,4 %           |

**Tab. 7.1:** Maximale relative Abweichungen des mathematischen Fahrzeugmodells bezogen auf die gewandelte chemische (Verbrennungsmotor) und mechanische Energie (weitere Teilmodelle) im messtechnisch erfassten Versuchsfahrzeug

der mit Hilfe von Messungen erhoben wurde, ist die Abweichung dieses Teilsystems deutlich geringer.

Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit ergibt sich durch den *relativen Vergleich* von zwei Simulationsdurchläufen, wobei im zweiten Simulationsdurchlauf die zu bewertende Systemmodifizierung vorgenommen wurde. Durch den Bezug des modifizierten Systems auf das Referenzsystem (beide simulativ abgebildet) wirken sich Abweichungen, die durch ein Teilmodell hervorgerufen werden (z. B. ungenau abgebildete ohmsche Verbraucher), in der Regel nicht so stark auf das gewünschte Resultat aus wie der Vergleich der Simulation mit dem Original.

## 7.3 Vergleich verschiedener Simulationsverfahren

Anhand der in Kapitel 6 demonstrierten Anwendungsbeispiele soll an dieser Stelle eine Bewertung nach objektiven Kriterien stattfinden. Diese bestehen aus dem Vergleich der absoluten Verbrauchseinsparungspotenziale unter verschiedenen Systemvariationen (mathematisch berechnetes Ergebnis) und der Bewertung von Ressourcen- und Zeitbedarf bei der Durchführung der Simulation.

### 7.3.1 Einsparungspotenziale

Anhand der nun validierten bzw. hinsichtlich Genauigkeit bewerteten zeitbasierten Längsdynamiksimulation kann das stochastische Berechnungsverfahren in seinen Berechnungseigenschaften betrachtet werden. Dies wird

zunächst anhand des Simulationsdurchlaufs der bekannten Maßnahmen im elektrischen Bordnetz getan. Da die stochastische Bewertungsmethodik durch Kombination aller Betriebszustände einen anderen Vergleichsumfang als die zeitbasierte Simulation bewertet, kann die Güte nicht alleine aufgrund des Kraftstoffbedarfs über einen gewählten Fahrzyklus geschehen. Um die Wirkungsweise der Methodik bei unterschiedlichen Betriebszuständen im Vergleich zur zeitbasierten Simulation zu erkennen, werden verschiedene Streckenprofile konstanter Geschwindigkeit  $v$  ( $v > 60$  km/h), Streckenprofile mit variablen Geschwindigkeiten  $v$  ( $v < 50$  km/h) und Streckenprofile mit sehr dynamischen Geschwindigkeitsänderungen verwendet. Zusätzlich wird die Strecke in kleinere Streckenabschnitte aufgeteilt, deren Zeitintervall variiert. Die Verwendung stationärer Betriebszustände des Fahrzeugs als Eingangsgrößen für beide Simulationen ergibt eine Aussage über die Vergleichbarkeit der Berechnungsverfahren und der zugrundegelegten Modelle für den stochastischen und den zeitbasierten Ansatz.

Im Unterschied zu den Berechnungen in Kapitel 5.3.2 wird hier eine negative oder positive Energiebilanz des Speichers nicht in der Kraftstoffeinsparung ausgewiesen.

Durch *freie Kombination* aller Betriebspunkte nimmt die stochastische Methodik zunächst bewusst falsche Kombinationen in Kauf (z. B. eine Energiewandlung, obwohl im zeitdiskreten Berechnungsverfahren der Speicher bereits voll wäre). Dies liegt u. a. im Ansatz der stochastischen Methodik, die zunächst alle Variablen als stochastisch unabhängige Variablen behandelt, was sie manchmal aber nicht sind. Bei der Diskussion der Fehlerbestimmung und -eliminierung ist somit auch der Grad der Abhängigkeit der verwendeten Variablen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7.4).

In Tabelle 7.2 sind die *relativen Verbrauchspotenziale* auf dem gewählten Fahrprofil dargestellt. Aus dem Profil, das eine Gesamtlänge von 5.652 Sekunden (s) und damit bei einer Schrittweite von 0,01 s über einen Wertebereich von 565.200 Betriebspunkten verfügt, werden aus dem Streckenbereich A, der sich durch konstante Geschwindigkeiten mit  $v > 60$  km/h auszeichnet, Zeitintervalle von 0,01 s, 1 s, 42 s und 101 s verwendet. Dabei sind die kürzeren Intervalle Teilmengen der längeren Zeitabschnitte. Mit den auftretenden Zustandsgrößen des Fahrzeugs innerhalb dieser Intervalle werden jeweils beide Simulationsmethoden angewendet. Beim Simulationsintervall von 0,01 s besteht lediglich eine Messgröße für jede Zustandsvariable, die als Eingangsgröße für die Simulation herangeführt wird.

| Zeitintervall | Verbrauchsdifferenz |              |
|---------------|---------------------|--------------|
|               | zeitbasiert         | stochastisch |
| 0,01 s        | -0,32 %             | -0,33 %      |
| 1 s           | -0,17 %             | -0,17 %      |
| 42 s          | -0,27 %             | -0,24 %      |
| 101 s         | -0,32 %             | -0,24 %      |
| 5652 s        | -0,22 %             | -0,30 %      |

**Tab. 7.2:** Streckenabschnitt A: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei konstanter Sollgeschwindigkeit mit  $v > 60$  km/h, nach [1]

Unter Anwendung der Simulationsdauer von 0,01 s hat das freie Kombinieren der Betriebszustände nach dem stochastischen Verfahren keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Es ergibt sich dennoch ein Unterschied in den Ergebnissen. Dies ist auf ein *differierendes Interpolationsverfahren* bei der Einbindung der Kennfelder von Generator und Verbrennungsmotor zurückzuführen. Eine Vergrößerung des Streckenintervalls zeigt ein ähnliches Verhalten der Einsparungspotenziale, wobei sich in diesem Abschnitt bei einer Zunahme der Zeitdauer die Verbrauchspotenziale gegenläufig zur Tendenz des Endergebnisses bewegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der zeitbasierten Simulation das Vorliegen einer Konstantfahrt mit einem hohen Zuganteil zunächst eine Reduktion des Speicherstands der Batterie nach sich zieht, was die Verbrauchseinsparung zunächst gegenüber der stochastischen Simulation erhöht.

| Zeitintervall | Verbrauchsdifferenz |              |
|---------------|---------------------|--------------|
|               | zeitbasiert         | stochastisch |
| 0,01 s        | 0,0 %               | 0,0 %        |
| 1 s           | -0,05 %             | -0,11 %      |
| 42 s          | -0,03 %             | -0,09 %      |
| 101 s         | -0,07 %             | -0,27 %      |
| 5652 s        | -0,22 %             | -0,30 %      |

**Tab. 7.3:** Streckenabschnitt B: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei einem Streckenabschnitt mit  $v < 50$  km/h, nach [1]

Für Tabelle 7.3 ist ein Streckenanteil B gewählt worden, der sich durch niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten auszeichnet. Der stationäre Vergleich bei einem beliebigen Betriebspunkt ergibt keine Ersparnis, was darauf

schließen lässt, dass der Betriebspunkt eine Schubphase gewesen sein muss. Der Verlauf der Einsparpotenziale bei Erhöhung des Zeitintervalls ist sehr unterschiedlich. Insbesondere der Sprung der Ersparnis in den stochastischen Verfahren bei Erhöhung der Simulationsdauer auf 101 s ist zunächst auffällig. Berücksichtigt man allerdings den relativen Vergleich zwischen den jeweiligen Ergebnissen der Dauern 42 s und 101 s, so scheinen alle Werte gleichmäßig anzusteigen. Das gewählte Streckenintervall von 42 s Dauer scheint für die Rekuperation nicht sehr geeignet.

Tabelle 7.4 vergleicht die Ergebnisse in einem auf die Geschwindigkeit bezogenen dynamischen Streckenabschnitt C. Der Verlauf der Resultate ist hier zunächst sehr unterschiedlich, tendiert allerdings schon nach 101s in Richtung der Ergebnisse des gesamten Streckenverlaufs.

| Zeitintervall | Verbrauchs Differenz |              |
|---------------|----------------------|--------------|
|               | zeitbasiert          | stochastisch |
| 0,01 s        | -0,24 %              | -0,18 %      |
| 1 s           | -0,36 %              | -0,29 %      |
| 42 s          | -0,14 %              | -0,49 %      |
| 101 s         | -0,16 %              | -0,37 %      |
| 5652 s        | -0,22 %              | -0,30 %      |

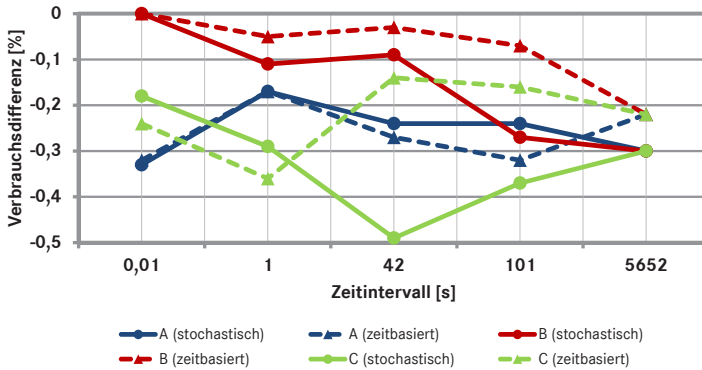
**Tab. 7.4:** Streckenabschnitt C: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei stark dynamischem Verlauf der Sollgeschwindigkeit, nach [1]

Abbildung 7.4 zeigt zusammengefasst den Verlauf der Verbrauchspotenziale der zwei Simulationsansätze. Die Trends im Streckenabschnitt B zeigen hier, dass Streckenparameter wie z. B. das Höhenprofil oder die Sollgeschwindigkeit einen starken Einfluss auf die Ergebnisse des Verfahrens haben können.

### 7.3.2 Nachbildung stochastischer Verfahren

Anhand der Bewertung des Lenksystems wird eine andere Möglichkeit der Validierung angewandt. Mit Hilfe einer *Veränderung der zeitlichen Reihenfolge* der Zustandsgrößen des Lenksystems (z. B. Druck und/oder Drehzahl der Lenkhilfpumpe) sollen die Ergebnisse der stochastischen Simulation plausibilisiert werden. Dieser Ansatz scheint sinnvoll, da die stochastische Simulation ebenfalls die zeitliche Aufeinanderfolge der Systemzustände frei aufgrund der mathematischen Modellbeschreibung kombinieren kann.





**Abb. 7.4:** Verbrauchs Differenzen, ermittelt durch beide Simulationsverfahren auf den Streckenabschnitten A, B und C sowie dem gesamten Fahrprofil

Die relative Häufigkeit der Systemzustände muss allerdings der vorherigen Systemkonfiguration entsprechen.

Verwendet man extreme Werte oder ausschließlich wirkungsgradungünstige Kombinationen (z. B. hohe Lenkleistungen bei schlechten Wirkungsgraden des Verbrennungsmotors), so erhält man eine Sensitivität der einzelnen Parameter (z. B. Drehmoment, Drehzahl, Volumenstrom, Gegendruck), die wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz des Lenksystems haben.

Als zu validierendes Anwendungsbeispiel dient hier die stochastische Simulation der Verbrauchspotenziale der verbrauchsreduzierenden Lenkung (vgl. Kapitel 6.3).

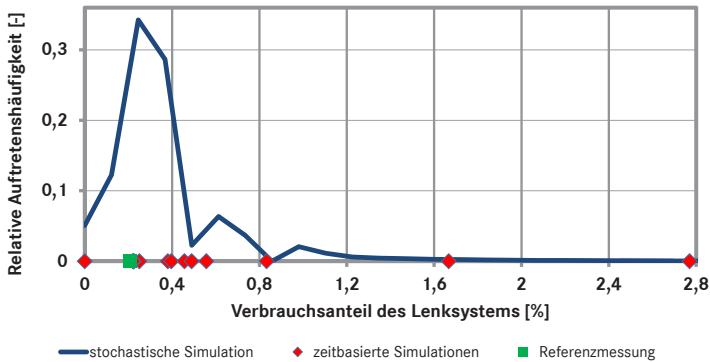
Tabelle 7.5 stellt den Kraftstoffverbrauchsanteil des Lenksystems auf Basis seiner mechanischen Leistung dar. Alle Werte basieren auf dem Fahrprofil aus Kapitel 4.4 und sind mit Hilfe der zeitbasierten Simulation ermittelt worden.

Die zeitbasierte Simulation bildet im ersten Schritt das Verhalten des Lenksystems auf der Referenzstrecke nach. Es ergibt sich ein Kraftstoffverbrauchsanteil des Lenksystems von 0,21 %. Nun wird als Variante zuerst der Verlauf des Gegendrucks ( $p_{LHP_1}^*$ ) verändert. Dazu werden die Werte dieser Variablen ihrer Größe nach sortiert. Da die Gegendrücke im Referenzsystem einen relativ konstanten Verlauf besitzen, ergibt sich durch die Neuverteilung eine geringe Auswirkung auf den Kraftstoffanteil (0,22 %). Die Neuverteilung des Motormoments ( $M_{VKM,e_1}^*$ ), ebenfalls der Größe

| Variation                                 | Verbrauchsanteil |
|---|------------------|
| Referenz                                  | 0,21 %           |
| $p_{LHP_1}^*$                             | 0,22 %           |
| $M_{VKM,e_1}^*$                           | 3,55 %           |
| $n_{VKM_1}^*$                             | 0,22 %           |
| $p_{LHP_2}^*, M_{VKM,e_2}^*, n_{VKM_2}^*$ | 3,56 %           |
| $p_{LHP_3}^*$                             | 9,36 %           |

**Tab. 7.5:** Zeitliche Variation der Zustandsgrößen des Lenksystems, nach [1]

nach sortiert, ergibt hier schon eine wesentlich größere Auswirkung auf den Verbrauchsanteil am Gesamtverbrauch. Dies ist allerdings mit einer Veränderung der Fahrstrecke verbunden, d. h. die Geschwindigkeitsmerkmale können auf diese Art nicht mehr erfüllt werden. Aus diesem Grund steigt der Verbrauchsanteil auf 3,55 %. Die Neusortierung der Drehzahl ( $n_{VKM_1}^*$ ) ergibt kaum einen Einfluss auf den Anteil des Lenksystems, da die Werte der Drehzahl analog zum Gegendruck auf der Überlandstrecke sehr ähnlich verlaufen.



**Abb. 7.5:** Zeitbasiert und stochastisch simulierte Verbrauchsanteile des Lenksystems, Klassenbreite  $\Delta E_{chem,LHP_k}^* = 0,12\%$ , nach [1]

Die Neuverteilung aller Parameter auf eine Art, dass im Referenzsystem die schlechtesten Wirkungsgrade von Verbrennungsmotor und Lenkhilfpumpe mit den höchsten Gegendrücken der Lenkhilfpumpe übereinkommen ( $p_{LHP_2}^*, M_{VKM,e_2}^*, n_{VKM_2}^*$ ), ergibt ein minimal höheres Verbrauchspotenzial

als die reine Neuverteilung des Motormoments. Eine Erhöhung des Lenkgedrucks ( $p_{LHP_3}^*$ ) auf technisch maximal mögliche Werte ergibt hier einen Verbrauchsanteil von 9,3 %.

Die auf diese Art berechneten Randwerte stellen nun den maximalen Verbrauchsanteil des Lenksystems unter Anwendung der zeitbasierten Simulation dar, der physikalisch möglich ist. Die stochastische Simulation darf diese Verbrauchsanteile nicht überschreiten, da ansonsten durch eine falsche Kombination Verbrauchswerte zustande kommen, die in der Realität nicht vorkommen. Für einen realistischen Vergleich werden nun weitere zeitliche Abfolgen gebildet, die realitätsnaher als die Extremwerte nach Tabelle 7.5 sind.

Abbildung 7.5 stellt den Verbrauchsanteil des Lenksystems nach Durchführung der Referenzmessung, 14 zeitbasierten Simulationen unter Variation der zeitlichen Abfolge von Parametern des Lenksystems sowie der stochastischen Simulation dar.

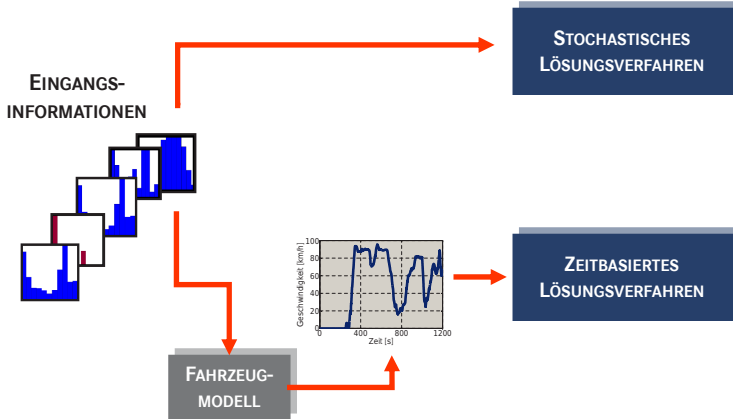
Das Ergebnis zeigt anschaulich, dass Fälle wie die Rekombination des Motormoments, die nach Tabelle 7.5 ein Verbrauchspotenzial von 3,55 % ergeben, mit einer so verschwindend geringen Wahrscheinlichkeit abgebildet werden, dass das Ergebnis als nicht relevant untergeht.

Das Simulationsergebnis auf der Referenzstrecke liegt mit 0,21 % knapp unter der größten Häufigkeit mit einem Verbrauchsanteil von 0,3 %. Anhand dieser Anwendung kann sehr gut dargestellt werden, wo das Ergebnis der herstellerepezifischen Auslegungsstrecke im Vergleich zur Kundenanwendung liegt.

### 7.3.3 Generierung zufälliger Eingangsgrößen

Unter Anwendung der stochastischen Simulation entstehen durch die Kombination abhängiger Zustandsgrößen des Systems in der Lösungsmenge einige Betriebszustände, die entweder in der Realität nicht vorkommen oder gar durch technische Randbedingungen nicht vorkommen können oder dürfen. Um diese *Fehlerquelle* zu identifizieren, wird eine zeitbasierte Längsdynamiksimulation verwendet, deren Eingangsgrößen wie die der stochastischen Simulation ebenfalls aus einer häufigkeitsbasierten Datenquelle entstammen.

Nach Abbildung 7.6 werden beim stochastischen Lösungsverfahren die Häufigkeitsverteilungen nach Kapitel 4 auf direktem Weg dem Fahrzeugmodell zugeführt und die gewünschte Ausgangsgröße berechnet. Das zeitbasierte Simulationsverfahren benötigt eine vorherige Umwandlung in eine zeitbasierte Abfolge.

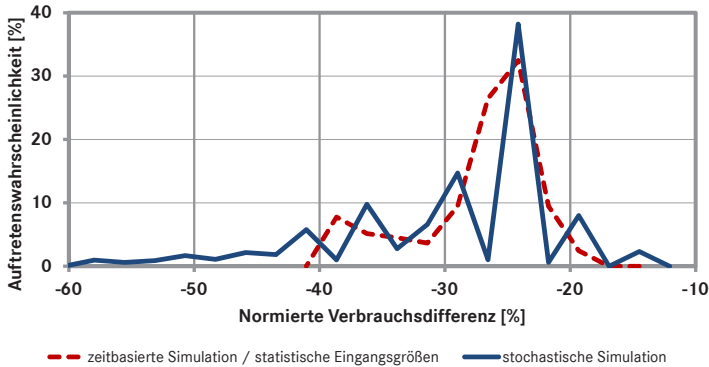


**Abb. 7.6:** Ablaufplan der stochastischen Simulation und der zeitbasierten Simulation mit aus Häufigkeitsverteilungen generierten Eingangsgrößen

Die Merkmalswerte der Häufigkeiten (z. B. die Fahrgeschwindigkeit) werden vor der Zuführung zum zeitbasierten Lösungsverfahren nach einem festen Ablaufschema in eine zeitliche Reihenfolge versetzt. Das Fahrzeug beginnt den Streckenverlauf mit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 0$  km/h. In Abhängigkeit der Fahrzeugbeschleunigungen, die in Form einer Häufigkeitsverteilung vorliegen, und der Häufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten des Fahrzeugs wird ein neuer zeitlich abfolgender Geschwindigkeitsverlauf generiert. Dazu werden die Werte der Verteilungen nach dem Zufallsprinzip in eine Abfolge gebracht. Das Fahrzeugmodell wird dazu benötigt, damit keine Zustandsreihen gebildet werden, die das Fahrzeug aufgrund seiner Charakteristik nicht leisten kann. Ist die Geschwindigkeit in einer zeitlichen Abfolge definiert, erfolgt die Zuordnung aller Zustandsgrößen der Fahrzeugsysteme (z. B. Motormomente, Generatorleistungen o. Ä.). Sind die Zeitreihen der Eingangsparameter gebildet, erfolgt eine zeitbasierte Simulation, aus der in Kombination mit einer verbrauchsreduzierenden Maßnahme eine Verbrauchseinsparung resultiert.

Die zufällige *Neubildung eines zeitlichen Verlaufs* mit anschließendem Simulationsdurchlauf muss wiederholt durchgeführt werden. Jeder Durchlauf resultiert in einem neuen Wert der Verbrauchseinsparung. Alle Werte zusammen ergeben eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die nun herangezogen werden kann, um sie mit der stochastischen Methodik zu vergleichen. Diese hat das entsprechende Resultat mit nur einem Berechnungsdurchlauf erreicht.

Abbildung 7.7 zeigt den Vergleich der Ergebnisse beider Verfahren. Die Anwendung erfolgte hierbei anhand einer Verkleinerung des Fördervolumens eines heute eingesetzten Luftpressers. Die zeitbasierte Simulation mit zeitbasierten Eingangsgrößen aus Häufigkeitsverteilungen wurde dazu 80 Mal angestoßen.



**Abb. 7.7:** Verbrauchsdifferenzen durch Reduktion des Luftpresser-Fördervolumens, Klassenbreite  $\Delta E_{\text{chem,LP,norm}_k}^* = 2,4\%$ , Ergebnisse der zeitbasierten und stochastischen Simulation, nach [84]

Die durchschnittliche Einsparung liegt beim stochastischen Verfahren bei  $-29,6\%$  normierter Verbrauchsdifferenz, während die zeitbasierten Simulationsdurchläufe einen Mittelwert von  $-27,7\%$  ausweisen. Dies entspricht einer Verbrauchsdifferenz von  $-0,15\%$  bzw.  $-0,14\%$ . Betrachtet man die Ergebnisse der zeitbasierten Simulation als Referenz, so ergibt sich eine Abweichung der Ergebnisse der stochastischen Simulation von  $6,9\%$ .

In Abbildung 7.7 ist ebenfalls zu erkennen, dass das Ergebnis der stochastischen Simulation in den Randbereichen sehr stark streut. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die stochastische Simulationsmethodik Werte

guten Wirkungsgrades kombiniert werden, die so zu einer hohen Verbrauchersparnis führen. Diese hohen Einsparungen scheinen auf Basis eines realen Streckenverlaufs nicht erreichbar zu sein. Die Auftretenshäufigkeit dieser Verbrauchersparnis ist allerdings sehr gering.

### 7.3.4 Simulationsaufwand

Ein *Berechnungsverfahren* benötigt zwangsläufig Ressourcen, die seine Berechnungsalgorithmen durchführen. Anhand der Anwendungen, die zur Bewertung der Verbrauchspotenziale in den Kapiteln 7.3.1 und 7.3.2 dienen, wird die Simulationsdauer unter der Abbildung der Systeme in der Toolkette Matlab/Simulink untersucht. Das zugrundeliegende Fahrprofil bezieht sich dabei auf Kapitel 4.4.

| Maßnahme     | Simulationsdauer |              |
|--------------|------------------|--------------|
|              | zeitbasiert      | stochastisch |
| Rekuperation | 5 s              | 617 s        |
| Lenksystem   | 4 s              | 301 s        |

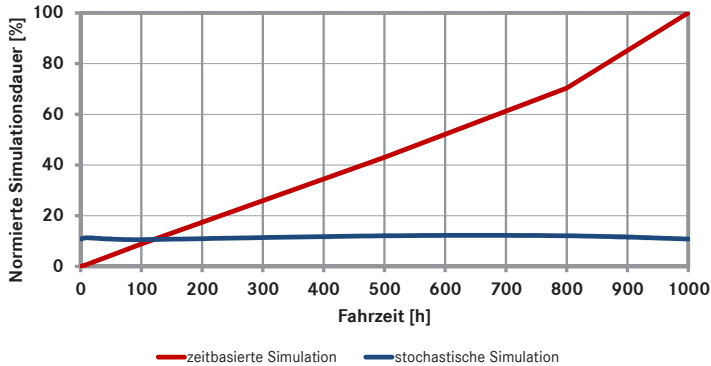
**Tab. 7.6:** Simulationsdauer der Simulationsverfahren, nach [1]

Es ist zu erkennen, dass die Simulationsdauer auf diesem Fahrprofil bei Anwendung des stochastischen Verfahrens ca. 100 Mal so lange ist wie ein zeitbasiertes Verfahren.

Die *Erhöhung der Simulationsdauer* ist in diesem Fall dem Berechnungsverfahren in Verbindung mit geringen Klassenbreiten geschuldet, die im Anwendungsfall auf bis zu 4.500 Klassen mit geringen Besetzungszahlen (v. a. in den Randbereichen) führen.

Der Vergleich bezieht sich hierbei allerdings auf ein Fahrprofil mit einer Streckenlänge von ca. 80 Kilometern, einer Zeitdauer von ca. 1,6 Stunden und einer Schrittweite für die zeitdiskrete Simulation von 0,01 Sekunden. Erhöht man den Betrachtungshorizont (z. B. auf 1.000 km), so steigt der Zeitbedarf der zeitbasierten Simulation in Analogie zum steigenden Zeitbedarf der Fahrstrecke in der Realität. Die Simulationsdauer des stochastischen Verfahrens bleibt hierbei annähernd gleich, da dieses Verfahren mit relativen Häufigkeiten rechnet. Die Häufigkeitsverteilungen ändern sich zwar aufgrund der variierten Fahrprofile, dies hat allerdings kaum Einfluss auf die spätere Berechnungsdauer.

Abbildung 7.8 zeigt zum Vergleich die normierten Simulationsdauern von zeitbasierter und stochastischer Simulation in Abhängigkeit der Fahrzeit. Hierbei ist zu beachten, dass die absoluten Zeitdauern stark abhängig von den Eigenschaften des eingesetzten Rechners sind.



**Abb. 7.8:** Normierte Simulationsdauer von zeitbasierter und stochastischer Simulation in Abhängigkeit der Fahrzeit, bezogen auf die maximale Zeitdauer der zeitbasierten Simulation

Das Rechnen mit Häufigkeiten bei der stochastischen Simulation nimmt hohe Ressourcen in Anspruch, da der Häufigkeitswert jeder Klasse einer Zufallsvariablen mit dem entsprechenden Wert der weiteren Zufallsvariablen gemäß den Bestimmungen aus Kapitel 2.3.5 verrechnet wird. Einen Ansatz zur Reduktion des Zeitaufwands bieten hierbei Dichtefunktionen, die als Hilfsmittel zur Beschreibung einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung eingesetzt werden können. Im Gegensatz zum Rechnen mit Häufigkeitsverteilungen erfolgt die Verrechnung zweier Dichtefunktionen anschließend nicht mehr klassenweise.

Am Beispiel einer Wahrscheinlichkeitsverteilung des elektrischen Leistungsbedarfs einiger Verbraucher nach Abbildung 7.9 soll versucht werden, die Dichtefunktion und deren Parameter (Erwartungswert und Varianz) zu ermitteln. Die Verteilung folgt keiner bekannten Dichtefunktion (z. B. Normalverteilung, Gleichverteilung, Bernoulli-Verteilung) und weist zudem zwei Modi auf. Sie wird daher als bimodale Verteilung angenommen [13] [11].

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer bimodalen Verteilung  $Y$  kann als aus zwei Verteilungen  $X_1$  und  $X_2$  (in diesem Fall zwei Normalverteilungen) zusammengesetzte Verteilung angenommen werden.

$$Y = \begin{cases} X_1 & (\text{Verteilung 1}) \\ X_2 & (\text{Verteilung 2}) \end{cases} \quad (7.1)$$

Der Faktor  $\lambda_V$  berücksichtigt dabei anteilig die beiden Verteilungen an der Dichtefunktion der bimodalen Verteilung.

$$f_Y(x) = \lambda_V \cdot f_{X_1}(x) + (1 - \lambda_V) \cdot f_{X_2}(x) \quad (7.2)$$

Zur Bestimmung der Parameter Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  wird ein Monte-Carlo-Algorithmus verwendet. Die Monte-Carlo-Methode ist ein Verfahren, bei dem man mit Hilfe von Zufallsgeneratoren Lösungen von Problemen „auslost“ [13].

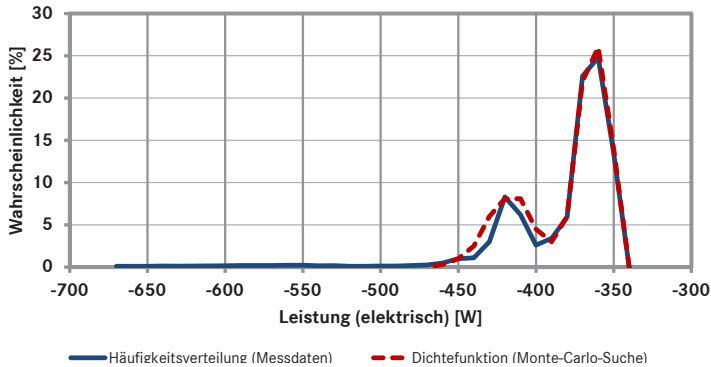
In Abbildung 7.9 wurden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Parameter einer *bimodalen Verteilung* bestimmt. Dazu wurden unter Einsatz eines Zufallsgenerators die Parameter einer bimodalen Verteilung bestimmt und mit der messtechnisch ermittelten Verteilung verglichen. Nach der zufälligen Generierung von 50.000 Dichtefunktionen resultiert eine Dichtefunktion mit den meisten Übereinstimmungsmerkmalen zur gesuchten Verteilung. Sie ist der Grafik hinzugefügt.

In der Anwendung auf das Bordnetz ergibt sich in diesem Fall eine sehr gute Übereinstimmung mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung (vgl. Abbildung 7.9). Bei weiteren Verbrauchern ist das Auffinden einer geeigneten Dichtefunktion mit einer Ungenauigkeit gegenüber der Wahrscheinlichkeitsverteilung verbunden, was zu Fehlern in der anschließenden Berechnung führt.

Die Berechnung mit Hilfe von Verteilungsfunktionen würde den zeitlichen Aufwand der stochastischen Simulation nochmals deutlich reduzieren. Auf der anderen Seite steigt wiederum die Fehleranfälligkeit durch Anwendung der multimodalen Funktionen, die eine Verteilung nur ungenau abbilden können.

Daher wurde in dieser Arbeit das Rechnen mit Häufigkeitsverteilungen bevorzugt.





**Abb. 7.9:** Anwendung einer Monte-Carlo-Suche zur Bestimmung der Dichtefunktion einer Häufigkeitsverteilung elektrischer Leistungen, Klassenbreite  $\Delta P_{el,k} = 10$  W, nach [68]

### 7.3.5 Fazit des Genauigkeitsvergleichs

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Validierung der stochastischen Simulationsmethodik zeigen anschaulich die Güte der erzielten Ergebnisse. Es ist ersichtlich, dass mit diesem Verfahren Werte erzeugt werden, deren Auftreten in der Realität nicht vorkommen können, was seine Genauigkeit reduziert. Sobald jedoch Fahrprofile mit einer langen Fahrzeit verwendet werden, kommt der Geschwindigkeitsvorteil des stochastischen Simulationsverfahrens zu tragen, der unabhängig von der Anzahl der eingehenden Messgrößen ist.

## 7.4 Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeit

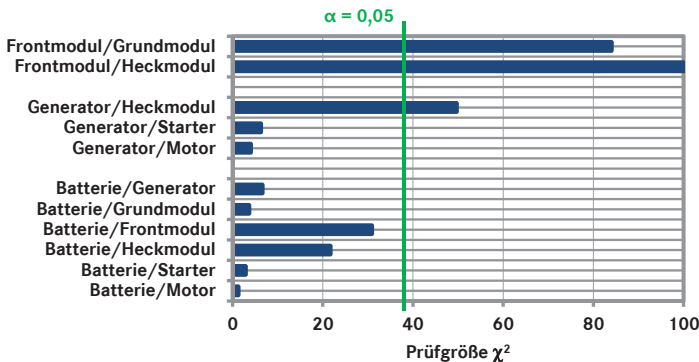
Bereits mehrfach im Verlauf dieser Arbeit wurde der Einfluss der stochastischen Abhängigkeit auf die Ergebnisse stochastischer Berechnungsvorgänge angesprochen. Nach Kapitel 2.3.4 ist die stochastische Unabhängigkeit Voraussetzung zur Durchführung von Rechenoperationen mit Häufigkeits- und Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Diese Voraussetzung wurde bisher entgegen der Realität angenommen. An dieser Stelle soll die stochastische Unabhängigkeit überprüft werden. Liegt eine Abhängigkeit der Variablen

vor, soll an dieser Stelle der Einfluss dieser Abhängigkeit auf das Berechnungsergebnis ermittelt werden. Gleichzeitig werden Maßnahmen beschrieben, mit denen eine Abhängigkeit der Variablen vermieden werden kann, um stochastische Berechnungsvorgänge durchführen zu können.

Zur Überprüfung der Unabhängigkeit wird nach Kapitel 2.3.4 der  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest angewandt. Ist die Prüfgröße  $\chi^2$  klein, so kann man vermuten, dass die Hypothese der Unabhängigkeit zweier diskreter Zufallsvariablen wahr ist.

An dieser Stelle sollen die Abhängigkeiten innerhalb des elektrischen Bordnetzes untersucht werden. Dazu werden die Häufigkeitsverteilungen der elektrischen Leistungen einzelner Verbrauchergruppen, die separat durch Messtechnik erfasst wurden (vgl. Kapitel 4.4.3), betrachtet.

In Abbildung 7.10 ist das Ergebnis des  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests dargestellt. Dabei steht die Bezeichnung Generator für die Häufigkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Generators. Auf die gleiche Weise gilt dies für die Komponenten Batterie und Starter. Mit Heck- und Grundmodul werden alle elektrischen Leistungen bezeichnet, die am Außenbereich (Heck oder Front) des Fahrzeugs gemessen wurden. Dies ist vorwiegend der Leistungsbedarf der Beleuchtung des Fahrzeugs sowie der Blink- und Bremsleuchten. Das Grundmodul bezeichnet die Leistungen, die für die Versorgung aller Verbraucher im Innenraum des Fahrzeugs benötigt werden. Mit Motor werden alle elektrischen Leistungen bezeichnet, die zu dessen Betrieb notwendig sind (u. a. Steuergeräte, Einspritzdüsen, Heizung usw.).



**Abb. 7.10:** Werte der Prüfgröße  $\chi^2$  nach Anwendung des  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests zur Untersuchung der Unabhängigkeit zweier Zufallsvariablen, nach [68]

Der kritische Wert der Prüfgröße  $\chi^2$  bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  beträgt für eine  $\chi^2$ -Verteilung mit 25 Freiheitsgraden:

$$\chi^2 = 37,65 \quad (7.3)$$

Die Ergebnisse des Unabhängigkeitstests weisen nach Abbildung 7.10 für die elektrischen Leistungen der Batterie keine Abhängigkeit zu den anderen Baugruppen nach. Ebenfalls besteht keine mathematische Abhängigkeit zum Energiewandler Generator. Die Prüfgröße  $\chi^2$  bewegt sich hierbei im Bereich zwischen 0 und 30. Zwischen Generator und Heckmodul ermittelt die Prüfgröße einen Wert von ca. 50. Damit ist eine geringe Abhängigkeit vorhanden. Ein logischer Rückschluss auf funktionale Abhängigkeiten zwischen den Leistungen von Generator und Heckmodul durch die Betriebsstrategie des Fahrzeugs ist allerdings nicht zu erkennen. Das Front- und das Heckmodul stehen in voller Abhängigkeit. Dies ist leicht nachzuvollziehen, da sowohl die Blinkfunktion als auch die Beleuchtung immer gleichzeitig elektrische Leistung in Front- und Heckmodul anfordern. Die Beziehung von Front- und Grundmodul ist wiederum durch die Fahrzeugfunktionalität nicht zu erklären, in den Messdaten ist sie mit einem  $\chi^2$  von knapp über 90 allerdings vorhanden.

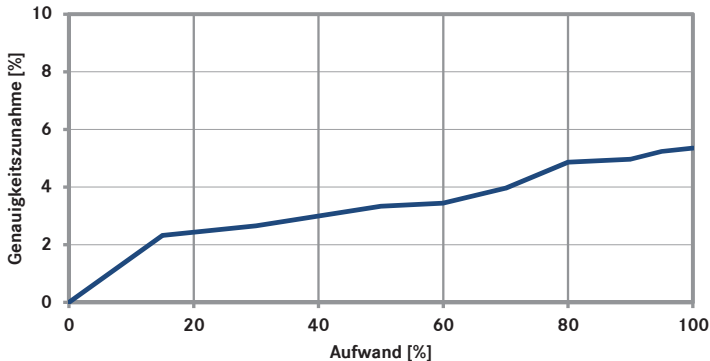
Für die praktische Anwendung des stochastischen Simulationsverfahrens bedeutet dies, dass nicht alle Verteilungen der einzelnen Verbraucher(-gruppen) miteinander verrechnet werden dürfen (z. B. um die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Summe aller elektrischen Leistungen zu erhalten). Um dies zu umgehen, werden im Idealfall die abhängigen Leistungsverteilungen (z. B. von Frontmodul und Heckmodul) vor der Anwendung der statistischen Auswertung im zeitdiskreten Bereich addiert und anschließend eine Häufigkeitsverteilung der gemeinsam aufgetretenen Leistungen erstellt. Somit wären alle Zufallsgrößen mathematisch unabhängig und könnten daher zu den stochastischen Rechenoperationen verwendet werden.

Es treten allerdings mehrere Fälle auf, die dies nicht ermöglichen. Zum einen kann es bereits in den Datenquellen nach Kapitel 4.1 vorkommen, dass Messdaten nicht zeitbasiert, sondern bereits statistisch ausgewertet vorliegen. Zum anderen könnte genau der Austausch oder die Veränderung einer Komponente, die in mathematischer Abhängigkeit weiterer Funktionen steht, die Fragestellung an die Simulation sein.

Zur Lösung dieses Problems besteht die Möglichkeit, die Häufigkeitsverteilung einer Variablen (z. B. die maximale elektrische Leistung des Generators, die in einer Abhängigkeit zur Drehzahl des Generators steht) in mehrere

Verteilungen aufzuteilen, die keine Abhängigkeiten beinhalten (z. B. in mehrere Verteilungen elektrischer Leistungen des Generators, basierend auf den vorliegenden Drehzahlen des Verbrennungsmotors). Mit dieser Aufteilung kann man das Ziel erreichen, dass diese Verteilungen als mathematisch unabhängig gelten. Somit dürfen mathematische Operationen durchgeführt werden. Die Aufteilung der Häufigkeitsverteilungen führt allerdings zu einer Erhöhung des Berechnungsaufwandes und damit der Dauer der Simulation. Vergleicht man anschließend die Simulationsdauern beider Berechnungsansätze, ist mit einer gestiegenen Simulationsdauer der zusätzliche Berechnungsaufwand zur Durchführung der Korrekturen bekannt.

In Abbildung 7.11 ist das Verhältnis zwischen Ergebnistüte und zusätzlichem Aufwand für den Berechnungsaufwand des stochastischen Verfahrens dargestellt. Die Erhöhung der Genauigkeit erfolgte hier durch die Verwendung von mehrdimensionalen Verteilungen für alle Größen, die stochastisch abhängig sind. Die Ermittlung der erreichten Genauigkeit geschah anschließend anhand der Vorgehensweisen nach den Kapiteln 7.3.2 und 7.3.3. Abbildung 7.11 zeigt, dass mit doppeltem Simulationsaufwand eine Genauigkeitserhöhung von ca. 5% erreicht werden konnte. Die Steigung der Kurve nimmt allerdings mit zunehmendem Aufwand ab.



**Abb. 7.11:** Prozentuale Genauigkeitserhöhung des Ergebnisses der Simulation in Abhängigkeit des zusätzlichen Aufwands

Aus dieser Betrachtung können zwei Ableitungen getroffen werden.

- Eine Verbesserung der Genauigkeit durch Reduktion mathematischer Abhängigkeiten im stochastischen Simulationsverfahren ist mit einem hohen simulativen Aufwand verbunden.
- Der Einfluss der Berechnungsvorgänge unter Missachtung der stochastischen Unabhängigkeit auf die absolute Verbrauchseinsparung ist vorhanden und anhand der Anwendungsbeispiele für diese quantifizierbar.

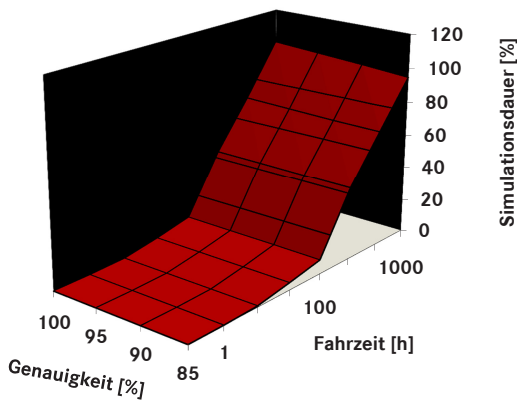
Eine generelle Übertragbarkeit des Fehlereinflusses durch die Abhängigkeit auf alle Berechnungen wäre wünschenswert. Auf diese Weise könnte man z. B. basierend auf dem Unabhängigkeitsmaß, das durch den  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest ermittelt wurde, eine exakte Aussage über die Ergebnisgüte der durchgeführten oder durchzuführenden Simulation treffen. Leider kann das Unabhängigkeitsmaß nicht für eine exakte Abschätzung der Fehlerauswirkung herangezogen werden, da es lediglich das mathematische Maß für die Abhängigkeit beschreibt und nicht die Auswirkung auf das Fahrzeugmodell.

So kann die Auswirkung der mathematischen Abhängigkeit nur experimentell anhand der durchgeführten Anwendungsbeispiele erfolgen. Deren Quantifizierung findet im nächsten Unterkapitel statt, das alle Ergebnisse der Genauigkeitsbetrachtung anhand der verschiedenen Beispiele zusammenfasst.

## 7.5 Objektive Bewertung des Verfahrens

Dieses Unterkapitel soll einen finalen Überblick über die objektive Bewertung des stochastischen Verfahrens ermöglichen. Dazu werden die Ergebnisse der objektiven Methoden aus den Kapiteln 7.2, 7.3 und 7.4 berücksichtigt. Sie sollen den Anwendern des stochastischen Simulationsverfahrens einen groben Anhaltswert über die Ergebnisgüte ihrer Ergebnisse bieten. Die quantifizierten Gütekriterien, bestehend aus dem Nutzen und dem Aufwand, sind dabei auf die zeitbasierte quasistationäre Simulation bezogen. Die Ergebnisse repräsentieren die Genauigkeit bei den in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungsbeispielen. Eine generelle Übertragbarkeit auf alle stochastischen Berechnungen ist daher nicht möglich.

In Abbildung 7.12 ist die Gütebewertung für das Referenzverfahren dargestellt, das zeitbasierte Simulationsverfahren. Die Simulationsdauer als Bewertungsmaßstab für den Aufwand sowie die Ergebnisgüte als Nutzen des Verfahrens sind auf die zeitbasierte Simulation normiert. Dies bedeutet, dass ihre maximal erreichbaren Werte auf 100 % skaliert sind. Die Verwendung von absoluten Zahlen für die Simulationsdauer scheint hier auch nicht sinnvoll, da die Simulationsdauer sehr stark ressourcenabhängig ist. Daher wird hier ein vergleichender Ansatz gewählt. Als weitere Größe ist die Fahrzeit gewählt, die Einfluss auf die Simulationsdauer hat.



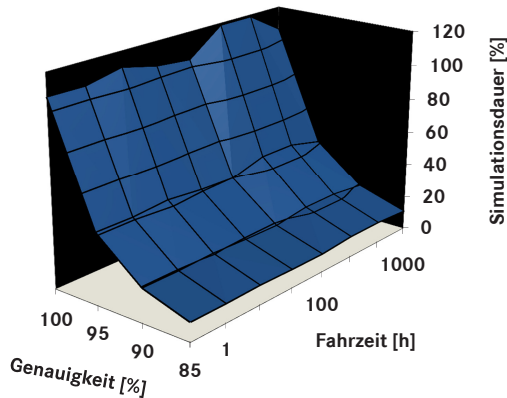
**Abb. 7.12:** Normierte Simulationsdauer in Abhängigkeit der erzielbaren Genauigkeit und der simulierten Fahrzeit für die zeitbasierte quasistationäre Längsdynamiksimulation

Vergleichbar zu Kapitel 7.3.4 erkennt man den Einfluss der Fahrzeit auf die Simulationsdauer. Anhand der zeitdiskreten Berechnung der Zustandsgrößen der Simulation erscheint dies auch schlüssig. Die Genauigkeit kann hier variiert werden (z. B. durch variierte Interpolationsverfahren o. Ä.). Sie haben aber geringe Auswirkungen auf den Simulationsaufwand.

In Abbildung 7.13 sind die Kennzahlen für das stochastische Verfahren dargestellt. Hier erkennt man einen deutlichen Unterschied. Grundsätzlich ist die Simulationsdauer dieses Verfahrens nicht abhängig von der Fahrzeit des Fahrprofils. Vergleicht man hier die Werte für die maximale Fahrzeit bei einer Genauigkeit des stochastischen Verfahrens von 85 % der Bewertungsgröße<sup>1</sup>, so ergibt sich hierbei ein deutlicher Effizienzvorteil durch das

<sup>1</sup>Eine Simulationsdauer von 100 % bezieht sich hier auf das zeitbasierte Verfahren für eine Fahrzeit von 1.000 Stunden.

stochastische Verfahren. Eine Steigerung der Genauigkeit um ca. 5 - 10 % erbringt für das Verfahren ebenfalls noch Vorteile. Bei identischer Genauigkeit ist der Zeitaufwand zur Durchführung der stochastischen Simulation um ca. 20 % höher. Dies kann mit den vielen iterativen Berechnungsschritten erklärt werden, die zusätzlich geleistet werden müssen.



**Abb. 7.13:** Normierte Simulationsdauer in Abhängigkeit der erzielbaren Genauigkeit und der simulierten Fahrzeit für das stochastische Simulationsverfahren

Mit Hilfe dieser beiden Diagramme können die Vor- und Nachteile des stochastischen Verfahrens klar hervorgehoben werden.

- Je größer die Dauer der eingehenden Fahrprofile, desto effizienter ist das stochastische Verfahren gegenüber dem zeitbasierten Verfahren.
- Eine annähernd gleiche Genauigkeit der Berechnungsergebnisse lässt sich nur in Folge eines Mehraufwandes bei der stochastischen Simulation realisieren.
- Bei kurzen Streckenverläufen ist das zeitbasierte Verfahren Mittel der Wahl. Allerdings bei einem geringeren Informationsgehalt: Es liegen auf diese Weise nur Ergebnisse für eine einzige Fahrstrecke vor. Die Auswirkung der Varianz, die durch unterschiedliche Fahrprofile, Fahrertypen, Beladungszustände der Fahrzeuge etc. entstehen, auf den Kraftstoffverbrauch bleiben unbekannt bzw. können nur durch zusätzliche Rechenläufe für andere Lastfälle bestimmt werden.
- Der Genauigkeitsgrad der stochastischen Simulation lässt sich grob abschätzen.

Mit Hilfe dieser Betrachtungen kann nun der Anwender klar entscheiden, bei welchem Anwendungsfall welches Verfahren das für ihn geeignetere ist.

## 7.6 Subjektive Bewertung des Verfahrens

Die Erfahrungen aus der vielfältigen Anwendung der Methodik sowie die Betrachtung der objektiven Kriterien führen dazu, dass die Entwicklungsmethodik aus Expertensicht subjektiv bewertet werden kann. Damit kann entschieden werden, ob und an welcher Stelle es sinnvoll ist, das stochastische Simulationsverfahren in den Produktentstehungsprozess als sinnvolles Werkzeug der Fahrzeugentwicklung und -auslegung zu integrieren.

Innerhalb der letzten Jahre wurde das Entwicklungstool daher für die begleitende Unterstützung in der Verbrauchsbewertung von Energiemanagementmaßnahmen und der Parameterauslegung für deren Betriebsstrategien eingesetzt. Begleitend dazu und als Referenz für das jeweils berechnete Ergebnis diente eine bestehende zeitbasierte Simulation. Es stellte sich heraus, dass in Bezug auf die Bewertung von Energiemanagementmaßnahmen je nach Reifegrad der Entwicklung eines neuen Systems unterschiedliche Anforderungen gestellt werden.

Eine bis zur Serientauglichkeit entwickelte Energiemanagementmaßnahme muss vor der Freigabe des neuen Systems auf bekannten Referenzstrecken hinsichtlich ihres Einsparpotenzials hin bewertet werden. Dazu wird in der Regel ein Fahrversuch durchgeführt. Bei Maßnahmen, die ein relativ geringes Einsparpotenzial ( $< 0,5\%$ ) aufweisen, wird dabei immer häufiger eine zeitbasierte Längsdynamiksimulation eingesetzt, da die variierenden Umgebungseinflüsse dieses Potenzial nicht mehr ohne eine ständige Vergrößerung des zeitlichen und messtechnischen Aufwands ermitteln lassen. Für eine Bewertung der Maßnahme im Kundeneinsatz existiert mit Ausnahme von zeitaufwändigen und finanziell kostspieligen Flottenversuchen derzeit kaum eine Möglichkeit, das zu erreichende Potenzial abschätzen zu können. Die zeitbasierte Simulation kann diese Aufgabe lösen. Dies ist allerdings mit einem hohen Aufwand verbunden.

Sobald eine Überprüfung der Fahrprofile vieler Kunden durchgeführt werden soll, wird der Einsatz zeitbasierter Simulationen sehr schnell unwirtschaftlich, da ihr Aufwand sehr stark ansteigt. Simuliert man, um den Aufwand überschaubar zu halten, nur als sinnvoll erachtete Kundenprofile, so steigt



auf der anderen Seite die Abweichung der betrachteten Maßnahme zwischen dem Ergebnis der Simulation und der vom Kunden gemessenen Kraftstoffeinsparung.

Genau diesen Anwendungsfall deckt das stochastische Simulationsverfahren ab. Es reduziert den Zeitaufwand pro Simulationsdurchlauf unter Betrachtung langer Streckendaten. Dabei wird die Methodik umso effizienter, je mehr Messungen herangezogen werden, die nach statistischer Auswertung in Häufigkeitsverteilungen als Eingangsgrößen für die stochastische Simulation herangezogen werden können.



# 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein *neuartiges stochastisches Simulationsverfahren* als effizienter Ansatz zur längsdynamischen Verbrauchssimulation vorgestellt, das die explizite Berechnung im Zeitbereich ersetzt.

Entsprechend dem heutigen Stand der Wissenschaft und Technik wurden dazu im ersten Schritt die Grundlagen des längsdynamischen Verhaltens von Nutzfahrzeugen und deren simulativer Abbildung erarbeitet. Nach der Darstellung der Grundlagen und Begriffsdefinitionen von Energie und Leistung wurden Ansatzmöglichkeiten zur Energieeinsparung für effiziente Nutzfahrzeuge hergeleitet und präsentiert. Aus einer breiten Datenbasis, bestehend aus Fahrzeugmessungen, Flottenversuchen und Kundenfahrerproben, wurde eine Wissensbasis generiert, deren statistisch ausgewertete Messwerte als Eingangsgrößen zur Durchführung der Simulation dienen.

Im *Hauptteil dieser Arbeit* wurde das Verfahren der stochastischen Simulation definiert. Das Simulationsverfahren wurde weiterhin durch die Integration eines evolutionären Optimierungsalgorithmus ergänzt, der freie Systemparameter hinsichtlich eines Optimierungskriteriums verändert. Anschließend wurde die stochastische Simulation auf einige Beispiele angewendet. Dabei wurden die Eigenschaften des neuen Verfahrens dargestellt und mit bestehenden Verfahren verglichen.

Nach der Anwendung wurde die stochastische Simulation anhand definierter subjektiver und objektiver Bewertungskriterien untersucht. Die Unterschiede zu bekannten zeitbasierten Simulationsverfahren wurden herausgearbeitet und präsentiert. Abschließend wurde das neue Verfahren in seinen Stärken und Schwächen bewertet.

## 8.1 Stochastisches Simulationsverfahren

Das in dieser Arbeit vorgestellte stochastische Simulationsverfahren basiert auf Messdaten, die Eingangsgrößen für die Berechnung sind. Durch die Messdaten können die Zustandsgrößen aller im mathematischen Fahrzeugmodell abgebildeten Komponenten berechnet werden. Eine neue Systemkonfiguration, die der Entwickler und gleichzeitige Anwender des Simulationsverfahrens bewerten lassen will, verändert durch neue Systemparameter und Betriebsstrategien die Zustandsgrößen der davon betroffenen Komponenten. Dadurch ergibt sich eine Veränderung des Verhaltens der Energiewandlung im Fahrzeugsystem. Die Berechnung der Energiebilanz für das neue Fahrzeugsystem führt schließlich zum Berechnungsergebnis. Das Bewertungskriterium für das neue System ist in der Regel dessen Kraftstoffbedarf. Es kann allerdings dafür auch jede andere Variable des Fahrzeugmodells verwendet werden (z. B. die elektrische Leistung des Generators). Durch Anwendung eines Optimierungsverfahrens können freie Systemparameter hinsichtlich eines optimalen Kriteriums verändert werden.

Die Datenbasis zur Durchführung einer stochastischen Simulation wird mit Hilfe von Messdaten aus Fahrprofilen einer großen und repräsentativen Kundengruppe sowie aus Erprobungsfahrzeugen erstellt. Nach deren Auswertung liegen sie als statistische Größen, in der Regel als Häufigkeitsverteilungen, vor. Das stochastische Berechnungsverfahren verwendet daher zur Berechnung die mathematischen Operationen aus dem Fahrzeugmodell und wendet diese auf die Häufigkeitsverteilungen an. Für die Anwendung der mathematischen Operationen wird beim Berechnungsvorgang entgegen der Realität eine *stochastische Unabhängigkeit* der Variablen angenommen, die miteinander verrechnet werden. Dadurch ergeben sich potenzielle Fehlerquellen, deren Auswirkung auf das Berechnungsergebnis ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit war. Es konnte hier gezeigt werden, wie die Bestimmung der Abhängigkeiten verschiedener Variablen des Fahrzeugsystems durchgeführt wird und welche Abhängigkeiten innerhalb eines beispielhaften Fahrzeugsystems bestehen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Resultate stochastischer Berechnungsvorgänge streuen. Dies konnte aber durch den Vergleich mit Fahrzeugmessungen und zeitbasierten Simulationen oftmals dem Streckenverlauf und der Betriebsstrategie zugeordnet werden, so dass durch die Berechnungsmethodik selbst ein geringerer Fehler entsteht, sofern die Trajektorie des Fahrzeugs nicht verändert wird und keine Systemänderungen vorgenommen werden, die eine Auswirkung auf die Leistungen vieler Komponenten des Fahrzeugs haben.

Ein *zeitdiskretes Simulationsverfahren* löst zu jedem Zeitschritt die Berechnungsvorschriften des mathematischen Fahrzeugmodells. Auf diese Weise kann es Betriebsstrategien sehr realitätsgetreu umsetzen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Betriebsstrategie Ereignisse auf Variablen bezieht, deren Werte sich in Abhängigkeit der Zeitdauer ändern (z. B. die gespeicherte Energie einer Batterie). Das stochastische Simulationsverfahren hingegen löst die Berechnungsvorschriften aus dem Fahrzeugmodell genau einmal für die Häufigkeitsverteilungen aller Zustandsgrößen. Zeitlich veränderliche Variablen können hierbei nicht berücksichtigt werden. Die zeitlichen Verläufe können allerdings bei Verwendung der *stochastischen Simulation* mit einigen Zwischenschritten näherungsweise nachgebildet werden.

Die erste Möglichkeit der Nachbildung über der Zeit veränderlicher Merkmale ist die Berücksichtigung der Dauer ihres Auftretens in Häufigkeitsverteilungen. In dieser Arbeit wurde z. B. eine Häufigkeitsverteilung der Auftretensdauer von Zug- und Schubphasen des Verbrennungsmotors dazu genutzt, um die Energie zu berechnen, die während einer Phase der Batterie zugeführt oder entnommen wurde. Die zweite Möglichkeit ist der iterative Durchlauf der Berechnungsvorschriften des Fahrzeugmodells. In dieser Arbeit wurde dies für die Erfüllung der Leistungs- und Energiebilanzen durchgeführt. Das Kriterium für deren Erfüllung ist die Übereinstimmung der betragsmäßigen Summe aller zu- und abfließenden Leistungen und Energien innerhalb eines (Teil-)Systems. Um für diesen Fall eine ausgeglichene Leistungs- und Energiebilanz für den Batteriespeicher zu erhalten, mussten unter Anpassung der Wandlungsleistung des Generators die Gleichungen mehrfach angewandt werden, bis die Bedingungen beider Bilanzen erfüllt waren. Trotz des Mehraufwandes der iterativen Berechnungsschritte ist die Summe aller Berechnungsvorgänge bei der stochastischen Simulation geringer als bei der zeitbasierten Simulation.

Der *Zeitbedarf* für die Durchführung einer stochastischen Simulation unter Anwendung der Eingangsgrößen des gewählten Referenzfahrprofils ist bei einer kurzen Streckendistanz von ca. 80 Kilometern um ein Vielfaches höher als der, der für die Durchführung einer zeitbasierten Simulation benötigt wird. Erhöht man allerdings die Streckenlänge und Zeitdauer des zu simulierenden Fahrprofils, so bleibt der Zeitbedarf für einen stochastischen Berechnungsdurchlauf gleich, während der des zeitbasierten Verfahrens überproportional zum Simulationsumfang ansteigt. Bei einer Streckenlänge von ca. 8.000 Kilometern entsprechen sich die Simulationsdauern beider Verfahren.

Die *Bewertung von Betriebsstrategien*, die Leistungen steuern, erfolgt schrittweise. So kann der Nutzer nach jedem Schritt die Auswirkung der Betriebsstrategie auf das System beobachten. Die Neuberechnung der Systembilanz führt dazu, dass der Nutzer die Auswirkung seiner gesetzten Parameter auf das Gesamtsystem erkennen kann. Er erhält dabei kein singuläres Bewertungskriterium (z. B. die Summe des eingesparten Kraftstoffverbrauchs), sondern die veränderten Betriebspunkte in Form von mehrdimensionalen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die er mit den Häufigkeitsverteilungen des vorliegenden Referenzfalls vergleichen kann.

Das *stochastische Simulationsverfahren* eignet sich aufgrund seiner statistischen Darstellungsform zur visuellen Darstellung aller Leistungen und Energien im Fahrzeug. Dies ermöglicht dem Anwender, die Nutzung einer bestimmten Fahrzeugkonfiguration auf ausgewählten Fahrprofilen seiner Kunden zu betrachten und ungünstige Betriebszustände und deren Auftretenswahrscheinlichkeiten zu identifizieren. Bereits einfache Maßnahmen wie die Änderung eines Übersetzungsverhältnisses oder die Variation von Bauteileigenschaften durch mathematisch beschriebene Kennfelder sind einfach in die Simulation zu integrieren und unter Anwendung der Simulation zu bewerten.

Die *Optimierung freier Parameter* auf verschiedene Kundentypen ist eine geeignete Vorgehensweise, um in der Konzeptphase grundlegende Dimensionierungsfragen zu klären, die im späteren Verlauf auch in Kombination mit zeitbasierten Simulationsverfahren zu einem Kraftstoff- oder Wirtschaftlichkeitsoptimum führen.

## 8.2 Grenzen des Verfahrens

Das stochastische Simulationsverfahren verwendet ein *quasistationäres Fahrzeugmodell*, das sich prinzipiell sehr gut zur Berechnung wenig dynamischer Vorgänge eignet. Die Verwendung eines dynamischen Fahrzeugmodells zur Berechnung von instationären Vorgängen ist allerdings nur in Kombination mit zeitbasierten Simulationsumgebungen möglich, da nur hier die Auflösung der entstehenden Differenzialgleichungen möglich ist.

Dadurch – und durch das stochastische Berechnungsverfahren eingeschränkt – gilt der *Grundsatz*, dass das verwendete Fahrprofil bzw. die Transportaufgabe nicht verändert werden darf und die Sollgeschwindigkeit des Fahrprofils der Istgeschwindigkeit des simulierten Fahrzeugs entsprechen muss. Dies

führt dazu, dass z. B. eine starke Reduktion der Motorleistung nur mit großer Ungenauigkeit abgebildet werden kann, da hier zwangsläufig das Geschwindigkeitsprofil verändert wird. Die Simulation von Fahrdynamik und Fahrleistung ist aus diesen Gründen nicht das Anwendungsgebiet des Verfahrens.

Der Schwerpunkt des Verfahrens liegt daher auf der Bewertung von Energiemanagementmaßnahmen in ihrer Auswirkung auf Kundenfahrprofile. Dabei gilt die Einschränkung, dass die Geschwindigkeitsverläufe durch die Integration der Maßnahmen nicht verändert werden dürfen. Aufgrund des konstanten Verkehrsflusses in der späteren Anwendung erscheint es allerdings unwahrscheinlich, dass ein Fahrer, dem durch eine Energiemanagementmaßnahme mehr Antriebsleistung zur Verfügung steht, seine Geschwindigkeitstrajektorie stark verändert.

Für die Simulation von Kraftstoffeinsparungen auf *konkreten Streckenverläufen*, die durch ein zeitlich verlaufendes Höhen- sowie Fahrgeschwindigkeitsprofil beschrieben sind (z. B. der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ)), eignet sich das Verfahren nicht. Dies ist darin begründet, dass das Verfahren eine Berechnung von Merkmalshäufigkeiten durchführt und daher keiner festen zeitlichen Vorgabe von Zustandsgrößen folgen kann. Ebenso sind komplexe Betriebsstrategien nur mit reduzierter Genauigkeit abbildbar, da die Anzahl der Iterationsschritte und die Kombination aller möglichen Betriebszustände eine Interpretation des Ergebnisses aufgrund der weit streuenden Verteilungsfunktion kaum möglich macht.

Natürlich kann die Streuung durch Berücksichtigung aller stochastischen Abhängigkeiten im Fahrzeugsystem reduziert werden. Allerdings berechnet die stochastische Simulation keine zeitdiskreten Zustandsgrößen (z. B. den Batterieladezustand), die während des Fahrprofils auftreten. Daher kann selbst mit einer deutlichen Erhöhung des Aufwands durch die Berücksichtigung von Abhängigkeiten das Fahrzeugverhalten nicht exakt abgebildet werden. Das Ergebnis der stochastischen Simulation würde darüber hinaus aufgrund der Möglichkeit der aus den vorgegebenen Betriebspunkten basierenden freien Trajektorienwahl trotzdem streuen. Es wurde in dieser Arbeit nachgewiesen, dass der Aufwand, eine Betriebsstrategie mit Hilfe der stochastischen Simulation darzustellen, größer ist als der Aufwand bei Anwendung der zeitbasierten Simulation. Die exakte Abbildung einer Betriebsstrategie soll nicht das Ziel der stochastischen Simulation sein. Ihre Aufgabe ist es, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ihrer Auswirkungen auf den Energieeinsatz des Fahrzeugs zu berechnen.

Die Anwendung der stochastischen Simulation anhand der gewählten praktischen Beispiele zeigt, dass selbst die Optimierung von hybriden Antriebssträngen, die eine große Veränderung der Energieverteilung im Fahrzeug darstellt, sehr gut möglich ist. Eine größere Veränderung der Leistungsverteilung innerhalb des hybriden Antriebsstrangs führt wiederum zu einer *breiten Streuung der Verteilungsfunktionen*, da es durch die Erhöhung der Freiheitsgrade im Antriebsstrang sehr viele Möglichkeiten gibt, die geforderte Fahraufgabe zu erfüllen. Diese Streuung tritt allerdings auch in der Realität so auf, wie die Ergebnisse aus Flottenversuchen mit Hybridfahrzeugen zeigen.

### 8.3 Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle

Grundsätzlich ist die *Übertragbarkeit des stochastischen Simulationsverfahrens* auf alle Systeme möglich, die Energien und Leistungen innerhalb einer definierbaren Systemgrenze enthalten und deren Wandlungsvorgänge steuern können. Eine Anwendung der Methodik auf energiewirtschaftliche Fragestellungen scheint aus den Erfahrungen bei der Fahrzeuganwendung sehr geeignet zu sein. Anhand verschiedener Energiequellen (z. B. Wasserkraft- oder Atomkraftwerke, Wind- oder Solarenergie) könnten hierbei unter Betrachtung der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Leistungsanforderungen von Industrie- und Privathaushalten grundsätzliche Systemoptimierungen, die Auslegung neuer Energiequellen (z. B. Speicherkraftwerke) sowie preisbildende Maßnahmen (z. B. Nutzung von Nachtstrom) berechnet werden.

Aufgrund des *stationären Verhaltens* der energetischen Teilnehmer wären an dieser Stelle die Einschränkungen durch eine schlecht abbildbare Systemdynamik geringer als in der automobilen Anwendung. Sie würden zu einer noch kleineren Abweichung der Ergebnisse führen.

### 8.4 Empfehlungen für die weitere Forschung

Wie bereits in Kapitel 7.3.4 beschrieben, besteht ein hoher Aufwand in der *Datenspeicherung* sowie in der späteren Berechnung der häufigkeitsbasierten Darstellung der Betriebspunkte. Eine Möglichkeit zur Generierung von Verteilungsfunktionen würde an dieser Stelle sowohl die Schnelligkeit als auch



das Datenhandling und den benötigten Speicherbedarf für die Kundendaten wesentlich vereinfachen. Das Auffinden einer passenden Verteilungsfunktion wäre natürlich mit einer Reduktion der Genauigkeit verbunden, da keine Verteilungsfunktion die auftretenden Betriebspunkte, die in der Fahrzeuganwendung gemessen worden sind, exakt abbilden kann. Fände man eine geeignete Möglichkeit, Verteilungsfunktionen zu generieren, so wäre zu untersuchen, ob lieber der höhere Simulationsaufwand oder die steigende Ungenauigkeit bei der Generierung der Verteilungsfunktion in Kauf genommen werden soll.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Berechnungsschritte für komplexe Betriebsstrategien durch *parallele Berechnung der Teilsysteme* zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die heutige iterative Vorgehensweise sieht vor, die Berechnungsschritte hintereinander durchzuführen. Die Zeitdauer eines stochastischen Simulationsdurchlaufs könnte reduziert werden, wenn nicht jedes Subsystem des Fahrzeugmodells anhand seiner Hierarchieebene nacheinander berechnet würde. Für Subsysteme, die nicht in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, könnten deren Berechnungsvorgänge zeitgleich durchgeführt werden.

Ein weiterer Punkt wäre die Verbesserung der *Datenablage* in der Wissensbasis. Hier sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, mit der Fahrprofile automatisch kategorisiert und in die Wissensbasis einsortiert werden können. Dies würde die nur teilautomatisierte Bearbeitung der vielen Messdaten deutlich vereinfachen. So könnte eine große Datenmenge an Fahrzeugmessdaten, die täglich über Telematikdienste gesammelt werden, dazu dienen, die energieeffiziente Auslegung von Fahrzeugen in Zukunft automatisiert vorzunehmen — anhand der Fahrprofile, die jeden Tag in der Realität auftreten.



# A. Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Erhöhung des Kundennutzens als Treiber energieeffizienter Fahrzeuge, nach [82] . . . . .   | 3  |
| 1.2  | Dynamische und quasistationäre Längsdynamiksimulation, nach [83] . . . . .   | 5  |
| 1.3  | Aufbau und Inhalt der Arbeit . . . . .   | 8  |
| 2.1  | Prozessdefinition nach DIN 66201, nach [40] . . . . .  | 13 |
| 2.2  | Arten von Kopplungen zwischen Systemen oder Systemelementen, nach [122] . . . . .  | 14 |
| 2.3  | Wege zur simulativen Systemanalyse, nach [115] . . . . .   | 16 |
| 2.4  | Bausteine einer Simulation . . . . .   | 18 |
| 2.5  | Punktmassenersatzmodell, nach [33] und [43] . . . . .  | 21 |
| 2.6  | Kräfte an einem Sattelzug (oben, nach [5]) und nach Anwendung des Punktmassenersatzmodells (unten), nach [97] . . . . .  | 22 |
| 2.7  | Muscheldiagramm eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors mit Volllastkennlinien verschiedener Motorkonfigurationen, x-Achse: Motordrehzahl $n_{VKM}$ [1/min] [29] . . . . . | 27 |
| 2.8  | Sankey-Diagramm der Energieverteilung im Nutzfahrzeug . . . . .  | 29 |
| 2.9  | Antriebsstrangmodell mit möglichen elektrischen Eingriffen, nach [97] . . . . .  | 31 |
| 2.10 | Antriebsleistung in der hybriden Struktur, nach [97] . . . . .   | 32 |
| 2.11 | Vorwärts- und Rückwärtssimulation zur Lösung der längsdynamischen Bewegungsgleichungen . . . . .   | 36 |
| 2.12 | Modellbasierte Abbildung der Nebenaggregate . . . . .  | 39 |
| 2.13 | Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leistungsabgabe des Generators . . . . .   | 41 |
| 2.14 | Absolute und relative Häufigkeiten der elektrischen Leistungsabgabe des Generators, Klassenbreite $\Delta P_{Gen,el_i} = 100 \text{ W}$ . . . . .                  | 42 |
| 2.15 | Box-Whisker-Plot mit Kenngrößen der elektrischen Generatorleistung $P_{Gen,el}$ . . . . .  | 44 |
| 2.16 | Lorenzkurve des Verlaufs der elektrischen Generatorleistung $P_{Gen,el}$ . . . . .   | 46 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.17 | Relative Häufigkeitsverteilung des zeitlichen Verlaufs der Generatorleistung $h(P_{\text{Gen,el}})$ , Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 10 \text{ W}$ . . .   | 48 |
| 2.18 | Häufigkeitsverteilung der messtechnisch erfassten Generatorleistung sowie eine Normal- und Gleichverteilung, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 10 \text{ W}$ . . . . .  | 50 |
| 2.19 | Drehzahl-Strom-Wirkungsgrad-Kennfeld eines elektrischen Generators . . . . .  | 51 |
| 2.20 | Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators, Klassenbreiten $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ , $\Delta I_j = 10 \text{ A}$ . . . . .   | 52 |
| 2.21 | Häufigkeitsverteilung der Wirkungsgrade des Generators $\eta_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite $\Delta \eta_{\text{Gen}_k} = 1 \%$ . . . . .  | 53 |
| 2.22 | Häufigkeitsverteilungen zweier elektrischer Leistungsverläufe sowie deren Addition, Klassenbreite $\Delta P_{\text{el}_k} = 10 \text{ W}$ . . . . .   | 56 |
| 2.23 | Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el/mech}_k} = 10 \text{ W}$ . . . . .  | 58 |
| 2.24 | Die Trapezregel, nach [49] . . . . .  | 61 |
| 2.25 | Relative Häufigkeitsverteilungen der Motordrehzahl $n_{\text{VKM}}$ und Generator Drehzahl $n_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite $\Delta n_{\text{VKM}_k} = 100 \text{ 1/min.}$ bzw. $\Delta n_{\text{Gen}_k} = 400 \text{ 1/min.}$ , $i_{\text{Gen}} = 4$ . . . . . | 63 |
| 2.26 | Vorgehensweise bei der Optimierung freier Parameter einer Simulation unter Anwendung Evolutionärer Algorithmen, nach [103] . . . . .  | 66 |
| 2.27 | Ablaufdiagramm eines evolutionären Optimierungsalgorithmus, nach [103] . . . . .  | 67 |
| 3.1  | Vorteile eines Energiemanagements, nach [36] . . . . .  | 71 |
| 3.2  | Strategien zur effizienten Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie, nach [103] . . . . .  | 73 |
| 3.3  | Definition von Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie, nach [16] . . . . .  | 78 |
| 3.4  | Energie-Wege im Fahrzeug (ohne elektrische Antriebsmöglichkeit), nach [97] . . . . .  | 80 |
| 3.5  | Energie-Hierarchie anhand der Fahrzeugarchitektur, nach [97] . . . . .  | 81 |
| 3.6  | Mögliche Energiepfade (1, 2 oder 3) zur Versorgung der Nebenaggregate, nach [62] . . . . .  | 83 |
| 3.7  | Stoßrichtungen des Energiemanagements, nach [106] . . . . .   | 85 |
| 3.8  | Mögliche Stellhebel für ein Energiemanagementsystem mit Nebenaggregaten und Stand der Technik bei Nutzfahrzeugen . . . . .  | 88 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.9  | Energiewandlung und -verteilung von elektrischer Energie im Nutzfahrzeug [31] . . . . .   | 90  |
| 3.10 | Energiewandlung und -verteilung von pneumatischer Energie im Nutzfahrzeug [31] . . . . .  | 91  |
| 3.11 | Energiewandlung und -verteilung von hydraulischer Energie im Nutzfahrzeug [31] . . . . .  | 92  |
| 3.12 | Das Klimasystem im Nutzfahrzeug [31] . . . . .  | 93  |
| 4.1  | Hybrider Antriebsstrang im Flottenversuch (vereinfacht, 4x2), nach [97] . . . . .   | 99  |
| 4.2  | Geschwindigkeits- und Höhenprofil der Referenzstrecke „Überland“ . . . . .  | 103 |
| 4.3  | Zug- und Schubanteil auf den Referenzstrecken Stadt, Überland und Autobahn . . . . .  | 105 |
| 4.4  | Mischprofil mit Stadt-, Überland- und Autobahnanteilen, $\bar{v} = 47,7$ km/h . . . . .   | 108 |
| 4.5  | Gesuchtes Geschwindigkeitsmuster innerhalb einer weiteren Geschwindigkeitsfolge . . . . .   | 110 |
| 4.6  | Mustererkennung anhand Geschwindigkeitsprofilen verschiedener Fahrzeuge und Fahrer, nach [97] . . . . .   | 113 |
| 4.7  | Statistische Merkmale erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97] . . . . .  | 114 |
| 4.8  | Struktur der Datenbank M zur Gliederung des Datenmaterials . . . . .  | 116 |
| 4.9  | Datenbankstrukturen H(Häufigkeiten) und M(Messwerte) . . . . .  | 118 |
| 4.10 | Zuordnung der statistischen Messdaten zu den Datenbanken H und M . . . . .  | 120 |
| 4.11 | Statistische Merkmale des Kraftstoffverbrauchs erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97] . . . . .                             | 121 |
| 4.12 | Statistische Merkmale der Motordrehzahl erkannter Geschwindigkeitsverläufe mit den Mustern A, B und C, nach [97] . . . . .                                    | 122 |
| 4.13 | Motorbetriebspunkte (rot) dargestellt auf einem Muscheldiagramm des Verbrennungsmotors während einer Stadt-(links) bzw. Überlandfahrt (rechts) [97] . . . . . | 122 |
| 4.14 | Energie- (links) und Leistungsbilanz (rechts) eines Hybridfahrzeugs [97] . . . . .  | 123 |
| 4.15 | Diskrete Häufigkeitsanteile der Fahrzeuggeschwindigkeit anhand des Streckenverlaufs, Klassenbreite $\Delta v_k = 1$ km/h . . . . .                            | 124 |
| 4.16 | Häufigkeiten in diskreten Leistungsklassen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite $\Delta P_{VKM, mech_k} = 10$ kW . . . . .                                   | 127 |
| 4.17 | Anteile der mechanischen Energie der Nebenaggregate am Gesamtenergieeinsatz des Fahrzeugs, nach [62] . . . . .  | 128 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.18 | Durchschnittliche drehzahlabhängige Leistung der Nebenaggregate in den Betriebspunkten des Fahrzeugprofils, nach [62] . . . . .   | 129 |
| 4.19 | Maximal mögliche mechanische Leistungsaufnahme der Nebenaggregate, nach [62] . . . . .  | 130 |
| 4.20 | Anteile der Komponenten bzw. Subsysteme am elektrischen Energiebedarf, nach [62] . . . . .  | 131 |
| 4.21 | Energetische Systemabbildung vor (oben) und nach (unten) Integration eines zusätzlichen elektrischen Verbrauchers innerhalb des elektrischen Bordnetzes . . . . .   | 132 |
| 5.1  | Ablaufplan der stochastischen Entwicklungsmethodik . . . . .  | 139 |
| 5.2  | Abschnitt A: Energiebilanz des Referenzsystems . . . . .  | 140 |
| 5.3  | Abschnitt B: Unausgeglichene Systembilanz nach Veränderung des Referenzsystems (links) sowie nach anschließender Neuberechnung der Leistungen (rechts) . . . . .  | 140 |
| 5.4  | Abschnitt C: Optimierung der Systemeigenschaften . . . . .  | 141 |
| 5.5  | Systemgrenzen der elektrischen Energieversorgung (oben) und der Hybridisierung des Antriebsstrangs (unten) . . . . .  | 144 |
| 5.6  | Kosten-, Energie- und Leistungsbilanz nach Abschnitt A . . . . .  | 146 |
| 5.7  | Häufigkeitsverteilung (diskret) der elektrischen Endleistung $h(\sum P_{el,V})$ , Klassenbreite $\Delta P_{el,V_k} = 10 \text{ W}$ . . . . .  | 148 |
| 5.8  | Verteilung des Generatorwirkungsgrades $\eta_{Gen}$ , Klassenbreite $\Delta \eta_{Gen_k} = 1 \%$ . . . . .  | 149 |
| 5.9  | Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite $\Delta P_{Gen,el/mech_k} = 10 \text{ W}$ . . . . .   | 150 |
| 5.10 | Häufigkeiten der mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite $\Delta P_{VKM,mech_k} = 10 \text{ kW}$ . . . . .  | 150 |
| 5.11 | Häufigkeitsverteilung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades $\eta_{VKM}$ , Klassenbreite $\Delta \eta_{VKM_k} = 0,2 \%$ . . . . .  | 151 |
| 5.12 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der chemischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite $\Delta P_{chem,VKM_k} = 10 \text{ kW}$ . . . . .   | 151 |
| 5.13 | Elektrische Leistungen des Referenzsystems (oben) und nach Erhöhung der Generatorleistung (unten) . . . . .   | 154 |
| 5.14 | Veränderung des Endleistungsprofils $h(P_{el,V})$ . . . . .   | 155 |
| 5.15 | Wahrscheinlichkeitsverteilung des neuen elektrischen Verbraucherprofils, ermittelt aus der Addition der Häufigkeitsverteilungen der Leistungen eines neuen Verbrauchers mit den Leistungen der bestehenden elektrischen Verbraucher, Klassenbreite $\Delta P_{el_k} = 10 \text{ W}$ . . . . . | 157 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.16 | Relative Häufigkeitsverteilungen der Motordrehzahl $n_{\text{VKM}}$ und Generatordrehzahl $n_{\text{Gen}}$ , Klassenbreite $\Delta n_{\text{VKM}_k} = 100 \text{ 1/min.}$ bzw. $\Delta n_{\text{Gen}_k} = 400 \text{ 1/min.}$ , $i_{\text{Gen}} = 4$ . . . . . | 158 |
| 5.17 | Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators, Klassenbreiten $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ , $\Delta I_j^* = 10 \text{ A}$ . . . . .  | 159 |
| 5.18 | Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generatorwirkungsgrades $\eta_{\text{Gen}}^*$ , Klassenbreite $\Delta \eta_{\text{Gen}_k}^* = 1 \%$ . . . . .  | 159 |
| 5.19 | Elektrische und mechanische Leistungsverteilung des Generators nach Multiplikation mit dem reziproken Wirkungsgrad, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el/mech}_k}^* = 10 \text{ W}$ . . . . .   | 160 |
| 5.20 | Wahrscheinlichkeitsverteilungen der mechanischen und chemischen Leistungen des Verbrennungsmotors, Klassenbreite $\Delta P_{\text{VKM,mech/chem}_k}^* = 10 \text{ W}$ . . . . .  | 161 |
| 5.21 | Mehrdimensionale relative Häufigkeitsverteilung von Strom und Drehzahl des Generators im Schubbetrieb, Klassenbreiten $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ , $\Delta I_j = 10 \text{ A}$ . . . . .  | 164 |
| 5.22 | Volllastkennlinie des verwendeten Generators ( $T_{\text{Generator}} = 80^\circ \text{ C}$ ) . . . . .   | 164 |
| 5.23 | Wahrscheinlichkeitsverteilung von maximalem Generatorstrom des Generators in Abhängigkeit der Generatordrehzahl während des Schubbetriebs, Klassenbreiten $\Delta n_i = 100 \text{ 1/min.}$ , $\Delta I_j^* = 10 \text{ A}$ . . . . .                          | 165 |
| 5.24 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistungen des Generators $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$ , Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ . . . . .   | 165 |
| 5.25 | Integration einer Betriebsstrategie . . . . .  | 166 |
| 5.26 | Theoretisch mögliche Leistungsaufnahme durch die Batterie $p(P_{\text{el,B,Laden}}^*)$ in Schubphasen, Klassenbreite $\Delta P_{\text{el,B}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .   | 168 |
| 5.27 | Begrenzte Leistungsaufnahme $p(P_{\text{el,B,Laden}}^*)$ durch die Batterie in Schubphasen, Klassenbreite $\Delta P_{\text{el,B}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .  | 169 |
| 5.28 | Generatorleistung nach Begrenzung durch den Batteriespeicher, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .  | 170 |
| 5.29 | Differenz der Energiemenge nach einer Zug-/Schubphase in Bezug auf die volle nutzbare Speicherkapazität der Batterie, Klassenbreite $\Delta E_{\text{el,B}_k}^* = 0,02 \%$ . . . . .   | 171 |
| 5.30 | Mögliche Verläufe des relativen Speicherstands über der Simulationsdauer . . . . .   | 175 |
| 5.31 | Neue (S*) und konventionelle (S) Generatorleistung sowie ideale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Generatorleistung, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .   | 177 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.32 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen des Generators, bezogen auf die Zugphasen des Fahrzeugs, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .                             | 178 |
| 5.33 | Variation von Komponenteneigenschaften . . . . .   | 179 |
| 5.34 | Volllastkennlinie der Generatoren der Systeme $S$ und $S^*$ ( $T_{\text{Generator}} = 80^\circ \text{ C}$ ) . . . . .  | 180 |
| 5.35 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Generators, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .  | 181 |
| 5.36 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistungen nach Berücksichtigung der Energiebilanz der Batterie, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .                           | 183 |
| 5.37 | Wahrscheinlichkeitsverteilung des Generatorwirkungsgrades $\eta_{\text{Gen}}^*$ , Klassenbreite $\Delta \eta_{\text{Gen}_k}^* = 1 \%$ . . . . .  | 183 |
| 5.38 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Generatorleistungen beider Systeme, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .   | 184 |
| 5.39 | Optimierung freier Parameter . . . . .   | 185 |
| 5.40 | Grafische Benutzeroberfläche zur Optimierung beliebiger Zielfunktionen, erstellt mit der Programmiersprache Matlab [103] . . . . .   | 188 |
| 5.41 | Fitnessplot bei der Optimierung der Batteriekosten . . . . .   | 189 |
| 5.42 | Jährliche Kosteneinsparungen des Kunden unter Variation der Batteriekapazität sowie Minimum nach dem Optimierungsvorgang . . . . .   | 189 |
| 6.1  | Wahrscheinlichkeitsverteilung im Schubbetrieb maximal möglicher Generatorleistungen $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$ , Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ , durchgeführt für alle Varianten . . . . . | 193 |
| 6.2  | Wünschenswerte Leistungsaufnahmen durch die Batterie $p(P_{\text{el,B,Laden}}^*)$ in Schubphasen für alle Varianten, Klassenbreite $\Delta P_{\text{el,B}_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ . . . . .                               | 194 |
| 6.3  | Begrenzte Leistungsaufnahmen $p(P_{\text{el,B,Laden}}^*)$ durch den Speicher in Schubphasen, Klassenbreite $\Delta P_{\text{el,B}_k}^* = 0,2 \text{ kW}$ , für alle Varianten . . . . .                                  | 195 |
| 6.4  | Generatorleistungen nach Begrenzung durch den Speicher, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,el}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .  | 195 |
| 6.5  | Leistungsverteilungen der Generatorvarianten und Referenzfall, $\Delta P_{\text{Gen,el}_k} = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .   | 196 |
| 6.6  | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen der Generatoren, bezogen auf die Zugphasen des Fahrzeugs, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k}^* = 0,1 \text{ kW}$ . . . . .                            | 197 |
| 6.7  | Kraftstoffverbrauchsdivergenz der Systemvarianten . . . . .  | 197 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 6.8  | Relative Kosten/Amortisationsdauer der Systemvarianten bezogen auf die Variante 6 . . . . .   | 199 |
| 6.9  | Integration einer Solarzelle mit priorisierter Abgabe elektrischer Leistung . . . . .   | 201 |
| 6.10 | Globalstrahlung in Deutschland [121] . . . . .  | 203 |
| 6.11 | Aufgenommene mechanische Leistung des Generators in Abhängigkeit der Solarfläche, Klassenbreite $\Delta P_{\text{Gen,mech}_k}^* = 0,01 \text{ kW}$ , nach [2] . . . . .   | 204 |
| 6.12 | Amortisationsdauer eines Niedervolt-Solarsystems . . . . .  | 205 |
| 6.13 | Mechanische Leistungen der Lenkhilfpumpe, Klassenbreite $\Delta P_{\text{LHP,mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$ , nach [1] . . . . .  | 207 |
| 6.14 | Kraftstoffverbrauchsdifferenzen durch Reduktion des Volumensstroms bei verschiedenen Grenzgeschwindigkeiten unter Bewertung durch verschiedene Simulationsverfahren, linearer Zusammenhang basierend auf den Stützstellen der Simulation, nach [1] . . . . .              | 208 |
| 6.15 | Resultierende mechanisch aufgenommene Leistung der hydraulischen Lenkhilfe nach Substitution durch elektrische Lenkkräftunterstützung für $-20^\circ < \phi_{\text{LW}} < +20^\circ$ , Klassenbreite $\Delta P_{\text{LHP,mech}_k} = 0,1 \text{ kW}$ , nach [1] . . . . . | 209 |
| 6.16 | Temperaturdifferenz des Innenraums pro Betriebsphase (Zug- oder Schubphase) aufgrund der rekuperativen Zuschaltung des Klimakompressors, Klassenbreite $\Delta(\Delta T_{\text{I}}^*)_k = 0,05 \text{ K}$ . . . . .   | 214 |
| 6.17 | Häufigkeit der Betriebspunkte von hybridem (rechts) und konventionellem (links) Nutzfahrzeug [97] . . . . .   | 216 |
| 6.18 | Berechnungsvorgang unter Variation der hybriden Antriebsleistung . . . . .  | 217 |
| 6.19 | Energiepfadvariation durch riemengetriebene und elektrisch angetriebene Nebenaggregate [103] . . . . .  | 224 |
| 7.1  | Verifikations- und Validierungstechniken (V & V) nach Grad der Subjektivität [90] . . . . .   | 228 |
| 7.2  | Validierungskonzept zur Bewertung der Entwicklungsmethodik, nach [1] . . . . .  | 230 |
| 7.3  | Vergleich zwischen zeitbasiert simuliertem und gemessenem Kraftstoffverbrauch, nach [1] . . . . .   | 232 |
| 7.4  | Verbrauchsdifferenzen, ermittelt durch beide Simulationsverfahren auf den Streckenabschnitten A, B und C sowie dem gesamten Fahrprofil . . . . .  | 237 |
| 7.5  | Zeitbasiert und stochastisch simulierte Verbrauchsanteile des Lenksystems, Klassenbreite $\Delta E_{\text{chem,LHP}_k}^* = 0,12 \%$ , nach [1] . . . . .  | 238 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 7.6  | Ablaufplan der stochastischen Simulation und der zeitbasierten Simulation mit aus Häufigkeitsverteilungen generierten Eingangsgrößen . . . . .  | 240 |
| 7.7  | Verbrauchsunterschiede durch Reduktion des Luftpresser-Förder-<br>volumens, Klassenbreite $\Delta E_{\text{chem,LP,norm}_k}^* = 2,4\%$ , Ergebnisse<br>der zeitbasierten und stochastischen Simulation, nach [84] . | 241 |
| 7.8  | Normierte Simulationsdauer von zeitbasierter und stochasti-<br>scher Simulation in Abhängigkeit der Fahrzeit, bezogen auf die<br>maximale Zeitdauer der zeitbasierten Simulation . . . . .                          | 243 |
| 7.9  | Anwendung einer Monte-Carlo-Suche zur Bestimmung der Dich-<br>tefunktion einer Häufigkeitsverteilung elektrischer Leistungen,<br>Klassenbreite $\Delta P_{\text{el}_k} = 10\text{ W}$ , nach [68] . . . . .         | 245 |
| 7.10 | Werte der Prüfgröße $\chi^2$ nach Anwendung des $\chi^2$ -Unabhängig-<br>keitstests zur Untersuchung der Unabhängigkeit zweier Zufalls-<br>variablen, nach [68] . . . . .   | 246 |
| 7.11 | Prozentuale Genauigkeitserhöhung des Ergebnisses der Simula-<br>tion in Abhängigkeit des zusätzlichen Aufwands . . . . .  | 248 |
| 7.12 | Normierte Simulationsdauer in Abhängigkeit der erzielbaren<br>Genauigkeit und der simulierten Fahrzeit für die zeitbasierte<br>quasistationäre Längsdynamiksimulation . . . . .                                     | 250 |
| 7.13 | Normierte Simulationsdauer in Abhängigkeit der erzielbaren<br>Genauigkeit und der simulierten Fahrzeit für das stochastische<br>Simulationsverfahren . . . . .  | 251 |

# B. Tabellenverzeichnis

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | Auswirkungen einer Energiemanagementmaßnahme aus Sicht des Fahrzeugherstellers . . . . .                                     | 34  |
| 2.2  | Vor- und Nachteile der Lösungsansätze, nach [83] . . . . .   | 37  |
| 2.3  | Kenngrößen des elektrischen Leistungsverlaufs des Generators   | 45  |
| 4.1  | Konfiguration der hybriden Versuchsfahrzeuge (Mercedes-Benz Atego) . . . . .   | 99  |
| 4.2  | Kilometerleistung der Kundenfahrerprobungsfahrzeuge in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Baumusters . . .             | 101 |
| 4.3  | Kundennahe Referenzstrecken und ihre Eigenschaften . . .   | 102 |
| 4.4  | Aufbau der Messstruktur und Messkanäle (Auswahl) der Erprobungsträger . . . . .  | 104 |
| 4.5  | Zuordnung der Fahrprofile aufgrund der Durchschnittsgeschwindigkeit . . . . .  | 107 |
| 4.6  | Eigenschaften einer vorsortierten Messung . . . . .  | 107 |
| 4.7  | Mustererkennung (gleitender Mittelwert), Vorgehensweise nach [97] . . . . .  | 112 |
| 4.8  | Mustererkennung mittels gleitendem Mittelwert (Differenzen), Vorgehensweise nach [97] . . . . .                              | 112 |
| 4.9  | Zuordnung einzelner Fahrprofile, Vorgehensweise nach [97] .  | 115 |
| 4.10 | Verbrauchs- und Leistungsverhalten bezogen auf die chemische Energie . . . . .   | 126 |
| 6.1  | Maximale Leistungsfähigkeit der Generatorvarianten . . . .   | 193 |
| 6.2  | Speicherart und Kapazität von Referenz- und Variantensystemen . . . . .  | 194 |
| 6.3  | Vergleich der Resultate beider Verfahren . . . . .   | 198 |
| 6.4  | Vergleich der Resultate mit Hilfe stochastischer und zeitbasierter Simulation, Vorgehensweise in Anlehnung an [97] . . . . . | 220 |
| 6.5  | Kenngrößen des Pneumatiksystems, nach [103] . . . . .  | 222 |
| 6.6  | Kraftstoffverbrauchsdivergenz in Abhängigkeit von vier freien Parametern, Vorgehensweise in Anlehnung an [103] . . . . .     | 223 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 6.7 | Kraftstoffverbrauchsdifferenz durch Variation von Generatorleistung und Batteriegröße, Vorgehensweise in Anlehnung an [103] . . . . .  | 224 |
| 7.1 | Maximale relative Abweichungen des mathematischen Fahrzeugmodells bezogen auf die gewandelte chemische (Verbrennungsmotor) und mechanische Energie (weitere Teilmodelle) im messtechnisch erfassten Versuchsfahrzeug . . . . . | 233 |
| 7.2 | Streckenabschnitt A: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei konstanter Sollgeschwindigkeit mit $v > 60$ km/h, nach [1] . . . . .                                 | 235 |
| 7.3 | Streckenabschnitt B: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei einem Streckenabschnitt mit $v < 50$ km/h, nach [1] . . . . .  | 235 |
| 7.4 | Streckenabschnitt C: Vergleich des relativen Verbrauchseinsparungspotenzials unter Anwendung der Simulationsverfahren bei stark dynamischem Verlauf der Sollgeschwindigkeit, nach [1] . . . . .                                | 236 |
| 7.5 | Zeitliche Variation der Zustandsgrößen des Lenksystems, nach [1] . . . . .   | 238 |
| 7.6 | Simulationsdauer der Simulationsverfahren, nach [1] . . . . .  | 242 |

## C. Abkürzungsverzeichnis

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>A</b>              | Autobahn  |
| <b>ACEA</b>           | Association des Constructeurs Européens d'Automobiles<br>(Verband der europäischen Automobilhersteller) |
| <b>AG</b>             | Aktiengesellschaft  |
| <b>AH</b>             | Hinterachse des Anhängers   |
| <b>AV</b>             | Vorderachse des Anhängers   |
| <b>BGR</b>            | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe   |
| <b>BMVBS</b>          | Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung   |
| <b>bzw.</b>           | beziehungsweise   |
| <b>CAN</b>            | Controller Area Network (serielles Bussystem)   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Kohlenstoffdioxid   |
| <b>COG</b>            | Causal Ordering Graph (Grafisches Modellierungsverfahren)   |
| <b>D</b>              | Deichsel  |
| <b>d</b>              | Tag   |
| <b>d. h.</b>          | das heißt   |
| <b>DIN</b>            | Deutsches Institut für Normung  |
| <b>e</b>              | effektiv  |
| <b>EEM</b>            | elektrisches Energiemanagement  |
| <b>EG</b>             | Europäische Gemeinschaft  |
| <b>el.</b>            | elektrisch  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>EM</b>       | Elektromotor   |
| <b>EMR</b>      | Energetic Macroscopic Representation (Methode zur Modellierung und Steuerung von elektromechanischen Systemen) |
| <b>EN</b>       | Europäische Norm   |
| <b>EnM</b>      | Energiemanagement  |
| <b>EnMS</b>     | Energiemanagementsystem  |
| <b>etc.</b>     | et cetera (lat.: und so weiter)  |
|                 |  |
| <b>F</b>        | Fahrzeug, Kraftfahrzeug  |
| <b>FP</b>       | Fahrpedal  |
| <b>FV</b>       | Flottenversuch   |
| <b>FW</b>       | Fahrwiderstand   |
|                 |  |
| <b>G</b>        | Geschwindigkeit  |
| <b>ggf.</b>     | gegebenenfalls   |
| <b>GmbH</b>     | Gesellschaft mit beschränkter Haftung  |
| <b>GPRS</b>     | General packet radio service (paketorientierter Dienst zur Datenübertragung in GSM-Netzen)                     |
| <b>GSM</b>      | Global System for Mobile Communications (Standard für volldigitale Mobilfunknetze)                             |
| <b>G-F</b>      | Geschwindigkeit-Fahrer (-Gliederung)   |
|                 |  |
| <b>H</b>        | Hinterachse  |
| <b>h</b>        | Stunde   |
| <b>hi.</b>      | hinten   |
| <b>Hz</b>       | Hertz  |
|                 |  |
| <b>i. d. R.</b> | in der Regel   |
| <b>ISO</b>      | Internationale Organisation für Normung  |

---

|              |  |
|--------------|--|
| <b>IQA</b>   | Interquartalsabstand   |
| <b>K</b>     | Komponente   |
| <b>K*</b>    | modifizierte Komponente  |
| <b>KFE</b>   | Kundenfahrerprobung  |
| <b>KIT</b>   | Karlsruher Institut für Technologie                              |
| <b>LKW</b>   | Lastkraftwagen   |
| <b>M</b>     | Datenbank der Messwerte  |
| <b>mech.</b> | mechanisch   |
| <b>MB</b>    | Mercedes-Benz  |
| <b>NA</b>    | Nebenaggregat  |
| <b>NEFZ</b>  | Neuer Europäischer Fahrzyklus                                    |
| <b>NFZ</b>   | Nutzfahrzeug   |
| <b>o. Ä.</b> | oder Ähnliches   |
| <b>QS</b>    | Quartilskoeffizient der Schiefe                                  |
| <b>R</b>     | Rangieren  |
| <b>S</b>     | System, Fahrzeugsystem   |
| <b>s</b>     | Sekunde  |
| <b>S*</b>    | modifiziertes System/Fahrzeugsystem                              |
| <b>SI</b>    | Système international d'unités (Internationales Einheitensystem) |
| <b>SOC</b>   | State of Charge (Ladezustand von Akkumulatoren)                  |
| <b>STC</b>   | Standard Test Conditions (Standard-Testbedingungen)              |

|                |   |
|----------------|---|
| <b>TCO</b>     | Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)        |
| <b>u. a.</b>   | und andere, und anderes, unter anderem, unter anderen |
| <b>Ü</b>       | Überland  |
| <b>usw.</b>    | und so weiter   |
| <b>V</b>       | Vorderachse   |
| <b>v. a.</b>   | vor allem   |
| <b>vo.</b>     | vorne   |
| <b>VDI</b>     | Verein Deutscher Ingenieure                           |
| <b>vgl.</b>    | vergleiche  |
| <b>VKM</b>     | Verbrennungskraftmaschine                             |
| <b>V&amp;V</b> | Verifikations- und Validierungstechniken              |
| <b>wg.</b>     | wegen   |
| <b>z. B.</b>   | zum Beispiel  |
| <b>zGG</b>     | zulässiges Gesamtgewicht                              |



## D. Verwendete Formelzeichen

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $A$                   | Fläche, Fahrzeugstirnfläche                                    |
| $a_i$                 | Element einer Zahlenfolge                                      |
| $A_{\text{Leerlauf}}$ | Anteil des Leerlaufbetriebs                                    |
| $A_{\text{Schub}}$    | Anteil des Schubbetriebs                                       |
| $A_{\text{Solar}}$    | Fläche der Solarzellen   |
| $A_{\text{Zug}}$      | Anteil des Zugbetriebs   |
| $b_e$                 | effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch                    |
| $b_k$                 | Element einer Zahlenfolge (Mustervorgabe)                      |
| $c_i$                 | Element einer Differenzenfolge von $a_i$                       |
| $c_{p,\text{Luft}}$   | spezifische Wärmekapazität von Luft                            |
| $c_W$                 | Luftwiderstandsbeiwert   |
| $D$                   | Index-Intervall ähnlicher Werte                                |
| $d_i$                 | Element einer Differenzenfolge von $b_k$                       |
| $E$                   | Energie  |
| $E(X)$                | Erwartungswert   |
| $E_B$                 | Energie des Batteriespeichers                                  |
| $E_{B,\text{gesamt}}$ | Gesamtenergie des Batteriespeichers                            |
| $E_{\text{chem}}$     | Chemischer Energieeinsatz                                      |
| $E_{\text{chem}}^*$   | Chemischer Energieeinsatz des modifizierten<br>Fahrzeugsystems |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $E_{\text{chem,LHP}}^*$     | Primärenergieeinsatz zum Betrieb der Lenkhilfpumpe                       |
| $E_{\text{chem,LP,norm}}^*$ | Normierter Primärenergieeinsatz zum Betrieb des Luftpressers             |
| $E_K$                       | Kraftstoffenergie  |
| $E_{\text{kin}}$            | kinetische Energie   |
| $E_{\text{pot}}$            | potenzielle Energie  |
| $E_{\text{rot}}$            | Rotationsenergie   |
| $\Delta E_{\text{chem}}^*$  | Änderung des chemischen Energieeinsatzes im modifizierten Fahrzeugsystem |
| $F$                         | Kraft  |
| $F_{\text{Antr}}$           | Zug- oder Antriebskraft  |
| $F_D$                       | horizontale Deichselkraft  |
| $F_{\text{FW}}$             | Fahrwiderstandskraft, Summe der Fahrwiderstandskräfte                    |
| $F_K$                       | Fläche zwischen der Lorenzkurve und der 45°-Geraden                      |
| $F_{\text{Luft}}$           | Luftwiderstandskraft   |
| $f_R$                       | Rollwiderstandsbeiwert   |
| $F_{\text{Rad}}$            | Radwiderstandskraft  |
| $F_{\text{Steig}}$          | Steigungswiderstandskraft  |
| $F_T$                       | Trägheitskraft   |
| $f_{\text{VKM}}$            | Drehfrequenz der Verbrennungskraftmaschine                               |
| $f_{\text{VR}}$             | Prozentuale Kraftstoffeinsparung   |
| $F_{\text{W/T}}$            | Summe der Widerstands- und Trägheitskräfte                               |
| $FP$                        | Fahrpedalstellung  |
| $F(x)$                      | Verteilungsfunktion  |
| $f(x)$                      | Dichtefunktion   |
| $f_{X_1}(x)$                | Dichtefunktion von Verteilung 1  |
| $f_{X_2}(x)$                | Dichtefunktion von Verteilung 2  |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $f_Y(x)$                      | Dichtefunktion einer bimodalen Verteilung  |
| $F_{(S)}$                     | Übertragungsfunktion des Systems S   |
| $G$                           | Globalstrahlung  |
| $g$                           | Erdbeschleunigung, Gravitationsbeschleunigung  |
| $G(x_k)$                      | anteilige Merkmalssumme  |
| $g(x_k)$                      | relative Merkmalssumme   |
| $h$                           | Höhe   |
| $H_i$                         | Heizwert   |
| $H_s$                         | Brennwert  |
| $h_s$                         | spezifische Enthalpie  |
| $h(n_{\text{Gen}})$           | Häufigkeitsverteilung der Drehzahlen des Generators  |
| $h(P_{\text{el,B}})$          | Häufigkeitsverteilung der Batterieleistung   |
| $h(P_K)$                      | Häufigkeitsverteilung der Leistung einer Komponente K  |
| $h(p_{\text{LHP}})$           | Häufigkeitsverteilung des Differenzdrucks an der Lenkhilfpumpe   |
| $h(P_{\text{mech(FW,T,NA)}})$ | Häufigkeitsverteilung der Leistungen der Fahrwiderstände, der Trägheiten und der Nebenaggregate (ohne Generator) |
| $h(x_j)$                      | relative Häufigkeitsverteilung   |
| $h(\sum P_{\text{el,V}})$     | Häufigkeitsverteilung der elektrischen Leistung aller Verbraucher V  |
| $I$                           | Strom  |
| $i$                           | Anzahl der Arbeitsspiele pro Umdrehung   |
| $i_{\text{Achse}}$            | Achsübersetzung  |
| $i_G$                         | Getriebeübersetzung  |
| $I_{\text{Gen}}$              | Generatorstrom   |
| $i_{\text{Gen}}$              | Übersetzungsverhältnis des Generators  |

---

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $I_i$                                | Index-Vektor   |
| $i_{NA}$                             | Übersetzungsverhältnis eines Nebenaggregats                        |
| $J$                                  | Massenträgheitsmoment  |
| $J_{\text{Antriebsraeder}}$          | Massenträgheitsmoment der Antriebsräder                            |
| $J_{\text{Antr,Diff}}$               | Massenträgheitsmoment der Antriebswellen und des Differenzials     |
| $J_{\text{Antr},i}$                  | Massenträgheitsmoment des Antriebsstrangs                          |
| $J_{G_i}$                            | Massenträgheitsmoment des Getriebes ( $i$ für den jeweiligen Gang) |
| $J_K$                                | Massenträgheitsmoment der Kupplung                                 |
| $J_{\text{Raeder}}$                  | Massenträgheitsmoment der nicht angetriebenen Räder                |
| $J_{\text{VKM}}$                     | Massenträgheitsmoment des Verbrennungsmotors                       |
| $k$                                  | Parameter der Komponente Kupplung                                  |
| $k_{\text{Luft}}$                    | Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften von Luft              |
| $K_{\Delta E, \text{Fzg.}}$          | Entwicklungskosten pro Fahrzeug und Jahr                           |
| $K_{\Delta I, \text{Jahr}}$          | Jährliche Investitionskosten                                       |
| $K_{\Delta K, \text{Fzg.}}$          | Komponentenkosten pro Fahrzeug und Jahr                            |
| $K_{\Delta KS, \text{Jahr}}$         | Jährliche Kosteneinsparung durch gesunkenen Kraftstoffverbrauch    |
| $K_{\Delta \text{TCO}, \text{Jahr}}$ | Differenz der Gesamtbetriebskosten pro Jahr                        |
| $L$                                  | Gini-Koeffizient   |
| $l$                                  | Länge, Abstand   |
| $M$                                  | Drehmoment   |
| $m$                                  | Masse  |
| $\dot{m}$                            | Massenstrom  |

---

|                      |   |
|----------------------|---|
| $m_A$                | Masse des Anhängers/Auffiegers  |
| $M_{\text{Antr}}$    | Antriebsmoment  |
| $M_E$                | Drehmoment des Elektromotors  |
| $m_F$                | Fahrzeugmasse   |
| $M_{\text{FW}}$      | Fahrwiderstandsmoment   |
| $\dot{m}_K$          | Kraftstoffmassenstrom   |
| $M_{\text{Rad}}$     | Radmoment   |
| $M_{\text{VKM,e}}$   | effektives Motordrehmoment  |
| $M_{\text{VKM,e}}^*$ | Drehmoment des Verbrennungsmotors im modifizierten System                 |
| $n$                  | Drehzahl  |
| $n_{\text{Antr}}$    | Antriebsdrehzahl  |
| $n_E$                | Drehzahl des Elektromotors  |
| $n_{\text{Gen}}$     | Generator Drehzahl  |
| $n_{\text{VKM}}$     | Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine                                    |
| $n_{\text{VKM}}^*$   | Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine im modifizierten System            |
| $n(x_j)$             | absolute Häufigkeitsverteilung  |
| $P$                  | Leistung  |
| $p$                  | Druck, Druckdifferenz   |
| $P_{\text{el}}$      | elektrische Leistung  |
| $P_{\text{el}}^*$    | elektrische Leistung im modifizierten System                              |
| $P_{\text{el,B}}$    | elektrische Leistung der Batterie   |
| $P_{\text{el,B}}^*$  | elektrische Leistung der Batterie im modifizierten System                 |
| $P_{\text{el,LG}}^*$ | elektrische Unterstützungsleistung für das Lenkgetriebe des neuen Systems |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $P_{el,Solar}^*$    | elektrische Leistung der Solarzellen im modifizierten System              |
| $P_{Gen,el}$        | elektrische Leistung des Generators                                       |
| $P_{Gen,el}^*$      | elektrische Leistung des Generators im modifizierten System               |
| $P_{Gen,el,max}$    | maximale elektrische Leistung des Generators                              |
| $P_{Gen,el,max}^*$  | maximale elektrische Leistung des Generators im modifizierten System      |
| $P_{Gen,mech}$      | Mechanische Leistung des Generators                                       |
| $P_{Gen,mech}^*$    | Mechanische Leistung des Generators im modifizierten Fahrzeugsystem       |
| $P_{hydr}$          | hydraulische Leistung   |
| $p_{LHP}$           | Druckdifferenz der Lenkhilfpumpe  |
| $p_{LHP}^*$         | Druckdifferenz der Lenkhilfpumpe im modifizierten System                  |
| $p_{m,e}$           | effektiver Mitteldruck  |
| $P_{mech,hydr}$     | mechanische Antriebsleistung des hydraulischen Systems                    |
| $P_{mech,LG}$       | mechanische Unterstützungsleistung des Lenkgetriebes                      |
| $P_{mech,LHP}$      | mechanische Antriebsleistung der Lenkhilfpumpe                            |
| $P_{mech,rot}$      | rotatorische mechanische Leistung   |
| $P_{mech,transl}$   | translatorische mechanische Leistung                                      |
| $P_{mech(FW,T,NA)}$ | mechanische Leistung aus Fahrwiderständen, Trägheiten und Nebenaggregaten |
| $P_{th}$            | thermische Leistung   |
| $P_{th,konv}$       | thermische Leistung durch Konvektion                                      |
| $P_{VKM,e}$         | effektive Leistung der Verbrennungskraftmaschine                          |
| $P_{VKM,i}$         | innere Leistung der Verbrennungskraftmaschine                             |
| $p_0$               | Druck bei Normbedingung   |

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $p(E_B^*)$                        | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Energie des Batteriespeichers im modifizierten System  |
| $p(E_{\text{chem}}^*)$            | Wahrscheinlichkeitsverteilung der chemischen Energien im modifizierten Fahrzeugsystem   |
| $p(P_{\text{chem}}^*)$            | Wahrscheinlichkeitsverteilung der chemischen Leistungen im modifizierten Fahrzeugsystem   |
| $p(P_{\text{el,B}}^*)$            | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistung des Batteriespeichers im modifizierten System   |
| $p(P_{\text{el,HV,Schub}}^*)$     | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Hochvoltsystems in Schubphasen im modifizierten System  |
| $p(P_{\text{el,HV,Supp}}^*)$      | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Hochvoltsystems im Unterstützungsfall im modifizierten System   |
| $p(P_{\text{el,HV,Zug}}^*)$       | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistungen des Hochvoltsystems in Zugphasen im modifizierten System  |
| $p(P_{\text{el,Solar}}^*)$        | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Leistung von Solarzellen im modifizierten System   |
| $p(P_{\text{Gen,el}}^*)$          | Wahrscheinlichkeitsverteilung der elektrischen Generatorleistung im modifizierten System  |
| $p(P_{\text{Gen,mech}}^*)$        | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistung des Generators im modifizierten System  |
| $p(P_K^*)$                        | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leistung einer modifizierten Komponente $K^*$   |
| $p(p_{\text{LHP}}^*)$             | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Druckdifferenz im modifizierten System  |
| $p(P_{\text{mech(el,HV),Zug}}^*)$ | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen für das Hybridsystem in Zugphasen im modifizierten System   |
| $p(P_{\text{mech,VKM,opt}}^*)$    | Wahrscheinlichkeitsverteilung der mechanischen Leistungen des Verbrennungsmotors im optimalen Betriebspunkt (in Abhängigkeit seiner Drehzahlen) im modifizierten System |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $p(\eta_{\text{Gen}}^*)$    | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wirkungsgrade des Generators im modifizierten System                 |
| $p(\sum P_{\text{el,V}}^*)$ | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Summe der elektrischen Verbraucherleistungen im modifizierten System |
| $p(\sum P_{\text{mech}}^*)$ | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Summe der mechanischen Leistungen im modifizierten System            |
| $p(\Delta T_{\text{I}}^*)$  | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Temperaturänderung im Innenraum im modifizierten System              |
| $\Delta p$                  | Druckdifferenz   |
| $\sum P_{\text{el,V}}$      | Summe der Leistungen aller elektrischen Verbraucher  |
| $\sum P_{\text{mech}}$      | Summe aller mechanischen Leistungen  |
| $r_{\text{dyn}}$            | dynamischer Radhalbmesser  |
| $R_{\text{s,Luft}}$         | spezifische Gaskonstante für Luft  |
| $S$                         | Strukturvariable   |
| $t$                         | Zeit, Zeitdauer  |
| $\frac{dT}{dt}$             | Temperaturgradient   |
| $U$                         | Spannung   |
| $U_{\text{Gen}}$            | Generatorspannung  |
| $\dot{V}$                   | Volumenstrom   |
| $v$                         | Geschwindigkeit, Fahrzeuggeschwindigkeit   |
| $v_{\text{Anstr}}$          | Anströmgeschwindigkeit   |
| $V_{\text{F}}$              | Volumen des Fahrerhauses   |
| $v_{\text{grenz}}$          | Grenzgeschwindigkeit   |
| $V_{\text{H}}$              | Hubvolumen   |



---

|                        |  |
|------------------------|--|
| $v_{\text{ist}}$       | Istgeschwindigkeit                                       |
| $\dot{V}_{\text{min}}$ | minimaler Volumenstrom                                   |
| $V_n^*$                | Systemparameter des modifizierten Systems                |
| $\dot{V}_{\text{red}}$ | reduzierter Volumenstrom                                 |
| $v_{\text{soll}}$      | Sollgeschwindigkeit                                      |
| $\Delta \dot{V}$       | Differenz des Volumenstroms                              |
| $Var(X)$               | Varianz  |
| $W$                    | Arbeit   |
| $\bar{x}$              | Arithmetischer Mittelwert                                |
| $X_A$                  | Ausgangsgröße  |
| $X_E$                  | Eingangsgröße  |
| $x_{\text{mod}}$       | Modus  |
| $X_1$                  | Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Verteilung 1         |
| $X_2$                  | Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Verteilung 2         |
| $Y$                    | Wahrscheinlichkeitsverteilung einer bimodalen Verteilung |
| $Z$                    | Zufallsvariable  |
| $\alpha$               | Steigungswinkel  |
| $\epsilon$             | Abweichung der Wertefolge $a_i$                          |
| $\zeta$                | Abweichung der Wertefolge $c_i$                          |
| $\eta_B^*$             | Wirkungsgrad der Batterie im modifizierten System        |
| $\eta_{\text{Diff.}}$  | Wirkungsgrad des Differenzials                           |

---

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\eta_e$                     | effektiver Wirkungsgrad   |
| $\eta_G$                     | Wirkungsgrad des Getriebes  |
| $\eta_{\text{Gen}}$          | Wirkungsgrad des Generators   |
| $\eta_{\text{Gen}}^*$        | Wirkungsgrad des Generators im modifizierten System                                     |
| $\eta_{\text{Kardan}}$       | Wirkungsgrad der Kardanwelle  |
| $\eta_{\text{LHP}}$          | Wirkungsgrad der Lenkhilfpumpe  |
| $\eta_{\text{Solar}}$        | Wirkungsgrad der Solarzellen  |
| $\eta_{\text{Verschattung}}$ | Wirkungsgrad durch Verschattung der Solarzellen   |
| $\eta_{\text{VKM}}$          | Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors   |
| $\eta_{\text{VKM}}^*$        | Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors im modifizierten System                             |
| $\lambda$                    | Luftverhältnis  |
| $\lambda_V$                  | Anteiliges Verhältnis einer Verteilung an der Dichtefunktion einer bimodalen Verteilung |
| $\mu$                        | Erwartungswert  |
| $\mu(A)$                     | Wahrscheinlichkeitsmaß  |
| $\nu$                        | Variationskoeffizient   |
| $\rho_L$                     | Luftdichte  |
| $\rho(x)$                    | Wahrscheinlichkeitsfunktion   |
| $\sigma$                     | Standardabweichung  |
| $\sigma^2$                   | Varianz   |
| $\phi_{\text{LRW}}$          | Lenkradwinkel   |
| $\chi^2$                     | Prüfgröße für den Unabhängigkeitstest   |

---

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\omega$              | Winkelgeschwindigkeit                               |
| $\omega_{\text{VKM}}$ | Winkelgeschwindigkeit der Verbrennungskraftmaschine |



## E. Literaturverzeichnis

- [1] G. Aboudy. *Bewertung von Simulationsmethoden auf ihre Anwendbarkeit zur Effizienzbetrachtung von Energiemanagementmaßnahmen*. Diplomarbeit, TU Berlin, 2011.
- [2] G. Aboudy. *Energieeffizienzbetrachtung in der Energieversorgung elektrischer Nebenverbraucher unter Einsatz verschiedener Speicher- und Wandlertechnologien*. Studienarbeit, TU Berlin, 2011.
- [3] J. von Grundherr zu Altenthan und Weiyerhaus. *Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung*. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [4] D. Ammon. *Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik*. Teubner B.G. GmbH, 1997.
- [5] W. Appel, H. Brähler, S. Breuer, U. Dahlhaus, T. Esch, E. Hoepke, S. Kopp, B. Rhein. *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [6] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. *Energie in Zahlen – Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen*. Prometheus Verlags- und Kommunikationsgesellschaft, Wuppertal, 2012.
- [7] R. van Basshuysen, F. Schäfer. *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Vieweg+Teubner, 2007.
- [8] D. Baumgarten. *Skript zur Vorlesung Statistik*. URL: [http://www.fbmn.h-da.de/~baumgarten/wiki/uploads/Main/stat\\_2a.pdf](http://www.fbmn.h-da.de/~baumgarten/wiki/uploads/Main/stat_2a.pdf), abgerufen am: 18.03.2013, 2012.
- [9] H. Benker. *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von Mathematica, Maple, Mathcad, Matlab und Excel*. Springer Berlin, 2003.

- [10] K. Berns, B. Schürmann, M. Trapp. *Eingebettete Systeme – Systemgrundlagen und Entwicklung eingebetteter Software*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [11] O. Beucher. *Mathematische Grundlagen der Systemtheorie*. 3. Auflage. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2008.
- [12] O. Beucher. *Mathematische Optimierung*. 3. Auflage. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2008.
- [13] O. Beucher. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB*. Springer, 2007.
- [14] K. Binder. *Computersimulationen*. Physik Journal 3 (5), 2004.
- [15] BMG Engineering AG. *Energie-Kennzahlen*. URL: <http://www.bmgeng.ch/downloads/produktion/Energiekennzahlen.pdf>, abgerufen am: 03.05.2013, 2009.
- [16] M. Bockhorst. *Energielexikon, Energiefluss*. URL: <http://www.energieinfo.de/eglossar/energiefluss.html>, abgerufen am: 06.07.2012, 2012.
- [17] A. Böge. *Modellbildung und Simulation – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Vieweg+Teubner, 2007.
- [18] W. Borutzky. *Bond Graph Methodology*. Springer London, 2010.
- [19] S. Büchner. *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2008.
- [20] Bundesamt für Konjunkturfragen. *RAVEL – Industrie-Handbuch*. URL: <http://www.pcb.ch/fachp/fachp07.html>, abgerufen am: 06.07.2012, 1993.
- [21] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. URL: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie-Kurzstudie2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie-Kurzstudie2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3), abgerufen am: 18.03.2013, 2010.
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Energiemanagementsysteme in der Praxis. ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen*. URL: <http://www>.

- umweltdaten.de/publikationen/fpdf-1/3959.pdf, abgerufen am: 04.07.2012, 2012.
- [23] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/30886/publicationFile/455/gueterverkehrs-prognose-2050.pdf>, abgerufen am: 04.02.2013, 2007.
- [24] H.-J. Bungartz, S. Zimmer, M. Buchholz, D. Pflüger. *Modellbildung und Simulation: Eine Anwendungsorientierte Einführung*. Springer, 2009.
- [25] M. Burkschat, E. Cramer, U. Kamps. *Beschreibende Statistik. Grundlegende Methoden*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [26] G. Cerbe. *Grundlagen der Gastechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2008.
- [27] D. Chrenko. *Energetic Macroscopic Representation Modeling and Control of a Low Temperature Fuel Cell System Fed by Hydrocarbons*. Purdue University, 2008.
- [28] Daimler AG. *Daimler Nachhaltigkeitsbericht 2009*. URL: <http://nachhaltigkeit2009.daimler.com/>, abgerufen am: 07.09.2011, 2010.
- [29] Daimler AG. *Muscheldiagramm eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors (OM501 LA) mit Vollastkennlinien*. 2005.
- [30] Daimler AG. *TOP10 – Atego Kaufkriterien*. 2010.
- [31] Daimler AG. *Digitales Nutzfahrzeug-Versuchsmodell, Baumuster C963403 (Actros Sattelzugmaschine, 4x2)*. 2011.
- [32] Daimler Fleetboard GmbH. *Mit FleetBoard Fahrzeugmanagement zu mehr Wirtschaftlichkeit im Unternehmen*. URL: [http://www.fleetboard.com/info/Fleetboard\\_downloads/Broschueren/FM.pdf](http://www.fleetboard.com/info/Fleetboard_downloads/Broschueren/FM.pdf), abgerufen am: 06.07.2012, 2012.
- [33] W. David. *Modulares Simulationsprogramm zur Auslegung und längsdynamischen Untersuchung von Kfz-Antriebssystemen*. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 1994.

- [34] W. David. *Neuartiges modular aufgebautes Rechenprogramm zur Längsdynamik-Simulation*. 2. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, 1989.
- [35] O. Deiser. *Einführung in die Mengenlehre*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [36] Deutsche Energie-Agentur GmbH. *Vorteile des Energiemanagements*. URL: <http://www.industrie-energieeffizienz.de/energiemanagement.html>, abgerufen am: 04.07.2012, 2012.
- [37] Deutsches Institut für Normung. *DIN 1319-3, Grundlagen der Messtechnik - Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*. 1996.
- [38] Deutsches Institut für Normung. *DIN 1343, Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen*. 1990.
- [39] Deutsches Institut für Normung. *DIN V 18599, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*. 2013.
- [40] Deutsches Institut für Normung. *DIN 66201, Prozeßrechensysteme – Begriffe*. 1981.
- [41] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung (IVF). *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. URL: [http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/01/FE\\_96\\_857\\_2005\\_Verflechtungsprognose\\_2025\\_Zusammenfassung\\_20071114.pdf](http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/01/FE_96_857_2005_Verflechtungsprognose_2025_Zusammenfassung_20071114.pdf), abgerufen am: 08.08.2013, 2007.
- [42] C. J. Diederichs. *Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Nutzen-Kosten-Untersuchungen: allgemeine Grundlagen u. spezielle Anwendungen im Bauwesen*. Expert-Verlag GmbH, 1985.
- [43] R. Diekamp. *Gesamtprozessanalyse – Motormechnik Antriebsstrangsimulation*. FVV, 1989.
- [44] R. Diekamp. *Rationell einsetzbare Simulationsprogramme zur Berechnung dynamischer Vorgänge am Verbrennungsmotor mit seinen Nebenantrieben im Rahmen einer Gesamtprozessanalyse*. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), 1989.



- [45] C. Engelhardt-Nowitzki, O. Nowitzki, B. Krenn. *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation*. Gabler, 2008.
- [46] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*. Amtsblatt der Europäischen Union, 2007.
- [47] European Automobile Manufacturers Association (ACEA). “*Vision 20-20*“, *ACEA-Presskonferenz auf der IAA 2008*. URL: [http://www.acea.be/images/uploads/files/20080923\\_truck\\_event\\_speech\\_Renschler\\_de.pdf](http://www.acea.be/images/uploads/files/20080923_truck_event_speech_Renschler_de.pdf), abgerufen am: 04.02.2013, 2008.
- [48] R. Fabis. *Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006.
- [49] R. W. Freund, R. H. W. Hoppe. *Numerische Mathematik*. Springer, 2007.
- [50] T. Frey, M. Bossert. *Signal- und Systemtheorie*. Vieweg+Teubner, 2009.
- [51] P. J. Gawthrop, D. J. Ballance. *Symbolic computation for manipulation of hierarchical bond graphs in Symbolic Methods in Control System Analysis and Design*. The Institution of Electrical Engineers, London, 1999.
- [52] A. Gikas, R. Keenan. *Statistische Aspekte der Energiewirtschaft 2005*. Europäische Kommission, 2006.
- [53] M. Gipsier. *Systemdynamik und Simulation*. Teubner, 1999.
- [54] B. Girod, R. Rabenstein, A. Stenger. *Einführung in die Systemtheorie*. Teubner, 2007.
- [55] P. Glassermann. *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. Springer, 2003.
- [56] M. Goemans, K. Jansen, J. D. P. Rolim, L. Trevisan. *Approximation, Randomization and Combinatorial Optimization: Algorithms and Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [57] G. H. Golub, J. M. Ortega. *Wissenschaftliches Rechnen und Differentialgleichungen. Eine Einführung in die Numerische Mathematik*. Heldermann Verlag, 1995.
- [58] H. Gordon. *Discrete Probability*. Springer Verlag, 1997.

- [59] H. Gränicher. *Messung beendet, was nun?* vdf Hochschulverlag AG, 1996.
- [60] M. Greiner, G. Tinhofer. *Stochastik für Informatiker*. Carl Hanser Verlag, 1996.
- [61] E. Härtter. *Wahrscheinlichkeitsrechnung für Wirtschafts- und Naturwissenschaftler*. Vandenhoeck & Ruprecht, 1974.
- [62] F. Heckert. *Simulative Abbildung und Optimierung von Antriebsstrang und Nebenaggregaten in einem schweren Nutzfahrzeug*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2010.
- [63] M. Hillenbrand. *Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik / Elektronik Architekturen von Fahrzeugen*. Dissertation, KIT Scientific Publishing, 2012.
- [64] International Organization for Standardization (ISO). *ISO 26262 – Road vehicles – Functional safety*. 2011.
- [65] A. Janßen, F. Küçükay. *Repräsentative Fahrmanöver und -strecken für Fahrwerkbelastungen*. Tagung fahrwerk.tech, München, 2005.
- [66] W. Kohn. *Statistik*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [67] F. Kuypers. *Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- [68] P. Lamothe. *Mathematischer Ansatz zur zeitunabhängigen Beschreibung von Fahrzeugsystemen*. Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2010.
- [69] M. Link. *Konzeption und Validierung eines Algorithmus zur fahrsituationsabhängigen Beeinflussung des Lenksystems im Nutzfahrzeug*. Bachelorarbeit, Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2011.
- [70] F. Lorenz. *Lineare Algebra I*. Spektrum Akademischer Verlag, 2003.
- [71] M. Lunanova. *Optimierung von Nebenaggregaten – Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission von Kraftfahrzeugen*. Vieweg+Teubner, 2009.
- [72] O. Maiwald. *Simulationsumgebung zur Analyse verschiedener Hybridantriebs-Konfigurationen*. ATZ, 2010.

- [73] E. W. Mayr. *Diskrete Wahrscheinlichkeitstheorie*. URL: <http://www14.informatik.tu-muenchen.de/lehre/2010SS/dwt/2010-dwt.pdf>, abgerufen am: 04.01.2012, 2010.
- [74] M. Mayr. *Technische Mechanik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008.
- [75] A. Meister. *Numerik linearer Gleichungssysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2005.
- [76] G. Merker, C. Schwarz. *Verbrennungsmotoren – Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*. Vieweg+Teubner, 2006.
- [77] M. Meywerk. *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [78] K. Mollenhauer, H. Tschöke. *Handbuch Dieselmotoren*. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [79] A. Müller. *Simulation – valide für die breite Industrie?* HTCO GmbH, Freiburg, 2002.
- [80] L. Müller. *Handbuch der Elektrizitätswirtschaft – Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001.
- [81] J.-P. Müller-Kose. *Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe*. Shaker, 2002.
- [82] N. Nachi. *Einstieg in die Hybridtechnik*. Daimler AG, Virtual Truck Academy, Schulungsunterlagen Alternative Antriebe – Hybrid, Teil 1, 2010.
- [83] C. Nizzola. *Modellierung und Verbrauchsoptimierung von ottomotorischen Antriebskonzepten*. Dissertation, ETH Zürich, Nr. 13831, 2000.
- [84] R. Oberfell. *Einsatzorientierte Bewertung und Optimierung von Energiemanagementmaßnahmen im Kraftfahrzeug durch stochastische Kombination energetisch relevanter Betriebszustände*. Wissenschaftssymposium Automobiltechnik 2013, 2013.
- [85] Österreichischer Wirtschaftsverlag GmbH. *Trucker Express, Ausgabe 4 / Dezember 2003*. 2003.
- [86] L. Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 2*. Vieweg+Teubner, 2001.

- [87] B. Pompe. *Verfahren der stochastischen Signalverarbeitung, 1-semesterige Vorlesung für Studenten der Physik*. Institut für Physik der Universität Greifswald, URL: <http://www2.physik.uni-greifswald.de/~pompe/SCRIPTS/vss.pdf>, abgerufen am: 13.02.2013, 2011.
- [88] W. Posch. *Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe*. Gabler Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- [89] F. Puente León, U. Kiencke, H. Jäkel. *Signale und Systeme*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011.
- [90] M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [91] K. Reif, H. Wallentowitz. *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Vieweg+Teubner, 2006.
- [92] R. Reuter, R. Hoffman. *Bewertung von Berechnungsergebnissen mittels Stochastischer Simulationsverfahren*. VDI-Berichte 1559: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau – Tagung Würzburg 2000, pp. 697-719, 2000.
- [93] H. Rinne. *Taschenbuch der Statistik*. Harri Deutsch, 2003.
- [94] L. Sachs. *Statistische Methoden*. Springer-Verlag, 1993.
- [95] Schauenburg Consulting. *KNA – die intelligente Kundennutzenanalyse*. URL: [http://www.schauenburg-consulting.de/downloads/kna\\_prospekt\\_2010.pdf](http://www.schauenburg-consulting.de/downloads/kna_prospekt_2010.pdf), abgerufen am: 10.07.2012, 2012.
- [96] T. Schickinger, A. Steger. *Diskrete Strukturen - Band 2*. Springer Verlag, 2001.
- [97] J. Schietzold. *Analyse und Optimierung der Energiebilanz von hybridisierten Nutzfahrzeugen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2010.
- [98] V. Schindler. *Vorlesungsunterlagen „Alternative Antriebe“, Sommersemester 2010*. TU Berlin, Vorlesungsunterlagen Sommersemester, 2010.
- [99] M. Schmidt. *Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs von Nebenaggregaten im Kraftfahrzeug*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.

- [100] M. Schmidt. *Nebenaggregate-Management*. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Heft 662, 1998.
- [101] D. Schram, M. Hiller, R. Bardini. *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [102] C. Schweiger. *Objektorientierte Modellierung und Echtzeitsimulation von Kraftfahrzeug-Antriebsträngen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2008.
- [103] A. Sehi. *Verwendung von evolutionären Algorithmen zur Optimierung von Energiemanagementkonzepten im Nutzfahrzeug*. Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2010.
- [104] U. Seiffert, G. Rainer. *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz*. Vieweg+Teubner, 2008.
- [105] J. Seitz, M. Debes, M. Heubach, R. Tosse. *Digitale Sprach- und Datenkommunikation: Netze – Protokolle – Vermittlung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2007.
- [106] R. Siegert. *Die Herausforderung CO<sub>2</sub> / Energiemanagement für Mercedes Pkw*. Daimler AG, 2010.
- [107] S. N. Sivanandam, S. N. Deepa. *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer, 2008.
- [108] K. Specht, R. Bulander, W. Gohout. *Statistik für Wirtschaft und Technik*. Oldenbourg Verlag, 2012.
- [109] Springer Gabler Verlag. *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichworte: Modell/Verteilung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [110] Springer Gabler Verlag. *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Simulation*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [111] C. Stan. *Alternative Antriebe für Automobile*. Springer-Verlag, 2008.
- [112] D. Steinhausen. *Simulationstechniken*. Oldenbourg, 1994.
- [113] A. Steland. *Basiswissen Statistik: Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [114] T. Streilein, J. Hillmann. *Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton*. VDI-Tagung Würzburg, 2002.
- [115] C. Strelen, W. Sandmann. *Simulation – Methoden für Anwendungen*. Institut für Informatik IV, Vorlesung Sommersemester, 2001.

- [116] The Mathworks. *Matlab, R2007b*. URL: <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, abgerufen am: 18.02.2011, 2007.
- [117] A. Thess. *Das Entropieprinzip. Thermodynamik für Unzufriedene*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007.
- [118] H. Thome. *Zeitreihenanalyse: eine Einführung für Sozialwissenschaftler und Historiker*. Oldenbourg, 2005.
- [119] T. Troitzsch. *Social Science Simulation – Origins, Prospects, Purposes*. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [120] E. Truckenbrodt. *Fluidmechanik, Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide*. Springer, 2008.
- [121] Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik. *Messdaten der Wetterstation*. URL: <http://wetter.eit.uni-kl.de/>, abgerufen am: 14.10.2010, 2010.
- [122] S. Vanja, C. Weber, H. Bley, K. Zeman. *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [123] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen*. 2010.
- [124] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Wärmeatlas*. 2006.
- [125] A. von Vietinghoff. *Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008.
- [126] W. Voß. *Taschenbuch der Statistik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2000.
- [127] WABCO Fahrzeugsysteme GmbH. *FuelGuard<sup>TM</sup> – Elektronische Luftaufbereitungseinheit*. URL: [http://www.wabco-auto.com/de/produkte\\_systeme\\_wabco/druckluft-management/luftaufbereitungseinheit-apu/elektronische-luftaufbereitungseinheit-e-apu/](http://www.wabco-auto.com/de/produkte_systeme_wabco/druckluft-management/luftaufbereitungseinheit-apu/elektronische-luftaufbereitungseinheit-e-apu/), abgerufen am: 03.07.2013, 2013.
- [128] B. Wede. *Modellierung eines 6-Gang-Schaltgetriebes mit Hilfe der Modellierungssprache Modelica*. Grin Verlag, 2010.
- [129] G. Weiberg. *Trucks 2020 – Innovationen und Trends in der Nutzfahrzeugindustrie*. Universität Stuttgart, Vorlesungsreihe „Technologieführer der Automobilindustrie stellen sich vor“, 2011.

- 
- [130] K. Weicker. *Evolutionäre Algorithmen*. Teubner, 2007.
- [131] M. C. Wewel. *Statistik im Bachelor-Studium der BWL und VWL. Methoden, Anwendung, Interpretation*. Pearson Studium, 2006.
- [132] U. Wiesel. *Hybrides Lenksystem. Technische und Methodische Ansätze*. Dissertation, KIT Scientific Publishing, 2010.
- [133] H. Windisch. *Thermodynamik. Ein Lehrbuch für Ingenieure*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2011.
- [134] M. Wissmann. *Nutzfahrzeuge: Für alle unterwegs*. URL: <http://www.vda.de/de/downloads/661/>, abgerufen am: 08.08.2013, 2008.





# F. Stichwortverzeichnis

$\chi^2$ -Test ..... 54  
ähnliche Streckenverläufe .... 108  
ökonomische Bedingungen ... 227

## A

Abbildung von Leistung  
und Verbrauch ..... 15  
abschließende  
Gütebewertung ..... 226  
absolute Häufigkeit ..... 47  
Amortisationsdauer ..... 204  
Amortisationsrechnung ..... 204  
Anbindung der  
Nebenaggregate ..... 29  
Animation ..... 227  
Antriebskraft ..... 22  
Anwendung der  
Berechnungsalgorithmen ..... 195  
Anwendung der  
stochastischen  
Simulationsmethodik ..... 191  
arithmetischer Mittelwert ..... 41  
Aufgliederung der  
Validierungsarten ..... 229  
Ausgangsgrößen ..... 19  
Auslegungskriterium ..... 222  
auslegungsspezifische  
Optimierung ..... 221

## B

Basis der Berechnung ..... 202

Bedeutung des  
Fahrzeugmodells ..... 148  
Begutachtung ..... 227  
Berechnung der  
Energiedifferenz ..... 182  
Berechnungsgrundlagen ..... 152  
Berechnungsverfahren ..... 242  
bestehende  
Fahrzeugtopologie ..... 155  
Betriebsstrategie ..... 162, 202  
Betriebsverhalten ..... 106  
Bewegungsgleichung ..... 35  
Bewertung der  
stochastischen Simulation ... 225  
Bewertung des  
Fahrzeugmodells ..... 231  
Bewertung eines  
Rekuperationssystems ..... 200  
Bewertungs- und  
Optimierungsaufgabe ..... 137  
bimodale Verteilung ..... 244  
Brennwert ..... 76

## C

CO<sub>2</sub>-Emission ..... 1  
Computersimulationen ..... 15

## D

Datenablage ..... 261  
Datenlogger ..... 99  
Datenquellen ..... 98  
Datenreihe ..... 109

Datenspeicherung ..... 260  
 deskriptive Statistik ..... 40  
 Dichtefunktion ..... 48  
 differierendes  
 Interpolationsverfahren ..... 235  
 Dimensionstest ..... 229  
 DIN EN 16001 ..... 70  
 DIN EN ISO 50001 ..... 72  
 Drehmomentmodell ..... 25  
 dynamisches System ..... 13

## E

effiziente  
 Simulationsmethodik ..... 7  
 Ein- und Ausgangsgrößen .... 14  
 Eingangsgröße ..... 17  
 Eingangsparameter ..... 138  
 elektrische Leistungsbilanz .. 156  
 elektrischer Energiebedarf ... 192  
 elektrischer Speicher ..... 166  
 elektrisches  
 Energiemanagement ..... 70  
 elektrisches System ..... 90  
 Endenergie ..... 77  
 Endleistungsprofile ..... 147  
 Energie- und Kostenbilanz .. 146  
 Energie-Hierarchie ..... 81  
 Energiebilanz ..... 82  
 Energiebilanz des  
 Gesamtfahrzeugs ..... 152  
 Energiebilanz im  
 Hybridfahrzeug ..... 32  
 Energiebilanzierung ..... 79, 82  
 Energieerhaltungssatz ..... 79  
 Energiemanagement ..... 69  
 Energiemanagementsystem .. 69  
 Energiemanagementsystem  
 für das Bordnetz ..... 74  
 Energiepfade ..... 83  
 Energieverteilung ..... 75

Energiewertschöpfungskette .. 78  
 Entropie ..... 79  
 Entwickler ..... 137  
 Entwicklung und Auslegung  
 von Fahrzeugsystemen ..... 6  
 Entwicklung und Einführung  
 eines energieeffizienten  
 Fahrzeugsystems ..... 4  
 Entwicklungsmethodik ..... 258  
 Ereignisvaliditätstest ..... 229  
 Erfüllung der Leistungs-  
 und Energiebilanz ..... 218  
 Erfassung des  
 Kraftstoffbedarfs ..... 11  
 Erhöhung der  
 Simulationsdauer ..... 242  
 Erhöhung des Kundennutzens . 2  
 Ersatzmodell ..... 22  
 extrinsischer Bereich ..... 227

## F

Fahrertyp ..... 112  
 Fahrwiderstandskraft ..... 22  
 Fahrzeughersteller ..... 2  
 Fahrzeugkonfiguration ..... 146  
 Fahrzeugmodell ..... 143, 146  
 Fehlerfortpflanzung ..... 232  
 Fehlerquelle ..... 239  
 Festwerttest ..... 228  
 Flottenversuche ..... 98  
 freie Kombination ..... 234  
 funktionales Fahrzeugmodell .. 31

## G

Güterverkehrsaufkommen ..... 1  
 geringe zeitliche  
 Einschaltdauer ..... 211  
 Gesamtenergie ..... 103  
 Gesamtnutzen der  
 Methodik ..... 230

Gesetzgebung ..... 2  
gewogenes arithmetisches  
Mittel ..... 42  
grafische Oberfläche ..... 187  
Grenzwerttest ..... 228  
Grundlagen und  
Anwendungsbeispiele ..... 135

## H

Häufigkeitsver-  
teilung ..... 47, 148, 206  
Häufigkeitsverteilungen der  
Betriebszustände ..... 215  
höchste Priorität ..... 179  
Heizwert ..... 76  
hierarchische Modellierung  
des Fahrzeugsystems ..... 232  
Hilfsaggregate ..... 28  
Hybrid-Fahrzeug ..... 98  
Hybridelektrokraftfahrzeug ... 30  
hybrider Antriebsstrang ..... 94  
Hybridisierung des  
Antriebsstrangs ..... 215  
hydraulisches System ..... 92

## I

Integration einer Solarzelle .. 201  
Integration eines  
Optimierungsalgorithmus .... 224  
Interquartalsabstand ..... 43  
Intervallbreite ..... 52  
intrinsischer Bereich ..... 226  
ISO 26262 ..... 74

## K

kinetische Energie ..... 75  
Klassierung der  
Geschwindigkeiten ..... 101  
Klimasystem ..... 93, 210

konkreter Streckenverlauf ... 259  
Kopplungsarten ..... 13  
Kosten der Batterie ..... 187  
Kosten- und Energiebilanz .. 160  
Kosten-Nutzen-Analyse ..... 34  
Kraftstoffpotenziale ..... 210  
Kraftstoffverbrauchs-  
bewertung ..... 4  
Kundenfahrerprobung ... 98, 100  
kundennahe Fahrerprobung .. 98

## L

Längsdynamik des Fahrzeugs .. 4  
Längsdynamikmodell ..... 145  
Längsdynamiksimulation .... 4, 6  
Lösungsverfahren ..... 19  
Lastpunktverschiebung ..... 220  
Leistung ..... 76  
Leistungs- und  
Energiebilanz ..... 131, 153  
Leistungsverzweigter Hybrid .. 31  
Lenkleistungen ..... 208  
Lorenzkurve ..... 45  
Luftsystem ..... 91  
Luftwiderstandskraft ..... 23

## M

Massenträgheitsmoment ..... 24  
mechanische Leistung ..... 157  
Modell ..... 18  
Modellbildung ..... 25  
Modellierung des  
Fahrerhauses ..... 211  
Modellierungsmethoden ..... 14  
Modus ..... 43  
Monitoring ..... 227  
Mustererkennung ..... 108, 115

## N

Nebenaggregate ..... 28, 73

- Neuberechnung ..... 196  
 Neuberechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung .... 179  
 Neubestimmung der Generatorleistung ..... 182  
 Neubildung eines zeitlichen Verlaufs ..... 240  
 neue Häufigkeitsverteilung .. 156  
 Nutzenergie ..... 77  
 Nutzung solarer Energie .... 200
- O**
- objektive Bewertung ..... 230  
 optimale Lösung ..... 62  
 Optimierungskriterium ..... 186  
 Optimierungsverfahren ..... 64
- P**
- p-Quantil ..... 43  
 parallele Berechnung ..... 261  
 Paralleler Hybrid ..... 31  
 physikalisches Modell ..... 21  
 potenzielle Energie ..... 75  
 potenzielle Fehlerfälle ..... 74  
 Primärenergieträger ..... 77  
 Prozessdefinition ..... 12  
 Punktmassenersatzmodell ... 21
- Q**
- Quartilskoeffizient der Schiefe ..... 43  
 quasistationäre Simulation ... 36  
 quasistationäres Fahrzeugmodell ..... 258
- R**
- Radwiderstandskraft ..... 22
- Reduktion der Generatorleistung ..... 180  
 Reduktion des Simulationsaufwands ..... 5  
 Regulierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ..... 2  
 Rekuperationssystem ..... 162  
 relative Verbrauchspotenziale ..... 234  
 relative Häufigkeit ..... 47  
 relativer Speicherstand ..... 169  
 relativer Vergleich ..... 233  
 repräsentatives Lastkollektiv ..... 105
- S**
- Schreibtischtest ..... 227  
 Schwerpunkt dieser Arbeit .. 255  
 Sekundärenergie ..... 77  
 Sensitivitätsanalyse ..... 98, 228  
 Serieller Hybrid ..... 30  
 simple Integration ..... 211  
 Simulation ..... 15  
 Speicherstandsbestimmung .. 213  
 Stützen der Simulation ..... 226  
 Standardabweichung ..... 44  
 stationäres Verhalten ..... 260  
 statisches System ..... 13  
 statistische Techniken ..... 229  
 Steigungswiderstand ..... 23  
 Stellhebel ..... 206  
 Stellhebel des Energiemanagements ..... 85  
 stochastische Simulationsmethodik ..... 192  
 stochastische Unabhängigkeit ..... 53, 256  
 stochastisches Simulationsverfahren ..... 255  
 Strafterm ..... 187

Struktur eines Systems ..... 13  
strukturiertes Durchgehen... 227  
subjektive Bewertung ..... 226  
subjektive und objektive  
Bewertungskriterien..... 229  
Subjektivitätsgrad ..... 227  
Suchalgorithmus ..... 64  
System ..... 12  
Systembewertung ..... 208  
Systemgrenze der  
Simulation ..... 143  
Systemparameter..... 138, 144  
Systemvariation..... 192

## T

technisches System ..... 12  
Test der internen Validität .. 229  
Test von Teilmodellen ..... 227  
Trägheitskraft ..... 24  
Trace-Analyse ..... 228  
Turing-Test ..... 228

## U

Umgebung ..... 12  
Umwandlungsprozesse ..... 79  
Ursache-Wirkungen-Test ..... 228

## V

Validierung des  
Fahrzeugmodells ..... 230  
Validierung im Dialog ..... 227  
Validierung von  
Simulationen ..... 226  
Validierung von  
Vorhersagen ..... 229  
Variationskoeffizienten ..... 44  
Veränderung der  
zeitlichen Reihenfolge ..... 236  
Veränderung eines Bauteils.. 178

Verbrauchsmodell ..... 25  
Verbrauchspotenzial ..... 194  
Vergleich ..... 191  
Vergleich der  
absoluten Ergebnisse ..... 197  
Vergleich des  
Fahrzeugmodells ..... 231  
Vergleich mit  
anderen Modellen ..... 228  
Vergleich mit  
aufgezeichneten Daten ..... 229  
Verhalten ..... 12  
Verteilung ..... 47  
Verteilungsfunktion ..... 43, 48  
Verwendung von  
Evolutionären Algorithmen.. 186  
virtuelle Produktentstehung .. 12  
Volumenstromreduktion .... 206  
Vorgehensweise der  
stochastischen  
Entwicklungsmethodik ..... 138  
Vorteil ..... 201

## W

Wahrscheinlichkeit der  
Temperaturabnahme ..... 213  
Wahrscheinlichkeitsfunktion .. 48  
Wahrscheinlichkeitsmaß ..... 47  
Wahrscheinlichkeitsver-  
teilungen ..... 204  
Wahrscheinlichkeitsverteilung. 47  
Wahrscheinlichkeitsverteilung  
der Temperaturdifferenz .... 214  
Wirkungsgradkennfelder .... 193  
Wirtschaftlichkeitsbe-  
trachtung ..... 35  
Wirtschaftswunder ..... 1

## Z

Zeitbedarf ..... 257

|                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| zeitdiskreter Wertebereich... 212 | Ziel einer ausgeglichenen         |
| zeitdiskretes                     | Energiebilanz ..... 218           |
| Simulationsverfahren ..... 257    | zusätzlicher Elektromotor ... 209 |

# G. Eigene Publikationen

## G.1 Tagungsbeiträge/Veröffentlichungen

- # *Methodischer Ansatz bei der Betrachtung von Bordnetzarchitekturen – Grundlagenuntersuchung zu der zukünftigen Bereitstellung von elektrischer Energie in Nutzfahrzeugen*  
Tagung: 1. Commercial Vehicle Technology Symposium Kaiserslautern; Kaiserslautern, Deutschland; 2010  
Autoren: Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.; Schwarzhaupt, A.
- # *Entwicklungsprozess zum Entwurf von energieeffizienten Nutzfahrzeugen in seiner Anwendung auf die Auslegung von Nebenaggregaten*  
Tagung: 11. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge; Steyr, Österreich; 2011  
Autoren: Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.; Schwarzhaupt, A.; Wohlfahrt, E.
- # *Einsatz eines Entwicklungstools zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Energiemanagementmaßnahmen*  
Tagung: 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik; Aachen, Deutschland; 2011  
Autoren: Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.; Wohlfahrt, E.
- # *An Approach to Develop Energy Efficient Operation Strategies and Derivation of Requirements for Vehicle Subsystems Using the Vehicle Air Conditioning System as an Example*  
Tagung: SAE World Congress; Detroit, USA; 2013  
Autoren: Fritz, M.; Oberfell, R.; Gauterin, F.; Frey, M.; Weßling, J.; Wohlfarth, E.
- # *Einsatzorientierte Bewertung und Optimierung von Energiemanagementmaßnahmen im Kraftfahrzeug durch stochastische Kombination energetisch relevanter Betriebszustände*

*Tagung:* Wissenschaftssymposium Automobiltechnik (WISAU); Aachen, Deutschland; 2013

*Autoren:* Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.

- # *CO<sub>2</sub>-optimized design of air compressor concepts. A methodical approach to analyzing the commercial vehicle's fuel consumption in customer use*

*Tagung:* 12. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge; Celle, Deutschland; 2013

*Autoren:* Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.; Wohlfarth, E.; Zeimer, D.; Kober, W.

- # *Kraftstoffverbrauchsreduktion durch Energiemanagement bei Nutzfahrzeugen – technische und methodische Ansätze*

*Tagung:* Fachakademie Daimler Trucks; Wörth, Deutschland; 2013

*Autoren:* Oberfell, R.

- # *Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions by Use of a Thermal Shortterm Storage System within the A/C System*

*Tagung:* 3. Commercial Vehicle Technology Symposium Kaiserslautern; Kaiserslautern, Deutschland; 2014

*Autoren:* Fritz, M.; Gauterin, F.; Haussmann, R.; Wohlfarth, E.; Oberfell, R.

- # *Mehrwertfunktionen für Zweispeicherbordnetze in schweren Nutzfahrzeugen*

*Tagung:* Elektrik und Elektronik im Nutzfahrzeug; Baden-Baden, Deutschland; 2014

*Autoren:* Oberfell, R.; Gauterin, F.; Gast, S.



## G.2 Offenlegungsschriften

- # *Konzept einer Temperaturschutzsteuerung für ein hybrides Lenksystem*  
Offenlegung: DE 10 2008 019 170 A1; 27.11.2008  
Erfinder: Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Wiesel, U.
- # *Konzept einer bedarfsorientierten Regelung des Hydraulikvolumenstroms im Lenksystem mittels eines Bypasses in der Lenkhilfpumpe*  
Offenlegung: DE 10 2008 026 193 A1; 18.12.2008  
Erfinder: Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Wiesel, U.
- # *Konzept einer bedarfsorientierten Regelung des Hydraulikvolumenstroms im Lenksystem mittels eines 3-Wege-Proportional-Stromregulventils*  
Offenlegung: DE 10 2008 028 170 A1; 15.01.2009  
Erfinder: Oberfell, R.; Rothmund, M.; Schwarzhaupt, A.; Sulzmann, A.; Vegh, I.; Wiesel, U.
- # *Sleepmode für Hybridlenksystem*  
Offenlegung: DE 10 2008 047 500 A1; 04.06.2009  
Erfinder: Gast, S.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Wiesel, U.
- # *Konzept einer Regelstrategie für ein kraftstoffarmes Lenksystem mit hydraulischer Lenkunterstützung*  
Offenlegung: DE 10 2008 051 692 A1; 10.06.2009  
Erfinder: Gast, S.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Wiesel, U.
- # *Informations- und Regelsystem zur Reduktion des Energiebedarfs bei Nebenverbrauchern im Kraftfahrzeug*  
Offenlegung: DE 10 2009 041 559 A1; 17.06.2010  
Erfinder: Gast, S.; Kirchner, D.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.
- # *Entwicklungsmethodik zur ganzheitlichen Analyse und Optimierung der Energiebilanz im Kraftfahrzeug*  
Offenlegung: DE 10 2009 048 615 A1; 24.06.2010  
Erfinder: Gast, S.; Gauterin, F.; Kirchner, D.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.
- # *Gezielte Nutzung einer regenerativen Energiequelle zur Versorgung von Komfortverbrauchern im Nutzfahrzeug*  
Offenlegung: DE 10 2009 058 889 A1; 29.07.2010

- Erfinder:* Gast, S.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Spennemann, F.; Weisz, A.
- # *Mehrzonen-Solardach zur optimalen Ausnutzung globaler Sonneneinstrahlungen im Kraftfahrzeug*  
*Offenlegung:* DE 10 2009 058 891 A1; 05.08.2010  
*Erfinder:* Gast, S.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Spennemann, F.; Weisz, A.
- # *Verfahren für einen Überholassistenten auf Basis der Umfelderkennung und eines aktiven Lenkmomenteneingriffs*  
*Offenlegung:* DE 10 2010 010 557 A1; 05.01.2011  
*Erfinder:* Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.; Wiesel, U.; Wirnitzer, J.
- # *Gesamtheitliches Energiemanagement im Kraftfahrzeug durch prädiktives Fahren auf der Basis fahrertypischer Eigenschaften*  
*Offenlegung:* DE 10 2009 042 180 A1; 24.03.2011  
*Erfinder:* Gast, S.; Gauterin, F.; Kirchner, D.; Oberfell, R.; Schwarzhaupt, A.
- # *Konvoy-Assistent für eine gleichmäßige und energiesparende Fahrweise basierend auf einer Gesamtverkehrsbilderkennung*  
*Offenlegung:* DE 10 2009 048 061 A8; 07.04.2011  
*Erfinder:* Ficicioglu, S.; Kirchner, D.; Maass, M.; Metz, K.; Oberfell, R.; Rothe, S.; Schrauf, M.; Schwarzhaupt, A.; Stahl, W.; Vegh, I.; Wirnitzer, J.; Wohlfarth, E.
- # *Energiepreisassistent (EPA) für ein globales Tankmanagement zur Kostenreduzierung im Einkauf von Primärenergie*  
*Offenlegung:* DE 10 2009 040 722 A1; 28.07.2011  
*Erfinder:* Bonnet, C.; Büchele, T.; Kirchner, D.; Oberfell, R.; Scheitler, R.; Schreitmüller, T.; Schumacher, J.; Schwarzhaupt, A.; Stahl, W.; Tischler, M.; Vegh, I.
- # *Regelalgorithmus Central Energy Management (CEM) zur effizienten Bereitstellung elektrischer Energie*  
*Offenlegung:* DE 10 2012 001 381 A1; 02.08.2012  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Oberfell, R.; Wohlfarth, E.
- # *Klimaanlage mit betriebsabhängigem Aufbau eines thermischen Speichers*  
*Anmeldung:* 12.08.2013

- Erfinder:* Gauterin, F.; Frey, M.; Fritz, M.; Gauß, A.; Oberfell, R.; Wohlfarth, E.
- # *Situationsabhängige Verkleinerung des zu klimatisierenden Fahrzeuginnenraumes*  
*Anmeldung:* 05.09.2013  
*Erfinder:* Gauterin, F.; Frey, M.; Fritz, M.; Weßling, J.; Oberfell, R.; Wohlfarth, E.
- # *Parametrierbares Filterverfahren zur Reduktion von Spannungsschwankungen im Bordnetz*  
*Offenlegung:* DE 10 2013 003 594 A1; 19.09.2013  
*Erfinder:* Berg, S.; Kober, W.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Einsatz von mehreren Motorlüftern zur verbesserten Umströmung des Motorblocks*  
*Anmeldung:* 07.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Optimierte Fahrtwindkühlung bei NFZ durch eine Reduzierung des Staudruckes zwischen dem Motorkühler und dem zentralen Motorlüfter*  
*Anmeldung:* 16.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Reduzierung der zentralen Motorlüfterleistung durch eine Verlegung des Klimakondensators*  
*Anmeldung:* 16.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Optimierte Fahrtwindkühlung bei NFZ durch eine Fixierung des durch eine Kupplung/Getriebe angetriebenen Motorlüfters bei ausreichender Fahrtwindkühlung*  
*Anmeldung:* 16.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Aktive Einbindung des Motorkühlwasserausgleichsbehälters als zusätzlicher Kältespeicher in den Motorkühlkreislauf mit einer regelbaren Wasserpumpe*

- Anmeldung:* 19.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Druckluftgeführte Verdampfungskühlung der Kühlflächen*  
*Anmeldung:* 19.11.2013  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Betriebsstrategie für eine Klimaanlage mit thermischem Fluidspeicher*  
*Offenlegung:* DE 10 2012 108 317 A1; 13.03.2014  
*Erfinder:* Gauterin, F.; Frey, M.; Fritz, M.; Gauß, A.; Oberfell, R.; Wohlfarth, E.
- # *Erhöhung des Anteils an rekuperierbarer Energie im Klimasystem durch Regelung der Verdampferemperatur auf vier Ein- und Ausschaltgrenzen*  
*Anmeldung:* 01.04.2014  
*Erfinder:* Eibofner, A.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Rotter, M.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Verfahren zur Begrenzung des Batterieladestromes über steuerbaren Generator*  
*Offenlegung:* DE 10 2013 015 859 A1; 24.04.2014  
*Erfinder:* Hoos, F.; Müller-Junker, J.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Vorausschauende Planung eines LKW-Generatormanagements basierend auf Daten von aktuellem Fahrzeuggewicht, Navigationssystem, Tempomat (PPC), Tachograf und Telematik-System*  
*Offenlegung:* DE 10 2014 001 417 A1; 18.09.2014  
*Erfinder:* Hoos, F.; Oberfell, R.
- # *Integration und Ansteuerung einer zweiten Energiequelle in das thermische und elektrische Netz*  
*Offenlegung:* DE 10 2014 005 126 A1; 25.09.2014  
*Erfinder:* Kober, W.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Klappbares Hilfsrad zur Sicherstellung der Energieversorgung sicherheitskritischer elektrischer Verbraucher*  
*Offenlegung:* DE 10 2014 005 128 A1; 25.09.2014  
*Erfinder:* Deuschle, K.; Kober, W.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.

- # *Schaltungskonzept und -verfahren zur Erhöhung von Zuverlässigkeit & Startfähigkeit mittels Einsatz mehrerer Energiespeicher*  
Offenlegung: DE 10 2014 005 130 A1; 25.09.2014  
Erfinder: Kober, W.; Krippner, N.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Nutzung vorhandener Energiequellen im Fahrzeug durch Wandlung in elektrische Energie zur Sicherstellung der Startfähigkeit des Verbrennungsmotors*  
Offenlegung: DE 10 2014 005 131 A1; 25.09.2014  
Erfinder: Kober, W.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.
- # *Zwei-Generator-Konzept für ein sicheres und effizientes Bordnetz*  
Offenlegung: DE 10 2014 005 132 A1; 25.09.2014  
Erfinder: Kober, W.; Oberfell, R.; Weller-Schelle, S.; Wohlfarth, E.



## H. Betreute wissenschaftliche Arbeiten

- # *Potentialabschätzung abschaltbarer elektrischer Nebenverbraucher zur Integration in ein gesamtheitliches Energiemanagement im Nutzfahrzeubereich*  
Autor: Lang, A.  
Art: Diplomarbeit; Hochschule Esslingen, 2008
- # *Methodischer Ansatz zur Integration von Energieeffizienzkonzepten in eine bestehende Bordnetzarchitektur*  
Autor: Kirchner, D.  
Art: Diplomarbeit; Hochschule Giessen-Friedberg, 2009
- # *Simulative Abbildung und Optimierung von Antriebsstrang und Nebennaggregaten in einem schweren Nutzfahrzeug*  
Autor: Heckert, F.  
Art: Diplomarbeit; Universität Stuttgart, 2010
- # *Analyse und Optimierung der Energiebilanz von hybridisierten Nutzfahrzeugen*  
Autor: Schietzold, J.  
Art: Diplomarbeit; Technische Universität Dresden, 2010
- # *Maßnahmen am elektrischen Bordnetz zur energieeffizienten Auslegung von zukünftigen Nutzfahrzeugen*  
Autor: Büsing, J.  
Art: Diplomarbeit; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010
- # *Nutzung solarer Energie durch Integration von Solarzellen in eine bestehende Bordnetzarchitektur*  
Autor: Hecker, J.-S.  
Art: Diplomarbeit; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010

- # *Mathematischer Ansatz zur zeitunabhängigen Beschreibung von Fahrzeugsystemen*  
Autor: Lamothe, P.  
Art: Master-Thesis; Hochschule Karlsruhe / École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon, 2010
- # *Verwendung von evolutionären Algorithmen zur Optimierung von Energiemanagementkonzepten im Nutzfahrzeug*  
Autor: Sehi, A.  
Art: Master-Thesis; Hochschule Karlsruhe, 2010
- # *Entwurf einer Benutzerschnittstelle für eine zeitunabhängige Simulationsumgebung zur Analyse und Optimierung der Energiebilanz in Nutzfahrzeugen*  
Autor: Stoll, T.  
Art: Bachelor-Thesis; Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2010
- # *Energieeffizienzbetrachtung in der Versorgung elektrischer Nebenverbraucher unter Einsatz verschiedener Speicher-/Wandlertechnologien*  
Autor: Aboudy, G.  
Art: Studienarbeit; Technische Universität Berlin, 2011
- # *Bewertung von Simulationsmethoden auf ihre Anwendbarkeit zur Effizienzbetrachtung von Energiemanagementmaßnahmen*  
Autor: Aboudy, G.  
Art: Diplomarbeit; Technische Universität Berlin, 2011
- # *Weiterentwicklung einer Rekuperations- und Ladestrategie für verschiedene Batterietechnologien*  
Autor: Eibofner, A.  
Art: Bachelor-Thesis; Hochschule Ravensburg-Weingarten, 2012
- # *Methodenerstellung zur Bordnetzleistungsaufnahmenbestimmung im Komponentenverbund*  
Autor: Schmidt, M.  
Art: Diplomarbeit; Berufsakademie Sachsen, 2012
- # *Bewertung von Energiemanagementkonzepten zur Kraftstoffverbrauchsreduktion bei der Energiewandlung in pneumatische Energie*  
Autor: Bitar, C.  
Art: Master-Thesis; Technische Universität Berlin, 2013



- 
- # *Performance testing for the optimized alternator management system for a prototypical truck in order to increase energy conversion efficiency*  
Autor: Abdo, M.  
Art: Master-Thesis; Universität Kassel / Cairo University, 2013
  - # *Anordnungs- und Antriebskonzepte für einen energieeffizienten Betrieb des Kühlerlüfters im Nutzfahrzeug*  
Autor: Eibofner, A.  
Art: Master-Thesis; Hochschule Esslingen, 2013
  - # *Konzeption und Umsetzung einer Simulationsumgebung zur Auslegung von Energiebordnetzen*  
Autor: Möhring, C.  
Art: Master-Thesis; Technische Universität München, 2015



# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter [www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu) als PDF frei verfügbar  
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel  
**Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug.** 2010  
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber  
**Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahntriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers.** 2010  
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener  
**Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement.** 2010  
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog  
**Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten.** 2011  
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft  
**Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich.** 2011  
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker  
**Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation.** 2011  
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe.** 2011  
ISBN 978-3-86644-599-4

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev  
**Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs.** 2011  
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz  
**Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk.** 2011  
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine.** 2012  
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler  
**Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis.** 2012  
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies  
**Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen.** 2012  
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber  
**Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz.** 2012  
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**  
**27./28. September 2012 in Karlsruhe.** 2012  
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen**  
**20. Februar 2013, Karlsruhe.** 2013  
ISBN 978-3-86644-970-1

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau  
**Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen.** 2013  
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang  
**Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius  
**Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke  
**Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr  
**Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova  
**Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt  
**Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann  
**Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0187-9

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann  
**Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei  
**Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz  
**Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab  
**Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler  
**Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös  
**Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen**  
**25. Februar 2015, Karlsruhe.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert  
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0332-3

# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 32**     Martin Scherer  
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33**     Rinaldo Arnold  
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34**     Johannes Gültlinger  
**Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35**     Thorsten Dreher  
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36**     Steffen Kölling  
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37**     Michael Fritz  
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38**     Ralf Oberfell  
**Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0403-0

Als effizienter Ansatz zur Verbrauchssimulation wird in der vorliegenden Arbeit ein stochastisches Simulationsverfahren vorgestellt. Dieses Verfahren ergänzt die explizite Berechnung im Zeitbereich. Unter Berücksichtigung statistisch ausgewerteter Fahrzeug- und Streckendaten berechnet es eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu erreichenden Energieeinsparung. Der Algorithmus nutzt dabei die Berechnungsvorschriften aus der mathematischen Modellierung der längsdynamischen Eigenschaften eines Nutzfahrzeugs. Die Verwendung eines Optimierungsverfahrens ergänzt die in diesem Buch vorgestellte Entwicklungsmethodik und ermöglicht eine einsatzspezifische Auslegung von Nutzfahrzeugen.

