

109

Karlsruher Schriftenreihe
 Fahrzeugsystemtechnik

Michael Mürken

**Methode zur Bewertung der
Zuverlässigkeit der elektrischen
Energieversorgung in der
automobilen Vorentwicklung**

Michael Mürken

**Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit
der elektrischen Energieversorgung in der
automobilen Vorentwicklung**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 109**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Prof. Dr.-Ing. Luise Kärger

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Institutsteilen Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbau und Mobile Arbeitsmaschinen.

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

Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung

von
Michael Mürken

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen
Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation
von Michael Mürken, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 30. März 2023
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Golder

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



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2023 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-1298-1
DOI 10.5445/KSP/1000158067

Danksagung

Bei der Anfertigung der vorliegenden Dissertation wurde ich von vielen Menschen begleitet und unterstützt. Für die Motivation und die Hilfe möchte ich mich bei ihnen an dieser Stelle bedanken.

Allen voran bedanke ich mich in besonderer Weise bei Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld für den herzlichen Empfang an seinem Institut, für die gute Betreuung und für die kompetenten sowie konstruktiven Diskussionen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Golder für die Anfertigung des Zweitgutachtens. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze bedanken.

Meine Zeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik durfte ich als sehr familiär erleben. Hierbei gilt ein sehr großer Dank Ivana Kramer für die freundliche und fürsorgliche Begleitung sowie für die Unterstützung beim Navigieren durch die Untiefen der Universitätsverwaltung. Durch die regelmäßigen Aufenthalte am Institut war ich über die Zeit hinweg in unterschiedlichen Bürokonstellationen untergebracht. In diesem Zusammenhang gilt meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Philipp Otto, Dr.-Ing. Franz Jost und Dr.-Ing. Markus Tesar ein großer Dank für die freundliche Aufnahme sowie für die kreativen Diskussionen und die inhaltlichen Anregungen zu meiner Arbeit.

Ein Großteil der vorliegenden Arbeit entstand im Rahmen meiner Anstellung als Doktorand bei der Audi AG Ingolstadt in der Abteilung „Forschung und Voraentwicklung für elektrische Energiesysteme“. Bei meinen Kollegen und Betreuern Dr.-Ing. Achim Enthaler und Dr.-Ing. Andreas Thanheiser möchte ich mich für die Anregung des Themas, für die spannenden und motivierenden Gespräche sowie für die umfassende Unterstützung in allen Belangen herzlich bedanken. Der kollegiale und freundschaftliche Umgang hat sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Im Rahmen der Anfertigung einer Arbeit mit dem hier vorliegenden Umfang müssen eine Vielzahl von Untersuchungen in teils sehr verschiedenen Themenfeldern durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang möchte ich mich für die studentischen Arbeiten von B.Sc. Thilo Brunsch, M.Sc. Adrian Gru-

ber, M.Sc. Ruben Kopischke, M.Sc. Alexander Kurz, M.Sc. Felix Kuschel, M.Sc. Stefan Maier, M.Sc. Alexej Shashkin und M.Sc. Markus Wagner bedanken. Diese Arbeiten haben wichtige Beiträge zur Entwicklung der hier vorgestellten Methode sowie zur Erstellung der dabei verwendeten Modelle geliefert.

Im Besonderen möchte ich mich bei M.Sc. Dominik Kübel bedanken. Im Rahmen seiner Arbeiten über die Zuverlässigkeit essentieller Komponenten der automobilen elektrischen Energieversorgung konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden, die entscheidende Impulse für die hier vorliegende Arbeit gegeben haben. Natürlich gilt mein Dank auch allen hier nicht namentlich genannten Kolleginnen und Kollegen für den freundlichen und kollegialen Umgang sowie für jedes kürzere oder längere Gespräch.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern, bei meiner Freundin und bei meiner Familie für die großartige Unterstützung während meiner Ausbildung und für die Begleitung durch all die Höhen und Tiefen während meines bisherigen Werdegangs bedanken. Nur durch diesen Rückhalt konnte ich mich voll auf meine Ausbildung und auf die Anfertigung dieser Arbeit konzentrieren.

Kurzfassung

Die Automobilindustrie befindet sich derzeit in einer Phase des fundamentalen Wandels. Zwei Entwicklungen sind hierbei von besonderer Bedeutung: die Ersetzung klassischer Verbrennungskraftmaschinen durch elektrische Antriebe und die Entwicklung vollständig autonom fahrender Fahrzeuge. Bisher sind in der Europäischen Union zwar noch keine Personenkraftwagen zugelassen, die vollständig autonom fahren (ausgenommen Fahrzeuge, die zu Entwicklungs- und Forschungszwecken eine Sonderzulassung besitzen). Es ist allerdings nur eine Frage der Zeit, bis autonom fahrende Fahrzeuge in den Markt eintreten. Der Übergang zu vollständig autonom fahrenden Kraftfahrzeugen stellt die Automobilhersteller vor verschiedene Herausforderungen, insbesondere mit Blick auf Fragen der Verantwortung. An die technischen Systeme zur Realisierung des autonomen Fahrens werden in puncto Sicherheit und Zuverlässigkeit dabei höhere Anforderungen gestellt als an menschliche Fahrzeugführer. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine entsprechende Funktionsabsicherung der jeweils beteiligten Systeme erforderlich. Dabei unterliegen jedoch nicht nur die neuen Systeme strengen Anforderungen. Auch alle klassischen Fahrzeugsysteme, die zur Bereitstellung bzw. Aufrechterhaltung all jener sicherheitskritischen Funktionen erforderlich sind, die ihrerseits notwendig sind, um das autonome Fahren zu realisieren, müssen an die neuen Anforderungen angepasst werden. Dementsprechend besteht nicht nur bezüglich der neu zu entwickelnden, sondern auch bezüglich bereits bestehender technischer Systeme Forschungsbedarf.

Generell werden neue technische Systeme nach bewährten Methoden entwickelt und ihre Zuverlässigkeit wird auf der Basis der in der Industrie geltenden Standards quantitativ bewertet. In der Serienentwicklung ist dieser Prozess klar definiert. In der Vorentwicklung hingegen gibt es aufgrund der zeitlichen Beschränkungen und der begrenzten Datenlage keine umfassenden Methoden zur Durchführung der erforderlichen Untersuchungen und zur Bewertung der Zuverlässigkeit.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode ent-

wickelt, anhand derer die Zuverlässigkeit technischer Systeme auch in der automobilen Vorentwicklung qualitativ und quantitativ bewertet werden kann. Im Kern besteht diese Methode aus einer Kombination von physikalischen und stochastischen bzw. kombinatorischen Modellen der fraglichen Komponenten. Durch die Kopplung mit physikalischen Komponentenmodellen können die andernfalls rein stochastischen Zuverlässigkeitsmodelle mit verschiedenen Komponentenmodellen und unterschiedlichen Abstraktionsgraden parametrisiert werden, was erforderlich ist, um den Gegebenheiten in der automobilen Vorentwicklung gerecht zu werden. Da die Berechnungen auf realen Belastungsdaten bzw. auf plausiblen Schätzungen beruhen, können deutlich spezifischere Zuverlässigkeitsaussagen getroffen werden.

Der Fokus der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen liegt auf dem System der elektrischen Energieversorgung. Dabei werden die folgenden Komponenten einer detaillierten Betrachtung unterzogen: die Blei-Säure-Batterie als Energiespeicher, ein klassischer Klauenpolgenerator mit passiver und aktiver Gleichrichtung als Energiequelle, ein Gleichspannungswandler zur Verbindung der verschiedenen Spannungsebenen in einer Architektur mit 12V- und 48V-Spannungsebene sowie verschiedene Typen von automobilen Schmelzsicherungen als Teilsystem der Vernetzung. Am Beispiel des rein stochastischen, auf der Weibullverteilung basierenden Modells des Ausfallverhaltens von Blei-Säure-Batterien kann gezeigt werden, dass die empirisch ermittelten Ausfalldaten den wesentlichen Faktor für die Zuverlässigkeitsbewertung darstellen.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angestellten Zuverlässigkeitsberechnungen beruhen auf Belastungsdaten, die aus Versuchsfahrten stammen, die mit zwei Fahrzeugmodellen – einem Audi A3 und einem Audi A8 – auf unterschiedlichen Strecken vorgenommen wurden. Die aus den durchgeführten Versuchsfahrten gewonnenen Messergebnisse dienen dabei als Eingangsdaten für die Belastungsanalyse und bilden in dieser Arbeit die Basis für die quantitative Zuverlässigkeitsbewertung des Generators, des Gleichspannungswandlers und der Schmelzsicherungen. Um eine analoge Zuverlässigkeitsbewertungen für alle Komponenten durchführen zu können, werden entsprechende abstrahierte Modelle entwickelt und die dazugehörigen physikalischen Grundgleichungen diskutiert. Die so entwickelten physikalischen Modelle werden anschließend mit Zuverlässigkeitsmodellen gekoppelt, die auf der Basis der jeweiligen kritischen Komponentenfehler aufgebaut werden. Hierfür werden die Fehlermöglichkeiten sowie Fehlereinflüsse aller Komponenten analysiert. Anhand dieser Modelle wird abschließend eine quantitative Zuverlässigkeitsbewertung für das Gesamtsystem der elektrischen Energieversorgung in Bezug auf sicher-

heitsrelevante elektrische Verbraucher durchgeführt.

Durch die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode auf die automobilen elektrische Energieversorgung kann im Ergebnis gezeigt werden, dass sich – auf der Basis entsprechender Modellabstrahierungen und sofern eine hinreichende Datenlage gegeben ist – umfassende Zuverlässigkeitsbewertungen auch in der automobilen Vorentwicklung durchführen lassen. Konkret kann aus den hier angestellten Berechnungen abgeleitet werden, dass eine klassische elektrische Energieversorgung, die allein auf der 12V-Spannungsebene operiert, nicht dazu geeignet ist, hochautomatisierte elektrische Verbraucher mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zu versorgen. Daher ist, um sicherheitsrelevante Verbraucher angemessen zu versorgen, mindestens die Einführung von Fehlerisolationsmechanismen erforderlich. Dies gilt auch für Architekturen, in denen die elektrische Energieversorgung auf zwei Spannungsebenen realisiert ist. Durch die Einführung einer zweiten Spannungsebene und den damit erforderlichen Gleichspannungswandler werden zwar einige Fehlermechanismen von der 12V-Spannungsebene isoliert. Dennoch beeinflussen die Fehlerbilder nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher (QM-Verbraucher) die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung deutlich stärker als die Fehlerbilder der so isolierten Komponenten, beispielsweise des Generators. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass ein Ausfall der sicherheitsrelevanten Verbraucher am besten mittels einer Isolation der nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher verhindert werden kann. Die vorliegende Arbeit konnte aufzeigen, dass für die Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher Fehlerisolationsmechanismen benötigt werden.

Abstract

The automotive industry is currently undergoing a phase of fundamental change. Two developments are of particular importance here: the replacement of conventional combustion engines with electric drives, and the advancement of fully autonomous vehicles. Although no fully autonomous vehicle has been registered in the European Union yet (except for those with a special permit for research and development purposes), it is only a matter of time for fully autonomous vehicles to enter the market.

The transition to fully autonomous vehicles poses various challenges for automotive manufacturers, particularly concerning questions of responsibility. In terms of safety and reliability, the requirements placed on the technical systems that are required to realize autonomous driving are stricter than those placed on human drivers. To meet these requirements, the systems involved must be functionally safeguarded. However, not only the systems to be newly implemented are subject to these strict requirements. The same holds for those systems that are already in use and that are required to provide or maintain safety-critical functions which, in turn, are necessary to realize autonomous driving. For this reason, research and development has to be done on both already existing and newly developed technical systems.

In general, the development of new technical systems is done according to well-established methods, and their reliability is assessed quantitatively based on time-proven industry standards. With regards to serial development, this process is clearly defined. In the context of pre-development, however, due to the time constraints and the limited data available, there are no commensurable comprehensive methods for conducting the necessary analyses and for evaluating reliability.

Against this backdrop, the goal of the present thesis is to develop a method that can be used to both qualitatively and quantitatively assess the reliability of technical systems in automotive pre-development. In essence, this method consists of a combination of physical and stochastic or combinatorial models of the components to be analyzed. By so coupling the otherwise purely sto-

chastic reliability models with physical component models, the method can be parameterized with different component models and different levels of abstraction, which is a prerequisite to meet the requirements of automotive pre-development.

This thesis' research focus is on the energy supply system. The following components will be examined in detail: lead-acid batteries as energy storage devices, classic claw-pole generators with passive and active rectification as energy sources, DC/DC converters for connecting the different voltage levels in architectures with both 12V and 48V voltage levels, and different types of automotive fuses as subsystems of the wiring harness. Using the example of a purely stochastic model of the failure behavior of automotive lead-acid batteries based on the Weibull distribution, it turns out that the decisive factor for making reliability assessments are the empirically determined failure data.

The calculations performed in this thesis are based on empirically obtained load data from test drives with two vehicles, an Audi A3 and an Audi A8, on different routes. This allows for a significant increase in the specificity of the reliability assessments performed. (The method can also be applied, however, if no empirical data is available. In this case, plausible estimates can be used as a substitute for real data.) The measurement results obtained from the test drives performed serve as input data for the load analysis and also form the basis for the quantitative reliability assessment of the generator, the DC/DC converter, and the fuses. To perform analogous reliability evaluations for all components, corresponding abstracted models are developed and the associated basic physical equations are discussed. The physical models developed in this way are then coupled with reliability models built on the respective critical component faults. To this end, both the failure modes and the influences of all components are analyzed. Finally, based on these models, a quantitative reliability assessment concerning safety-relevant electrical loads is performed for the overall power supply system.

By applying the method developed in this work to the automotive power supply, it can be shown that if both appropriate model abstractions and sufficient data are available, comprehensive reliability evaluations in the context of automotive pre-development are possible. Specifically, the calculations performed in this thesis show that a classic power supply operating solely on the 12V voltage level is not suitable for supplying highly automated electrical consumers with high-degree reliability requirements. Therefore, the introduction of fault isolation mechanisms is required as a minimum to adequately supply safety-relevant loads. This also applies to architectures in which the power

supply is implemented on two voltage levels. However, while the introduction of a second voltage level and a corresponding DC/DC converter is sufficient to isolate some fault mechanisms from the 12V voltage level, the fault patterns of non-safety-related consumers (QM consumers) have a much stronger influence on the reliability of the electrical power supply than the fault patterns of the components isolated in this way (e.g., the generator). In this context, it can be shown that a failure of the safety-relevant consumers can best be prevented by isolating the non-safety-relevant consumers. The main result of the present thesis, then, is that the electrical power supply requires a fault isolation mechanism to supply safety-relevant consumers with adequate reliability.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	vii
Abkürzungen und Symbole	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung	5
1.3 Gliederung der Arbeit	7
2 Grundlagen	11
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	11
2.2 Zulassungsvoraussetzungen	13
2.3 Zuverlässigkeit technischer Systeme	15
2.3.1 Fehlerklassifizierung	16
2.3.2 Fehlerursachen	17
2.3.3 Risikobewertung	26
2.3.4 Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit	29
2.4 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie	35
2.4.1 Lebensdauerverteilungen	41
2.4.2 Qualitative und quantitative Methoden	50
2.5 Handbücher zur Berechnung der Ausfallrate	57
2.5.1 Berechnungsmethode und Beschleunigungsmodelle	58

3	Bewertung der Zuverlässigkeit	61
3.1	Standard ISO 26262	61
3.1.1	Zuverlässigkeitsbewertung nach ISO 26262	65
3.1.2	Vorbedingungen für die Bewertung der Zuverlässigkeit	68
3.2	Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung	69
3.2.1	Prozessschritte in der Vorentwicklung	70
3.2.2	Diskussion der Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung nach aktuellem Stand	72
3.2.3	Datenquellen der Ausfallraten	74
3.2.4	Zusammenfassung	77
3.3	Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung	79
3.3.1	Anforderungen an die Methode	79
3.3.2	Beschreibung der Methode	80
4	Energieversorgung in Kraftfahrzeugen	85
4.1	Architektur der elektrischen Energieversorgung	88
4.1.1	Topologie	88
4.1.2	Spannungsebenen	90
4.2	Verbraucher	93
4.3	Energie- und Leistungsmanagement	97
4.4	Anforderungen an die elektrische Energieversorgung	99
4.4.1	Hochautomatisierte Fahrfunktionen	100
4.5	Fehler in der elektrischen Energieversorgung	106
4.6	Risikobewertung für hochautomatisierte Funktionen	112
4.7	Zusammenfassung	116
5	Belastungs- und Zuverlässigkeitsmodelle der Komponenten der elektrischen Energieversorgung	121
5.1	Fahrprofil	122
5.1.1	Strecken	123
5.1.2	Versuchsaufbau	126
5.1.3	Auswertung der Versuchsfahrten	127
5.1.4	Zusammenfassung	132
5.2	Modell der Blei-Säure-Batterie	135
5.2.1	Technologie	136

5.2.2	Alterungs- und Ausfallmechanismen	138
5.2.3	Fehlerverteilung	141
5.2.4	Alterungsmodelle der Blei-Säure-Batterie	144
5.2.5	Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien	146
5.3	Modell des Generators	157
5.3.1	Technologie	157
5.3.2	Verlustleistung	160
5.3.3	Verlustleistungsmodell	164
5.3.4	Temperaturmodell	166
5.3.5	Zuverlässigkeitsmodell des Generators	173
5.4	Modell des Gleichspannungswandlers	186
5.4.1	Technologie	186
5.4.2	Modellbildung für einen bidirektionalen 12V/48V-GSW	190
5.4.3	Verlustleistung	193
5.4.4	Temperaturmodell	195
5.4.5	Zuverlässigkeitsmodell des GSW	200
5.4.6	Berechnung der Ausfallrate	207
5.5	Zusammenfassung	211
6	Anwendung und Auswertung der Methode	215
6.1	Zuverlässigkeitsbewertung der klassischen Architektur zur elektrischen Energieversorgung	215
6.1.1	Definition der Architektur und Auswahl der Komponentenmodelle	217
6.1.2	Festlegung der Fahrprofile	218
6.1.3	Durchführung der Berechnung	219
6.1.4	Fehlerbäume der klassischen elektrischen Energieversorgung	221
6.1.5	Auswertung des Einflusses der Basisereignisse	225
6.1.6	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern	231
6.1.7	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Batteriefehlern	232

6.1.8	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Generatorfehlern	235
6.1.9	Zusammenfassung Zuverlässigkeit der klassischen elektrischen Energieversorgung	237
6.2	Zuverlässigkeitsbewertung von elektrischen Energieversorgungsarchitekturen mit zwei Spannungsebenen und Gleichspannungswandler	238
6.2.1	Definition der Architektur und Auswahl der Komponentenmodelle	238
6.2.2	Fehlerbäume für eine elektrische Energieversorgungsarchitektur mit zwei Spannungsebenen	240
6.2.3	Auswertung des Einflusses der Basisereignisse	247
6.2.4	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern	252
6.2.5	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Batteriefehlern	254
6.2.6	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Generatorfehlern	256
6.2.7	Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Fehlern des Gleichspannungswandlers	258
6.3	Zusammenfassung: Anwendung und Auswertung der Methode	261
7	Zusammenfassung und Ausblick	267
7.1	Zusammenfassung	267
7.2	Ausblick	271
A	Anhang	275
A.1	Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke A3	275
A.2	Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke A8	276
A.3	Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke lang A3	277
A.4	Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke lang A8	278
A.5	Auswertung Fahrzyklus Langstrecke A3	279
A.6	Auswertung Fahrzyklus Langstrecke A8	280
	Literaturverzeichnis	281

Abkürzungen und Symbole

ABA	Autobahnassistent
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Abstandsregeltempomat
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AEBS	Notbremsassistentensysteme
AGM	Absorbent Glass Mat
AP	AutobahnpiLOT
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
AU3	Audi A3
AU8	Audi A8
BAS	Bremsassistent
BMS	Batterie-Management-System
BW	Brake-By-Wire
CA	Notbremsassistent
CAN	Controller Area Network
CCF	Common Cause Failure

CF	Causal or Cascade Failure
CMF	Common Mode Failure
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Stadtpilot
DC	Diagnostic coverage
DF	Dependent Failure
EES	Elektrik- und Elektronik-Systeme
EFB	Enhanced Flooded Battery
EG-FGV	EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung
EM	Energiemanagement
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOL	Lebensdauerende
EPS	Electric Power Steering
ESC	Elektronische Stabilitätskontrolle
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FIT	Failure In Time
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FR	FlexRay (Serielles, deterministisches und fehlertolerantes Feldbussystem)
FTA	Fault Tree Analysis
GSW	Gleichspannungswandler

GuR	Gefahren- und Risikoanalyse
HCI	Hot-Carrier-Injection
HSI	Hardware-Software-Interface
HV	Hochvolt
IC	Integrated Circuit
KA	Kurzstrecke A
KB	Kurzstrecke B
KC	Kurzstrecke C
KPS	Kurze Pendlerstrecke
KS	Kurzstrecke
KSS	Kohle-Schleifring-Systems
LA	Langstrecke A
LB	Langstrecke B
Lidar	Light detection and ranging
LIN	Local Interconnect Network
LKA	Spurhalteassistent
LM	Leistungsmanagement
LPS	Lange Pendlerstrecke
LS	Langstrecke
LV	Niedervolt
MLCC	Multilayer Ceramic Capacitors
MMS	Mensch und Maschine

MOST	Media Oriented Systems Transport
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTF	Mean Time To Failure
NBTI	Negative Bias Temperature Instability
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NN	Normalnull
NOTI	No Thermal Incidents
OBD	On-Board-Diagnose-Schnittstelle
OEM	Fahrzeughersteller
PDU	Power Distribution Unit
PEP	Produktentstehungsprozess
PFH	Probability of a Dangerous Failure per Hour
PK	Kurze Pendlerstrecke
PKW	Personenkraftwagen
PL	Lange Pendlerstrecke
PSO	Partikelschwarmoptimierung
QM	Qualitätsmanagement
$R_{DS(on)}$	Drain-Source-Widerstand
SBW	Steer-By-Wire
SOC	State-Of-Charge
SOH	State-Of-Health
SP	Staupilot

SS	Sicherheitsschalter
SSZ	Start-Stopp-Zyklus
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TDDB	Time Dependent Di-electrical Breakthrough
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VLRA	Valve Regulated Lead Acid Battery
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

1 Einleitung

Die Einleitung besteht aus drei aufeinander aufbauenden Unterkapiteln: Zu Beginn wird die Motivation der vorliegenden Dissertation mit dem Titel „Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung“ vorgestellt. Im Anschluss daran folgen die Auflistung und Erläuterung der zu beantwortenden Forschungsfragen sowie die Darstellung der sich daraus ergebenden Zielstellungen für die durchzuführenden Analysen. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht zur Gliederung der Arbeit.

1.1 Motivation

Durch den zunehmenden Einsatz automatisierter Assistenzsysteme befindet sich die Entwicklung von Personenkraftwagen im Wandel. Die ersten Assistenzsysteme wie z. B. das Antiblockiersystem (ABS) oder die Elektronische Stabilitätskontrolle (ESC) waren auf bestimmte Bereiche bzw. Funktionen beschränkt und wurden zur Erhöhung der Eigensicherheit entwickelt. Neue Assistenzsysteme hingegen sollen die gesamte Fahrzeugführung übernehmen und nicht nur die Eigen-, sondern auch die Verkehrssicherheit verbessern. Zusätzlich soll der Komfort erhöht werden.

Zu diesen neuen Assistenzsystemen zählen bspw. Kamera- und Radarsysteme, die in Personenkraftwagen integriert und zur Übernahme der Längs- und Querführung eingesetzt werden. Ein weiteres Beispiel ist der Abstandsregeltempomat (ACC), eine Erweiterung des klassischen Tempomats. Der ACC ermöglicht es, die Fahrzeuggeschwindigkeit an den Verkehrsfluss im Allgemeinen sowie insbesondere an die Geschwindigkeit des jeweils vorausfahrenden Fahrzeugs anzupassen. Die Abstandsmessung wird dabei über ein Radarsystem realisiert. Ein drittes Beispiel für ein neuartiges Assistenzsystem, das sich ebenfalls bereits im Serieneinsatz befindet, ist der Spurhalteassistent (LKA). Anhand

von Kameradaten werden Fahrbahn-, Rand- und Begrenzungsmarkierungen erkannt, auf deren Basis die Fahrtrajektorie berechnet wird. Um die Einhaltung der so ermittelten Fahrtrajektorie zu regeln, ist ein aktiver Systemeingriff erforderlich. Dies wird durch den Einsatz elektrischer bzw. elektrisch-hydraulischer Servolenkungen ermöglicht [9].

Nach geltendem Recht erfordern alle bisher in Serie gebrachten Assistenzsysteme die volle Aufmerksamkeit des Fahrzeugführers. Die Fahrzeugführung liegt allein in seiner Verantwortung [56]. Zukünftige Assistenzsysteme wie bspw. der Autobahnassistent (ABA) erfordern keine vollständige Aufmerksamkeit des Fahrzeugführers mehr und steuern das Kraftfahrzeug bei geringen Geschwindigkeiten selbst. Weitere Assistenzsysteme werden folgen und die Möglichkeiten hinsichtlich des Grads der Automatisierung deutlich erweitern. Zur Kategorisierung hochautomatisierter Assistenzsysteme wird zwischen fünf Automatisierungsstufen unterschieden. Diese sind in Tabelle 1.1 aufgelistet [56]. Gemäß dieser Kategorisierung entspricht Stufe 0 einem Kraftfahrzeug

Stufen	0	1	2	3	4
Quer- und Längsführung	Fahrer	Fahrer	System	System	System
Umfeldüberwachung	Fahrer	Fahrer	Fahrer	System	System
Rückfallebene	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	System

Tabelle 1.1: Automatisierungsstufen des automatisierten Fahrens nach [56].

ohne jegliche Assistenzsysteme und Stufe 4 einem vollautomatisierten bzw. autonom fahrenden Kraftfahrzeug. Für die Einstufung ist entscheidend, ob die Quer- und Längsführung, die Umfeldüberwachung sowie die Rückfallebene vom Fahrzeugführer übernommen oder aber von dem bzw. den Assistenzsystemen umgesetzt werden. Der Automatisierungsgrad aller derzeit in Serie eingesetzten Systeme ist auf Stufe 2 begrenzt, da die Umfeldüberwachung und die Rückfallebene bisher noch in jedem Fall durch den Fahrzeugführer realisiert werden müssen. Ein System wie der Autobahnassistent wäre als Stufe-3-Assistenzsystem zu qualifizieren, da die Fahrzeugführung und die Abstandsregelung hier nicht länger vom Fahrzeugführer, sondern autonom vom System durchgeführt würden. Die Rückfallebene würde hingegen weiterhin durch den Fahrzeugführer realisiert. Das Fahrzeug kann im Not- oder Fehlerfall also in einen sicheren Zustand geführt werden, z. B. durch Bremsung bis zum Stillstand. Dies muss allerdings weiterhin vom Fahrzeugführer übernom-

men werden. Dementsprechend handelt es sich beim Autobahnassistenten um ein Stufe-3- und nicht um ein Stufe-4-Assistenzsystem.

Um der Stufe 4 zu entsprechen, muss ein Assistenzsystem zusätzlich zur Quer- und Längsführung sowie zur Umfeldüberwachung auch die Rückfallebene umsetzen. Der sichere Zustand, bspw. durch einen Nothalt, muss also durch das Fahrzeug bzw. das Assistenzsystem selbst und damit unabhängig vom Fahrzeugführer erreicht werden können [103]. Um diese Anforderung erfüllen zu können, müssen die das Assistenzsystem konstituierenden Komponenten, Sensoren, Steuergeräte und Aktoren redundant sowie fehlertolerant ausgelegt werden. Darüber hinaus ergeben sich auch an die Kommunikationsverbindungen und an die elektrischen Energieversorgung deutlich höhere Anforderungen. Betrachten wir diesbezüglich zunächst den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf Sensoren und Steuergeräte sowie in Bezug auf Aktoren:

Sensoren und Mikroprozessoren können bereits heute in kosteneffizienter Weise redundant und fehlertolerant ausgelegt werden. Aktuelle Steuergeräte besitzen, falls darauf sicherheitsrelevante Softwareanteile ausgeführt werden, redundante Prozessorarchitekturen [86], wobei meist mindestens zwei Mikrocontroller oder Multicore-Prozessoren [6] eingesetzt werden.

Zu den sicherheitsrelevanten Aktoren im Automobil gehören die elektrischen Maschinen der elektrischen Servolenkung und des elektrischen Bremssystems. Elektrische Bremssysteme, bestehend aus elektrischen Ventilen und Pumpen, sind durch die mechanisch-hydraulische Kopplung mit der Rückfallebene „Fahrer“ verbunden. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad und der Einführung von By-Wire-Systemen müssen die Bremssysteme über mindestens zwei Aktoren zum Stellen der Bremskraft verfügen.

Im Hinblick auf die Faktoren „Kommunikation“ und „die elektrische Energieversorgung“ lässt sich die derzeitige Situation folgendermaßen zusammenfassen:

Kommunikationsverbindungen sind im Automobilbereich bereits durch verschiedene Kommunikationsstandards (CAN, LIN, MOST, FR etc.) redundant und diversitär ausgelegt. Mit Automotive Ethernet [102] wurde zudem ein weiterer, äußerst leistungsfähiger Kommunikationsstandard eingeführt, durch den die Zuverlässigkeit und die Sicherheit der Kommunikation weiter erhöht werden konnten.

Unabhängig von der Ausführung sicherheitsrelevanter Assistenzsysteme benötigen die Verbraucher (Sensoren, Steuergeräte und Aktoren) eine stabile und zuverlässige elektrische Energieversorgung. Die Stabilität der Spannungsversorgung ist wissenschaftlich bereits gut untersucht und ein Großteil der

Fahrzeughersteller verfügt über eigene Standards zur Einhaltung der Spannungsstabilität. Die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung stand bisher jedoch nicht im Fokus der Fahrzeugentwicklung, da diesbezügliche Sicherheitsziele durch gesonderte Anforderungen in den jeweiligen Domänen realisiert werden konnten. Angesichts der neueren Entwicklungen ist dieses Vorgehen jedoch nicht länger zu empfehlen. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Assistenzsystemen und insbesondere aufgrund des Anstiegs von deren Automatisierungsgrad ist es unabdingbar, die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung zu garantieren. Zu diesem Zweck müssen neue Komponenten für die elektrische Energieversorgung eingeführt werden und die bereits eingesetzten Komponenten müssen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit untersucht und ggf. verbessert werden.

Wenn in der elektrischen Energieversorgung Fehler auftreten, kann dies dazu führen, dass die Verbraucher nicht mehr hinreichend mit Energie versorgt werden und in der Folge ihre Funktion nicht oder zumindest nicht mehr vollumfänglich erfüllen können. Die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung im Ganzen leitet sich dabei aus der Zuverlässigkeit der genutzten Teilsysteme ab. An die elektrische Energieversorgung für hochautomatisierte Assistenzsysteme bestehen dabei besonders hohe Anforderungen, da im Fehlerfall die Versorgung aller sicherheitsrelevanten Verbraucher garantiert sein muss. Um dies zu bewerkstelligen, ist zweierlei notwendig: Zum einen ist die Neuentwicklung von Komponenten erforderlich, um die Rückwirkungsfreiheit (Fehlertoleranz) garantieren zu können. Diese Komponenten zur Fehlerisolation bzw. zur Sicherstellung der Rückwirkungsfreiheit müssen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit untersucht werden. Zum anderen ist es wichtig in Erfahrung zu bringen, welche Fehler in den bisher eingesetzten Komponenten mit welcher Wahrscheinlichkeit zum Ausfall der elektrischen Energieversorgung führen. Hierbei bestehen zwei Probleme: Erstens sind Grundlagendaten zur Zuverlässigkeit der Komponenten der elektrischen Energieversorgung nur in unzureichender Menge vorhanden. Zweitens kann aufgrund des zeitlich begrenzten Horizonts der Vorentwicklung keine Serienbewertung hinsichtlich der Zuverlässigkeit durchgeführt werden.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der im vorigen Unterkapitel geschilderten Ausgangslage besteht die Zielstellung der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Systeme in der automobilen Vorentwicklung, wobei die Methode am Beispiel der elektrischen Energieversorgung entwickelt und validiert werden soll. Zu diesem Zweck werden verschiedene physikalische und stochastische Modelle für die in Serie eingesetzten Komponenten vorgestellt und diskutiert. Diese Modelle stammen zum einen aus der Literatur und zum anderen aus eigenen Felduntersuchungen und dienen zur Bewertung der Zuverlässigkeit der in dieser Arbeit untersuchten Komponenten. In der Serienentwicklung wird die Zuverlässigkeit von elektrischen Energieversorgungssystemen auf der Grundlage der DIN-Norm 61508 [14] beurteilt, wobei in der ISO-Norm 26262 [68] ein umfassender und speziell für den Automobilsektor ausgelegter Prozess für die Zuverlässigkeitsbewertung in der Serienentwicklung beschrieben wird. Im Zentrum dieses Prozesses stehen die Bewertung von Risiken sowie die darauf basierende Ableitung von Sicherheitszielen. Jedes Sicherheitsziel unterliegt entsprechend der jeweiligen Gefahren- und Risikoeinstufung eigenen Grenzwerten.

Auf den beiden oben genannten Normen bzw. Standards baut grundsätzlich auch der Entwicklungsprozess für sicherheitsrelevante und hochautomatisierte Assistenzsysteme auf. In der automobilen Vorentwicklung stehen jedoch nicht genügend Entwicklungsdaten zur Verfügung, um Hardware-Metriken zu berechnen und eine ganzheitliche Zuverlässigkeitsbewertung durchzuführen. Hinzu kommt, dass die verfügbaren Standards und Handbücher nur automotivspezifische Komponenten auf Bauteilebene abdecken (vgl. Unterkapitel 2.5). Beide Domänen – sowohl Software als auch Hardware – sind in einem frühen Entwicklungsstadium und dienen der Komponentenspezifikation.

Um dieser Problematik Abhilfe zu schaffen, wird eine Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der automobilen Vorentwicklung benötigt. Dabei stehen die folgenden Fragestellungen im Zentrum der Untersuchungen:

1. Welche Grundanforderungen bestehen aus rechtlicher und normativer Perspektive an die elektrischen Energieversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher?

2. Kann die Zuverlässigkeit in der automobilen Vorentwicklung auf der Basis einer Kombination aus abstrakten Modellen zukünftiger Komponenten und Erfahrungswerten aus Felddaten und Studien bewertet werden?
3. Welche Faktoren beeinflussen die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung?
 - a) Wie beeinflusst die Architektur der elektrischen Energieversorgung deren Zuverlässigkeit?
 - b) Wie beeinflusst die spezifische Komponentenbelastung die Zuverlässigkeit der jeweiligen Komponente und damit die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung im Gesamten?
4. Welche Architektur ermöglicht eine kosteneffiziente und hinreichend zuverlässige elektrische Energieversorgung?

Angesichts dieser Fragestellungen lässt sich die in dieser Arbeit verfolgte Zielstellung wie folgt konkretisieren: Da in frühen Entwicklungsphasen naturgemäß keine ausreichende Datenlage bestehen kann, muss eine Methode entwickelt werden, die eine Bewertung der Zuverlässigkeit in der automobilen Vorentwicklung auch unabhängig von empirisch gewonnenen Daten möglich macht. Dies soll erreicht werden, indem Modelle der typischen Komponenten der automobilen elektrischen Energieversorgung entwickelt werden, die anstelle der nicht vorhandenen empirischen Daten als Grundlage der Zuverlässigkeitsbewertung dienen.

Inwieweit die Belastung bestimmter Komponenten deren eigene Zuverlässigkeit beeinflusst und welche Auswirkungen sich daraus im Zusammenspiel mit anderen Komponenten auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems ergeben, soll über die Berücksichtigung physikalischer Eigenschaften untersucht werden. Zu diesem Zweck werden Fahrversuche durchgeführt, aus denen die spezifischen Komponentenbelastungen abgeleitet werden können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Eingangsdaten für die Zuverlässigkeitsbewertung. Diese Methode wird dann auf zwei verschiedene Arten von Versorgungsarchitekturen angewendet: zum einen auf eine klassische Architektur mit nur einer 12V-Spannungsebene und zum anderen auf eine Architektur, bei der die klassische 12V-Spannungsebene mit einem Gleichspannungswandler (GSW) an eine 48V-Spannungsebene angebunden ist. Auf der Basis der Ergebnisse soll abschließend aufgezeigt werden, welche Maßnahmen für die Realisierung ei-

ner zuverlässigen Versorgungsarchitektur für hochautomatisierte Assistenzsysteme erforderlich sind.

1.3 Gliederung der Arbeit

Um eine Antwort auf die generelle Fragestellung nach der Bewertung der Zuverlässigkeit in der automatisierten Vorentwicklung geben zu können, müssen zunächst mehrere untergeordnete Fragestellungen beantwortet werden. Dementsprechend ist die vorliegende Arbeit in die folgenden Kapitel untergliedert:

- Zu Beginn werden in Kapitel 2 die rechtlichen Rahmenbedingungen und Zulassungsvoraussetzungen für Personenkraftwagen vorgestellt und diskutiert. Anschließend folgt die Beschreibung der normativen Basis zur Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Systeme in der allgemeinen technischen Entwicklung von Systemen. Daraufaufgehend werden die allgemeinen Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie sowie die wesentlichen Standards zur Bewertung von Ausfallraten vorgestellt.
- In Kapitel 3 werden aus der Serienentwicklung bekannte Methoden zur quantitativen Bewertung der Zuverlässigkeit diskutiert. Auf dieser Grundlage wird dann eine Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung abgeleitet. Hierzu wird die grundlegende Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit vorgestellt und es wird auf bekannte Probleme eingegangen. Zusätzlich wird die Vorentwicklung von der Serienentwicklung abgegrenzt. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung und Beschreibung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Berechnungsmethode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung.
- In Kapitel 4 werden zunächst die wesentlichen Architekturen und Spannungsebenen der elektrischen Energieversorgung vorgestellt. Anschließend folgt die Beschreibung der Verbraucher und deren Wechselwirkungen untereinander in Abhängigkeit vom Energie- und Leistungsmanagement. Daraufaufgehend werden die wesentlichen Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in hochautomatisierten bzw. autonomen Assistenzsystemen diskutiert. Zum Ende des Kapitels werden mögliche Fehlerquellen in der elektrischen Energieversorgung analysiert. Auf der

Grundlage der hierbei gewonnenen Erkenntnisse wird anschließend eine Risikobewertung durchgeführt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Anforderungen an die Energieversorgung.

- In Kapitel 5 werden zunächst verschiedene Fahrprofile definiert, um das jeweilige Kundenverhalten abbilden zu können. Die aus der Analyse dieser Fahrprofile gewonnenen Belastungsdaten werden vorgestellt und ausgewertet. Anschließend wird ein Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien vorgestellt, das im Rahmen von eigenen Untersuchungen [110] erarbeitet wurde, die im Vorfeld der Erstellung der vorliegenden Dissertation durchgeführt wurden. Das Modell wurde auf der Grundlage der Auswertungen von Felddaten für 436.357 fehlerhafte Blei-Säure-Batterien erstellt. Auf die Vorstellung dieses Modells für Blei-Säure-Batterien folgt die Beschreibung der Zuverlässigkeitsmodelle für weitere zentrale Komponenten der elektrischen Energieversorgung. Hierzu werden Komponentenmodelle eines 12V-Generators, eines 12V/48V-Gleichspannungswandlers und der Vernetzung der elektrischen Energieversorgung entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden als Element der Vernetzung exemplarisch automobiler Schmelzsicherungen berücksichtigt. Dabei werden nicht nur die einzelnen Komponenten selbst vorgestellt und diskutiert, sondern jeweils auch die für ihre Konstruktion verwendeten Technologien, ihre Funktionen, spezifische Alterungs- und Ausfallmechanismen sowie die Auswirkungen von Fehlern in diesen Komponenten auf die elektrische Energieversorgung im Ganzen. Für Komponenten mit komplexer Fehlerstruktur werden zusätzlich Teilfehlerbäume eingeführt. Mit Blick auf die zu untersuchenden Komponenten werden daraufhin entsprechende Verlustleistungs- und Temperaturmodelle entwickelt. Abschließend werden auf der Basis der in Unterkapitel 2.5 vorgestellten Handbücher für alle Komponenten Modelle zur Berechnung der jeweiligen Ausfallraten erstellt.
- In Kapitel 6 wird die in Kapitel 3 vorgestellte Methode mit den in Kapitel 5 entwickelten Komponentenmodelle angewendet. Berechnet werden dabei die Zuverlässigkeit einer klassischen Versorgungsarchitektur sowie die Zuverlässigkeit einer Architektur mit zwei Spannungsebenen. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit werden zunächst Hauptereignisse definiert, bezüglich derer dann jeweils Fehlerbäume mit den zugehörigen Basisereignissen aufgebaut werden. Zusätzlich erfolgen eine Aus-

wertung der Berechnungen der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der Hauptereignisse sowie eine Diskussion möglicher Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Auf dieser Basis können Zielarchitekturen für die Versorgung sicherheitskritischer bzw. hochautomatisierter Assistenzsysteme abgeleitet werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die rechtlichen Rahmenbedingungen und Zulassungsvoraussetzungen für Personenkraftwagen vorgestellt. Darauf folgt die allgemeine Beschreibung der Bewertungsprozesse und -maßstäbe für die Zuverlässigkeit technischer Systeme. Anschließend werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie vorgestellt und diskutiert. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung wesentlicher Handbücher zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten technischer Komponenten.

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Allgemeinen sind die Herstellung von Produkten sowie die Sicherstellung von deren Sicherheit rechtlich über das Produktsicherheits- und das Produkthaftungsgesetz geregelt [33] und [31]. Aufgrund dieser beiden Gesetze ist jeder Hersteller eines Produktes für dessen Produktsicherheit verantwortlich und unterliegt der Gefährdungshaftung. Daher gilt, dass unabhängig vom Verschulden derjenige haftet, der eine Gefährungsquelle schafft. Im Falle eines Produktfehlers und der sich daraus ergebenden Folgen schreibt das Produkthaftungsgesetz in § 1 Absatz 1 Folgendes vor:

„Wird durch den Fehler eines Produkts jemand getötet, sein Körper oder seine Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Hersteller des Produkts verpflichtet, dem Geschädigten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen. Im Falle der Sachbeschädigung gilt dies nur, wenn eine andere Sache als das fehlerhafte Produkt beschädigt wird und diese andere Sache ihrer Art nach gewöhnlich für den privaten Ge- oder Verbrauch bestimmt und hierzu von dem Geschädigten hauptsächlich verwendet worden ist.“

In § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs [32] findet sich mit der Schadensersatzpflicht eine weitere Regelung, die in diesem Kontext relevant ist. Nach [93]

können dabei drei unterschiedliche Fehlerarten voneinander unterschieden werden:

- der Konstruktionsfehler,
- der Fabrikationsfehler und
- der Instruktionsfehler.

Diese Fehlerarten sind nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar. So ist bspw. bei Ausfällen von Komponenten im Feld oft nicht klar, ob diese aus Fehlern in der Konstruktion oder aus minimalen Maßabweichungen beim Einbau resultieren. In einigen Fällen kann diese Frage aufgrund mangelnder Informationen nicht entschieden werden, in anderen Fällen sind die Ausfälle Fehlern beider Arten zuzuordnen. Dementsprechend hängt auch die juristische Anwendung dieser Begrifflichkeiten immer von den Umständen des jeweiligen Einzelfalls ab. Dennoch lassen sich die folgenden generellen Aussagen treffen: Der *Konstruktionsfehler* betrifft den Verstoß gegen geltende technische Erkenntnisse bei der Herstellung. Dies hat zur Folge, dass der Fehler jedem hergestellten Produkt anhaftet. Im Hinblick auf die Haftung für Konstruktionsfehler ist Folgendes zu sagen: Der Hersteller eines Produkts – im Falle der Fahrzeugindustrie sind dies die Zulieferer und die jeweiligen Fahrzeughersteller selbst – ist dazu verpflichtet, in der Planung und Konstruktion nach dem *Stand von Wissenschaft und Technik* vorzugehen, um den Verbraucher vor Schäden infolge von Mängeln zu bewahren. Dabei ist nach [96] die Drei-Stufen-Theorie zu beachten, der zufolge bezüglich der Entwicklung und Herstellung eines Produkts nach rechtlicher Auffassung zwischen drei Abstufungen zu unterscheiden ist:

- den allgemein anerkannten Regeln der Technik,
- dem Stand der Technik sowie
- dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Die *allgemein anerkannten Regeln der Technik* beschreiben Regeln und Techniken, die bereits in der Praxis angewendet werden und hinreichend erprobt sind. Die Steigerung dieser Stufe ist die Entwicklung und Herstellung nach dem *Stand der Technik*. Hierbei sind zusätzlich auch aktuell noch nicht angewendete Regeln und Techniken zu berücksichtigen. Die höchste Stufe stellt die

Entwicklung und Herstellung nach dem *Stand von Wissenschaft und Technik* dar. Hier sind alle vorhandenen Erkenntnisse zu berücksichtigen, auch solche, die bisher nur rein wissenschaftlich bekannt sind.

Im Gegensatz zum Konstruktionsfehler, der jedes hergestellte Produkt betrifft, ist der *Fabrikationsfehler* auf wenige bzw. einzelne Produkte beschränkt. Er tritt durch Fehler in der Herstellung wie bspw. die einmalige Fehlfunktion einer Maschine auf. Im Hinblick auf Fabrikationsfehler ist zu sagen, dass der Produzent durch eine entsprechende Organisation und Kontrolle die Fehlerfreiheit jedes einzelnen Produkts gewährleisten muss. Können Fabrikationsfehler selbst durch größtmögliche Sorgfalt nicht restlos ausgeschlossen werden, muss das dadurch entstehende Risiko durch geeignete Qualitätskontrollen und Einzeltests kompensiert werden. Lediglich bei Ausreißern, deren Auftreten sogar dann nicht verhindert werden kann, wenn alle zumutbaren Sicherheitsvorkehrungen getroffen wurden, haftet der Hersteller nicht.

Ein *Instruktionsfehler* liegt vor, wenn der Hersteller den Verbraucher nicht durch eine verständliche Bedienungsanleitung vor produktspezifischen Gefahren gewarnt hat, wobei im Falle eines Personenkraftwagens die Verwendung in der allgemeinen Zweckbestimmung liegen muss.

Neben der Frage, welche der vorgestellten Fehlerarten einen Ausfall und damit ggf. rechtlich relevante Sach- oder Personenschäden verursacht hat, ist für die Produkthaftung des Weiteren von Interesse, wie die Beweislast verteilt ist. Hierbei liegt nach [93] für Konstruktions-, Fabrikations- und Instruktionsfehler die Beweispflicht beim Hersteller, da dieser seiner Sorgfaltspflicht nachkommen muss.

2.2 Zulassungsvoraussetzungen

Jedes neu entwickelte Kraftfahrzeug unterliegt den oben genannten allgemeinen gesetzlichen Anforderungen an technische Produkte. Zusätzlich muss es vom Gesetzgeber aber außerdem zur Teilnahme am Straßenverkehr zugelassen werden. Zu diesem Zweck muss der Fahrzeughersteller (OEM) eine sog. Typgenehmigung durchführen. Hierbei wird durch eine vom Gesetzgeber anerkannte Prüfeinrichtung exemplarisch ein einzelnes Modell abgenommen, um die entsprechende Modellreihe zulassen zu können.

Die rechtlichen Regelungen bzw. Zulassungsvoraussetzungen für den Erhalt einer Typgenehmigung finden sich in § 21 der Straßenverkehrs-Zulassungs-

Ordnung (StVZO) [30] sowie in der EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (EG-FGV) [29]. Des Weiteren sind zur Erlangung einer Betriebserlaubnis die in der Richtlinie 2007/46/EG [45] festgelegten Anforderungen zu erfüllen. Hierbei werden an die einzelnen Systeme erweiterte Anforderungen in Form der UN/ECE-Regelungen gestellt. Derzeit existieren in der ECE-Homologation 163 Regelungen.

Entscheidend für die Erteilung einer Zulassung und einer Betriebserlaubnis ist die Gewährleistung der Fahrzeugsicherheit. Hierfür sind vor allem jene technischen Systeme ausschlaggebend, welche die Längs- und Querdynamik beeinflussen. Die entsprechenden ECE-Regelungen sind die Regelungen

- Nr. 13 für die Bremsanlage für Fahrzeuge mit Anhänger [43],
- Nr. 13-H für Bremsen von Fahrzeugen der Klassen M1 und N1 [44],
- Nr. 79 für die Lenkanlage [46] und
- Nr. 131 für Notbremsassistentensysteme (AEBS) [47].

Neben den Anforderungen an das eigentliche System beinhalten alle diese Regelungen auch Anforderungen an die elektrische Energieversorgung. Nach [46] 5.1.9 gilt für die elektrischen Energieversorgungseinrichtung Folgendes:

„Für die Lenkanlage und andere Anlagen darf dieselbe elektrische Energieversorgungseinrichtung verwendet werden. Bei einer Störung in einer Anlage, die an dieselbe elektrische Energieversorgungseinrichtung angeschlossen ist, muss die Lenkung nach den in Absatz 5.3 genannten entsprechenden Vorschriften für eine solche Störung sichergestellt werden.“

Die hier festgelegten Kriterien beziehen sich auf die Restenergie bzw. auf die noch verfügbare Leistung, anhand derer garantiert sein muss, dass die Lenkung ab dem Moment des Eintritts eines Fehlers bis zum sicheren Stillstand des Fahrzeugs weiterhin funktioniert. Hierbei dürfen bestimmte Szenarien wie z. B. eine Fehlfunktion in Form eines falschen Lenkwinkels nicht auftreten.

In den ECE-Regelungen werden vom Gesetzgeber alle Anforderungen an die Entwicklung von Personenkraftwagen genannt. Die elektrische Energieversorgung wird dabei zwar in mehreren Regelungen erwähnt, aufgrund der Entwicklungskomplexität jedoch nicht in einer eigenen ECE-Regelung abgebildet. Aus den Anforderungen, die in den Regelungen für die verschiedenen Fahrzeugsysteme genannt werden, ergeben sich allerdings mehrere Rahmenanforderungen

an die elektrische Energieversorgung von Personenkraftwagen. Diese werden in Kapitel 4 diskutiert.

2.3 Zuverlässigkeit technischer Systeme

Jedes technische System – unabhängig davon, ob es sich um ein mechanisches oder elektronisches System handelt – besitzt eine endliche Lebensdauer und somit auch eine begrenzte Zuverlässigkeit. Das Eintreten eines Fehlers führt das System aus dem Zustand der Zuverlässigkeit in den Zustand der Unzuverlässigkeit. Der Begriff der Zuverlässigkeit beschreibt dabei die Fähigkeit eines technischen Systems, die für dieses System spezifische(n) Funktion(en) in einem bestimmten Zeitintervall fehlerfrei auszuführen. Der Begriff der Verfügbarkeit beschreibt den Kehrwert der Funktionseinschränkung und muss für jedes System bzw. für jedes Teilsystem einzeln bewertet werden.

Bezüglich der verschiedenen Arten von Fehlern, zu denen es kommen kann, wird zwischen sicheren und gefährlichen sowie zwischen entdeckbaren und nicht entdeckbaren Fehlern unterschieden [23]. Sichere Fehler sind solche, die – unabhängig davon, ob sie entdeckbar oder nicht entdeckbar sind – keinen direkten Einfluss auf sicherheitskritische Funktionalitäten des Gesamtsystems haben und somit nicht zu einem unsicheren Systemzustand führen. Gefährliche Fehler hingegen führen zu einem unsicheren und in diesem Sinne gefährlichen Zustand des Gesamtsystems. Hierbei ist weiter zwischen entdeckbaren und nicht entdeckbaren gefährlichen Fehlern zu unterscheiden: Im Fall von entdeckbaren gefährlichen Fehlern kann das Gesamtsystem durch geeignete Gegenmaßnahmen von einem gefährlichen in einen sicheren Systemzustand überführt werden. Genau dies ist bei nicht entdeckbaren gefährlichen Fehlern nicht der Fall. Hier wird mit Eintreten des Fehlers ein gefährlicher Zustand erreicht.

Sichere Fehler führen zwar immer zur Reduktion der Verfügbarkeit, jedoch nicht notwendigerweise in einen unsicheren, gefährlichen Zustand. Gefährliche Fehler hingegen führen direkt in einen unsicheren Zustand. Ist der Fehler durch geeignete Diagnosemaßnahmen entdeckbar, kann das Gesamtsystem in einen sicheren Systemzustand rücküberführt werden. Andernfalls befindet sich das System in einem unsicheren, gefährlichen Zustand. Dieser Zustand ist für sicherheitskritische Systeme nicht akzeptabel. In Abbildung 2.1 findet sich eine übersichtliche Darstellung der hier beschriebenen Fehlerklassifizierung.

gen sowie eine Einordnung der verschiedenen Systemzustände im Sinne von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

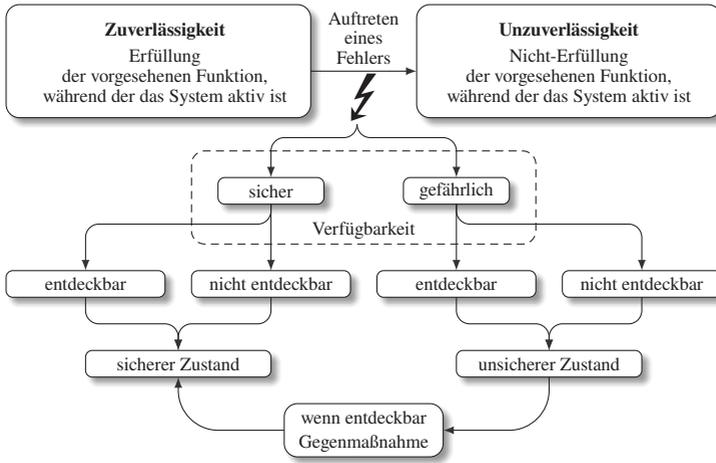


Abbildung 2.1: Übersicht der Fehlerklassifizierungen und der Einordnung im Sinne von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

2.3.1 Fehlerklassifizierung

Bei der Frage nach der Zuverlässigkeit von Komponenten bzw. ganzen Systemen wie der elektrischen Energieversorgung ist von besonderem Interesse, welche Auswirkungen mögliche Fehler in diesen Komponenten bzw. Systemen auf deren Zuverlässigkeit haben. Um diese Auswirkungen möglichst exakt spezifizieren zu können, bedarf es eines detaillierten Fehlerverständnisses. Zu diesem Zweck lassen sich mögliche Fehler auf der Grundlage von [17] hinsichtlich der folgenden Merkmale kategorisieren:

- Fehlerart,
- Fehlerursache,
- Fehlermechanismus und

- Fehlerfolge.

Die *Fehlerart* beschreibt die Ausprägung eines Fehlers. Zum Beispiel können bei elektronischen Bauelementen die Fehlerarten „offen“, „kurzgeschlossen“ und „Parameterdrift“ beobachtet werden.

Die *Fehlerursache* kann innerhalb oder außerhalb der jeweiligen Komponente liegen. Im ersten Fall spricht man von einer intrinsischen Fehlerursache. Als Beispiele hierfür können Materialschwächung oder Materialermüdung genannt werden. Auch wenn die Auswirkungen intrinsischer Fehlerursachen nicht zwangsläufig unmittelbar eintreten, liegen intrinsische Fehler immer bereits zu Beginn der Komponentenlebensdauer vor. Daher kann diesbezüglich auch von systematischen bzw. frühen Fehlern und dadurch bedingten Ausfällen gesprochen werden. Um extrinsische Fehlerursachen handelt es sich hingegen, wenn bspw. während der Entwicklung Fehler gemacht werden oder wenn es zu falscher Handhabung in der Produktion bzw. zu Missbrauch in der Anwendung kommt.

Der *Fehlermechanismus* ist der physikalische bzw. chemische Mechanismus, der zu einem Fehler in der Komponente führt. Beispiele hierfür sind Korrosion oder Elektromigration.

Die *Fehlerfolge* beschreibt die Auswirkung eines Komponentenfehlers. Wichtig ist hierbei, zu beachten, dass sich die Auswirkungen nur durch eine Betrachtung des Gesamtsystems ermitteln lassen. Dasselbe gilt für direkte Aussagen wie z. B., dass die Fehlerart „kurzgeschlossen“ in einen kritischen Systemzustand führt. Solche Aussagen sind nur durch eine Betrachtung des Gesamtsystems möglich. Der Begriff der Fehlerfolge lässt sich nach [17] weiter unterteilen in nicht relevanter, partieller, vollständiger und kritischer Fehler. Der Vollständigkeit halber sei hier darauf hingewiesen, dass es grundsätzlich auch möglich wäre, zwischen primären und sekundären Fehlern zu unterscheiden. Eine weitere Möglichkeit zur Fehlereinteilung, in diesem Fall in Bezug auf die Detektierung, liefert [22]. Beiden Möglichkeiten zur Kategorisierung von Fehlern wird in dieser Arbeit jedoch nicht nachgegangen, da die oben erläuterte Weise der Kategorisierung für die hier verfolgten Zwecke nützlicher ist.

2.3.2 Fehlerursachen

Im Allgemeinen kann das Auftreten eines Fehlers durch die Beseitigung seiner Ursachen verhindert werden. Daher ist es wichtig, die verschiedenen Arten von

Fehlerursachen näher zu betrachten.

Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, kann zwischen systematischen und zufälligen Fehlerursachen sowie zwischen Handhabungs-, Bedien- und Wartungsfehlern unterschieden werden.

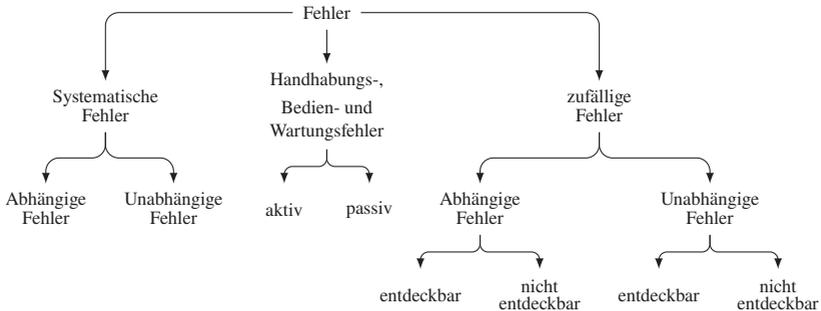


Abbildung 2.2: Fehlerklassifizierung nach [1] und [24]

Systematische Fehler

Systematische Fehler treten infolge ungeeigneter Entwicklungs- oder Herstellungsprozesse auf. In der Regel sind sie auf unentdeckte Falschinterpretationen, auf Fehler in der Herstellung oder auf unzureichende Testverfahren zurückzuführen. Ihr Auftreten wird durch unzureichend lange Entwicklungs- bzw. unzureichend lange Testzeiten begünstigt. Systematische Fehler können unabhängig von der jeweiligen Industrie und unabhängig vom Zielmarkt in jedem technischen Produkt auftreten.

Auf dem Markt können regelmäßig Produkte mit systematischen Fehlerursachen beobachtet werden. Ein bekanntes Beispiel aus der Telekommunikationsindustrie ist das Mobiltelefon Samsung Galaxy Note 7 aus dem Jahr 2017, bei dem es häufig zu Überhitzungen der Energiespeicher und infolgedessen zu Bränden kam. Samsung musste das Mobiltelefon aufgrund des fehlerhaften Energiespeichers zurückrufen. In diesem Fall lag der systematische Fehler in einem zu kleinen Gehäuse und einem dadurch bedingten kritischen Aufbau der Lithium-Ionen-Batterie [97], [175], [161]. Samsung selbst gibt an, dass

der Fehler aufgrund unzureichender Testläufe unentdeckt blieb [72].

Ein weiteres Beispiel für systematische Fehler stammt aus der Luft- und Raumfahrtindustrie. Es handelt sich um die von dem Unternehmen Boeing eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien, die im Flugzeugmodell 787 Dreamliner verbaut wurden. In mehreren Fällen – sowohl am Boden als auch in der Luft – kam es zu Systemausfällen, die aufgrund eines Fehlers im Energiespeicher bzw. in dessen Elektronik (z. B. Batterie-Management-System (BMS)) teilweise zu Bränden führten. Der Fehler konnte durch eine Überarbeitung des Energiespeichers behoben werden [177].

Systematische Fehler können über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg auftreten. Je nach Art und Ausprägung der Belastungsfaktoren zeigen sich manche systematischen Fehler erst nach mehreren Jahren Produktlebenszeit. Ein interessantes Beispiel hierfür ist ein von dem Unternehmen Takata (Automotive) hergestellter Fahrzeugairbag. In Regionen mit hoher Luftfeuchtigkeit und hohen Temperaturen fiel der Airbag aufgrund von Korrosion der Airbag-Komponenten teilweise aus. In anderen Fällen kam es zwar zu einer Auslösung des Airbags, doch das Gas zum Entfalten des Airbags entzündete sich, wodurch es zu einer Explosion kam, infolge derer Metallsplinter mit hoher Geschwindigkeit in Richtung des Fahrzeuginnenraums geschleudert wurden. Durch diese systematischen Fehler kam es zu mehreren Todesfällen und das Unternehmen Takata sah sich mit sehr hohen Folgekosten durch Rückrufaktionen und Schadensersatzansprüchen konfrontiert [156].

Anhand dieser Beispiele soll gezeigt werden, dass systematische Fehler in technischen Produkten aller Art auftreten können und dass die Folgen ein sehr hohes Gefährdungspotential aufweisen können. Problematisch ist, dass systematische Fehler sich nur bedingt mathematisch modellieren und dementsprechend nur in eingeschränktem Maß vorhersagen lassen. Aus diesem Grund muss die Vermeidung von systematischen Fehlern bereits im Entwicklungsprozess mit geeigneten Prozessen und Maßnahmen sichergestellt werden. Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von systematischen Fehlern weiter zu verringern, besteht darüber hinaus die Möglichkeit der diversitären Redundanz auf Hardware- und Software-Ebene. In der Luft- und Raumfahrt wird dieses Prinzip bspw. mit Bezug auf Flugcomputer angewendet, indem zwei oder mehr Prozessoren unterschiedlicher Hersteller eingesetzt werden, die sich gegenseitig überwachen [117].

Handhabungs-, Bedien- und Wartungsfehler

Viele technische Produkte erfordern für ihre Verwendung eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine (MMS). Hierbei gibt es verschiedene Fehlerzenarien, die durch die falsche Anwendung oder durch die falsche Bedienung von Maschinen realisiert werden und teilweise mit einer enorm hohen Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines gefährlichen Zustands einhergehen. Sie stellen somit ein sehr großes Risiko dar.

Grundsätzlich sind technische Systeme so ausgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Begehen von Bedienfehlern bzw. für das Auftreten der entsprechenden Fehlerursachen durch geeignete Maßnahmen verringert wird. Ein möglicher Ansatz hierfür ist z. B. das sog. Poka-Yoke-Prinzip, das sowohl in der Produktions- als auch in der Schnittstellentechnik Anwendung findet. Beim Poka-Yoke-Prinzip wird versucht, das Auftreten häufiger vermeidbarer Fehler zu verhindern. Ein Beispiel hierfür ist, dass Steckverbindungen verpolungsicher oder punktsymmetrisch ausgelegt werden, wodurch eine fehlerhafte Verbindung durch falsches Einstecken verhindert wird.

Trotz verschiedener Maßnahmen zur Vorbeugung und Verhinderung von Handhabungs-, Bedien- und Wartungsfehlern lassen sich diese nicht vollständig beseitigen. Vor allem im Umfeld komplexer Anforderungen und hoher Reaktionsgeschwindigkeiten treten menschliche Fehler verstärkt auf. So wurden bspw. im Straßenverkehr im Jahr 2017 in Deutschland 302.656 Unfälle mit Personenschäden dokumentiert. Dabei waren 88 Prozent aller erfassten Unfallursachen auf menschliches Versagen zurückzuführen [160].

Die Bewertung der Rolle, die menschliches Versagen bei Unfällen spielt, stellt insofern eine Schwierigkeit dar, als dass sich Fehler dieser Art zwar qualitativ beschreiben, jedoch nur bedingt quantitativ erfassen lassen. Quantitative Analysen müssen auf der Basis von Nutzerstudien durchgeführt werden, da das Phänomen „menschliches Versagen“ eine statistische Komponente hat und nur durch umfangreiche Studien adäquat erfasst werden kann. Nur auf der Basis quantitativer Analysen lassen sich qualifizierte Aussagen über die Grenzen der Interaktionsfähigkeit zwischen Mensch und Maschine treffen und technische Systeme so auslegen, dass mögliche Fehler durch die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine verringert bzw. vermieden werden können. Für das Steer-by-Wire-System in Kraftfahrzeugen hat Theis in [159] die menschliche Zuverlässigkeit untersucht. Hierfür wurden Erkenntnisse über die menschliche Zuverlässigkeit bei kognitiven Beanspruchungen aus dem

Kontext von Ereignissen in Kernkraftwerken genutzt. Diese wurden auf die Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle übertragen, um Vorhersagen über die Verhaltensweisen von Fahrern im Systemfehlerfall zu ermöglichen.

Nach [131] können die unterschiedlichen Belastungsfaktoren, die im Kontext der MMS zu Fehlern führen, anhand von dreizehn Kategorien klassifiziert werden. Die einzelnen Faktoren können anhand verschiedener Methoden unterschiedlich gut abgebildet werden. Für die Zwecke der vorliegenden Arbeit ist es nicht erforderlich, alle Kategorien im Detail zu erörtern.¹ Es genügt zu konstatieren, dass Fehler in der MMS im Wesentlichen durch eine zu hohe Komplexität, durch zu kurze Reaktionszeiten und durch vorhandene Unsicherheiten begünstigt werden.

Zufällige Fehler

Wie im vorigen Unterkapitel erläutert wurde, kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von systematischen Fehlern sowie von Handhabungs-, Bedien- und Wartungsfehlern durch den Einsatz geeigneter Prozesse und Maßnahmen vermindert bzw. gänzlich auf null reduziert werden. Das Auftreten von zufälligen Fehlern hingegen kann in technischen Systemen nie vollständig ausgeschlossen werden. Alle Komponenten besitzen das Potential für das Auftreten zufälliger Fehler, wobei bei Komponenten geringerer Qualität häufig eine Zunahme zufälliger Fehler beobachtet werden kann [41].

Wie oben erläutert, ist der Begriff „zufällig“ in diesem Zusammenhang nicht buchstäblich zu verstehen. Auch zufällige Fehler haben immer eine Ursache. Diese liegen entweder in statistischen Abweichungen in den Materialeigenschaften der jeweiligen Komponenten, in den Umständen des Herstellungsprozesses oder in den Betriebsbedingungen, unter denen die fraglichen Komponenten zum Einsatz kommen. Dass zufällige Fehler nicht buchstäblich zufällig sind, sondern immer eine Ursache haben, heißt allerdings nicht, dass diese Ursachen immer bekannt wären oder dass es immer möglich oder gar leicht wäre, sie zu bestimmen. Im Gegenteil: Der Nachweis von Fehlerursachen ist meist nicht trivial, da Fehler oft von einer Vielzahl von Ursachen abhängen. Um dieser Problematik zu begegnen, greift man auf Modelle zurück, wobei die Modellierung zufälliger Fehler auf der Basis empirischer Versuche bzw.

¹ Eine gute Zusammenfassung der eingesetzten Methoden bietet [26].

anhand der Auswertung von Felddaten erfolgt.

Im Allgemeinen können Fehler bei der Erstellung von Modellen als Zufallsvariablen aufgefasst werden. Zufällige Fehler stellen dabei Basisereignisse ω und somit eine Teilmenge des Merkmalraums Ω dar. Es gilt $\omega \in \Omega$.

Treten in Komponenten Fehler auf, die nicht auf äußere Ursachen zurückführbar sind, wird davon ausgegangen, dass es sich um zufällige Fehler handelt. Diese werden mit stochastischen Modellen erfasst und es wird eine Fehlerrate berechnet. Die Fehlerrate wird dabei in der Einheit Failure In Time (FIT) angegeben, wobei ein FIT die Größe $1 \cdot 10^{-9}h^{-1}$ besitzt.

Zufällige Fehler sind für die quantitative Beschreibung der Zuverlässigkeit technischer Systeme erforderlich und für eine Vielzahl von elektronischen Standardbauelementen in Form von Modellen vorhanden. Anhand dieser Modelle kann untersucht und berechnet werden, wie das Auftreten zufälliger Fehler von Einflussfaktoren wie dem Herstellungsprozess oder der thermischen Zyklisierung abhängt. Die wesentlichen Handbücher und Ausfallmodelle zu dieser Thematik werden in Unterkapitel 2.5 diskutiert.

Einfachfehler und Fehler gemeinsamer Ursache

Grundsätzlich wird in den Betrachtungen der vorliegenden Arbeit angenommen, dass alle Ausfälle, die in einem System auftreten oder auftreten können, voneinander unabhängig sind. Damit ist gemeint, dass der Ausfall einer Komponente keinen funktionalen oder physikalischen Einfluss auf andere Komponenten hat. Diese Annahme trifft jedoch nicht auf jedes Ausfallereignis zu. Es ist möglich, dass durch einen Einfachfehler mehrere Komponenten ausfallen oder weitere Fehler hervorgerufen werden. In diesen Fällen spricht man von abhängigen Fehlern. Im Allgemeinen wird bezüglich der Kategorie der abhängigen Fehler (Dependent Failure (DF)) zwischen drei Arten unterschieden:

- dem mehrfachen Versagen aufgrund einer gemeinsamen Ursache Common Cause Failure (CCF),
- dem Ausfall mehrerer gleichartiger Komponenten mit dem gleichen Fehlerbild Common Mode Failure (CMF) und
- Ausfällen, die aufgrund einer gemeinsamen Ursache nacheinander auftreten, was auch als Dominoeffekt bezeichnet wird Causal or Cascade Failure (CF).

Fehler gemeinsamer Ursache CCF kommen in allen technischen Systemen vor. Im Kontext von Personenkraftwagen geht das Risiko diesbezüglich vor allem von der elektrischen Energieversorgung aus, da Fehler in diesem Bereich ein besonders hohes Potential dafür haben, eine Vielzahl von Folgefehlern zu verursachen. Dies ist bspw. dann zu beobachten, wenn in einem Personenkraftwagen die Spannungslage der elektrischen Energieversorgung einbricht bzw. durch einen Fehler nicht mehr stabil gehalten werden kann. In der Folge eines solchen Fehlers kann es zu einer Vielzahl von Folgefehlern in unterschiedlichen Steuergeräten kommen, wenn diese aufgrund des Energieabfalls ihre vorgesehene Funktionalität nicht länger erfüllen können. Beispielsweise kann es dazu kommen, dass infolge der mangelhaften elektrischen Energieversorgung falsche Sensorwerte ermittelt bzw. gelesen werden oder dass die Kommunikation fehlerhaft ist, da die Spannungspegel in den diversen Netzwerken (LIN, CAN, FR, MOST, Automotive Ethernet etc.) nicht aufrechterhalten werden können.

Neben diesen Fehlern gemeinsamer Ursache (CCF) existiert eine Vielzahl von Fehlerursachen, die in der Folge mindestens einen weiteren Fehler verursachen, der zeitgleich bzw. nahezu zeitgleich eintritt. Ein solches *gemeinsames Fehlerbild (CMF)* liegt bspw. dann vor, wenn eine Komponente infolge zu hoher Temperaturen ausfällt und umliegende Komponenten wie z. B. SMD-Elektrolyt-Kondensatoren, die als Eingangsfiler eines Gleichspannungswandlers fungieren, ebenfalls aufgrund von Überhitzung ausfallen. In diesem Fall sind sowohl die Fehlerursachen (CCF) als auch die Fehlerbilder (CMF) der ausgefallenen Komponenten miteinander identisch.

Kaskadierende Fehler (CF) bzw. Ausfälle sind mit dem Dominoeffekt vergleichbar, bei dem eine Ursache eine Kette an Ereignissen auslöst. Ein Beispiel hierfür ist der Ausfall eines Netzwerkknotts. Der Ausfall dieses Knotts kann zur Mehrbelastung anderer Knoten führen und damit deren Ausfallwahrscheinlichkeit deutlich erhöhen. Fällt ein weiterer Knoten aus, sind die noch verbliebenen Knoten wiederum einer deutlich höheren Belastung ausgesetzt und die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der noch funktionierenden Knoten erhöht sich abermals. Letztendlich kann infolge eines solchen kaskadierenden Fehlers das gesamte Netzwerk ausfallen.

Fehlerentdeckung und Diagnose

Alle Komponenten besitzen das Potential für Fehler und somit für das Nichterfüllen ihrer vorgesehenen Funktionalität. Dabei sind sowohl die korrekte als auch die fehlerhafte Funktionsausführung über Messgrößen diagnostizierbar. Zu diesem Zweck wird zunächst die gemessene Größe aufgenommen, anschließend analysiert und schließlich wird ein Folgeereignis ausgelöst (bspw. wird eine Warnmeldung ausgegeben oder eine kalte Redundanz zugeschaltet). Je nachdem, ob der Fehler entdeckbar oder nicht entdeckbar bzw. gefährlich oder nicht gefährlich ist, ist das Vorhandensein einer solchen Diagnose vorteilhaft bzw. notwendig. Der Fehlerzustand kann dabei

- direkt,
- indirekt oder
- modellbasiert diagnostiziert werden.

Bei *direkten Diagnoseverfahren* wird auf der Basis einer direkt zu messenden physikalischen Größe auf den Zustand einer Komponente bzw. des Gesamtsystems geschlossen. Aus dem Messergebnis können dann weitere Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Ein Beispiel hierfür ist das Messen einer Spannung bei festgelegten Grenzwerten. Wird ein Grenzwert überschritten, kann dies direkt diagnostiziert werden.

Bei *indirekten Diagnoseverfahren* wird anhand mehrerer Systemgrößen der aktuelle Zustand des Systems (entweder funktional, fehlerhaft, degradiert oder ausgefallen) ermittelt. Auf dieser Basis können anschließend auch solche Fehlerereignisse diagnostiziert werden, die nicht direkt messbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die Kontrolle von Reifendruckveränderungen über Raddrehzahlsensoren.

Modellbasierte Diagnoseverfahren wurden vor allem zur Unterstützung von Reparaturen entwickelt. In [107] wird hierzu eine Methode vorgestellt, die auf einem neuronalen Netz basiert. Bei dieser Methode werden bereits bekannte Fehlersymptome sowie die damit verknüpften Reparaturen als Eingangsgrö-

ßen genutzt, um auf der Basis von Diagnosedaten² auch ohne genaue Systemkenntnisse mögliche Fehlerursachen und die jeweils passenden Reparaturmethoden zu ermitteln. Eine andere Vorgehensweise beschreibt Krieger [88]. Er präsentiert ein Echtzeitdiagnosesystem, welches mittels Bayes-Netz und Strukturbeschreibungen Fehlerkandidatenlisten generiert. Mittels dieser Fehlerkandidatenlisten können Diagnosen der Fehlerursachen nahezu in Echtzeit erfolgen. Ein drittes Verfahren ist die Erkennung von möglichen Fehlern in der Entwicklung durch die Kategorisierung von Fehlerspeichereinträgen, um auf wahrscheinliche Fehlerursachen schließen zu können. Dieses Verfahren wurde in [87] entwickelt und bietet den Vorteil, Fehler bereits während der Entwicklung analysieren und beheben zu können.

Bisher wird die modellbasierte Diagnose in Kraftfahrzeugen aufgrund der dafür erforderlichen Ressourcen nicht eingesetzt. Sie bietet jedoch das Potential, zukünftig auch bei weiter zunehmender Komplexität ein erhöhtes Maß an Diagnosefähigkeit zur Verfügung zu stellen.

Die Diagnosefähigkeit bzw. der Diagnosedeckungsgrad (Diagnostic coverage (DC)) ist für die Zuverlässigkeit einer technischen Komponente und des Gesamtsystems entscheidend. Ausschlaggebend bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit einer technischen Komponente bzw. des Gesamtsystems ist die Anfälligkeit für gefährliche Fehler. Hierbei wird der gefährliche Fehler definiert als

$$\lambda_d = \lambda_{dd} + \lambda_{du}. \quad (2.1)$$

Dabei sind λ_{dd} die entdeckbaren gefährlichen Fehler (detectable dangerous failures) und λ_{du} die nicht entdeckbaren gefährlichen Fehler (undetected dangerous failures).

Der Diagnosedeckungsgrad (DC) wird häufig in Prozent angegeben. Damit ist

$$DC_{\%} = \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_d} \cdot 100. \quad (2.2)$$

² Im Automobilsektor sind eine Vielzahl von Diagnosedaten über die On-Board-Diagnose-Schnittstelle (OBD) verfügbar. Diese Diagnosedaten sind in der ISO 15031 [69] herstellerübergreifend standardisiert.

Der mit Gleichung 2.2 ermittelte Deckungsgrad wird zur Einstufung der genutzten Diagnose genutzt. Hierbei richtet sich die Grundfragestellung nach dem zulässigen Risiko bzw. dem noch akzeptierbaren Restrisiko.

2.3.3 Risikobewertung

Alle technischen Systeme können infolge eines Fehlers die für sie vorgesehene Funktionalität verlieren. Sowohl in der Entwicklung und Herstellung als auch während der Wartung bzw. Reparatur technischer Systeme besteht jederzeit das Risiko, dass Fehlerursachen geschaffen werden. Zwar führt nicht jeder Fehler zu einem gefährlichen Systemzustand und ist somit riskant. Dennoch oder gerade deswegen ist es aber erforderlich zu definieren, welche Fehler als gefährlich gelten, welche entdeckbar bzw. nicht entdeckbar sind und welche Gegenmaßnahmen umgesetzt werden müssen, um ein akzeptables Risiko einhalten zu können. Abbildung 2.3 stellt das Prinzip der Risikominimierung dar. Zur Ermittlung des zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegenden Risikos muss eine Gefahren- und Risikoanalyse (GuR) durchgeführt werden. Hierbei werden zunächst – bspw. im Zuge einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) – alle Ereignisse aufgelistet, die sicherheitskritische Fehler verursachen können. Darüber hinaus liefert die FMEA Informationen über die dazugehörigen Fehlerursachen und -folgen, über die Fehlerhäufigkeit sowie über die Dauer der Gefährdung. Anschließend kann auf der Basis der so gewonnenen Informationen ermittelt werden, in welcher Höhe das jeweilige Risiko liegt, um geeignete Gegenmaßnahmen entwickeln und umsetzen zu können.

Dabei ist das Vorgehen, die auftretenden Fehler zum einen nach der Schwere des Schadens zu differenzieren und zum anderen danach, ob diese Schäden reversibel S_1 oder irreversibel S_2 sind. Anschließend muss die Häufigkeit gewichtet werden, d. h., es muss bestimmt werden, ob das fragliche Ereignis selten bzw. kurz F_1 oder häufig bzw. lang F_2 eintritt. Abschließend wird bewertet, ob und inwiefern es möglich ist, die Auswirkungen des fraglichen Fehlers zu vermeiden. Dies ist entweder möglich P_1 oder nicht möglich P_2 . Auf der Basis dieser Bewertung werden in Bezug auf die zuvor analysierten Ereignisse die Anforderungen festgelegt, die an die einzelnen Komponenten zu stellen sind. Dies geschieht in Form von sog. Kritikalitätsleveln, die auch als Sicherheits- oder Gefährdungslevel bezeichnet werden.

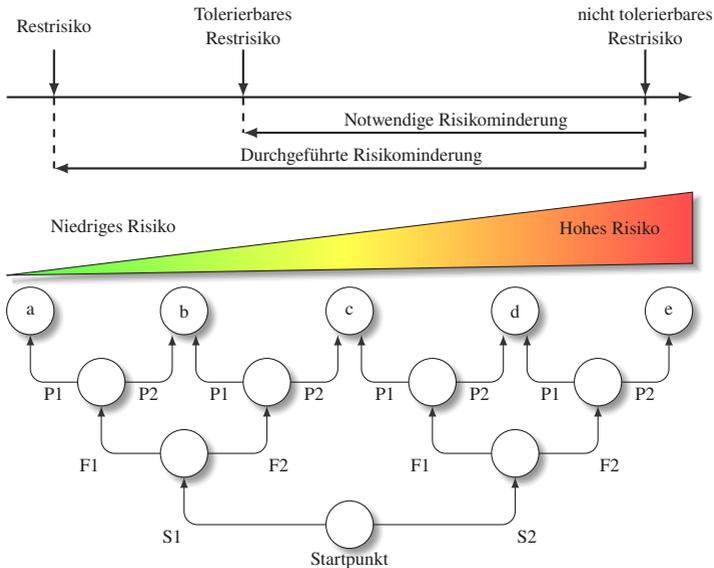


Abbildung 2.3: Das Konzept der Risikominimierung, in Anlehnung an die IEC 61508 [14] und den Risikograph nach DIN V 19250

Für die Analyse von Fehlern und die darauf aufbauende Zuverlässigkeitsbewertung gelten unterschiedliche Ableitungen der IEC 61508 [14]. Diese Norm gilt für die Verkehrsbereiche *Luft- und Raumfahrt DO-178B/C*, für den *Straßenverkehr ISO 26262* sowie für den *Schienenverkehr EN 50128*. In Tabelle 2.1 sind diesbezüglich die Kritikalitätslevel und die Wahrscheinlichkeiten der funktionalen Sicherheitsstandards für das Eintreten eines gefährlichen Fehlers pro Stunde³ aufgeführt. Hierbei muss beachtet werden, dass das Kritikalitätslevel als absolute Wahrscheinlichkeit und als Wahrscheinlichkeit pro Stunde angegeben werden kann. Die hier angegebenen Wertebereiche stammen aus der IEC 61508 und können für andere Standards abweichen.

³ Probability of a Dangerous Failure per Hour (PFH)

Performance Level		a	b	c	d	e
IEC 61508	Basis	(SIL 0)	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
ISO 26262	Automobil	QM	ASIL A	ASIL B / C	ASIL D	
DO-178C	Zivile Luftfahrt	Level E	Level D	Level C	Level B	Level A
EN 50128	Schienenverkehr	SIL 0	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4
ISO 13849	Maschinenbau	PL a	PL b / PL c	PL d	PL e	
IEC 62304	Medizin	Klasse A	Klasse B		Klasse C	
IEC 60730	Haushalt	Klasse A	Klasse B		Klasse C	
PFH ^a nach IEC 61508		10 ⁻⁵ bis 10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁵	10 ⁻⁷ bis 10 ⁻⁶	10 ⁻⁸ bis 10 ⁻⁷	10 ⁻⁹ bis 10 ⁻⁸

Tabelle 2.1: Einstufung der Kritikalitätslevel und die zulässige Ausfallrate in Fehlern pro Stunde (PFH) nach [14]

Akzeptiertes Risiko für hochautomatisierte Fahrfunktionen

Mit der Möglichkeit Risiken zu quantifizieren, ist es grundsätzlich möglich, Risikobewertungen technischer Systeme durchzuführen. Dabei muss die Frage nach dem verbleibenden Restrisiko gestellt und beantwortet werden. Diese Frage kann nicht allein aus technischer Sichtweise vollständig beantwortet werden und bedarf daher zusätzlich sowohl einer juristischen als auch einer ethischen Einordnung. Hierbei kann zum einen auf das ALARP-Verfahren⁴ zurückgegriffen werden; zum anderen muss der Gesetzgeber klare Anforderungen bzw. Grenzwerte festlegen, die für hochautomatisierte Systeme gelten sollen.

Die Ethik-Kommission für automatisiertes und vernetztes Fahren hat für die wesentlichen Fragestellungen zum hochautomatisierten bzw. autonomen Fahren im Juni 2017 ihren Abschlussbericht vorgelegt [162]. Laut diesem Bericht dürfen Kraftfahrzeuge, die hoch- bzw. vollautomatisiert sind, weniger Unfälle verursachen als solche, die von menschlichen Fahrern gesteuert werden. Darüber hinaus werden in den in Unterkapitel 2.2 diskutierten Zulassungsvoraussetzungen weitere Grenzen für das zu erwartende Restrisiko spezifiziert. In diesem Sinne muss bei jedem neu entwickelten System das Risiko für das Eintreten eines gefährlichen Ereignisses geprüft werden und es müssen geeignete Maßnahmen entwickelt und angewendet werden, um das verbleibende

⁴ ALARP steht für As Low As Reasonably Practicable und bedeutet, dass ein Restrisiko so gewählt werden sollte, dass es maximal niedrig ist, wobei die sich daraus ergebenden Normen zugleich aber noch vernünftigerweise praktikabel sein müssen.

Restrisiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

In der vorliegenden Arbeit werden elektrische Energieversorgungssysteme für hochautomatisierte Fahrfunktionen bis Stufe 4 (vgl. Tabelle 1.1) behandelt und diskutiert. Hierbei leiten sich die Anforderungen an das Gesamtsystem aus der Risikoanalyse nach ISO 26262 [68] ab. Auf der Grundlage der in Kapitel 4 vorgestellten elektrischen Energieversorgungsstrukturen und einer Bewertung der möglichen Fehler wird in Unterkapitel 4.7 eine Risiko- und Gefahrenanalyse für hochautomatisierte Fahrfunktionen durchgeführt. Aus dieser Analyse werden anschließend die wesentlichen Anforderungen an die elektrische Energieversorgung hinsichtlich deren Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit abgeleitet.

2.3.4 Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit von technischen Komponenten und somit von technischen Systemen ist nicht beliebig steigerbar, sondern prinzipiell begrenzt. Ein gewisses Restrisiko bleibt daher immer bestehen. Die Zuverlässigkeit lässt sich aber erhöhen, indem mögliche Risiken minimiert werden. Zu diesem Zweck müssen die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten gefährlicher Fehler in den verschiedenen Komponenten bzw. für einen damit ggf. einhergehenden Ausfall des Gesamtsystems identifiziert werden. In der Praxis bedeutet das, die Art und die Häufigkeit jener Fehler zu identifizieren, die zu einem gefährlichen Ereignis führen können. Bezüglich der im System verbleibenden Restfehler stellt sich die Frage, wie die von diesen Fehlern ausgehenden Risiken wirkungsvoll reduziert werden können bzw. wie die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erhöht werden kann.

Mathematisch wird die Zuverlässigkeit einer bestimmten Komponente bzw. eines bestimmten Systems als die Wahrscheinlichkeit dafür aufgefasst, dass die fragliche Komponente bzw. das fragliche System innerhalb eines Zeitintervalls $[0, t)$ ihre bzw. seine bestimmungsgemäße Funktionalität beibehält. Dabei wird die Zuverlässigkeit eines Systems über die Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion $R(t)$ definiert. Es gilt:

$$R(t) = \begin{cases} R(t) = 1 & t = 0 \\ R(t) = 0 & t \rightarrow \infty. \end{cases} \quad (2.3)$$

Die Zuverlässigkeit eines Gesamtsystems ist dabei abhängig von der Zuverlässigkeit aller einzelnen Teilsysteme. Vor diesem Hintergrund wird bei der Betrachtung von Systemen zwischen einer seriellen und einer parallelen Struktur unterschieden. Ein System wird dann als Seriensystem bezeichnet, wenn der Ausfall einer einzelnen Komponente zum Ausfall des Gesamtsystems führt (vgl. Abbildung 2.4 (a)). Als Parallelsystem gilt ein System dann, wenn es erst beim Ausfall aller Teilsysteme bzw. Komponenten ausfällt bzw. wenn das System bereits mit einer einzigen intakten Komponente funktionsfähig ist (vgl. Abbildung 2.4 (b)). Um die Überlebenswahrscheinlichkeit eines seriellen Sys-

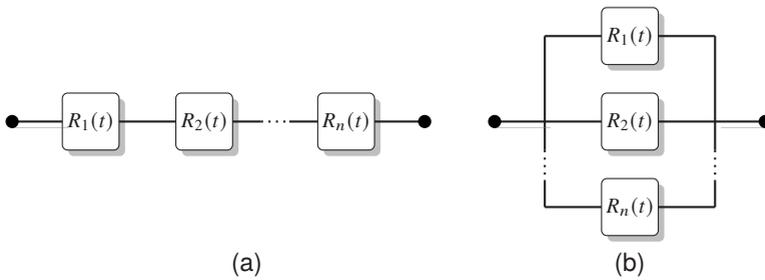


Abbildung 2.4: Serielle (a) und parallele (b) Systemstruktur

tems zu berechnen, muss man die inhärenten Überlebenswahrscheinlichkeiten P aller Komponenten dieses Systems gemäß des Multiplikationssatzes der Wahrscheinlichkeitsrechnung miteinander multiplizieren. Denn der Multiplikationssatz besagt, dass die Wahrscheinlichkeit für das zeitgleiche Eintreten von unabhängigen Ereignissen als Produkt ihrer jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeiten aufzufassen ist. Somit gilt für eine Serienstruktur:

$$P(A \cap \dots \cap n) = P(A) \cdot \dots \cdot P(n). \quad (2.4)$$

Die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit eines seriellen Gesamtsystems ist also das Produkt aller Komponentenüberlebenswahrscheinlichkeiten. Es gilt:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (2.5)$$

Die Parallelstruktur hingegen lässt sich mathematisch betrachtet als ein disjunktes Ereignis beschreiben und in Boolescher Algebra ausdrücken als

$$P(A \cup B \cup n) = P(A) + \dots + P(n) - P(A) \cdot \dots \cdot P(n). \quad (2.6)$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass in der Wahrscheinlichkeit für das Überleben einer Komponente auch die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Überlebens aller Komponenten beinhaltet ist. Daher muss hiervon das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten aus Gleichung 2.4 subtrahiert werden.

Im Falle einer Parallelstruktur entspricht die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit somit der Summe aller Komponentenüberlebenswahrscheinlichkeiten abzüglich des Produkts derselben. Die Systemwahrscheinlichkeit für eine Parallelstruktur lässt sich dementsprechend ausdrücken als

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (2.7)$$

Aus den Gleichungen 2.5 und 2.7 wird ersichtlich, dass zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit die Umsetzung einer Parallelstruktur von Vorteil ist.

In Abbildung 2.5 sind Systeme mit einer unterschiedlichen Anzahl von seriellen und parallelen Komponenten sowie mit unterschiedlichen Werten für die Komponentenzuverlässigkeit dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Abszisse invertiert dargestellt ist. Deutlich erkennbar ist, dass eine einfache Parallelstruktur entweder zu dem Zweck genutzt werden kann, die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen, oder aber dazu, um (bei gleichbleibender Systemzuverlässigkeit im Vergleich zum Einfachsystem) die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten zu reduzieren. Letzteres ist dann sinnvoll, wenn die Einzelkosten der Komponenten reduziert werden sollen, ohne die Systemzuverlässigkeit zu verringern. Diese Strategie ist besonders vor dem Hintergrund der Tatsache interessant, dass die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit zumeist mit einer Erhöhung der Kosten einhergeht, da Komponenten mehrfach benötigt werden. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, um Parallelstrukturen bzw. Redundanzen zu realisieren. Im Allgemeinen wird bezüglich der verschiedenen Redundanzarten unterschieden zwischen

- heißen,
- warmen und

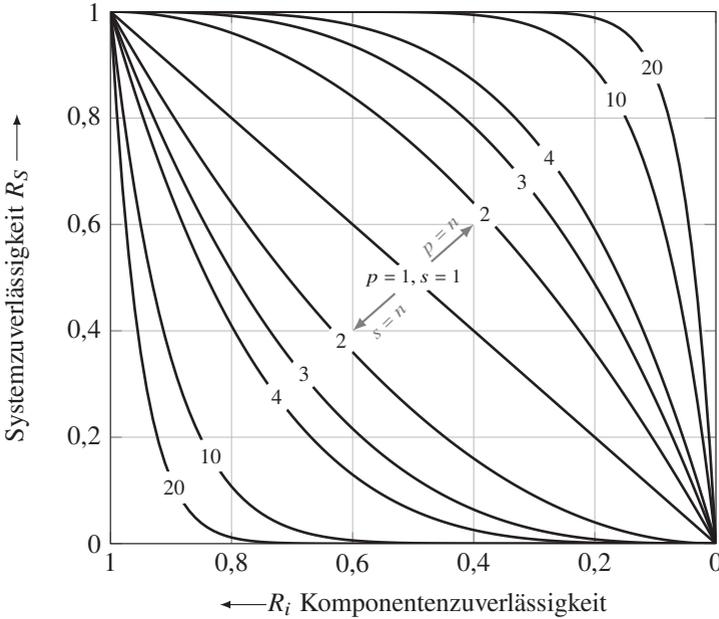


Abbildung 2.5: Vergleich der Systemzuverlässigkeit R von parallel p und seriell s verschalteten Komponenten

- kalten Redundanzen.

Unter einer *heißen* Redundanz wird das Vorhandensein einer zweiten, identischen Komponente verstanden, welche parallelgeschaltet und im Normalbetrieb den gleichen Belastungen ausgesetzt ist wie die erste. Ein Beispiel hierfür sind die Bremsysteme von Personenkraftwagen. Diese sind in zwei Bremskreisläufe aufgeteilt. Im Normalbetrieb sind beide aktiv. Beim Ausfall eines Kreislaufs gibt es weiterhin einen zweiten, funktional äquivalenten Kreislauf, womit sichergestellt ist, dass weiterhin eine hinreichende Bremsleistung bereitgestellt werden kann, um das Erreichen eines sicheren Zustands zu gewährleisten.

Bei einer *warmen* Redundanz gibt es zusätzlich zur Hauptkomponente eine zweite, funktional zwar nicht vollständig äquivalente Komponente, die bei einem Ausfall der Hauptkomponente aber ausreicht, um einen Notbetrieb der

fraglichen Funktion aufrechtzuerhalten. Diese zweite Komponente ist mit dem System verbunden, im Normalbetrieb allerdings weniger stark belastet als die Hauptkomponente. Daher unterliegt sie meist auch deutlich geringeren Anforderungen als die Hauptkomponente. Durch eine warme Redundanz kann die Systemzuverlässigkeit also zwar erhöht werden. Dies kann jedoch nur temporär erreicht werden, da ein dauerhafter Einsatz (wie bei der ursprünglichen Komponente) im Fall einer warmen Redundanz nicht möglich ist. Ein Beispiel für eine warme Redundanz ist der Energievorhalt eines kleineren Energiespeichers. Dieser wird zwar aktiv geladen und entladen und ist somit nicht zu jedem Zeitpunkt voll geladen; dennoch kann er im Fall eines Ausfalls des Hauptenergiespeichers zumindest temporär eine hinreichend große Menge an Energie für die sicherheitsrelevanten Verbraucher bereitstellen, um so das Erreichen eines sicheren Systemzustandes zu gewährleisten.

Bei einer *kalten* Redundanz ist die zusätzliche Komponente während des gewöhnlichen Systembetriebs nicht aktiv und wird nur beim Ausfall des Hauptsystems zugeschaltet. Da kalte Redundanzen – anders als heiße und warme Redundanzen – im Normalbetrieb also nicht mit dem System verbunden sind, gibt es keine Möglichkeit, ihre Funktionstüchtigkeit bzw. Einsatzfähigkeit zu überprüfen. Daher kann nur durch regelmäßige Überprüfungen des Systems sichergestellt werden, dass kalte Redundanzen bei Zuschaltung garantiert funktionieren. Ein weiterer wesentlicher Nachteil von kalten Redundanzen ist, dass jederzeit zwei Systeme mitgeführt werden müssen, obwohl im Normalbetrieb nur eines von beiden benötigt wird. Heiße und warme Redundanzen bieten im direkten Vergleich hierzu den Vorteil, dass die Gesamtsysteme, in denen sie verbaut werden, effizienter dimensioniert werden können.

Problematisch im Hinblick auf alle drei Redundanzarten ist die Tatsache, dass systematische Komponentenfehler, die sowohl in der Software als auch in der Hardware bestehen können, durch das Einführen von Redundanzen – egal, welcher Art – nicht eliminiert werden können. Aus diesem Grund ist es erforderlich, auf das Konzept der Diversität zurückzugreifen. Die grundlegende Idee hierbei besteht darin, nicht systematische Fehler als solche auszuschließen, sondern zu verhindern, dass ihr Auftreten gefährliche Konsequenzen für das System hat. Dies wird erreicht, indem sicherheitsrelevante Funktionalitäten auf verschiedene – also diverse – Komponenten verteilt werden. Auch bei einem Ausfall einer Komponente ist somit jederzeit sichergestellt, dass eine andere, von dieser Komponente unabhängige Komponente mit derselben Funktionalität vorhanden ist, die den Ausfall instantan ausgleicht. Auf diese Weise kann durch die Verwendung voneinander unabhängiger Komponenten

nahezu ausgeschlossen werden, dass systematische Fehler gefährliche Konsequenzen haben. Das Konzept der Diversität kann dabei sowohl auf Hardware-Ebene – z. B. durch Verwendung unterschiedlicher Prozessoren – als auch auf Software-Ebene – z. B. durch Verwendung unterschiedlicher Programmiersprachen und damit auch unterschiedlicher Compiler – umgesetzt werden. Einen guten Überblick über verschiedene Anwendungsarten der Diversität in der Luft- und Raumfahrt bietet [117]. Popov [58] hat eine Methode zur Quantifizierung der Diversität entwickelt. In seiner Arbeit führt Popov den Faktor der Diversitätstiefe (depth of diversity) Ω ein, welcher eine Aussage über das Maß der Diversität zulässt. Unter der Annahme, dass die hier relevanten Fehler für jeden Kanal⁵ unabhängig voneinander sind, ist Ω dabei definiert zu

$$\Omega = 1 - \frac{A \cap B}{A \cup B}. \quad (2.8)$$

Bei einem Wert von $\Omega = 1$ ist die maximale Diversitätstiefe erreicht, während ein Wert von $\Omega = 0$ bedeutet, dass keine Diversität vorliegt.

Anders als z. B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie wird in der Automobilindustrie grundsätzlich keine Diversität gefordert. Steuergeräte und damit Recheneinheiten werden vielmehr so ausgelegt, dass Funktionen, welche die Längs- und Querdynamik beeinflussen, redundant ausgeführt werden. Vor der Aktoransteuerung werden die Ergebnisse der Funktionen miteinander verglichen bzw. plausibilisiert. Wie in [6] gezeigt wird, besteht die Möglichkeit Multicore-Prozessoren zu nutzen, um die Funktionen auf jedem Prozessor zu berechnen und deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Die Autoren verweisen jedoch auf die nicht vorhandene Diversität bzw. auf die Problematik, dass systematische Fehler nicht ausgeschlossen werden können. Eine weitere Möglichkeit, um das Lenksystem redundant und im obigen Sinne divers zu gestalten, wird in [85] vorgestellt, wobei das Steuergerät der elektronischen Servolenkung sowohl in der Prozessorarchitektur als auch in der Aktoransteuerung redundant ausgeführt ist. In der von A. Kohn [85] durchgeführten Untersuchung werden zwar zwei identische Prozessoren verwendet; grundsätzlich eignet sich diese Architektur jedoch auch für den Einsatz zweier voneinander unabhän-

⁵ Kanal steht hier für das Vorhandensein einer Parallelstruktur. Ein Kanal kann in sich zwar mehrere serielle sowie parallele Komponenten beinhalten, fungiert im Kontext des Gesamtsystems jedoch als eine Parallelstruktur.

giger Prozessoren, um z. B. systematische Fehler in der Prozessorarchitektur ausschließen zu können.

2.4 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie

In diesem Unterkapitel soll die Frage beantwortet werden, wann eine Komponente bzw. ein System, das aus mehreren Komponenten besteht, intakt oder ausgefallen ist.

Die Zuverlässigkeit wird im Allgemeinen als die Fähigkeit eines technischen Systems definiert, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls seine vorgesehene Funktion zu erfüllen. Da die Zuverlässigkeit nicht aus physikalischen Grundgleichungen abgeleitet werden kann, wird sie stattdessen als stochastische Größe aufgefasst. Zur Berechnung der Zuverlässigkeit müssen Informationen aus Laborprüfungen bzw. aus Felddaten zur Verfügung stehen. Dabei wird angenommen, dass ausschließlich Sprungausfälle auftreten, d. h., dass das System entweder den Zustand *funktionsfähig* oder *ausgefallen* besitzt. Zur Beschreibung des Systemzustands wird die Boolesche Variable $Y(t)$ eingeführt. Es gilt:

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & \text{System ist funktionsfähig} \\ 0 & \text{System ist ausgefallen.} \end{cases} \quad (2.9)$$

Das Ausfallverhalten einer Komponente bzw. eines Systems wird nun über das Konzept der Überlebenswahrscheinlichkeit mit Hilfe von $Y(t)$ bestimmt. Hierbei ist $Y(t)$ als Zufallsvariable aufzufassen. Für die Überlebenswahrscheinlichkeit $p_S(t)$ gilt:

$$P(Y(t) = 1) =: p_S(t). \quad (2.10)$$

Nun wird die Zeitspanne vom Arbeitsbeginn bis zum Ausfall der betrachteten Komponente bzw. des betrachteten Gesamtsystems als Lebensdauer T eingeführt. Dabei ist T eine Zufallsvariable, die zur Darstellung der zeitabhängigen Systemfunktion $Y(t)$ dient. Die wesentlichen Zuverlässigkeitskenngrößen sind

mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung von T verknüpft. Die Systemfunktion $Y(t)$ ist definiert zu

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } t < T \\ 0 & \text{wenn } t \geq T. \end{cases} \quad (2.11)$$

Die *Ausfallwahrscheinlichkeit* ist die Verteilungsfunktion $F_T(t)$ der Lebensdauer T der betrachteten Komponente bzw. des betrachteten Gesamtsystems und gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass im Zeitintervall $[0, t]$ der Ausfall eintritt. $F_T(t)$ ist definiert zu

$$F_T(t) = P(T \geq t) \quad (t \leq 0). \quad (2.12)$$

Dabei gilt im Allgemeinen, dass $0 \leq F_T(t) \leq 1$ und $F_T(0) \geq 0$ vorausgesetzt werden kann.

Die *Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion*, auch als *Zuverlässigkeit* bezeichnet, gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass im Zeitintervall $[0, t)$ kein Ausfall der betrachteten Komponente bzw. des betrachteten Gesamtsystems eintritt. Die Zuverlässigkeit ist dabei definiert zu

$$R_T(t) = P(T > t) = 1 - F_T(t) \quad (t \leq 0). \quad (2.13)$$

Eine weitere wesentliche Größe ist die *Verfügbarkeit*. Die Verfügbarkeit entspricht für nicht reparierbare Systeme der Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. der Zuverlässigkeit. Im Fall von reparierbaren Systemen ist die Verfügbarkeit die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zum Zeitpunkt t kein Ausfall eingetreten ist. Es gilt: $P(X(t) = 1)$. Unter der Annahme, dass die Verteilungsfunktion $F_T(t)$ der Lebensdauer T in $[0, t)$ differenzierbar ist, wird mit der ersten Ableitung die Lebensdauerdichte bzw. die Ausfalldichte berechnet. Die Ausfalldichte ist definiert zu

$$f_T(t) = \frac{d}{dt} \cdot F_T(t). \quad (2.14)$$

Die Ausfalldichte besitzt die folgenden Eigenschaften:

$$\int_0^t f_T(\tau) d\tau = F(t), \quad \int_0^\infty f_T(t) dt = 1. \quad (2.15)$$

Aus Gleichung 2.15 wird ersichtlich, dass die Fläche, die von der Dichtefunktion f_T eingeschlossen wird, die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls darstellt. Somit kann durch Integration zwischen zwei Intervallgrenzen auf die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls geschlossen werden.

Die Ausfallrate

Eine weitere und mitunter wichtige Größe ist die *Ausfallrate*.⁶ Die Ausfallrate ist eine zusammenfassende Kenngröße und vereint eine Vielzahl von Einflussgrößen in sich, welche die Ausfallhäufigkeit beeinflussen. Definiert ist die Ausfallrate zu

$$\lambda_T(t) = \frac{f_T(t)}{R_T(t)}. \quad (2.16)$$

Mit Blick auf technische Systeme können unterschiedliche Verläufe von Ausfallratenfunktionen beobachtet werden und es kann zwischen Komponenten mit und solchen ohne Verschleißerscheinungen unterschieden werden. In Abbildung 2.6 ist ein idealisierter Verlauf einer Ausfallrate auf der Basis der Weibull-Verteilung mit unterschiedlichem Formparameter β dargestellt. Diese Kurve wird entsprechend ihrer Form auch als Badewannenkurve (Bathtub Curve, BTC) bezeichnet. Der Bereich I stellt die Frühausfälle⁷, der Bereich II die zufälligen Ausfälle⁸ und der Bereich III die verschleißbedingten Ausfälle dar.

Frühausfälle treten vor allem durch qualitativ bedingte Fehler auf. Zur Vermeidung von Frühausfällen müssen geeignete Testverfahren entwickelt und angewendet werden. Unabhängig davon, ob es sich um mechanische oder elektronische Komponenten handelt, existiert eine Vielzahl von Testmethoden zum Fehlerausschluss und somit zur Erhöhung der Produktqualität. Für elektronische Baugruppen (z. B. für Steuergeräte, Sensoren, Gleichspannungswandler etc.) kann je nach Herstellungsverfahren und Komplexität der Baugruppe auf verschiedene Test- und Prüfverfahren zurückgegriffen werden [10]. In Abhän-

⁶ Die Ausfallrate wird auch als Fehler- bzw. Gefährdungsrate (Hazard rate), teilweise auch als FIT-Rate, bezeichnet.

⁷ Dieser Bereich wird auch als *Instant Mortality* bezeichnet.

⁸ Dieser Bereich wird auch als Random Failure bzw. zufälliger, meistens als konstant angenommener Fehler bezeichnet.

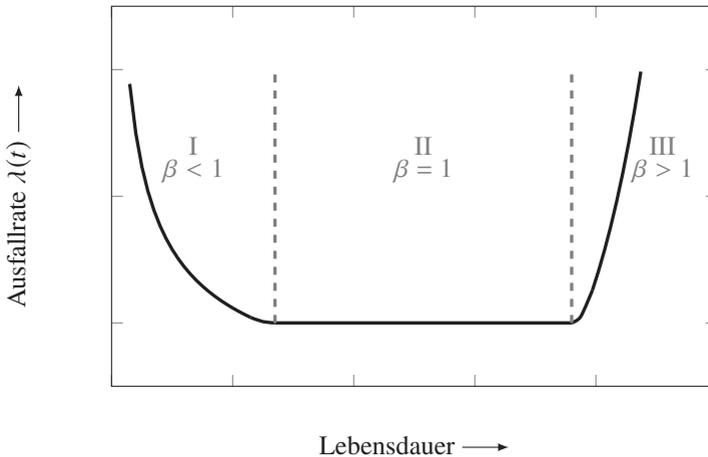


Abbildung 2.6: Die Badewannenkurve der Ausfallrate mit den Bereichen des Frühausfalls, des zufälligen bzw. konstanten Ausfalls sowie des verschleißbedingten Ausfalls

gigkeit davon, ob es sich um mechanische, elektro-chemische oder elektrische bzw. elektronische Komponenten handelt, variiert der Bereich mit konstanter Ausfallrate im Verlauf der Badewannenkurve aus Abbildung 2.6 deutlich. Mechanische sowie elektro-chemische Baugruppen unterliegen einem Verschleiß, wodurch das Vorliegen einer konstanten Ausfallrate lediglich zu Beginn der Einsatzzeit dieser Komponenten angenommen werden kann. Bei elektrischen bzw. elektronischen Baugruppen hingegen kann kein signifikanter Verschleiß beobachtet werden. Aus diesem Grund können für elektrische bzw. elektronische Baugruppen konstante Ausfallraten angenommen werden.

Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten basiert im Wesentlichen auf Felddaten sowie auf darauf aufbauenden stochastischen Untersuchungen. Da diese Felddaten und Untersuchungen zu Beginn einer Neuentwicklung nur teilweise vorhanden sind, muss auf bereits existierende Fehlerdaten aus Laborprüfungen und Datensätzen sowie auf Felddaten ähnlicher Komponenten zurückgegriffen werden. In Abbildung 2.7 sind die Erfassungsmöglichkeiten von Ausfallraten zusammenfassend dargestellt. Grundsätzlich kann zur Berechnung von Ausfallraten auf eine der vier in der Abbildung dargestellten Methoden bzw. auf die dort genannten Modelle und Daten zurückgegriffen werden. Entscheidend für die Wahl der Methode ist, wie präzise die Aussage

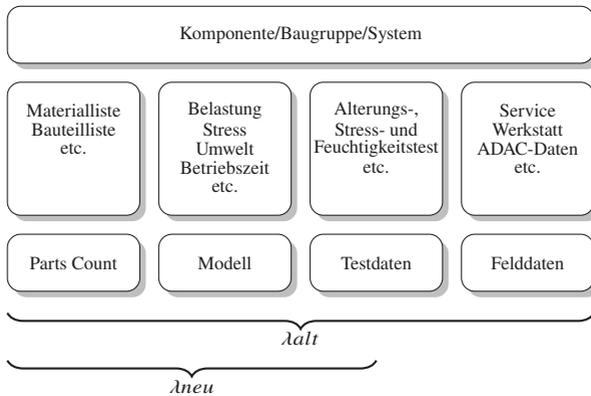


Abbildung 2.7: Methoden zur Ermittlung bzw. Berechnung der Ausfallraten von bekannten und unbekannt Systemen

über die mögliche Ausfallrate $\lambda(t)$ ausfallen muss.

Die *Parts-Count-Methode* stellt ein einfaches und schnell anwendbares Verfahren dar, welches vor allem zur Abschätzung einer ersten Tendenz sinnvoll ist. Dabei wird die Ausfallrate des Gesamtsystems bestimmt, indem zunächst die Ausfallraten der einzelnen Komponenten⁹ berechnet werden und anschließend über die Ausfallraten aller Komponenten des Gesamtsystems aufsummiert wird. Diese wird häufig aus bereits bekannten Datensätzen bzw. Handbüchern entnommen. Ein in diesem Zusammenhang relevantes und weit verbreitetes, jedoch mittlerweile als ungünstig zurückgezogenes Handbuch für die Zuverlässigkeitsvorhersage von elektronischer Ausrüstung bzw. elektronischen Baugruppen ist das Military Handbook (MIL-HDKB-217F) [40].

Mit der *modellbasierten Methode* besteht die Möglichkeit, bereits bekannte Modelle zur Berechnung von Ausfallraten zu nutzen. Hierbei werden aus bekannten Ausfalldaten Basis- bzw. Belastungsfaktoren abgeleitet, um anschließend auf der Basis dieser Werte die Ausfallraten für neue Komponenten zu berechnen. Die Ausfallrate λ ist in diesen Fällen konstant und definiert zu

$$\lambda = \lambda_{Basis} \cdot \pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \dots \cdot \pi_n. \quad (2.17)$$

⁹ Die Ausfallrate für eine einzelne Komponente wird gebildet, indem deren Anzahl mit einer konstanten Ausfallrate multipliziert wird.

Dabei ist λ_{Basis} die grundsätzliche Ausfallrate, welche auf der Basis bereits vorhandener Daten ermittelt wurde. Die spezifische Ausfallrate für die jeweils untersuchte neue Komponente wird über die verschiedenen Faktoren $\pi_1 \dots \pi_n$ an die jeweiligen Umgebungs- und Belastungsbedingungen angepasst. Die Faktoren variieren hierbei je nach zu modellierender Komponente und sind abhängig von den bereits vorhandenen Ausfalldaten. Im Wesentlichen werden hierbei Faktoren für die Herstellung, die Umwelt und den Betrieb bzw. die Belastung der fraglichen Komponenten berücksichtigt.

In Unterkapitel 2.5 werden diverse Standards zur Berechnung von Ausfallraten vorgestellt und es werden zugrunde liegende Modellansätze diskutiert. Die Datengrundlage für die Berechnung von Ausfallraten wird zum Teil auch aus *Testdaten* aus Komponenten- bzw. Baugruppentests gewonnen. Zu diesem Zweck werden mit den ersten Mustern bzw. mit dem Vorserienprodukt Ausfalltests durchgeführt. Aus diesen Tests lassen sich ebenfalls Ausfallraten ableiten, wenn auch auf der Basis eines sehr kleinen Stichprobenumfangs. Aufgrund der kleinen Grundmenge ist es in diesen Versuchen nicht möglich, sehr kleine Fehlerraten nachzuweisen. Häufig treten auch gar keine Fehler auf, sodass nur bedingt Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Fehlern mit kleiner Ausfallrate abgeleitet werden können.

Grundsätzlich stehen zwar sehr umfangreiche *Felddatensätze* aus Werkstattaufzeichnungen bzw. von Servicedienstleistern wie z. B. dem Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (ADAC) zur Verfügung. Diese sind für die hier verfolgten Zwecke jedoch unzureichend, da mit ihnen nur übergeordnete Fehlerkategorien gebildet werden können, aus denen Fehlerverteilungen abgeleitet, aber keine Wahrscheinlichkeiten berechnet werden können. Theoretisch wäre es zwar möglich, diese Quelle zur Berechnung von Ausfallraten zu nutzen, indem man fehlende Informationen abschätzt. Im Kontext der automobilen Vorentwicklung wäre auch das jedoch nicht ausreichend, da auch dann noch immer entscheidende Informationen fehlten (bspw. darüber, wie lange Batterien verbaut waren, bevor sie getauscht wurden, oder darüber, wie groß die Grundgesamtheit der für die Statistik relevanten Fahrzeuge war), sodass die Ergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit fehlerbehaftet wären. Um verlässlichere Zahlen zu erhalten, wird in der vorliegenden Arbeit daher stattdessen auf die oben genannten Ausfallratenhandbücher sowie auf Daten aus eigenen Untersuchungen [110] und [109] zurückgegriffen.

2.4.1 Lebensdauerverteilungen

Allen Lebensdaueruntersuchungen liegt die Erfassung empirischer Daten zugrunde. Dies gilt unabhängig davon, ob einzelne Komponenten oder gesamte Baugruppen untersucht werden. Bei den empirisch erfassten Daten handelt es sich um Daten aus Stichproben. Dabei werden $n > 1$ Elemente beobachtet, wobei sowohl n als auch der Beobachtungszeitraum möglichst groß gewählt werden sollten. Da dies aus Kostengründen jedoch oft nicht möglich ist, sind die Stichproben häufig unvollständig. Um dennoch Zuverlässigkeitsanalysen durchführen zu können, müssen geeignete Wahrscheinlichkeitsmodelle gewählt werden.

Auf der Basis solcher Wahrscheinlichkeitsmodelle können Erkenntnisse über die Ausfallraten – konstante und zeitabhängige – sowie über weitere statistische Größen gewonnen werden. In Abhängigkeit davon, welche Komponenten betrachtet werden, treten unterschiedliche Ausfallverteilungen auf. Bei elektronischen Komponenten sind häufig konstante Ausfallraten beobachtbar. Auch mechanische Komponenten weisen oft einen kleinen Bereich konstanter Ausfallraten auf, gehen dann aber in den verschleißbehafteten Bereich über. Ähnlich verhält es sich bei elektro-chemischen Komponenten wie Energiespeichern. Hier steigt die Ausfallrate mit zunehmender Einsatzzeit stetig an.

Zur Berechnung der Ausfallrate einer Komponente muss zunächst deren Lebensdauer ermittelt werden. Dies geschieht auf der Basis von Lebensdaueruntersuchungen mit einer bestimmten Grundgesamtheit der fraglichen Komponente. Aus den entsprechenden Aufzeichnungen bzw. Auswertungen der Versuchsergebnisse lässt sich die Lebensdauerverteilung bestimmen. Die wichtigsten Lebensdauerverteilungen im technischen Bereich sind

- die Exponentialverteilung und
- die Weibull-Verteilung.

Die *Exponentialverteilung* wird zur Abbildung konstanter Fehlerraten und am häufigsten im elektronischen Bereich verwendet. Die *Weibull-Verteilung* ist eine Erweiterung der Exponentialverteilung und ermöglicht teilweise eine sehr gute Anpassung an Datensätze aus dem Feld. Beispielsweise konnte in [110] die auftretende Fehlerhäufigkeit von Blei-Säure-Batterien anhand einer zweifachen Weibull-Verteilung approximiert werden.

Die Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung besitzt für eine Zufallsvariable X mit dem Skalenparameter λ und dem zeitabhängigen Argument t die folgend definierte Dichtefunktion:

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0, \\ 0 & t < 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Durch Variation des Skalenparameters λ lassen sich verschiedene Funktionsverläufe erreichen (vgl. hierzu Abbildung 2.8). Die Exponentialverteilung lässt

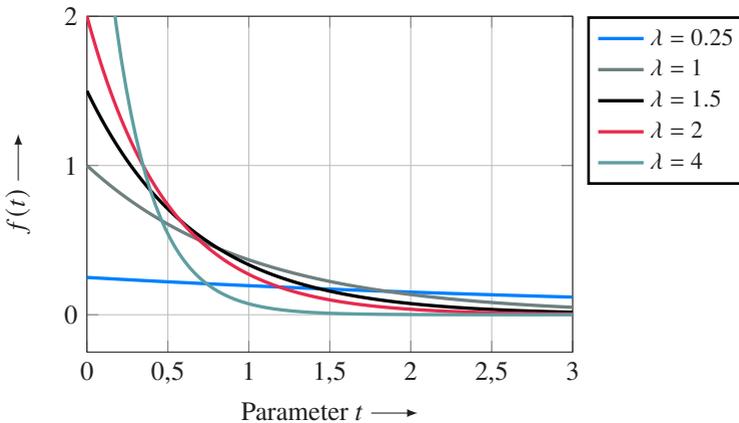


Abbildung 2.8: Exponentialverteilung

sich durch Betrachtung eines infinitesimal kleinen Zeitintervalls dt so interpretieren, dass $f(t) \cdot dt$ die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines zufälligen Ereignisses im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ abbildet. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird dabei direkt durch die Verteilungsfunktion ersichtlich. Diese ist für das Argument t definiert zu

$$F(t) = \int_0^t f_{\lambda}(\tau) d\tau = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0, \\ 0 & t < 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

Die Verteilungsfunktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass $F(t) = 1$ der betrachteten Grundgesamtheit bis $t = n$ ausgefallen sind. Für die Verteilungsfunktion ergeben sich durch Variation des Parameters λ die in Abbildung 2.9 dargestellten Verläufe. Wie zu erkennen ist, konvergieren die beob-

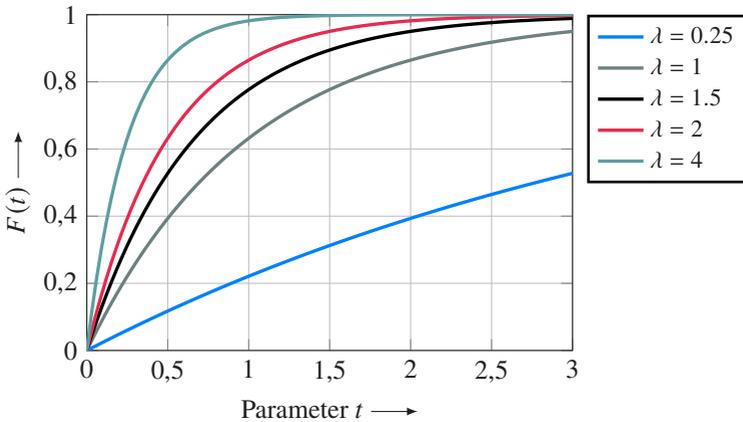


Abbildung 2.9: Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung

achteten Verläufe gegen 1. Die Größe t ist dabei dimensionslos bzw. kann auch einen zeitlichen Verlauf repräsentieren. Im Automobilsektor sind Beobachtungszeiträume von mehreren Monaten bis zu mehreren Jahren üblich. Auf der Basis der Exponentialverteilung berechnet sich die Ausfallrate mit Gleichung 2.16 zu

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (2.20)$$

Hier ist zu berücksichtigen, dass die Ausfallrate zur Unterscheidung bewusst mit $h(t)$ bezeichnet wurde, um eine Verwechslung mit dem Skalenparameter λ zu vermeiden. Die Ausfallrate $h(t)$ der Exponentialverteilung ist konstant und eignet sich damit zur Berechnung von Systemzuverlässigkeiten mittels Fehlerbäumen, Markov-Ketten usw. Die Ausfallrate mit dem bisher verwendeten Skalenparameter λ ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass mit den Gleichungen 2.18 und 2.19 für die Ausfallrate $h(t) = \lambda$, wenn $\lambda > 0$ gilt. Da der Erwartungswert der Exponenti-

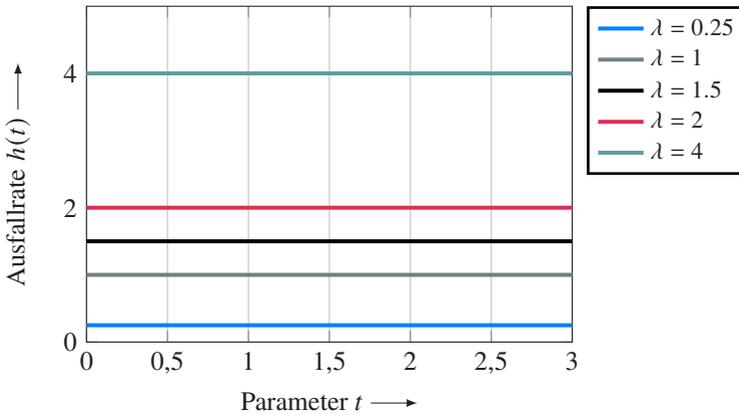


Abbildung 2.10: Ausfallrate der Exponentialverteilung

alverteilung aufgrund der Konstanz der Ausfallrate immer bei $t = 0$ liegt, kann der Erwartungswert mit

$$E[X] = \frac{1}{\lambda} \quad (2.21)$$

angegeben werden.

Der Erwartungswert stellt neben der Ausfallrate eine weitere wesentliche Größe in der Zuverlässigkeitsanalyse dar. In Bezug auf nicht reparierbare Systeme wird der Erwartungswert als Mean Time To Failure (MTTF) bezeichnet. Ist das System reparierbar, beschreibt der Erwartungswert die Zeit zwischen den Fehlern bzw. zwischen einer Wartung oder Reparatur und wird dementsprechend als Mean Time Between Failure (MTBF) bezeichnet.

Neben der einparametrischen Exponentialverteilung kann der Lageparameter auch mit der zweiparametrischen Exponentialverteilung um den Betrag γ verschoben werden. Dabei ist die Dichtefunktion der zweiparametrischen Exponentialverteilung definiert zu

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} & t > \gamma \geq 0, \\ 0 & \lambda < 0. \end{cases} \quad \lambda \geq 0 \quad (2.22)$$

Der Parameter γ verschiebt die Exponentialverteilung aus Gleichung 2.18, woraus sich die in Abbildung 2.11 dargestellten Verläufe ergeben. Dabei kann γ Beträge < 0 annehmen. Durch Integration der Dichtefunktion $f(t)$ der zwei-

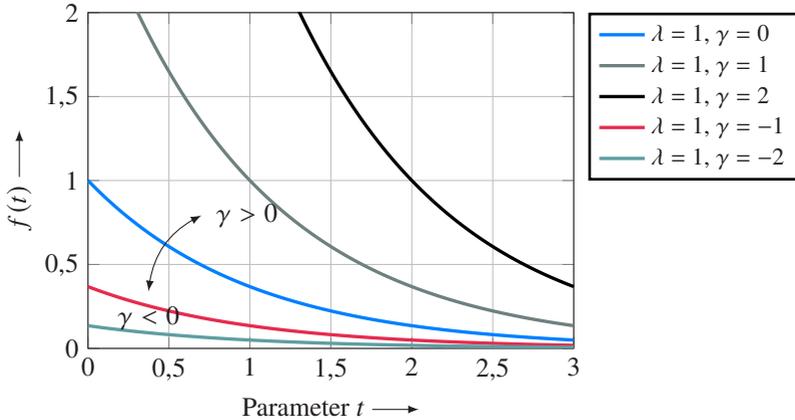


Abbildung 2.11: Exponentialverteilung zweiparametrig

parametrischen Exponentialverteilung lässt sich die Verteilungsfunktion $F(t)$ angeben zu

$$F(t) = \int_0^t f_\lambda(\tau) d\tau = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(t-\gamma)} & t \geq \gamma \geq 0, \quad \lambda > 0 \\ 0 & t < 0. \end{cases} \quad (2.23)$$

Die Verteilungsfunktion ergibt aufgrund der Verschiebung unterschiedliche Anfangswerte für den Parameter t . Zudem ändert sich auch die Berechnung des Erwartungswerts. Dieser ist mit der Verschiebung um γ definiert zu

$$E[X] = \gamma + \frac{1}{\lambda}. \quad (2.24)$$

Die Ausfallrate $h(t)$ bleibt konstant und bildet weiterhin mit der Verschiebung um γ den Parameter λ ab. Es gilt $h(t) = \lambda = \text{konstant}$.

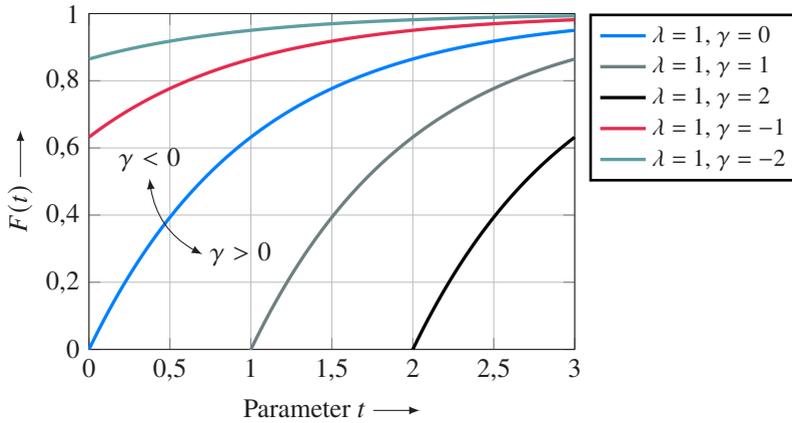


Abbildung 2.12: Verteilungsfunktion Exponentialverteilung zweiparametrig

Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung ist eine der bekanntesten Lebensdauerverteilungen. Ursprünglich wurde sie vom schwedischen Ingenieur Waloddi Weibull für die Materialprüfung entwickelt. Heute wird die Weibull-Verteilung allerdings für eine Vielzahl von Fehlerverteilungen unterschiedlicher Komponenten verwendet [2].

Die Weibull-Verteilung wird in der vorliegenden Arbeit mit dem Formparameter k und dem inversen Skalenparameter λ bzw. $\mu = \frac{1}{\lambda}$ genutzt. Sie ist mit λ definiert zu

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \lambda k (\lambda t)^{k-1} e^{(-\lambda t)^k} & k > 0, \quad \lambda > 0 \\ 0 & \lambda < 0. \end{cases} \quad (2.25)$$

Des Weiteren lässt sich die Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen mit $\mu = \frac{1}{\lambda}$ angeben:

$$f_{\mu}(t) = \begin{cases} \frac{k}{\mu} \left(\frac{t}{\mu}\right)^{k-1} e^{\left(-\frac{t}{\mu}\right)^k} & k > 0, \quad \mu > 0 \\ 0 & \mu < 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

Beide Verteilungen können durch eine Variation der Parameter an verschiedene Fehlerverteilungen angepasst werden. In Abbildung 2.13 ist die Weibull-Verteilung mit $\lambda = 1$ und $k > 0$ dargestellt. Die Weibull-Verteilung weist

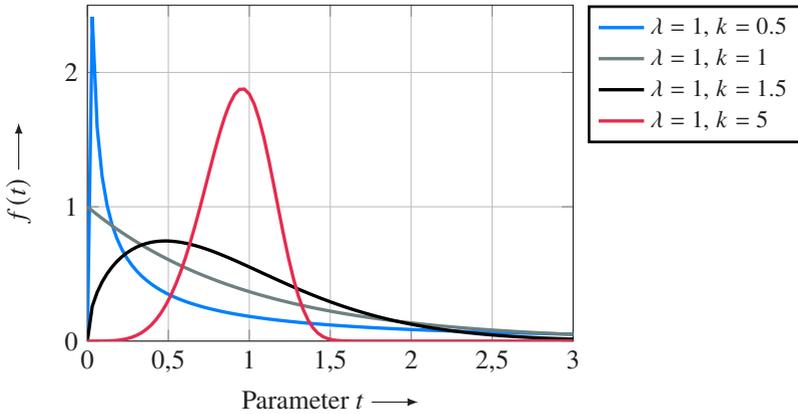


Abbildung 2.13: Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung

interessante Eigenschaften auf. Bei $k = 1$ ist sie eine Exponentialverteilung, bei $k = 2$ hingegen führt sie zur Rayleigh-Verteilung. Die Dichtefunktion $F_{\lambda}(t)$ der Weibull-Verteilung ist mit dem Parameter λ definiert zu

$$F_{\lambda}(t) = \begin{cases} 1 - e^{(-\lambda t)^k} & k > 0, \quad \lambda > 0 \\ 0 & \lambda < 0. \end{cases} \quad (2.27)$$

Des Weiteren lässt sich die Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung mit $\mu = \frac{1}{\lambda}$ angeben als

$$F_{\mu}(t) = \begin{cases} 1 - e^{\left(-\frac{t}{\mu}\right)^k} & k > 0, \quad \mu > 0 \\ 0 & \mu < 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

Die angegebenen Verteilungen eignen sich zur Abbildung von Ausfall- bzw. Fehlerdaten unterschiedlicher Systeme. Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall bzw. Fehler wird dabei durch die Dichtefunktion $F(t)$ abgebildet, die durch Integration der Verteilungsfunktion $f(t)$ bei Ausfalldaten über die Zeit t gewonnen wird. Für die bereits bekannten Parameter von λ und k sind die Kurven

der Dichtefunktion $F(t)$ in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Weibull-Verteilung

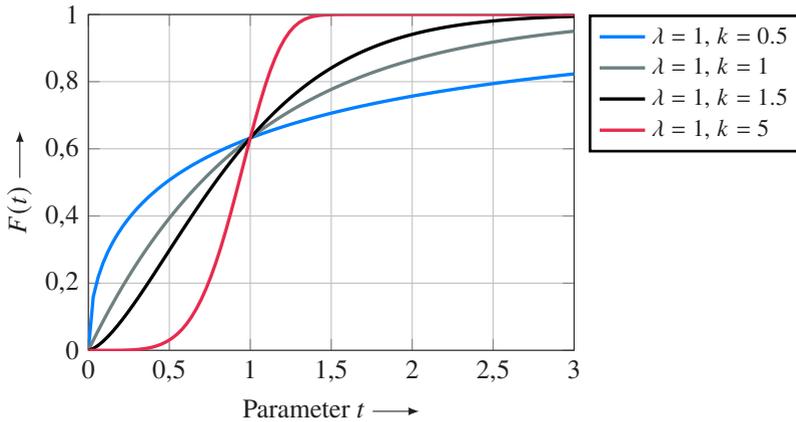


Abbildung 2.14: Dichtefunktion der Weibull-Verteilung

wird in wissenschaftlichen Abhandlungen zum Thema Zuverlässigkeit zur Modellierung von Lebensdauerdaten genutzt. Beispielsweise wurde in [120] auf der Basis der Weibull-Verteilung eine neue Methode zur Bestimmung der kilometerabhängigen Lebensdauer vorgestellt. Weitere Arbeiten zu Basisdaten sowie zur Ermittlung der Parameter der Weibull-Verteilung sind z. B. [106] und [122].

Ebenfalls von Interesse bei der Weibull-Verteilung ist die Ausfallrate. Diese ist im Gegensatz zur Exponentialverteilung nicht konstant, sondern vom Parameter t abhängig. Die Ausfallrate $h(t)$ der Weibull-Verteilung ist damit definiert zu

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \lambda k (\lambda t)^{k-1}. \quad (2.29)$$

Die Verteilung für $\lambda = 1$ und mit Variation von k ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die mit größer werdenden k zunehmende Steigung. Durch $k < 0$ lässt sich ein monoton fallender Verlauf erreichen.

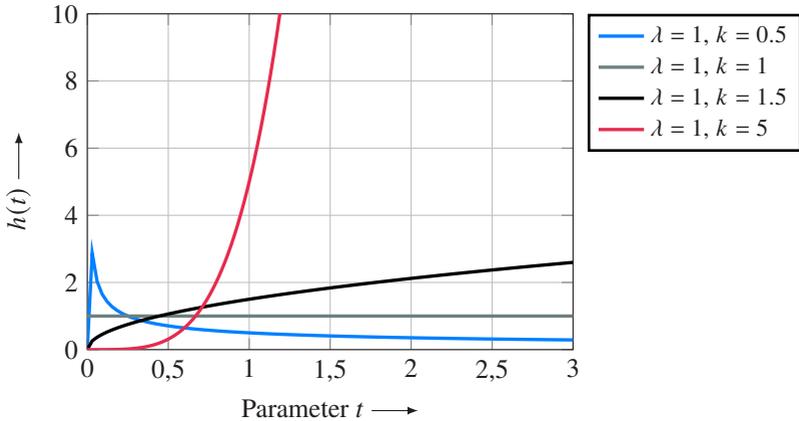


Abbildung 2.15: Ausfallrate der Weibull-Verteilung

Neben der Ausfallrate ist bei der Weibull-Verteilung auch der Erwartungswert von Interesse. Dieser besitzt die folgende Definition:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right). \quad (2.30)$$

Dabei ist die Gammafunktion das Integral von 0 bis ∞ über t . Die $\Gamma(a)$ -Funktion ist definiert zu

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} \cdot e^{-t} dt, \text{ für } a > 0. \quad (2.31)$$

Hierbei besitzt die $\Gamma(a)$ -Funktion die Eigenschaften $\Gamma(a+1) = a \cdot \Gamma(a)$ und $\Gamma(1) = 1$.

Eine weitere Methode zur Bestimmung von Ausfallraten liefert Pauli in [121]. Ein grundsätzliches Problem bei der Berechnung von Ausfallraten besteht in dem Umstand, dass in vielen Fällen keine oder nur unvollständige Datensätze vorhanden sind. Letzteres ist meist auf zu kurze Beobachtungszeiträume bzw. unzureichend dokumentierte Serviceintervalle oder auf nicht bekannte Grundgesamtheiten zurückzuführen. Um trotzdem Zuverlässigkeitsanalysen durchführen zu können, muss auf eigens für diese Zwecke entwickelte Verfahren zurückgegriffen werden. In [123] stellt Pauli ein geeignetes Verfahren

vor, um Zuverlässigkeitsprognosen für Kraftfahrzeugkomponenten auch bei unvollständigen Daten durchführen zu können.

Die hier vorgestellten Exponential- und Weibull-Verteilungen sind die beiden bekanntesten Vertreter von Lebensdauerverteilungen. Solche Lebensdauerverteilungen werden in der Wahrscheinlichkeitstheorie zu Modellierungszwecken benutzt, um die Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Ereignisse in der Zukunft auch dann bestimmen zu können, wenn diese physikalisch nicht hinreichend definierbar sind. Beide Verteilungen lassen sich im Übrigen auch miteinander kombinieren, um beliebige Fehlerdatenverläufe abbilden zu können.

In der Modellierung ist es oft erforderlich, logische Interaktionen sowie Fehler- und Funktionsverknüpfungen darzustellen. Hierfür wurden in der Vergangenheit verschiedene qualitative und quantitative Methoden entwickelt. Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Methoden zur Erreichung der in dieser Arbeit verfolgten Zwecke motiviert und anschließend diskutiert.

2.4.2 Qualitative und quantitative Methoden

In der Zuverlässigkeitstheorie existieren eine Vielzahl von Methoden und Verfahren, um das Eintreten von Ereignissen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu beschreiben bzw. vorherzusagen. Einige Methoden ermöglichen sowohl qualitative als auch quantitative Zuverlässigkeitsanalysen. Quantitative Analysen können allerdings nur dann durchgeführt werden, wenn hinreichend viele geeignete Informationen vorhanden sind, z. B. in Form von Test- bzw. Felddaten. Daher müssen quantitativen Zuverlässigkeitsanalysen immer qualitative Bewertungen vorgeschaltet sein. Die Zielsetzung qualitativer Systemanalysen besteht darin, das jeweils untersuchte Gesamtsystem zu verstehen, d. h., die wesentlichen Systemstrukturen und die Wirkketten einzelner sowie kombinierter Ereignisse zu bestimmen. Zur Anwendung qualitativer Methoden sind dementsprechend Systeminformationen erforderlich, die im Rahmen der Systementwicklung eines Produkts gesammelt werden. Jedes System wird dazu in seine Grundbestandteile zergliedert, um dessen grundlegende Funktion(en) sowie seine Interaktionen mit der Umwelt zu analysieren. Unter Hinzunahme der möglichen Fehlerfälle aller Komponenten können die wesentlichen Ausfallstrukturen bestimmt werden. Von Interesse ist dabei, wie sich Einfachfehler, latente Fehlerfälle und Mehrfachfehler auf das System auswirken. Die anhand

von qualitativen Methoden gewonnenen Erkenntnisse über Strukturen lassen sich z. B. anhand von Fehlerbäumen oder Markov-Ketten beschreiben und analysieren.

Im nächsten Schritt erfolgt ggf. eine mathematische Beschreibung der qualitativen Modellbildung, die ihrerseits die Grundlage für zusätzliche quantitative Auswertungen bildet. Hierzu müssen die Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Fehlerfälle bzw. Systemübergänge bekannt sein. Das Ziel der quantitativen Systemanalyse besteht darin, die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten kritischer Systemzustände zu ermitteln, um daraus Anforderungen an die Systementwicklung abzuleiten. Für Fehlerereignisse werden die Folgen und die sich daraus ergebenden kritischen Systemzustände identifiziert [1].

In der Entwicklung von Personenkraftwagen muss bereits frühzeitig eine Bewertung einzelner Funktionen und Komponenten durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird zu Beginn der Neuentwicklung eine GuR¹⁰ durchgeführt. Ein mögliches Verfahren für eine solche GuR wird in Abschnitt 2.3.3 vorgestellt und angewendet.

Im Rahmen einer GuR müssen zunächst das Wirkprinzip und auf dieser Basis die Wirkkette untersucht werden. Auf der Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen wird anschließend definiert, welche Fehlerereignisse aufgrund ihrer Gefährlichkeit für die jeweils betroffenen Komponenten bzw. für das Gesamtsystem mit welchem Aufwand vermieden werden müssen (wobei die Gefährlichkeit von der Eintrittswahrscheinlichkeit der Fehlerereignisse abhängt). Hierbei werden Grenzwerte in Form von Automotive Safety Integrity Level (ASIL) festgelegt. Ein Beispiel hierfür ist, dass die E-Maschine der elektrischen Servolenkung nie ein falsches Moment auf das Lenkgetriebe aufbringen darf. Denn die Folge wäre ggf. ein Verlassen der eigenen Spur und damit die Eigengefährdung sowie die Gefährdung des Gegenverkehrs bzw. anderer Verkehrsteilnehmer, infolgedessen es im schlimmsten Fall zu einem Unfall mit Todesfolge kommen könnte. Dieses Szenario wird in der GuR mit einem ASIL-D belegt [146] und muss mit jedem Aufwand, der zur Erzielung größtmöglicher Sicherheit erforderlich ist, vermieden werden. Dadurch ergeben sich weitreichende Anforderungen an den Entwicklungs- und Absicherungsprozess. Diese betreffen in dem hier beschriebenen Beispiel die Entwicklung der Lenkung selbst, aber auch darauf aufbauende Funktionen wie z. B. den Spurhalteassis-

¹⁰ Die Gefahren- und Risikoanalyse wird im internationalen Sprachgebrauch als Hazard Analysis and Risk Assessment, kurz HARA, bezeichnet.

tenten [61].

Auch für andere beteiligte Systeme ergeben sich erweiterte Anforderungen. Zur Umsetzung der geforderten Absicherung sowie zur abschließenden Bewertung müssen sowohl qualitative als auch quantitative Methoden eingesetzt werden.

Zur Durchführung von qualitativen sowie quantitativen Analysen eignen sich verschiedene Methoden. Im Hinblick auf qualitative Analysen sind für die Zwecke der vorliegenden Arbeit die folgenden Methoden geeignet:

- die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) sowie
- die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis (FTA)).

Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)

Die *Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)* wurde im Jahr 1960 von der NASA zur Absicherung der Apollo-Missionen entwickelt. Kurze Zeit später fand die FMEA auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie Anwendung. Basierend auf den dort gesammelten Erkenntnissen wurde im Jahr 1974 die Militärnorm MIL-P-1629 [39] veröffentlicht. Anschließend wurden in den verschiedenen Industriebereichen und Unternehmen eine Vielzahl von Normungen zur Gestaltung und Durchführung der FMEA entwickelt. In der Elektronikindustrie gilt hierzu die Norm IEC 60812 [16]. Seit dem Jahr 1977 findet die FMEA auch in der Automobilindustrie Anwendung. Diesbezüglich wurde der Standard SAE J1739 entwickelt [153]. Eine allgemeine Übersicht zur FMEA, zu ihrer Durchführung sowie zu ihrer Anwendung in unterschiedlichen Bereichen liefert [15]. Darüber hinaus existieren herstellerepezifische Fassungen wie z. B. [51].

In der Vergangenheit kam es zu verschiedenen Erweiterungen der FMEA. Der Grund hierfür ist, dass die Erfassung einzelner Fehler aufgrund der stetig zunehmenden Komplexität einzelner Komponenten und somit auch der Gesamtsysteme nur noch bedingt möglich ist. Auch die Überprüfung von Fehlern ist teilweise nur bei deren Bekanntheit möglich. Um dieser Problematik zu begegnen, werden Basisfehler von bekannten Komponentenfehlern genutzt und z. B. auf der Basis der Fuzzy-Logik miteinander kombiniert. Auf der Basis der daraus entstehenden Kombinationen werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten kritischer Fehlerkombinationen ermittelt. Liu hat in [95] 75 Veröffentlichun-

gen zum Thema Erweiterungen der FMEA auf der Grundlage der Fuzzy-Logik aus dem Zeitraum zwischen 1992 und 2012 untersucht und die wesentlichen Aspekte der einzelnen Erweiterungen zusammengefasst. Wie dabei gezeigt werden konnte, wurde die klassische FMEA in den letzten Jahren zunehmend mit der Fuzzy-Logik kombiniert, um die Eintrittswahrscheinlichkeiten ggf. kritischer Fehlerkombinationen erfassen zu können.

Auch die Automobilindustrie setzt in der Entwicklung auf eine erweiterte FMEA. Meist wird eine auf fünf oder sechs Schritten basierende FMEA eingesetzt [126]. Beide FMEAs lassen sich zwei übergeordneten Kategorien zuordnen:

1. der Systemanalyse sowie
2. der Fehleranalyse und Risikominderung.

Die *Systemanalyse* beinhaltet die Schritte 1 bis 3. Diese sind

1. die Planung,
2. die Strukturanalyse und
3. die Funktionsanalyse.

Die *Fehleranalyse und Risikominderung* beinhalten die Schritte 4 bis 6. Diese sind

4. die Fehleranalyse,
5. die Risikoanalyse und, ergänzend bei sechs Schritten,
6. die Optimierung.

Jede FMEA beginnt mit der Eingrenzung der Problemstellung. Hierbei ist zunächst eine Definition der Systemgrenzen erforderlich, um eine strukturelle Analyse zu ermöglichen. Beispielsweise wird der Betrachtungsumfang auf die kleinste Komponente begrenzt und es werden die Funktionen sowie Fehlfunktionen definiert. Basierend darauf muss im nächsten Schritt bewertet werden, welche Folgen bestimmte Fehlfunktionen für die betroffenen Komponenten selbst und das Gesamtsystem haben. Anschließend wird abgeleitet, inwieweit die zu untersuchenden Einzelfehler einen Zustand der Gefährdung verursachen. Je nach Eintretenswahrscheinlichkeit des fraglichen Ereignisses und der zuvor eingeschätzten Gefährdung wird eine Gegenmaßnahme zur Vermeidung

bzw. Verhinderung des Fehlers definiert. Dazu kann auch die Erweiterung bzw. Anpassung der Architektur gehören.

Fehlerbaumanalyse und Boolesche Algebra

Bereits im Jahr 1950 wurden die ersten Fehler- und Wirkungsanalysen anhand von Fehlerbaumstrukturen durchgeführt. Die eigentliche Fehlerbaumanalyse wurde aber erst im Jahr 1961 von H. A. Watson der Bell Laboratories entwickelt, indem er die Boolesche Algebra mit der Zuverlässigkeitstheorie kombinierte. Seitdem wird die Fehlerbaumanalyse in allen technischen Disziplinen zum Ableiten von Anforderung an Systeme sowie zur Berechnung von Fehlerwahrscheinlichkeiten eingesetzt.

Die Fehlerbaumanalyse ist eine deduktive Methode zur Systemanalyse und somit ein Top-Down-Verfahren. Unter Anwendung der Booleschen Algebra eignet sie sich auch für die Durchführung quantitativer Analysen, vor allem für exponentiell verteilte Fehler mit konstanter Ausfallrate als Eingangsgröße. Für zeitabhängige Ausfallraten $\lambda(t)$ bzw. $h(t)$ sowie für die Abbildung von Reparaturprozessen wird hingegen die Markov-Analyse angewendet. Sowohl bei der Fehlerbaumanalyse als auch bei der Markov-Analyse erfolgt der Berechnungsprozess bei nicht konstanten Ausfallraten iterativ. Die Ermittlung der allgemeinen Fehleranfälligkeit eines Systems ist zwar nicht bzw. nur durch mehrfache Berechnungssiterationen möglich. Dennoch bietet die Fehlerbaumanalyse wesentliche Vorteile. Zu nennen ist hier insbesondere die Möglichkeit zur graphischen Aufbereitung von Ereignissen, was eine einfache und logische Modellierung ermöglicht. Aufgrund dieser Vorteile stellt die Fehlerbaumanalyse eine der am häufigsten verwendeten Methoden in der qualitativen sowie quantitativen Analyse von technischen Systemen dar. Die Fehlerbaumanalyse wird in der DIN EN 61025 [13] detailliert beschrieben.

In Abbildung 2.16 ist beispielhaft ein Fehlerbaum mit den wesentlichen bzw. am häufigsten verwendeten Elementen dargestellt. Die hier dargestellte Gliederung in drei aufeinander aufbauende Ebenen lässt sich nur bei sehr einfachen Fehlerbäumen realisieren. Die oberste Ebene der Hauptereignisse ist dabei immer das resultierende Ereignis, z. B. der Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Die Elemente darunter stellen eine Verknüpfung der jeweiligen Fehlerereignisse dar und können deshalb je nach Modellierungsgrad in unterschiedlicher Reihenfolge auftreten.

In dem hier dargestellten Fehlerbaum befinden sich alle Fehlerereignisse auf

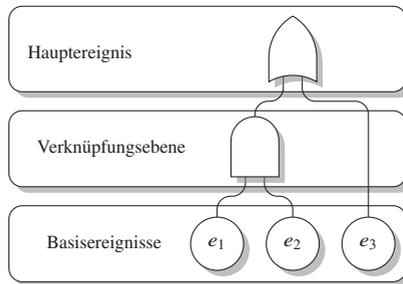


Abbildung 2.16: Exemplarische Darstellung eines Fehlerbaums mit UND- sowie ODER-Element und drei Basisereignissen

einer Ebene. Wie bereits erwähnt, können aber auch in den oberen Ebenen Basiselemente erforderlich sein. Dies hängt davon ab, welche Sub-Modelle genutzt werden. So ist bspw. der Fehlerbaum für den Generator in Abschnitt 5.3.5 aus mehreren Elementen (Mechanik, Elektrik bzw. Elektronik) aufgebaut. Dabei sind die einzelnen Teilsysteme wie z. B. die Gleichrichtung auf der Grundlage der jeweiligen Bauelemente modelliert. Die Hauptereignisse der Teilfehlerbäume – z. B. der offene, kurzgeschlossene oder degradierte Ausfall des Generators – werden anschließend in den übergeordneten Fehlerbaum der elektrischen Energieversorgung integriert. Auf diese Weise sind ein modularer Aufbau des Fehlerbaums und eine unabhängige Fehlerbaumpflege möglich. Unter der Grundannahme, dass alle Basisereignisse¹¹ voneinander unabhängig sind, eignet sich die Fehlerbaumanalyse durch die Wahl logischer Verknüpfungselemente besonders gut zur Modellierung von Wahrscheinlichkeitsereignissen. Fehler mit gemeinsamer Eintrittsursache müssen hingegen als CCF modelliert werden, da die Eintrittswahrscheinlichkeit andernfalls unterschätzt wird.

Auf der Basis der Booleschen Algebra und unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten für Fehler der Basisereignisse $P(A)$ und $P(B)$ berechnet sich die resultierende Wahrscheinlichkeit für den gleichzeitigen Eintritt beider Ereignisse im Sinne einer UND-Verknüpfung zu

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B). \quad (2.32)$$

¹¹ Als Basisereignis wird das unterste Element eines Fehlerbaums verstanden. Es kann die Wahrscheinlichkeit für einen einzelnen Fehler oder für die Kombination mehrerer Fehler beinhalten.

Die ODER-Verknüpfung berechnet sich bei gleichen Basiswahrscheinlichkeiten zu

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B). \quad (2.33)$$

Auf der Grundlage dieser beiden Verknüpfungsarten lässt sich eine Vielzahl von komplexen Fehlerstrukturen abbilden. Darüber hinaus existieren jedoch noch weitere Verknüpfungselemente. Zu nennen wären hier bspw. das invertierende Element, welches die Eingangsgröße zu $P_{Out} = 1 - P_{in}$ invertiert, oder die Exklusiv-Oder-Verknüpfung, welche definiert ist zu

$$P(A \dot{\vee} B) = P(A) + P(B) - 2 \cdot P(A \cap B). \quad (2.34)$$

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für die verschiedenen untersuchten Komponenten der elektrischen Energieversorgung mehrere Fehlerbäume erstellt. Auf der Basis dieser Fehlerbäume wurden anschließend die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen zu untersuchenden Ereignisse berechnet, z. B. für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung (vgl. hierfür Kapitel 5).

2.5 Handbücher zur Berechnung der Ausfallrate

Für die quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit ist relevant, wie häufig ein kritischer Fehler auftritt. Grundsätzlich können Fehler in allen Komponenten auftreten und dadurch zum Ausfall des Gesamtsystems führen. Im Fall von hochautomatisierten Assistenzsystemen muss insbesondere aber bekannt sein, mit welcher Wahrscheinlichkeit einzelne Bauteile in der elektrischen Energieversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher ausfallen. Denn ein Ausfall der elektrischen Energieversorgung kann besonders kritische Folgen haben.

In der vorliegenden Arbeit wird daher die Zuverlässigkeit verschiedener elektrischer Energieversorgungsarchitekturen untersucht, genauer gesagt der Teilsysteme Energiespeicher, Energiewandlung und Vernetzung. Für jedes Teilsystem wird dabei analysiert, welche Fehler mit welcher Häufigkeit auftreten und welche Auswirkungen diese haben. Im Fokus der Untersuchungen steht dabei ein Zuverlässigkeitsmodell¹² für 12V-Blei-Säure-Batterien. Dieses Modell wurde basierend auf Felddaten aus Werkstattaufzeichnungen der AUDI AG entwickelt und ermöglicht es, die Ausfallraten für konstante sowie für verschleißbedingte Fehler in Blei-Säure-Batterien abzuleiten.

Zum Zwecke der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten weiterer Elektronikkomponenten der elektrischen Energieversorgung wie z. B. dem Gleichspannungswandler stehen in der Literatur nur bedingt Felddaten zur Verfügung. Da es allerdings auch nicht möglich ist, Stichproben zu nehmen, weil in der Vorentwicklung nur Prototypen untersucht werden, wird zur Berechnung der Ausfallraten stattdessen auf Handbücher bzw. auf Zuverlässigkeitsstandards aus der Literatur zurückgegriffen. Die wesentlichen Handbücher, in denen sich Ausfallwahrscheinlichkeiten für diverse Bauelemente finden, sind – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – in Tabelle 2.2 aufgelistet. In der Automobilindustrie wird für die Berechnung von Ausfallraten vor allem die Siemens-Norm SN29500 [151] herangezogen. Mit zunehmender Komplexität der Systeme kann die SN29500 allerdings nur noch teilweise genutzt werden, da dann die Berücksichtigung aller Komponenten erforderlich ist und die SN29500 nicht alle Komponenten beinhaltet. Daher werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die folgenden weiteren Handbücher zur Berechnung von Ausfallraten herangezogen: für mechanische Komponenten das NSWC-Handbuch [111]

¹² Eine umfassende Beschreibung dieses Zuverlässigkeitsmodells findet sich in Unterkapitel 5.2.

Handbuch	Komponenten	Anwendung	Jahr
FIDES	Elektronisch	Luft- und Raumfahrt	2009
HDBK-217Plus	Elektronisch	Luft- und Raumfahrt	2015
IEC-TR-62380	Elektronisch	Luft- und Raumfahrt	2006
MIL-HDBK-217	Elektronisch	Militärisch	1990
NSWC-Handbuch	Mechanisch	Militärisch	2011
Siemens SN29500	Elektronisch	Automotive	1996
Telcordia SR-332	Elektronisch	Telekommunikation	2001

Tabelle 2.2: Zuverlässigkeitshandbücher bzw. Zuverlässigkeitsstandards zur Berechnung der Ausfallraten von verschiedenen mechanischen und elektronischen Bauelementen

sowie für elektronische Komponenten die Handbücher FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und IEC-TR-62380 [12].

2.5.1 Berechnungsmethode und Beschleunigungsmodelle

Jedes der oben genannten Handbücher liefert Modelle und Basisparameter zur Berechnung der Ausfallraten bestimmter Bauelemente. Die Berechnung der Ausfallraten erfolgt dabei auf der Grundlage der Parts-Stress-Methode. Bei dieser Methode wird die Ausfallrate über das Produkt der Referenzausfallrate λ_{ref} und der Belastungs- bzw. Stressfaktoren π_n gebildet:

$$\lambda = \lambda_{ref} \cdot \pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \dots \cdot \pi_n. \quad (2.35)$$

Die Referenzausfallrate λ_{ref} ist eine konstante Größe. Ihr Wert für die jeweiligen Bauelemente wird in den entsprechenden Handbüchern bereitgestellt. Als Belastungs- bzw. Stressfaktoren werden in Abhängigkeit vom jeweiligen Zuverlässigkeitsstandard physikalische und managementtechnische Parameter berücksichtigt. Letztere finden vor allem in FIDES verstärkt Anwendung und bilden die Reife des Herstellers, der genutzten Prozesse etc. ab.

Zur Berücksichtigung der Belastungsabhängigkeit der verschiedenen Ausfallraten werden physikalische Beschleunigungsmodelle sowie Modelle für physikalische Fehlermechanismen genutzt. Die für die Zwecke der vorliegenden Arbeit wesentlichen Modelle finden sich in [176], [8], [42] und [52]. Es handelt sich dabei um

- das Arrhenius-Modell, welches zur Berücksichtigung von Fehlermechanismen angewendet wird, die auf thermischem Stress beruhen;
- das Eyring-Modell, welches ebenfalls die thermische Belastung beschreibt, unter Hinzufügung zusätzlicher Faktoren jedoch auch für Stressbelastungen verwendet wird, die durch elektrische Spannung und Luftfeuchtigkeit verursacht werden;
- das Korrosions-Modell, welches Fehlermechanismen auf der Basis der Korrosion abbildet;
- das Black-Modell für Fehler, die durch Elektromigration verursacht werden;
- das HCI-Modell, mittels dessen die Injektion heißer Ladungsträger beschrieben wird, die häufig bei Mosfets zu beobachten ist;
- das Coffin-Manson-Modell, welches den Beschleunigungsfaktor für Fehler beschreibt, die durch thermische Ermüdung verursacht werden;
- den zeitabhängigen dielektrischen Durchbruch (TDDB), welcher spannungsinduzierte Defekte für CMOS-Bauelemente beschreibt; und
- die NBTI, welche im Wesentlichen P-Mosfets betrifft und sich auf die Störung der Drain-Region bezieht.

Die für die Zwecke der vorliegenden Arbeit relevantesten und von den Handbüchern überwiegend genutzten Beschleunigungsfaktoren beziehen sich auf das Arrhenius- und das Eyring-Modell.

Arrhenius-Modell

Das Arrhenius-Modell ist aus Beschreibungen der Reaktionsgeschwindigkeiten chemischer Prozesse bekannt. In der Zuverlässigkeitstheorie stellt das Belastungsmodell nach Arrhenius den Zusammenhang zwischen der absoluten Temperatur und der zu erwartenden Lebensdauer einer gegebenen Komponente her. Der Temperaturbelastungsfaktor ist dabei definiert zu

$$\Pi_T = A \cdot e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}. \quad (2.36)$$

Hierbei sind A der Skalierungsfaktor, E_a die Aktivierungsenergie, k die Boltzmann-Konstante, T_1 die Referenz- und T_2 die Betriebstemperatur.

Das Eyring-Modell

Das Eyring-Modell dient grundsätzlich ebenfalls zur Beschreibung der thermischen Belastung. Es wird jedoch auch genutzt, um die Ausfallrate in Abhängigkeit von der Betriebsspannung bzw. der Luftfeuchtigkeit zu berechnen. Dabei ist das Eyring-Modell für die Temperaturbelastung definiert zu

$$\Pi_T = A \cdot T^a \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T} + \left(B + \frac{C}{T}\right) \cdot S}. \quad (2.37)$$

Hierbei sind A , a , B und C Skalierungsfaktoren. E_a ist die Aktivierungsenergie, k die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur und S der jeweilige Stressfaktor. Auf die elektrische Spannung bezogen gilt:

$$\Pi_U = A \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T}} \cdot V^{-\beta}. \quad (2.38)$$

Zur Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit kann Gleichung 2.37 angegeben werden als

$$\Pi_{RH} = A \cdot e^{\frac{\Delta H}{k \cdot T}} \cdot V^{-\beta} \cdot RH^{-\gamma}. \quad (2.39)$$

In Kapitel 5 werden die im Hinblick auf die elektrische Energieversorgung wesentlichen Komponenten für die Berechnung der Zuverlässigkeit analysiert. Hierzu werden auf der Grundlage der in diesem Unterkapitel vorgestellten Ausfallratenmodelle und Handbücher die Zuverlässigkeiten der in Unterkapitel 5.2 behandelten Blei-Säure-Batterien, des in Unterkapitel 5.3 behandelten Generators und des in Unterkapitel 5.4 behandelten Gleichspannungswandlers hergeleitet und diskutiert.

3 Bewertung der Zuverlässigkeit

Um schneller mit neuen Produkteigenschaften in den Markt eintreten zu können, wird die Entwicklungszeit in der Automobilindustrie zunehmend verkürzt [75]. Im Kontext hochautomatisierter bzw. autonomer Assistenzsysteme gelten dabei im Hinblick auf alle Domänen im Kraftfahrzeug erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Aus den in den folgenden Unterkapiteln erläuterten Gründen ist die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung für hochautomatisierte Funktionen dabei von besonderer Relevanz, da sichergestellt werden muss, dass die einschlägigen Komponenten auch im Fehlerfall mit Energie versorgt werden und ihre Funktion weiterhin erfüllen können, also fail-operational sind.

In diesem Kapitel wird zunächst die Bewertung der Zuverlässigkeit im Serienprozess nach ISO 26262 vorgestellt. Danach werden bereits bekannte Methoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit im Kontext der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen diskutiert. Auf der Grundlage der hierbei gewonnenen Erkenntnisse wird anschließend eine Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der automobilen Vorentwicklung erarbeitet. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung und Erläuterung dieser Methode.

3.1 Standard ISO 26262

Für die Entwicklung und Herstellung funktional sicherer technischer Produkte müssen eine Vielzahl von Anforderungen zur Sicherstellung der Produktsicherheit und zur Gewährleistung des Sicherheitslebenszyklus erfüllt werden. Als normative Basis für die Beurteilung dieser Sicherheitsanforderungen gilt die internationale Norm IEC 61508 – *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme* – [14], welche allgemeine Methoden und Maßnahmen zur qualitativen und quantitativen Bewertung der funktionalen Sicherheit elektrischer bzw. elektronischer

Systeme liefert.

Nach [14] ist der Sicherheitslebenszyklus in 16 Phasen untergliedert. Die wesentlichen Phasen sind hierbei

1. die Konzeptphase (1),
2. die Gefährdungs- und Risikoanalyse (3),
3. die Realisierung (10) und
4. die Validierung (13).

Auf der Grundlage der IEC 61508 wurde anwendungsspezifisch für den Automobilsektor (Kraftfahrzeuge bis 3,5t) die ISO 26262 *Road Vehicles Functional Safety* [68] abgeleitet. Die ISO 26262 bildet in der Serienentwicklung die Basis für den Sicherheitslebenszyklus zur Erfüllung und zum Nachweis des funktionalen Sicherheitskonzepts. Sie umfasst den gesamten Serienentwicklungsprozess für Elektrik- und Elektronik-Systeme (EES), wobei im Mittelpunkt der Prozess nach dem V-Modell steht. Die wesentlichen Inhalte der ISO 26262 sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Insgesamt ist die ISO 26262 in zehn Bereiche aufgeteilt: In Teil 1 werden die in der Norm genutzten Begriffe und Abkürzungen definiert. In den Teilen 2 bis 7 wird der Serieneinsatz – im Wesentlichen die Feldüberwachung – geregelt, wobei insbesondere die für den Sicherheitslebenszyklus relevanten Entwicklungsschritte von EE-Systemen definiert werden. Die Teile 5 bis 8 enthalten die Grundlagen für die Zuverlässigkeitsbewertung im Serienprozess. In Teil 9 geht es um ASIL-orientierte und sicherheitsorientierte Analysen, während Teil 10 einen Leitfaden für die Benutzung der ISO 26262 darstellt. Für das Verständnis des weiteren Verlaufs der vorliegenden Arbeit ist es nützlich, eine detailliertere Betrachtung der Teile 2 bis 8 vorzunehmen:

Nach der Definition der einschlägigen Begriffe und Abkürzungen in Teil 1 werden in Teil 2 der ISO 26262 management- und prozessspezifische Schwerpunkte in Bezug auf die funktional sichere Entwicklung gesetzt. Der Fokus liegt dabei auf der unabhängigen Aufteilung des Sicherheitslebenszyklus innerhalb der Organisation, also auf der Definition von Rollen und unterschiedlichen Personen, der Aufteilung von Verantwortlichkeiten, einer klaren Strukturierung von der Systementwicklung bis hin zur Produktvalidierung etc. Des Weiteren wird definiert, welche Sicherheitsnachweise während der Entwicklung zu erbringen sind.

Die Zielsetzung von Teil 3 besteht in der Definition eines funktionalen Si-

1. Vocabulary			
2. Management of functional safety			
2-5 Overall safety management	2-6 Safety management during the concept phase and the product development	2-7 Safety management after the item's release for production	
3. Concept phase	4. Product development at the system level		7. Production and operation
	5. Product development at the hardware level		
3-5 Item definition	4-5 Initiation of product development at the system level	4-11 Release of Production	7-5 Production
3-6 Initiation of the safety lifecycle	4-6 Specification of the technical safety requirements	4-10 Functional safety assessment	7-6 Operation, service (maintenance and repair) and decommissioning
3-7 Hazard analysis and risk assessment	4-7 System design	4-9 Safety validation	
3-8 Functional safety concept		4-8 Item integration and testing	
	5-5 Initiation of product development at the hardware level	6-5 Initiation of product development at the software level	
	5-6 Specification of hardware safety requirements	6-6 Specification of software safety requirements	
	5-7 Hardware design	6-7 Software architectural design	
	5-8 Evaluation of the hardware architectural metrics	6-8 Software unit design and implementation	
	5-9 Evaluation of the safety goal violations due to random hardware failure	6-9 Software unit testing	
	5-10 Hardware integration and testing	6-10 Software integration and testing	
		6-11 Verification of software safety requirements	
8. Supporting process			
9. ASIL-oriented and safety-oriented analyses			
9-5 Requirements decomposition with respect to ASIL tailoring	9-6 Criteria of coexistence of elements	9-7 Analysis of dependent failure	9-8 Safety analyses
10. Guideline on ISO26262			

Abbildung 3.1: Inhaltsübersicht der ISO 26262, in Anlehnung an die Darstellung von [68]; Detailangaben für Teil 8 der ISO sind hier nicht dargestellt.

cherheitskonzepts. Zu Beginn werden die wesentlichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Komponenten mit dem Fahrzeugsystem erörtert. Bezüglich der anschließenden Initialisierung des Sicherheitslebenszyklus wird zwischen der Entwicklung neuer und der Veränderung bereits bestehender Komponenten unterschieden. Je nach Umfang der Veränderungen kann dabei ggf. eine Proven-in-Use-Argumentation angewendet werden, welche auf der Auswertung von Felddaten aufbaut und in der damit argumentiert wird, dass

eine Komponente hinreichend selten fehlerhaft wird, sodass durch den Nachweis aus dem Feld die Zuverlässigkeit bestätigt werden kann [145]. Handelt es sich um eine umfangreiche Änderung oder sogar um die Neuentwicklung einer Komponente, folgt eine Gefahren- und Risikoanalyse (GuR). Im Rahmen dieser werden die Fehlfunktionen der wesentlichen Fahrzeugsysteme mittels drei Hauptkategorien und je einer zugehörigen Unterkategorie bewertet. Diese sind

- die Fehlerauswirkung (classes of severity),
die von „keine Verletzungen (S0)“ bis „lebensbedrohliche Verletzungen (S3)“ reicht;
- die Eintrittswahrscheinlichkeit (classes of probability of exposure),
die von „unwahrscheinlich (E0)“ bis „hohe Wahrscheinlichkeit (E4)“ reicht; und
- die Kontrollierbarkeit (classes of controllability),
die von „grundsätzlich kontrollierbar (C0)“ bis „schwer oder nicht kontrollierbar (C3)“ reicht.

Aus der GuR werden als Zielgrößen die Sicherheitsziele und damit das funktionale Sicherheitskonzept für die fraglichen Komponenten in ihrem jeweiligen Systemkontext abgeleitet.

Teil 4 der ISO 26262 umfasst die Produktentwicklung auf Systemebene. Zu Beginn werden die technischen Sicherheitsanforderungen definiert. Darauf folgen die Ableitung der Systemspezifikationen sowie die Erstellung des Systemdesigns. Die Produktentwicklung auf Systemebene rahmt die Hauptdomänen Hardware- und Softwareentwicklung ein. Teil 4 der ISO 26262 beinhaltet in dieser Hinsicht die Endphasen des V-Modells und somit die Aspekte „Integration der Domänen“ und „Sicherheitstests zur Freigabe“.

In Teil 5 und 6 der ISO 26262 erfolgt der Entwicklungsprozess entlang jeweils eigener V-Modelle, wobei über das Hardware-Software-Interface (HSI) eine enge Verzahnung zwischen den beiden Hauptdomänen hergestellt wird. Während die Zielsetzung von Teil 5 in der Hardware-Integration und in der Durchführung von abschließenden Tests besteht, liegt das Hauptaugenmerk in Teil 6 auf der Zuverlässigkeitsbewertung der Software. Letztere stellt ein eigenes und umfangreiches Themenfeld dar, auf das an dieser Stelle nicht

näher eingegangen werden soll. Hilfreiche Informationen zu wesentlichen Untersuchungen bzw. Methoden können jedoch [132], [25] und [83] entnommen werden.

In der Serienentwicklung wird das V-Modell iterativ, auf der Basis der jeweiligen Musterstände, durchlaufen. Typischerweise beginnt die Entwicklung mit A-Mustern als einem ersten Prototypen für die Serienentwicklung, worauf B- und C-Muster folgen. Der Entwicklungsprozess wird mit dem letzten Musterstand abgeschlossen, d. h., es wird die Serienfreigabe erteilt.

In den nachfolgenden Teilen 5 bis 8 der ISO 26262 wird die Vorgehensweise bezüglich der Zuverlässigkeitsbewertung im Serienprozess erläutert und diskutiert. Da die dort vermittelten Inhalte für den weiteren Fortgang der hier anzustellenden Überlegungen von besonderer Relevanz sind, werden sie im folgenden Abschnitt detailliert betrachtet.

3.1.1 Zuverlässigkeitsbewertung nach ISO 26262

Ein funktional sicherer Entwicklungsprozess erfordert die Prüfung und den Nachweis der Einhaltung eines Sicherheitskonzepts. Die ISO 26262 gibt diesbezüglich keinen spezifischen methodischen Ansatz vor, sondern verweist generell auf die in der Zuverlässigkeitstechnik verwendeten Methoden (für eine Übersicht über die gängigen qualitativen und quantitativen Methoden vgl. Abschnitt 2.4.2).

In der Automobilindustrie werden als qualitative Methoden vor allem FMEAs sowie Fehlerbäume eingesetzt [168], [126], [51], [15], [169]. Letztere stellen die Grundlage für quantitative Bewertungsprozesse dar. Ein umfangreicher Vergleich zwischen den verschiedenen Bewertungsmethoden (FTA, Markov, Petri-Netz-Modell usw.) wurde in [1] erarbeitet. Abele beschreibt zusätzlich auch die Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung von Personenkraftwagen auf der Grundlage von Markov-Prozessen.

Unabhängig von der gewählten Methode wird von der ISO 26262 als integralem Bestandteil der Zuverlässigkeitsbewertung die Berechnung von Fehlermetriken gefordert. Hierbei ist es wichtig, zunächst zwischen den verschiedenen Arten von Fehlern zu unterscheiden:

- sichere Fehler λ_S ,
- Einfachfehler λ_{SPF} bzw. Restfehler λ_{RF}

- Mehrfachfehler λ_{MPF} (auffindbar oder latent).

Im nächsten Schritt werden auf der Grundlage der abgeleiteten und mittels Risikobewertung eingestuften Sicherheitsziele für die verschiedenen Fehlerarten Zielwerte definiert, die unterschritten bzw. eingehalten werden müssen. Maßgebend für die Metriken der ISO 26262 zur Bewertung der Zuverlässigkeit sind hierbei die Ausfallwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Fehlerkategorien. Diese werden über eigene quantitative Auswertungen auf der Grundlage der jeweils vorliegenden Entwicklungsdaten (Schaltpläne, Bauteilinformationen etc.) berechnet. Entscheidend ist dabei die Wahrscheinlichkeit für die Verletzung eines Sicherheitsziels.

Auf der Basis der Ausfallwahrscheinlichkeiten werden im nächsten Schritt die Ausfallraten bestimmt. Die Ausfallrate λ für sicherheitsrelevante Hardware-Elemente setzt sich aus den Ausfallraten für die oben genannten Fehlerarten zusammen:

$$\lambda = \lambda_{SPF} + \lambda_{RF} + \lambda_{MPF} + \lambda_S. \quad (3.1)$$

Dabei setzt sich λ_{MPF} aus der Ausfallrate der erkannten Mehrfachfehler $\lambda_{MPF,DP}$ und der Ausfallrate der latenten Fehler $\lambda_{MPF,L}$ zusammen:

$$\lambda_{MPF} = \lambda_{MPF,DP} + \lambda_{MPF,L}. \quad (3.2)$$

Die Ausfallrate der Restfehler berechnet sich auf der Grundlage des Diagnosedeckungsgrades (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.2) zu

$$\lambda_{RF} \leq \lambda_{RF,est} = \lambda \cdot \left(1 - \frac{K_{DC,RF}}{100} \right). \quad (3.3)$$

$$\text{mit } K_{DC,RF} = \left(1 - \frac{\lambda_{RF,est}}{\lambda} \right) \cdot 100. \quad (3.4)$$

Hierbei sind λ_{RF} die geschätzte Ausfallrate in Bezug auf Restfehler und $K_{DC,RF}$ der Diagnosedeckungsgrad in Prozent.

Die Fehlerrate in Bezug auf latente Fehler berechnet sich ebenfalls unter Berücksichtigung des Diagnosedeckungsgrades (vgl. hierfür Gleichung 3.6):

$$\lambda_{MPF,L} \leq \lambda_{MPF,L,est} = \lambda \cdot \left(1 - \frac{K_{DC,MPF,L}}{100}\right). \quad (3.5)$$

$$\text{mit } K_{DC,MPF,L} = \left(1 - \frac{L_{MPF,L,est}}{\lambda}\right) \cdot 100. \quad (3.6)$$

Die angenommene Ausfallrate und der Diagnosedeckungsgrad in Bezug auf latente Fehler sind dabei $\lambda_{MPF,L,est}$ und $K_{DC,MPF,L}$. Die Metriken zur Bewertung der Zuverlässigkeit berechnen sich aus dem Verhältnis der Ausfallraten. Die Einfachfehlermetrik berechnet sich über

$$M_{SPF} = 1 - \frac{\sum_{SR,HW} (\lambda_{SPF} + \lambda_{RF})}{\sum_{SR,HW} \lambda} \quad (3.7)$$

$$= \frac{\sum_{SR,HW} (\lambda_{MPF} + \lambda_S)}{\sum_{SR,HW} \lambda}. \quad (3.8)$$

Die Metrik für latente Fehler wird berechnet mit

$$M_{MPF,L} = 1 - \frac{\sum_{SR,HW} (\lambda_{MPF,latent})}{\sum_{SR,HW} (\lambda - \lambda_{SPF} - \lambda_{RF})} \quad (3.9)$$

$$= \frac{\sum_{SR,HW} (\lambda_{MPF,p,d} + \lambda_S)}{\sum_{SR,HW} (\lambda - \lambda_{SPF} - \lambda_{RF})}. \quad (3.10)$$

Hierbei ist $\lambda_{MPF,p,d}$ die Ausfallrate für wahrgenommene bzw. entdeckte Fehler.

Auf der Grundlage der so berechneten Metriken für Einfach- und Mehrfachfehler wird der Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsziele erbracht. In der ISO 26262 finden sich diesbezüglich die in Tabelle 3.1 angeführten Zielwerte.

Zielwerte	ASIL-B	ASIL-C	ASIL-D
Ausfallrate λ	$< 10^{-7} h^{-1}$	$< 10^{-7} h^{-1}$	$< 10^{-8} h^{-1}$
Einfachfehlermetrik λ_{MSPF}	$\geq 90\%$	$\geq 97\%$	$\geq 99\%$
Mehrfachfehlermetrik λ_{MMPF}	$\geq 60\%$	$\geq 80\%$	$\geq 90\%$

Tabelle 3.1: In der ISO 26262 empfohlene Werte für Ausfallwahrscheinlichkeiten sowie Gewichtungen der Metriken für Einfach- und Mehrfachfehler

3.1.2 Vorbedingungen für die Bewertung der Zuverlässigkeit

Im vorigen Abschnitt wurde erörtert, wie auf der Grundlage von Fehlermetriken die Berechnung der quantitativen Zuverlässigkeit möglich ist, die ihrerseits als Beurteilungsmaßstab bei der Entwicklung funktional sicherer Komponenten dient. Um diese Berechnungen überhaupt durchführen zu können, ist es – wie nun gezeigt werden soll – jedoch erforderlich, umfangreiche Eingangsinformationen zu jedem Entwicklungsschritt einzuholen. Als Grundlage bzw. Quelle für diese Informationen dienen komponentenspezifische Lastenhefte, die von der Fahrzeugentwicklung abgestimmte Spezifikationen über die jeweiligen Anforderungen enthalten und als Eingangsgrößen für die Komponententwicklung dienen. Der Umfang und die Qualität dieser Informationen hängt von der Organisation zwischen den Fahrzeugherstellern und ihren Zulieferunternehmen ab.

In Abbildung 3.2 sind die notwendigen Eingangsinformationen für die wesentlichen Entwicklungsschritte dargestellt. Wie aus der Abbildung hervorgeht, muss ein Großteil der Anforderungen an die Komponenten sowie an die jeweiligen Randbedingungen bereits zum Zeitpunkt der Konzeptentwicklung bekannt sein. Die Anforderungen an die Komponenten müssen dabei, wie oben beschrieben, in Lastenheften spezifiziert werden, da sie einen Großteil der für die Bewertung notwendigen Informationen zur Verfügung stellen. Ohne diese Lastenhefte bzw. eine genauere Spezifikation der Komponenten ist keine Anwendung des Sicherheitslebenszyklus nach ISO 26262 möglich.

Die bisherigen Ausführungen zusammenfassend lässt sich also sagen: Neben der angewendeten Methode sind für die Erstellung der Zuverlässigkeitsbewertung vor allem die zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten genutzten Ausfallraten wesentlich. Hierzu nennt die ISO 26262 als Datenquellen Gewähr-

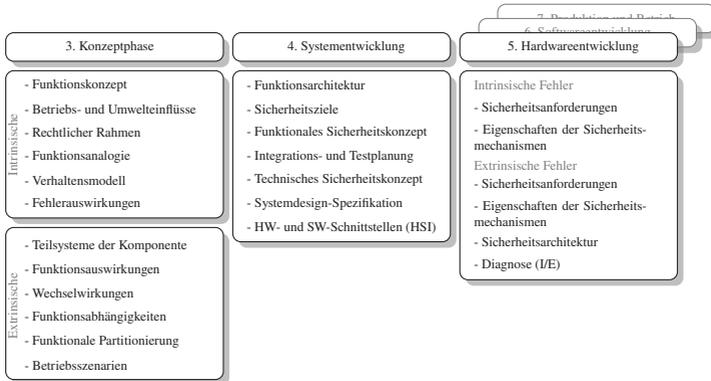


Abbildung 3.2: Zu erfüllende Anforderungen für die Durchführung einer Zuverlässigkeitsbewertung im Serienentwicklungsprozess nach ISO 26262 [68]

leistungsdaten, Ausfallratenhandbücher und Expertenschätzungen. Die oben ausführlich erörterte Berechnung der Basisfehlerraten für sichere Fehler bzw. für Einfach- und Mehrfachfehler erfolgt über die aus Systemschaltplänen erarbeiteten Wirkmechanismen bzw. Wechselwirkungen und Fehlerauswirkungen. Hierbei ist ein hoher Detailgrad notwendig, da jedes Bauelement, dessen Ausfall ein Sicherheitsziel verletzen würde, in der Bewertung Berücksichtigung finden muss.

3.2 Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung

In diesem Unterkapitel werden zunächst die Prozessschritte der Vorentwicklung erläutert. Vor diesem Hintergrund werden die Probleme und Herausforderungen erörtert, die im Hinblick auf die Durchführung von Zuverlässigkeitsbewertungen in der Vorentwicklung zu bewältigen sind. Anschließend werden mögliche Lösungskonzepte diskutiert und es wird eine Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung abgeleitet.

3.2.1 Prozessschritte in der Vorentwicklung

Die Vorentwicklungsphase ist ein Teil des Produktentstehungsprozess (PEP) in der Automobilindustrie. Sie dient zur Entwicklung neuer Lösungsansätze sowie zur möglichst frühzeitigen Klärung der Frage, welche dieser Lösungsansätze in der Serienentwicklung realisiert werden können [137]. Während es in der Serienentwicklung um die iterative Produktoptimierung und die Integration von neuen Komponenten in das Gesamtfahrzeug bis zur Produktfreigabe geht, besteht die Zielstellung in der Vorentwicklung darin, eine Entscheidungsgrundlage für den Beginn einer Serienentwicklung nach PEP zu liefern. Dementsprechend sind die wesentlichen Aktivitäten in der Vorentwicklung

- die Ideenfindung,
- die Produktdefinition und
- die Projektevaluierung.

Die Vorentwicklung ist organisatorisch von der Serienentwicklung entkoppelt und besitzt eine eigene Struktur. Im Gegensatz zur Serienentwicklung sollen in der Vorentwicklung mögliche Konzepte aus der Forschung im Systemkontext bewertet werden. Zudem sollen Spezifikationen der Komponenteneigenschaften entwickelt sowie Anforderungen an neue Komponenten bzw. Modifikationen von Anforderungen an bestehende Komponenten abgeleitet werden. In Abbildung 3.3 ist das V-Modell der Produktentwicklung nach [170] mit dem an die Vorentwicklung angepassten V-Modell dargestellt. In der Serienentwicklung soll die Produktentwicklung innerhalb eines Zeitraums von drei bis fünf Jahren abgeschlossen werden. Diese Frist kann nur eingehalten werden, wenn bereits zu Beginn der Serienentwicklung umfangreiche und genau spezifizierte Anforderungen vorliegen. Um diese Anforderungen zu erarbeiten, werden Vorentwicklungsprojekte und Studien initiiert, in denen eine frühzeitige Untersuchung der Frage vorgenommen wird, welche wesentlichen Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten des Systems bestehen [75]. Folgend sind die wesentlichen Prozessschritte der Vorentwicklung nach [178] zusammengefasst:

1. Identifikation des technologischen Potentials
2. Generierung und Bewertung der technischen Ideen

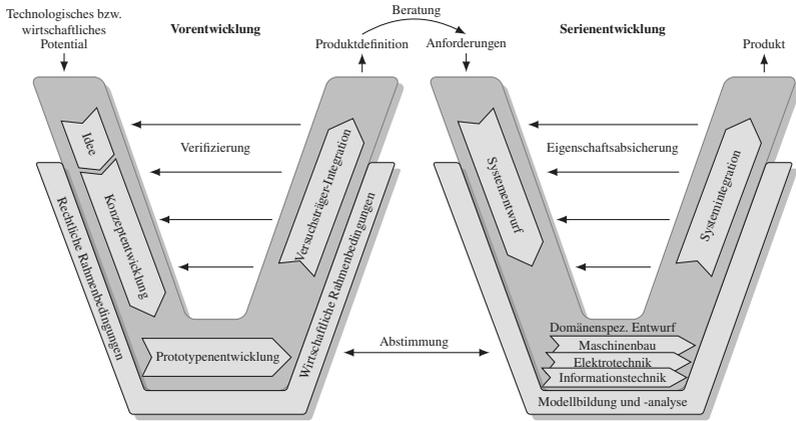


Abbildung 3.3: Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen Vor- und Serienentwicklung innerhalb des Entwicklungsprozesses auf der Grundlage des V-Modells nach [170]

3. Entwicklung und Vergleich technischer Konzepte
4. Design und Aufbau von Prototypen
5. Verifizierung (Bewertung der technischen Umsetzbarkeit)
6. Klärung rechtlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen
7. Direkter Austausch mit Serienabteilungen

Die Hauptziele der Vorentwicklung sind im Wesentlichen der Funktionsnachweis sowie eine erste wirtschaftliche Einschätzung. Unabhängig davon, ob es um eine neue Funktion, eine neue Komponente oder ein neues System geht, müssen die sich ergebenden Problem- und Fragestellungen identifiziert und gelöst bzw. beantwortet werden, um neue Ideen realisieren zu können. Zur Verifizierung der entsprechend aufgestellten Hypothesen werden im Zuge der Vorentwicklung prototypische Systeme aufgebaut. Zusätzlich werden im Hinblick auf die fahrzeugspezifische Umgebung essentielle Anforderungen erarbeitet. Diese dienen als wesentliche Eingangsgrößen für die Serienentwicklung, entweder zur Änderung bestehender oder zur Entwicklung neuer Komponenten.

3.2.2 Diskussion der Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung nach aktuellem Stand

Wie in den vorigen Unterkapiteln und Abschnitten geschildert, erfolgt die Zuverlässigkeitsbewertung in der Serienentwicklung auf der Grundlage der ISO 26262. In der Vorentwicklung kann diese Norm aufgrund der deutlich geringeren Anforderungstiefe sowie aufgrund abweichender Zielsetzungen jedoch nur bedingt angewendet werden. Zusätzlich existiert für die Automobilindustrie und insbesondere für die Komponenten der elektrischen Energieversorgung kein eigener Standard für Ausfallraten bzw. zur Komponentenzuverlässigkeit. Darüber hinaus wird eine umfassende Zuverlässigkeitsbewertung dadurch erschwert, dass die dafür erforderlichen Daten über eine lange Zeit hinweg und mit einer hohen Erfassungsrate aufgenommen werden müssen, da jede Veränderung in den Bauteil- und damit Steuergeräteparametern die Zuverlässigkeit negativ beeinflussen kann. Über lange Beobachtungszeiträume hinweg hohe Erfassungsraten aufrechtzuerhalten, ist jedoch nicht nur mit hohem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden, sondern in der Praxis auch deshalb nahezu unmöglich, weil eine Untersuchung der fraglichen Komponenten bzw. ein Zugang zu den dabei erfassten Daten in verlässlicher und umfassender Weise nur über Vertragswerkstätten möglich ist. Viele Kunden wechseln nach Ablauf der Garantie aber zu freien Werkstätten. Die daraus resultierende Datenlücke ist nur schwer zu kompensieren. Hinzu kommt, dass viele Komponenten, die im Automotive-Bereich zum Einsatz kommen, hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit in der Literatur nicht ausreichend beschrieben werden. Auch Komponenten, die bereits seit längerem in Serienproduktion sind, wurden hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit bisher nur unzureichend untersucht. Der Mangel an entsprechenden Informationen ist darauf zurückzuführen, dass viele Komponenten keine Sicherheitseinstufung erhalten. Für einen Großteil der Verbraucher gelten somit Qualitätsmanagement (QM)-Anforderungen, weshalb diese Verbraucher auch als QM-Verbraucher bezeichnet, eingestuft und nach entsprechenden Qualitätsansprüchen entwickelt werden. Fehler können dementsprechend in großer Häufigkeit auftreten, werden jedoch nicht aufgezeichnet bzw. dokumentiert. Vor dem Hintergrund dieses Mangels an Daten und der sich daraus ergebenden Probleme sollen im Folgenden mögliche Quellen für die Entwicklung einer Methode vorgestellt und diskutiert werden, um die soeben beschriebenen Lücken zumindest teilweise zu schließen. Zu diesem Zweck soll zunächst ein näherer Blick auf die Unterschiede zwischen der

Serien- und der Vorentwicklung geworfen werden, um die sich daraus ergebenden Einschränkungen bei der Umsetzung von Zuverlässigkeitsbewertungen in der Vorentwicklung herauszuarbeiten. Wie sich zeigen wird, ist es wesentlich, nicht nur die Ausfallhäufigkeiten für jede Komponente, sondern auch die entsprechenden Fehlerarten bzw. die Verteilungen der ursächlichen Fehlerarten zu identifizieren. Hierfür werden Unterschiede der Fehlerverteilungen ausgewertet und fehlende Zuverlässigkeitsmodelle aus Feld- und Handbuchdaten erstellt. Das Unterkapitel schließt mit der Beschreibung und Diskussion fehlender Zuverlässigkeitsmodelle für Energiespeicher im Kraftfahrzeug.

Einschränkungen der ISO 26262

Beim direkten Vergleich zwischen Serien- und Vorentwicklung zeigen sich wesentliche Unterschiede. Die in der Vorentwicklung untersuchten Komponenten dienen in erster Linie dem Funktionsnachweis und weisen daher einen prototypischen Charakter auf. Anders als in der Serienentwicklung stehen in der Vorentwicklung Informationen dementsprechend nur mit einem eher geringen Detaillierungsgrad zur Verfügung. Da in der Vorentwicklung primär auf Funktionserfüllung und nicht auf Absicherung abgezielt wird, lassen sich keine Fehleranalysen mit hohem Detailgrad durchführen. Nicht zuletzt auch aufgrund des limitierten Kosten- und Zeitrahmens ist in der Vorentwicklung somit keine vollumfängliche, funktional sichere Entwicklung und Zuverlässigkeitsbewertung nach ISO 26262 darstellbar.

Die Elektronik-Hardware beispielsweise wird primär mit Blick auf die Funktionserfüllung entwickelt; ein Absicherungskonzept hinsichtlich der Zuverlässigkeit existiert nur in Grundzügen. Auch auf der Basis von Vorentwicklungsschaltplänen können keine inhaltlich korrekten Berechnungen von Hardware-Metriken erstellt werden. Mit Blick auf die Software verhält es sich nicht anders. Hinzu kommt, dass in der Vorentwicklung nicht auf die Verwendung von Bauelementen geachtet wird, die für den Automobilsektor zugelassen und qualifiziert sind. Dies betrifft Funktionsmuster ebenso wie elektrische bzw. elektronische und mechanische Bauelemente. Die Berechnung der Metriken auf der Grundlage der Gleichungen 3.10 und 3.8 würde aufgrund unzureichender Informationen über die Gesamtfehler stark abweichende und somit schlecht interpretierbare bzw. vergleichbare Ergebnisse liefern. Je nachdem, in welchem Detailgrad die Komponenten und deren Gesamtfehler berücksichtigt werden, fallen die Ergebnisse von Auswertungen auf einer solchen Datenba-

sis entweder deutlich zu pessimistisch oder aber deutlich zu optimistisch aus. Beispiele wie diese illustrieren, weshalb nur Teile der Bewertungsmetriken der ISO 26262 in der Vorentwicklung angewendet werden können und weshalb es schwierig ist, Aussagen über die Zuverlässigkeit von Komponenten im Allgemeinen und insbesondere von solchen für die elektrische Energieversorgung in der Vorentwicklung zu treffen.

3.2.3 Datenquellen der Ausfallraten

Um trotz dieser Schwierigkeiten Zuverlässigkeitsbewertungen vornehmen zu können, muss auf andere Mittel zurückgegriffen werden. Eine Strategie besteht darin, sich auf Ausfallraten zu beziehen. Zur Bestimmung von Ausfallraten ist entscheidend, wie häufig die fragliche Komponente bzw. das fragliche Bauelement oder die gesamte Baugruppe während eines gewissen Beobachtungszeitraums ausfallen. Die Ausfalldaten, auf deren Basis die Ausfallraten berechnet werden, können aus folgenden Quellen gewonnen werden:

- Felddaten,
- Labortests,
- Handbücher,
- parametrische Abschätzungen und
- Expertenschätzungen.

Die Berechnung von Ausfallraten auf der Basis von *Felddaten* ist stark von der Datenqualität abhängig. Realitätsnahe Ergebnisse lassen sich nur bei guter Datenqualität erzielen. Von Vorteil bei dieser Methode ist jedoch, dass in den Daten bereits die spezifisch auftretenden Belastungen und Umgebungsbedingungen enthalten sind.

Die Berechnung von Ausfallraten aus Felddaten von Fahrzeugkomponenten ist häufig nicht trivial. Die Datengrundlage hierfür bilden im Wesentlichen Werkstattaufzeichnungen über Fahrzeuguntersuchungen zu Inspektions- und Wartungszwecken, die in entsprechenden Intervallen durchgeführt werden. Bei diesen Untersuchungen wird zwar eine große Menge von Diagnoseinformationen aufgezeichnet; allerdings werden aufgrund von Fehlern ausgefallene Kom-

ponenten meist getauscht, ohne dass die Fehlerursache untersucht wird [110]. Dies resultiert in unvollständigen Informationen über die tatsächlichen Fehlerursachen, was die Berechnung der spezifischen Ausfallrate für eine bestimmte Fehlerart aus Felddaten oft unmöglich macht. Problematisch bei der Ermittlung von Ausfallraten aus Felddaten ist zudem auch die relativ kurze Beobachtungszeit, da Ausfälle häufig nur während der Garantiezeit vollständig erfasst werden [120]. Datensätze über Gewährleistungsfälle sind von dieser Problematik zwar nur teilweise betroffen. Treten Fehlerbilder vermehrt auf, müssen die Hersteller schon aus ökonomischen Gründen umfassende Untersuchungen anstellen, um die Probleme zu beheben. Doch auch Ausfallhäufigkeiten aus Gewährleistungsdaten können nur eingeschränkt zur Berechnung von Ausfallraten genutzt werden. Dies rührt daher, dass die Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Fehlerursachen sowie die Unterscheidung zwischen Produktions- und Entwicklungsfehlern unbeachtet bleiben, da alle diese Ursachen zu Rückrufaktionen führen, wenn die von ihnen hervorgerufenen Fehler im Feld zu häufig auftreten oder kritisch sind [34], [156], [97], [177]. Weitere Probleme treten auf, wenn Fehler auf der Grundlage der vorliegenden Daten nicht plausibilisierbar sind, die Datenmenge zu gering ist oder schlicht gar keine Fehler gefunden werden. All diese Umstände führen zu unvollständigen Daten über die tatsächlichen Fehlerursachen, die dementsprechend nur bedingt als Grundlage für Zuverlässigkeitsbewertungen geeignet sind.

Ausfallraten, die aufgrund von Ausfalldaten aus *Labortests* bzw. Laborversuchen ermittelt werden, sind ebenfalls problematisch, da die dort beobachteten Fehler häufig nicht von zufälligen Ausfällen abgrenzbar sind. Dies liegt zum einen darin begründet, dass unter Laborbedingungen Fehlermoden gefördert werden können, die bei Feldbelastung nicht auftreten, und zum anderen daran, dass erhöhte Stressbelastungen häufiger zu systematischen Ausfällen führen [133]. Die Stressfaktoren müssen in Laborversuchen deshalb so gewählt werden, dass Zufallsausfälle gefördert werden.

Ein Vorteil von Laborversuchen besteht in der einfachen Anwendbarkeit bei Elektronikbauelementen, wobei mehrere Bauelemente gleichzeitig bzw. ganze Steuergeräte getestet werden können. Für die Untersuchung von Baugruppen sind Laborversuche hingegen nur begrenzt geeignet, da die Grundgesamtheit, die erforderlich wäre, um auch Fehler mit kleinen Ausfallraten beobachten zu können, schnell eine realistisch testbare Menge übersteigt. Für einen Großteil der Zuverlässigkeitsberechnungen für elektronische Komponenten werden daher Ausfallraten aus *Handbüchern* genutzt. Die zur Erstellung der vorliegenden Arbeit genutzten Handbücher werden in Unterkapitel 2.5 erläutert.

Vorteilhaft bei der Nutzung von Daten aus Handbüchern ist, dass diese einfach anzuwendende Alterungs- und Stressmodelle zur Ermittlung von Ausfallraten enthalten, welche es je nach Standard zulassen, mehrere Belastungsfaktoren zu berücksichtigen. Jedes Handbuch beinhaltet eigene Berechnungsvorschriften und Modelle, welche in Kombination mit gegebenen Basisfaktoren und zu erwartenden Belastungen eine relativ einfache Berechnung von Ausfallraten ermöglichen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass jedes Handbuch auf eigene Datengrundlagen zurückgreift, was dazu führt, dass die Absolutwerte stark streuen. Zudem ist zu beachten, dass jeder Standard unterschiedlich sensitiv auf Parameteränderungen reagiert [118], [104], [81], [73], [62].

Alle in dieser Arbeit verwendeten Handbücher bilden die in Abschnitt 2.5.1 beschriebenen Belastungs- und Stressfaktoren auf der Grundlage der Arrhenius-Gleichung ab. Die sich daraus ergebende Einschränkung bezüglich der Anwendbarkeit auf temperaturunabhängige Fehlermechanismen wird in [115] beschrieben, wobei in Bezug auf die Elektronikfertigung vor allem auf Fehler wie elektrisch leitende Fehlstellen und Ermüdungsbrüche der Kontaktierungen eingegangen wird. Beide Fehlermechanismen werden in den verwendeten Handbüchern nur bedingt berücksichtigt.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass Annahmen über Fehlerverteilungen sowie Fehlerverteilungen, die auf Labortests beruhen, nicht notwendigerweise der Situation im Feld entsprechen müssen, da Komponenten in der Automobilindustrie spezifischen Belastungen ausgesetzt sind und es dadurch zu abweichenden Fehlerverteilungen kommen kann. In diesem Zusammenhang wurden vom Autor 55.390 Generatoren sowie die 332.028 darin verbauten Gleichrichterioden in Bezug auf ihre spezifischen Fehlerbilder untersucht [109]. Dabei wurden ca. 70 Prozent der Dioden gealtert und 30 Prozent der Dioden kurzgeschlossen vorgefunden. Im Vergleich hierzu gibt [18] eine Fehlerverteilung von 70 Prozent kurzgeschlossener, 20 Prozent offener und 10 Prozent mit Parameterveränderung ausgefallener Zener-Dioden an. Ein derart deutlicher Unterschied muss sich nicht für alle in Kraftfahrzeugen verbauten Komponenten ergeben; die Möglichkeit solcher Abweichungen sollte in Zuverlässigkeitsanalysen jedoch unbedingt bedacht werden.

Als weitere Verfahren zur Erhebung von Ausfallraten können *parametrische Abschätzungen* sowie *Expertenschätzungen* dienen. Werte, die auf der Basis von parametrischen bzw. Expertenschätzungen beruhen, sind zwar grundsätzlich akzeptiert. Man muss jedoch bedenken, dass Schätzungen immer nur so genau sind wie die ihnen zugrunde liegenden Informationsquellen. Die tatsäch-

lich auftretenden Ausfallraten müssen daher anhand von Test- und Felddaten nachgewiesen werden.

Energiespeicher im Kontext der Zuverlässigkeit

Im Bereich der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen werden als Energiespeicher in der 12V-Spannungsebene nach wie vor am häufigsten Blei-Säure-Batterien eingesetzt. Für die Bewertung der Zuverlässigkeit dieser Batterien ist die Ausfallrate maßgebend, also die Häufigkeit, mit der Fehler auftreten. In bisherigen Arbeiten zu Blei-Säure-Batterien wurden auf der Grundlage von Feldstudien mit ca. 800 Absorbent Glass Mat (AGM)-Batterien konstante Ausfallraten ermittelt [3].

Wie alle Energiespeicher unterliegen auch Blei-Säure-Batterien Alterungseffekten, wobei zum einen die kalendarische und zum anderen die zyklische Alterung zum Tragen kommen. Beide Alterungsmechanismen führen zur Abnahme der Kapazität und somit zum Verschleiß des Energiespeichers. Wie in Unterkapitel 2.4 gezeigt wurde, sind die Ausfallraten von verschleißbehafteten Komponenten nicht konstant. Da für eine ganzheitliche Zuverlässigkeitsbewertung der elektrischen Energieversorgung die verschleißbedingte Ausfallrate von Blei-Säure-Batterien bekannt sein muss, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf der Grundlage von Werkstattaufzeichnungen ein eigenes Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien entwickelt (vgl. hierzu Unterkapitel 5.2).

3.2.4 Zusammenfassung

Da sie in einer frühen Phase der Entwicklung durchgeführt wird, kann man für eine Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung auf deutlich weniger Informationen über die fraglichen Komponenten und deren spezifische Belastungen zurückgreifen als in der Serienentwicklung. In der Vorentwicklung besteht die maßgebliche Zielgröße im Ermitteln der wesentlichen Anforderungen an neue Komponenten und Systeme. Für eine Zuverlässigkeitsbewertung, wie sie im Serienprozess nach ISO 26262 durchgeführt wird, stehen dabei die notwendigen Eingangsdaten nicht zur Verfügung. Man kann allerdings auch nicht einfach zur Berechnung von Metriken auf der Grundlage von Gesamtfehlern übergehen. Denn wenn wesentliche Komponenten oder Schaltungen nicht

verbaut sind, werden diese bei der Angabe des Verhältnisses von Einfach- zu Gesamtfehlern nicht berücksichtigt. Man erfasst also zwar die richtige Anzahl an Einfachfehlern, aber die Gesamtfehleranzahl fällt zu gering aus. Dies führt in der Konsequenz zu übermäßig optimistischen bzw. pessimistischen Ergebnissen.

Unabhängig von der Frage, ob zur Bewertung der Zuverlässigkeit die Metriken aus der ISO 26262 genutzt werden können oder nicht, muss eine Methode zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit angewendet werden. Hierfür bieten sich Fehlerbäume oder Markov-Prozesse an. Alle Methoden erfordern als Eingangsgröße die Ausfallraten der jeweils verwendeten Komponenten. Die Berechnung bzw. Ableitung von Ausfallraten ist, wie in den vorigen Kapiteln, Unterkapiteln und Abschnitten geschildert, jedoch kein trivialer Vorgang. Können zur Berechnung der Ausfallraten keine Felddaten genutzt werden, muss stattdessen auf Handbücher zurückgegriffen werden. Da für die Automobilindustrie in dieser Hinsicht allerdings kein eigener Standard existiert, muss auf Handbücher aus anderen Disziplinen (Luft- und Raumfahrt, Militär etc.) Bezug genommen werden. Die dabei auftretenden Probleme wurden im Vorangegangenen ausführlich diskutiert.

Weitere Probleme ergeben sich aus dem Umstand, dass der Fokus der Automobilindustrie auf der Qualitätserfüllung und somit auf der Zuverlässigkeit im Sinne der Lebensdauer liegt, jedoch nicht auf der Identifikation zufälliger Komponentenfehler. Dies ist wichtig, denn wenn eine Komponente im Feld fehlerhaft wird, ist zur Beurteilung der Frage nach der Zuverlässigkeit nicht nur die Ausfallrate, sondern auch die Ausfallursache entscheidend. Handelt es sich um einen Entwicklungs- oder Produktionsfehler, ist die Ursache systematischer Natur und die daraus resultierenden Fehler können nicht mit zufälligen Fehlern gleichgesetzt werden. Letztere müssen in einer umfassenden Analyse aber ebenso Beachtung finden wie erstere.

Um dies sicherzustellen, ist zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung die Verwendung einer Methode nötig, mit der die Zuverlässigkeit auch auf der Grundlage einer schlechten Datenlage und entsprechend geringer Informationsdichte und -qualität berechnet und bewertet werden kann.

3.3 Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung in der Vorentwicklung

Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen formuliert, die an eine Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung bestehen. Anschließend werden auf der Grundlage des V-Modells der Vorentwicklung die notwendigen Schritte zur Bewertung der Zuverlässigkeit hergeleitet und erläutert. Auf dieser Basis wird daraufhin eine Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit in der Vorentwicklung beschrieben. Die Anwendung der Methode findet sich in Kapitel 6.

3.3.1 Anforderungen an die Methode

Vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen Einschränkungen lassen sich zur Berechnung und zum Vergleich verschiedener Architekturen für die sichere elektrische Energieversorgung hochautomatisierter Verbraucher folgende Anforderungen formulieren:

1. Aufgrund der unzureichenden Datenlage in der Vorentwicklung kann keine vollständige Bewertung der Zuverlässigkeit auf der Basis der ISO 26262 erfolgen. Stattdessen muss die hier zu entwickelnde Bewertungsmethode zur Berechnung der Zuverlässigkeit die Verwendung von abstrahierten Komponentenmodellen ermöglichen.
2. Die Ausfallraten von spezifischen Komponenten aus der Automobilindustrie sind nur bedingt bekannt. Daher muss es im Rahmen der hier entwickelten Methode möglich sein, Ausfallraten aus verschiedenen Quellen wie Felddaten, Veröffentlichungen und Handbüchern zu berücksichtigen.
3. Bezüglich der Anwendung einschlägiger Handbücher ergeben sich weitere Anforderungen. Diese betreffen vor allem die Eingangsdaten, also die Frage, mit welchen Umgebungs- und Belastungsbedingungen die Komponenten in Kraftfahrzeugen beaufschlagt werden. Zu beachten ist hierbei, dass die elektrische Energieversorgung durch verschiedene Verbraucher unterschiedlich stark belastet wird, wobei die Höhe und die Dauer der Belastung von der Verbraucheraktivität und der Fahrzeug-

nutzung abhängen. Aus diesen Gründen müssen bei der Berechnung von Ausfallraten auf der Basis von Handbüchern die individuellen Belastungen der fraglichen Komponenten bekannt sein und berücksichtigt werden.

4. Die Ausfallraten für zufällige Fehler von bereits in Serie eingesetzten Komponenten der Teilsysteme Energiespeicher, Energiewandlung und Vernetzung werden in der gegenwärtig vorhandenen Literatur nicht ausreichend abgedeckt. Aus diesem Grund müssen auf der Grundlage von Felddatenanalysen wesentliche Annahmen bezüglich der Ausfallraten bekannter Komponenten getroffen und in die Zuverlässigkeitsbewertung einbezogen werden.
5. Als Ergebnis der hier unternommenen Bemühungen sollen Zuverlässigkeitskenngrößen ableitbar sein, anhand derer verschiedene Architekturen im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit miteinander verglichen und bewertet werden können.

Auf der Basis der hier aufgelisteten Anforderungen wird im Folgenden anhand der Prozessschritte in der automobilen Vorentwicklung die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit eingeordnet und beschrieben.

3.3.2 Beschreibung der Methode

Der Entwicklungsprozess in der automobilen Vorentwicklung ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die für die Zuverlässigkeitsbewertung wesentlichen Informationen werden in den Schritten 2 und 3 aufbereitet und festgelegt. Das Gesamtsystem, z. B. ein Steuergerät, muss dabei innerhalb der hierfür relevanten Ideen und Konzeptentwicklung definiert werden (2.1). Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen können Anforderungen für neue Komponenten abgeleitet werden, auf deren Basis anschließend die prototypische Hard- und Softwareentwicklung (3.1) sowie die Prototypenherstellung initiiert wird.

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit ist entscheidend, welche Gefahren und Risiken auf System- und Komponentenebene existieren. Daher müssen im Rahmen der Zuverlässigkeitsbewertung sowohl für das Gesamtsystem als auch für einzelne Komponenten Gefahren- und Risikoanalysen (GuR) durchgeführt werden. Als Eingangsgrößen der GuR auf Systemebene dienen die aus der

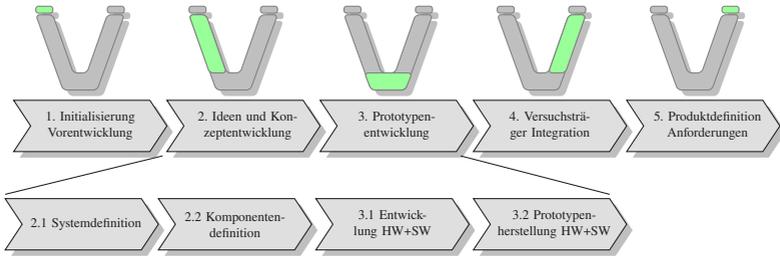


Abbildung 3.4: Beschreibung der modellbasierten Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung

Systemdefinition gewonnenen Informationen zur Funktions- und Wirkstruktur des jeweils betrachteten Systems. Die aus der GuR auf Systemebene gewonnenen Sicherheitsziele dienen wiederum der GuR auf Komponentenebene als Eingangsgrößen.

Aus dem Bereich der qualitativen Methoden können sowohl die FMEA als auch die FTA eingesetzt werden. Der Vorteil der Verwendung der FTA ist, dass sie eine direkte Überführung der qualitativen Struktur in die quantitative Bewertung ermöglicht. Aus diesem Grund wird im Folgenden die FTA als Methode zur Analyse und Berechnung der Zuverlässigkeit verwendet.

Nach der Durchführung einer GuR auf Komponentenebene folgt die Berechnung der Ausfallraten für die eingesetzten Bauelemente (vgl. hierzu Abbildung 3.5). Zur Berechnung der Zuverlässigkeit technischer Systeme wie der

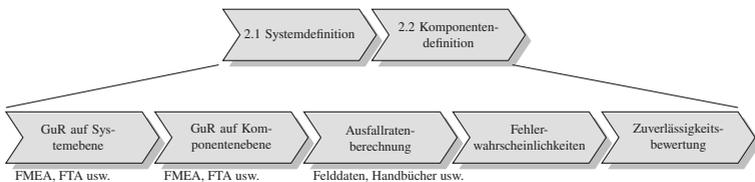


Abbildung 3.5: Detaildarstellung von Teil 2.1 und 2.2 der modellbasierten Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung

elektrischen Energieversorgung bzw. einzelner Komponenten derselben werden die bereits zuvor beschriebenen Quellen (Literatur, Ausfallratenhandbücher und eigene Zuverlässigkeitsmodelle) genutzt.

Die Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Ereignis

erfolgt auf der Basis der durch die qualitativen FTA erhaltenen Struktur und der Booleschen Algebra.¹ Auf der Grundlage der so berechneten Wahrscheinlichkeiten kann im nächsten Schritt die Zuverlässigkeit der eingesetzten Komponenten bewertet werden. Wie im Vorangegangenen erläutert, beruht die hier entwickelte Methode im Wesentlichen darauf, die Zuverlässigkeit nicht auf der Basis von Eingangsdaten zu berechnen (da diese in der Vorentwicklung nur unzureichend vorhanden sind), sondern stattdessen auf der Grundlage abstrahierter Komponenten- und Funktionsmodelle. Zur Erstellung dieser Modelle ist zusätzlich zu den jeweils zu untersuchenden Komponenten und genutzten Bauelementen die Kenntnis der Belastungen entscheidend, denen diese ausgesetzt sind.

Grundsätzlich muss bezüglich aller Komponenten und deren Bauelementen die Frage beantwortet werden, inwieweit die Belastung der fraglichen Komponente bzw. des fraglichen Bauelements deren bzw. dessen zufälligen Ausfall beeinflusst. In der elektrischen Energieversorgung liegt der Fokus dabei auf den Verbrauchern, den Umweltbedingungen und dem jeweiligen Fahrprofil. Die Belastung der zu betrachtenden Komponenten und Bauelemente variiert dabei in Abhängigkeit von thermischen und elektrischen Einflussparametern. Um die Belastung der einzelnen Komponenten und Bauelemente in der elektrischen Energieversorgung zu analysieren, wurden Untersuchungen in Form von Fahrversuchen durchgeführt.² Als Grundlage zur Berechnung der Ausfallraten dienten dabei die in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Modelle. Die aus den Fahrversuchen abgeleiteten Ergebnisse für die Komponentenbelastungen und die Umweltbedingungen wurden anschließend generalisiert und als Eingangsdaten für die Erstellung von Komponenten- und Ausfallratenmodellen genutzt. Hierzu wurden zunächst in Abhängigkeit von den genannten Eingangsdaten sowie auf der Basis physikalischer Komponentenmodelle die erforderlichen Werte für die Stress- und Komponentenbelastungen berechnet. Zur genauen Abbildung der Komponenten wurden dabei elektrische Modelle mit datengetriebenen thermischen Modellen kombiniert. Die Ergebnisse beider Modelle

¹ Grundsätzlich wäre die Modellierung zwar auch anhand von Markov-Prozessen möglich, diese Möglichkeit wird im weiteren Verlauf jedoch nicht weiter verfolgt, da der Fokus der vorliegenden Arbeit aus den oben genannten Gründen auf Einfachfehlern liegt, wohingegen die Verwendung von Markov-Prozessen vor allem für voneinander abhängige Ereignisse wie Mehrfachfehler geeignet ist. Eine ausführliche Beschreibung zur Modellierung mit Markov-Prozessen und weiteren Modellierungsmethoden findet sich in [1].

² Eine detaillierte Beschreibung dieser Fahrversuche findet sich in Unterkapitel 5.1.

dienten anschließend als Eingangsgrößen für die Berechnung der Ausfallraten. Die auf diesem Weg für die elektrische Energieversorgung entwickelten Modelle werden in Kapitel 5 detailliert beschrieben.

In Abbildung 3.6 ist der auf die automobilen elektrische Energieversorgung bezogene Berechnungsablauf dargestellt. Wie oben beschrieben dienen in dieser Methode als Eingangsdaten die aus Fahrversuchen abgeleiteten Belastungs- und Umweltpprofile. Um das Nutzungsverhalten von Fahrzeugen abbilden zu können, besteht die Möglichkeit, über Fahrprofilmodelle verschiedene Streckenprofile sowie die dabei auftretenden Belastungen zu parametrieren. Dabei werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Streckenarten – Kurz-, Mittel- und Langstrecke – und deren Häufigkeit im Fahrzeuglebenszyklus untersucht. Theoretisch wäre es zwar auch möglich, anstelle der Betrachtung der einzelnen Fahrprofile ein aggregiertes Fahrprofil zu nutzen. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsberechnung bei unterschiedlichen Kombinationen der Fahrprofile und deren Häufigkeit werden aus den oben genannten Gründen (geringere Präzision infolge von Ungenauigkeiten und mangelnder Vergleichbarkeit) im Folgenden jedoch nicht untersucht. Die Parameter der Fahrprofile werden in Abhängigkeit von der gewählten Systemarchitektur auf die einzelnen Komponenten aufgeteilt. Unter der Annahme, dass die Basislast gleichbleibt, können die Werte der Belastungsfaktoren für die verschiedenen Komponenten beliebig gewählt werden. In Abhängigkeit von der Belastung und den daraus entstehenden Verlustleistungen bzw. den daraus resultierenden Eigen- und Fremderwärmungen werden die Ausfallraten über die Modelle der verschiedenen Zuverlässigkeitsstandards (z. B. FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151]) berechnet. Für jede Komponente wird dabei ein eigener Fehlerbaum eingeführt. Die hierbei festgelegten Top-Ereignisse dienen anschließend als Basisereignisse für den Fehlerbaum des Gesamtsystems.

Im folgenden Kapitel wird zunächst die elektrische Energieversorgung in Kraftfahrzeugen vorgestellt, um anschließend deren wesentliche Eigenschaften zu diskutieren. Vor diesem Hintergrund wird eine GuR für hochautomatisierte Fahrfunktionen erstellt. Zudem werden die wesentlichen Komponenten der aktuellen elektrischen Energieversorgung nach dem hier vorgeschlagenen Verfahren exemplarisch modelliert. In Kapitel 6 wird die hier entwickelte Methode auf eine klassische sowie auf eine elektrische Energieversorgungsarchitektur mit zwei Spannungsebenen angewendet. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert.

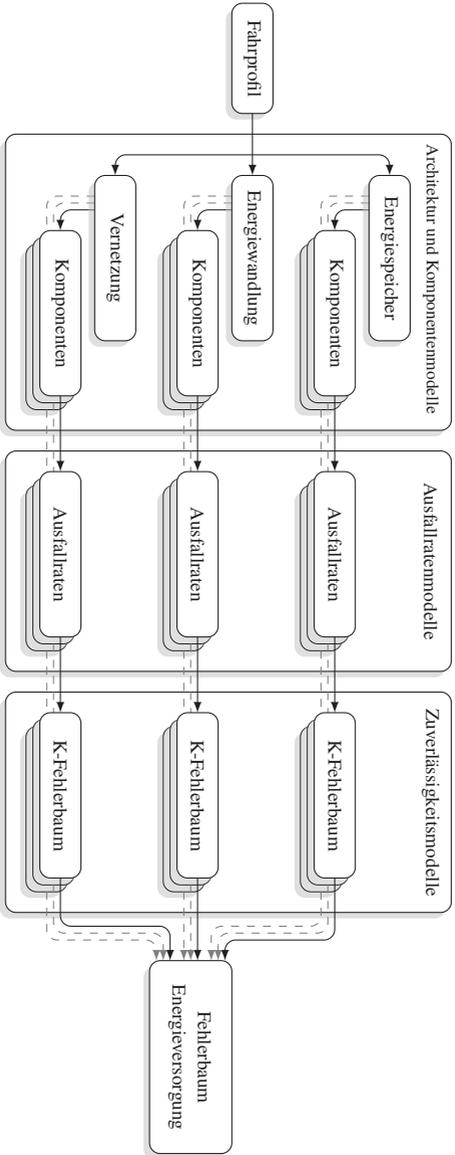


Abbildung 3.6: Beschreibung der modellbasierten Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit technischer Systeme in der automobilen Vorentwicklung am Beispiel der elektrischen Energieversorgung

4 Energieversorgung in Kraftfahrzeugen

Historisch betrachtet wurde die elektrische Energieversorgung von Personenkraftwagen zunächst zum Betrieb der Verbrennungskraftmaschine (VKM) erforderlich. Die Energie für die Zündelektronik musste in den Anfängen des Automobils aus gering leistungs- und speicherfähigen Energiespeichern gewonnen werden. Zusätzlich war nach jeder Fahrt das Laden dieser Speicher vonnöten, da die Fahrzeuge noch nicht über einen Generator zur Versorgung bzw. zum Laden des Energiespeichers verfügten. Erst mit der Einführung der Magnetzündung und der sog. Lichtmaschine als Generator etablierte sich die elektrische Energieversorgung im Automobil [90].

In der Frühphase der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen mussten nur wenige Verbraucher mit elektrischer Energie versorgt werden. Dies änderte sich mit der Zunahme von Funktionen zur Regelung der Längs- und Querdynamik, mit der Einführung neuer Komfortverbraucher sowie mit dem Zuwachs an Systemen zur Abgasnachbehandlung bzw. zur Verbrauchsreduktion deutlich. Mit der Nutzung elektrisch angetriebener Fahrzeuge kamen nochmals weitere Verbraucher hinzu, da E-Fahrzeuge die Integration von Verbrauchern erforderten, die bisher mit der VKM gekoppelt waren. Dieser Entwicklungsprozess bezüglich E-Fahrzeugen führte auch bei mechanisch angetriebenen Systemen bzw. Nebenaggregaten zu einem Wandel. So wurden neben Heizelementen auch Verbraucher wie z. B. die Wasserpumpe oder der Kältemittelverdichter elektrifiziert.

Im Wesentlichen besteht die elektrische Energieversorgung in Personenkraftwagen aus drei Teilsystemen, welche die Energie zur Versorgung der elektrischen Verbraucher bereitstellen bzw. übertragen. Das Gesamtsystem der elektrischen Energieversorgung kann dabei in die folgenden Teilsysteme unterteilt werden:

- Energiespeicher,

- Energiewandlung,
- Vernetzung sowie
- Leistungs- und Energiemanagement.

Jedes dieser Systeme ist an der elektrischen Energieversorgung beteiligt und steht in Verbindung zu- sowie in Wechselwirkung miteinander.

Die klassische elektrische Energieversorgung von Personenkraftwagen mit VKM basiert auf dem einfachen Prinzip, dass eine Blei-Säure-Batterie als Energiespeicher das Starten der VKM ermöglicht. Anschließend agiert der Generator über eine Kopplung mit der VKM als Energiequelle. Der Generator wandelt einen Teil der Bewegungsenergie der VKM in elektrische Energie um. Der Energietransport zwischen den Quellen und Senken bzw. zwischen den Verbrauchern wird über die Vernetzung sichergestellt und erfolgt entweder über Stromschienen oder über einzelne Leitungen, die als Verbindungen eingesetzt werden. Um gewissen Fertigungsanforderungen zu entsprechen sowie aus Gründen der Wartbarkeit wird die Vernetzung teilweise auch mit trennbaren Übergangsstellen ausgeführt. In diesem Fall werden die Verbraucher entweder einzeln oder in Gruppen versorgt.

Entscheidend dafür, ob die elektrische Energieversorgung über Verteilstellen wie z. B. Splices oder direkt vom Sicherungsverteiler aus erfolgen kann, ist zumeist die Frage nach der Notwendigkeit einer eigenen Absicherung zum Leitungsschutz. Die Verbraucher selbst wandeln die elektrische Energie, mit der sie versorgt werden, in andere Energieformen wie Bewegungs- oder Wärmeenergie um. Die elektrisch unterstützte Lenkung (Electric Power Steering (EPS)) bspw. hat hydraulische Systeme zur Lenkung weitgehend abgelöst und stellt heute im Bereich der Personenkraftwagen den Standard in der Lenkunterstützung dar [125].

Jeder Verbraucher hat eigene Anforderungen an die elektrische Energieversorgung, was Auswirkungen auf die Anforderungen an die einzelnen Teilsysteme hat (beispielsweise benötigt der Kühlerlüfter beim Anlaufen einen hohen Strom, welcher vom Energiespeicher bereitgestellt werden muss, wobei die Vernetzung hinreichend niederohmig dimensioniert sein muss usw.). Da sich die Komplexität von Personenkraftwagen durch die Einführung neuer Assistenzsysteme bzw. Funktionen deutlich erhöht hat und die Anforderungen dadurch nochmals gestiegen sind, wurde es erforderlich, eigens zur Regelung der elektrischen Energieversorgung entwickelte Energie- und Leistungsmana-

gementsysteme einzusetzen.

Mit der Erhöhung des Automatisierungsgrads in Personenkraftwagen steigen neben den Anforderungen an die Leistung vor allem auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung. Der Fokus der Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit liegt daher auf den Themen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung. Aufgrund der Komplexität der einzelnen Teilsysteme und deren Komponenten ist eine zuverlässige elektrische Energieversorgung aller Komponenten von deren Eigenschaften abhängig. Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung im Gesamten treffen zu können, müssen nicht nur alle Teilsysteme berücksichtigt werden, sondern auch die Wechselwirkungen aller Teilsysteme untereinander und mit dem Gesamtsystem. Im Folgenden werden die einzelnen Teilbereiche der elektrischen Energieversorgung näher betrachtet, und zwar nach der folgenden Struktur:

- Wesentlich für jede elektrische Energieversorgung ist deren Architektur. In Unterkapitel 4.1 werden die typischen Versorgungsstrukturen vorgestellt und deren Eigenschaften diskutiert.
- Jede Funktion erfordert eine Vielzahl von Verbrauchern in Form von Sensoren, Steuergeräten und Aktoren. In Unterkapitel 4.2 werden die Hauptkategorien vorgestellt, in welche die einzelnen Verbraucher diesbezüglich einzuordnen sind, und es wird erläutert, welche Wirkung die einzelnen Verbraucher auf die elektrische Energieversorgung haben.
- Die elektrische Energie zur Versorgung der Verbraucher wird von Energiespeichern bereitgestellt. Diese bilden die Basis der elektrischen Energieversorgung. Während bei VKM-betriebenen Fahrzeugen ein Generator die Hauptversorgung übernimmt, kommt bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ein DC/DC-Wandler zum Einsatz. Ein Überblick über die hier genutzten Technologien findet sich in Unterkapitel 5.4.
- Wie oben erwähnt, werden in modernen Personenkraftwagen Leistungs- und Energiemanagementsysteme eingesetzt. Dies geschieht zum einen aufgrund der zunehmenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Effizienz der elektrischen Energieversorgung sowie zum anderen zu Diagnosezwecken. In Unterkapitel 4.3 erfolgt eine Erläuterung der in Serienfahrzeugen verwendeten und in der Literatur vorgestellten Systeme.

- Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung werden in Unterkapitel 4.4 erläutert. Zunächst wird hierfür eine Übersicht über die für hochautomatisierte Systeme benötigten Komponenten und deren Anforderungen gegeben. Daraus werden anschließend die Zielanforderungen für die elektrische Energieversorgung hochautomatisierter bzw. autonomer Assistenzsysteme abgeleitet.

4.1 Architektur der elektrischen Energieversorgung

4.1.1 Topologie

Die Architektur der elektrischen Energieversorgung wird im Wesentlichen durch die Teilsysteme Vernetzung und Verbraucher dargestellt. Jeder Verbraucher muss in der Entwicklung eines Fahrzeugs entweder in notwendigen oder in freien Bauräumen positioniert werden. Dadurch wird zum einen die Grundarchitektur und zum anderen die Vernetzung vorgegeben. In klassischen Versorgungsarchitekturen mit einem Fahrzeugenergiespeicher ist dieser häufig in der Nähe der Hochleistungsverbraucher wie z. B. dem Starter der VKM platziert. Da die Positionierung des Generators u. a. auch von der Position des Motors abhängt, haben sich bei einer Vielzahl von Kraftfahrzeugen mit Frontmotor der in Abbildung 4.1 (a) dargestellte Schaltplan sowie die in (b) abgebildete Topologie etabliert.

Alle wesentlichen Komponenten der elektrischen Energieversorgung – also die Fahrzeugbatterie, der Generator und der Starter – sind im Motorraum verortet, sodass eine niederohmige Anbindung realisiert werden kann. Die Verbraucher V_n werden gewöhnlich über Leistungs- bzw. Sicherungsverteiler an die elektrische Energieversorgung angebunden, wobei mehrere Verteiler an unterschiedlichen Positionen im Fahrzeug platziert sind. Die Anbindung der Verbraucher an die Fahrzeugmasse erfolgt über die Karosserie. Diese Topologie entspricht einer *Baumstruktur* und ist die am weitesten verbreitete Struktur in der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen.

Infolge des Aufkommens von Kohlefaserverbundwerkstoffen im Karosseriebau und dem damit einhergehenden Wegfall der Karosserie als Masseleiter wurde es jedoch erforderlich, nach alternativen Strukturen zu suchen. In [149]

Kurzschlüsse auf, sind ohne Weiteres weder eine Diagnose noch ggf. eine darauf beruhende Fehlerbehandlung möglich, und unter Umständen werden funktionierende Verbrauchergruppen von der elektrischen Energieversorgung getrennt.

4.1.2 Spannungsebenen

Die Spannungsebene der elektrischen Energieversorgung in einem Kraftfahrzeug basiert im Wesentlichen auf der Spannung des jeweils verbauten Energiespeichers. Bei den historisch ersten Starterbatterien lag die Spannung bei ca. 6 Volt. Die einzelnen Starterbatterien bestanden dabei aus in Reihe bzw. teilweise auch aus parallel geschalteten Bleiakkumulatoren mit einer Nennspannung von ca. 2 Volt je Zelle. Aufgrund der Zunahme an Verbrauchern wurde die Nennspannung zur Erhöhung der Effizienz im Laufe der Zeit auf 12 Volt angehoben.

Grundsätzlich kann die Spannungslage der elektrischen Energieversorgung auf die Zyklen der Starterbatterie zurückgeführt werden. Im Kraftfahrzeug können dabei folgende Zustände voneinander unterschieden werden:

1. Im *Ruhezustand* ist die VKM außer Betrieb. Es erfolgt somit keine Nachladung der Starterbatterie über den Generator oder den Gleichspannungswandler. In elektrisch angetriebenen Fahrzeugen besitzt das 12V-System einen kleineren Energiespeicher, weshalb hier während des Ruhezustands bei zu niedriger Spannung aus dem Hochvoltspeicher (Traktionsbatterie) nachgeladen werden kann. Im Ruhezustand sind die Verbraucher entweder deaktiviert oder müssen hohe Ruhestromanforderungen erfüllen. Der Ruhezustand (Standby oder Sleep) kann mehrere Monate andauern und es kann ebenso lange dauern, bis der Speicher wieder geladen werden muss. Im Ruhezustand liegt die Spannungsebene der elektrischen Energieversorgung ohne Versorgung durch einen Generator bzw. Gleichspannungswandler auf dem Niveau des Potentials der Starterbatterie. Wenn die Ladezyklen sehr weit auseinanderliegen, kann dies jedoch zu tiefen Spannungswerten führen, wodurch vor allem der Energiespeicher irreversibel geschädigt werden kann. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Verbraucher im Ruhezustand besonders restriktiv.

2. Der *Fahrbetrieb* wird durch das Anlassen der VKM bzw. bei E-Fahrzeugen durch das Schließen der Hauptschütze eingeleitet. Hierbei werden die Verbraucher entweder direkt über den Generator versorgt, der auch die Starterbatterie lädt, oder sie werden mittels eines Gleichspannungswandlers aus einer höheren Spannungsebene gespeist.

Während des Fahrbetriebs wird die Spannung zum Laden des Energiespeichers und zur Versorgung der Verbraucher auf ca. 14,5 Volt angehoben. Die Zunahme der Anzahl von Verbrauchern und der Trend zu immer leistungsfähigeren Systemen machten in den letzten Jahrzehnten eine höhere Spannungslage erforderlich. Dementsprechend wurden seit Beginn der 1990er Jahre verschiedene Konzepte bzw. Architekturen für die Einführung einer 42V-Spannungslage diskutiert [49], [99], [112]. Das Konzept der 42V-Spannungsebene basiert auf der Anhebung der gesamten Spannungslage von 12 auf 42 Volt. Unter Berücksichtigung aller Toleranzen konnte eine Maximalspannung von kleiner 60 Volt erreicht werden. Aufgrund des enorm großen Umfangs an erforderlichen Änderungen an den bisher verbauten Verbrauchern wurde die 42V-Architektur bei vielen OEMs allerdings nicht in Serie eingeführt. Grund hierfür ist, dass aufgrund der sich deutlich ändernden Anforderungen und des Mehraufwands für die Aufbereitung der Eingangsspannung bei Steuergeräten bzw. Verbrauchern auf Logikspannungsebene mit der 42V-Architektur keine kosteneffiziente Versorgung umgesetzt werden konnte. Zwar wurden derartige Systeme teilweise in Serie gebracht, jedoch zumeist in Fahrzeugen mit Hybridantrieb. Im Zuge dieser Neuerungen wurden, zusätzlich zur geplanten Anhebung der Spannungslage, auch mehrere Architekturen entwickelt, in denen eine 12V- mit einer 42V-Spannungslage kombiniert wird, sodass nicht die gesamte Spannungslage auf 42 Volt angehoben werden muss, sondern nur der Teil des Netzes, der zur Versorgung von Verbrauchern mit hoher Stromaufnahme wie der Heizung oder Komfortsystemen dient. Neben komplett parallel geführten Spannungsebenen mit eigenen Energiespeichern und Generatoren sind vor allem solche interessant, die mit nur einem Generator und Energiespeicher auskommen. Häufig speist dabei der Generator aufgrund der höheren Effizienz die 42V-Ebene [158].

Mit steigenden Umweltaanforderungen, insbesondere bezüglich der Reduktion des Ausstoßes von Stickoxiden und Kohlenstoffdioxid (CO₂), wurde erneut die Einführung einer zweiten Spannungsebene forciert [76]. Durch die Verwendung von Hybridantrieben sowie durch die Gewichtsreduktion der Vernetzung leistungsintensiver Verbraucher konnte eine deutliche Verbesserung der Um-

weltbilanz erreicht werden [116].

Je nach Anforderung bzw. in Abhängigkeit von den jeweiligen Verbrauchern kann die 48V-Ebene unterschiedlich ausgeführt werden. In Abbildung 4.2 ist die 48V-Ebene mit einem Energiespeicher, einem Booster-Generator und einem 48V-Verbraucher dargestellt. In der 12V-Ebene wird bewusst auf einen Generator verzichtet. Die Versorgung erfolgt stattdessen über einen Gleichspannungswandler. Mit der Wahl eines hinreichend großen Energiespeichers kann die VKM problemlos über das 12V-System gestartet werden. Durch die Erweiterung des 48V-Generators zum Booster-Generator kann der Starter auf der 12V-Spannungsebene teilweise entfallen (sofern der Riemen-Starter-Generator genug Moment zum Starten der VKM aufbringen und auf die Kurbelwelle übertragen kann). In Abhängigkeit davon, welche Verbraucher auf der

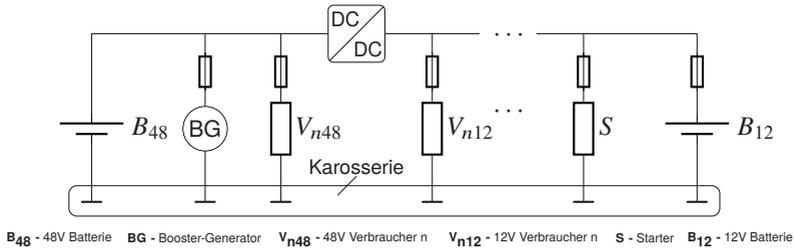


Abbildung 4.2: Basisarchitektur der elektrischen Energieversorgung mit 12V- und 48V-Spannungsebene

48V-Ebene versorgt werden müssen, können neben Lithium-Ionen-Speichern auch Super-Caps eingesetzt werden [171], [7]. Da die 48V-Ebene nicht galvanisch von der 12V-Ebene getrennt ist, wird die Karosserie als gemeinsames 0V-Potential genutzt.

Da auf der 12V-Ebene aus technischen und wirtschaftlichen Gründen zum Großteil Blei-Säure-Batterien als Energiespeicher eingesetzt werden, basiert die Auslegung der elektrischen Energieversorgung im Wesentlichen auf der Dimensionierung des Energiespeichers und auf der Einhaltung der diesbezüglichen Spannungsgrenzen [91]. Das Gesamtsystem verhält sich dabei wie ein klassischer Regelkreis mit der Bordnetzspannung als Führungsgröße, dem Generator als Stellglied und den Verbrauchern als Störgrößen.

4.2 Verbraucher

Die Entwicklung der elektrischen Energieversorgung richtet sich in erster Linie nach den Eigenschaften der Verbraucher bzw. danach, welche Anforderungen diese an die elektrische Energieversorgung stellen. Die Batterie, der Generator bzw. der Gleichspannungswandler, die Architektur und die Vernetzung müssen dementsprechend in Abhängigkeit von den jeweiligen Leistungsprofilen bzw. der Stromaufnahme der Verbraucher ausgelegt werden.

Mit zunehmender Fahrzeugausstattung nimmt auch der Umfang an Assistenz- und Komfortfunktionen zu. Aus diesem Grund müssen Fahrzeuge höherer Fahrzeugklassen, z. B. die Modelle Audi A8, BMW 7er oder Mercedes S-Klasse, mit einer besonders leistungsfähigen elektrischen Energieversorgung ausgestattet werden.

Grundsätzlich gibt es hinsichtlich der elektrischen Energieversorgung von Verbrauchern zwei Möglichkeiten: Entweder wird ein Verbraucher dauerhaft oder nur zur Funktionsausführung mit elektrischer Energie versorgt. Welche Option im konkreten Fall genutzt wird, hängt von den unterschiedlichen Funktionen der Verbraucher und somit von der Funktionsausführung ab. Im Sinne dieser leistungsspezifischen Anforderungen kann dabei zwischen den folgenden drei Arten von Verbrauchern unterschieden werden:

- Dauer-,
- Langzeit- und
- Kurzzeitverbraucher.

Dauerverbraucher sind Verbraucher, die während des gesamten Fahrbetriebs eine annähernd konstante Leistungsaufnahme aufweisen und von Beginn bis Ende des Fahrzyklus aktiv sind. Dauerverbraucher sorgen in der elektrischen Energieversorgung für eine konstante Basislast, die in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen sowie in Abhängigkeit von den Eigenschaften des jeweiligen Fahrzeugs und Fahrprofils variiert.

Langzeitverbraucher sind Verbraucher, die für längere Zeit, aber nur in bestimmten Situationen während des Fahrbetriebs aktiv sind und deren elektrische Energieversorgung von ihrer Aktivierung zur Erfüllung bestimmter Funktionen abhängt. Ein anschauliches Beispiel hierfür sind Heizverbraucher. Der Energieverbrauch von *Kurzzeitverbrauchern* hängt zum Großteil vom Fahr-

profil ab. Systeme wie die EPS oder Aktoren am Fahrwerk und für die VKM (z. B. der E-Turbolader) können je nach Leistungsanforderung mehrere Kilowatt Spitzenleistung umsetzen. Dies erklärt, weshalb die Maximalbelastung in der elektrischen Energieversorgung von Kurzzeitverbrauchern verursacht wird bzw. über deren Leistungsprofile zu erklären ist .

In Abbildung 4.3 ist die simulierte Stromaufnahme der EPS bei einem Spurwechsel mit Bremsengriff dargestellt. Im Falle des hier abgebildeten Profils wird der Maximalstrom während der maximalen Aussteuerung der Synchronmaschine erreicht und liegt bei ca. 140 Ampere. Ohne Lenkeingriff liegt die nominale Stromaufnahme bei wenigen Ampere. Die Spannungsstabilität der

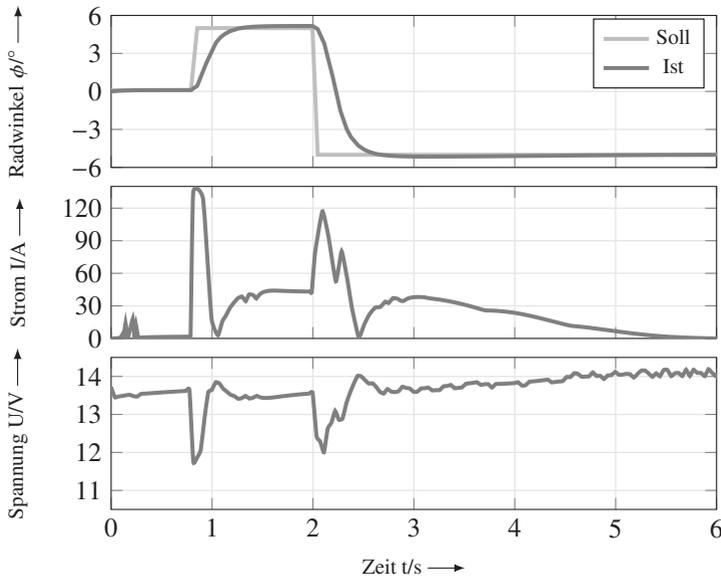


Abbildung 4.3: Belastung der elektrischen Energieversorgung während eines Spurwechsels mit Bremsung bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 80 km/h. Als Simulationsmodell wurde ein Einspurmodell mit den Fahrzeugparametern eines Audi A8 genutzt. Dargestellt sind in der oberen Abbildung der Soll- und der Ist-Radwinkel, in der Mitte der von der EPS aufgenommene Strom und unten die Spannungslage der elektrischen Energieversorgung, gemessen an der EPS. Simuliert wurde die elektrische Energieversorgung mit einem Generator, einer neuen Blei-Säure-Batterie (80 Ah, 100% State-Of-Charge (SOC) und idealer Vernetzung.

elektrischen Energieversorgung ist in der hier dargestellten Simulation hinreichend gegeben. Mit steigender Leistungsaufnahme der EPS sinkt die Spannung zunächst auf ca. 11 Volt ab und stabilisiert sich danach wieder auf dem Niveau der vom Generator vorgegebenen Sollspannung von ca. 14 Volt. (Je nachdem, welche Fahrsituation angenommen wird bzw. welche Alterungsbedingungen der Quellen sowie der Vernetzung vorliegen, kann die Spannung auch deutlich tiefer sinken.) Aufgrund des hohen Anstiegs im Strombedarf wird die Energie für dieses Manöver zum Großteil aus der Batterie bezogen. Der Generator ist aufgrund seiner Kopplung mit der VKM nicht dynamisch genug, um solche Gradienten bereitzustellen. Wie an diesem Beispiel gezeigt werden soll, sind Kurzzeitverbraucher für die elektrische Energieversorgung die kritischste Gruppe in der Belastung.

Aus Sicht der elektrischen Energieversorgung sind aber nicht nur die Verbrauchsspitzen durch die Kurzzeitverbraucher entscheidend, sondern zu berücksichtigen ist auch die Höhe der Grundlast durch die anderen Verbraucher. Letztere hängt von den Umgebungsbedingungen und hier vor allem von der Umgebungstemperatur ab. Vor diesem Hintergrund werden die Betriebsarten der Verbraucherprofile unterteilt in

- Sommer- und
- Winterbetrieb.

Diese Unterteilung ist zur Ermittlung der Maximalbelastung¹ und somit zur Identifikation kritischer Versorgungssituationen erforderlich. Die Maximalbelastung ist insofern ein entscheidender Faktor, als die installierte Gesamtleistung aller Verbraucher in einem Kraftfahrzeug die Leistungsfähigkeit der Energiequellen deutlich übersteigt, sodass die Auslegung der elektrischen Energieversorgung auf der Basis der Maximalbelastung erfolgen muss.

In Abbildung 4.4 sind der maximale Strombedarf verschiedener Fahrzeugkategorien im Sommer- und Winterbetrieb sowie die Maximalbelastung, gemessen im erweiterten NEFZ-Zyklus², dargestellt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, steigt der theoretisch maximal mögliche Strombedarf mit der Fahrzeugka-

¹ Auslastung der elektrischen Energieversorgung mit höchstmöglichem Gleichzeitigkeitsfaktor.

² Dabei handelt es sich um ein standardisiertes Geschwindigkeitsprofil, das dazu dient, den Verbrauch bzw. CO₂-Ausstoß zu ermitteln. Seit der Einführung von E-Fahrzeugen wurde es durch die Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) abgelöst.

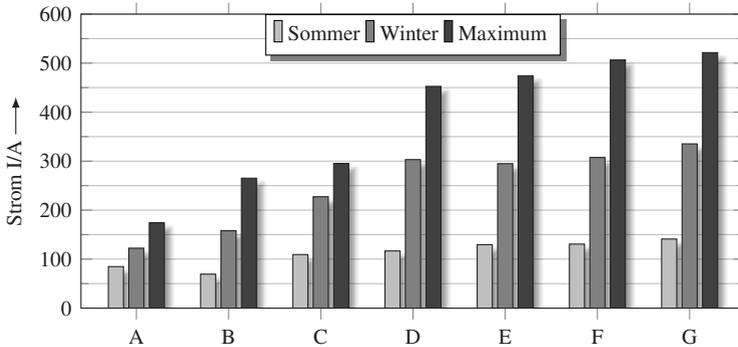


Abbildung 4.4: Stromaufnahme der elektrischen Energieversorgung, ermittelt im erweiterten Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)-Zyklus. Dargestellt sind die Stromaufnahmen im Sommer- und Winterbetrieb sowie die theoretisch maximal mögliche Stromaufnahme. Die Datenbasis bilden Auswertungen von Messungen mehrerer Fahrzeugmodelle mit unterschiedlicher Ausstattung. Die hierbei untersuchten Fahrzeugklassen sind (A) Kompaktklasse, (B) Geländewagen klein, (C) Sportwagen, (D) Mittelklasse, (E) obere Mittelklasse, (F) Oberklasse und (G) Geländewagen groß.

tegorie deutlich an. Dies lässt sich durch die Zunahme der Menge an Verbrauchern erklären. Im Vergleich zwischen Sommer- und Winterbetrieb innerhalb der jeweiligen Fahrzeugkategorien ist demgegenüber nur ein geringer Anstieg zu beobachten.

Im Winterbetrieb kann es durch Heizverbraucher wie Scheiben- und Flächenheizungen zu enormen Leistungsaufnahmen kommen. Vor allem zu Beginn eines Fahrzyklus sind im Winterbetrieb eine Vielzahl von Heizverbrauchern aktiv, was für eine hohe Grundlast sorgt. Im Sommerprofil hingegen sind keine Heizverbraucher vorhanden, was sich in einer entsprechend niedrigeren Stromaufnahme widerspiegelt.

Vergleicht man die benötigten Verbraucherströme zur Dauerleistung des Generators miteinander, wird deutlich, dass die Auslegung einer effizienten elektrischen Energieversorgung im Kraftfahrzeug zu einer deutlich niedrigeren Generatorleistung und damit zu einer energetischen Unterdeckung führt. Bei maximaler Verbraucherleistung liegt die Quellenleistung also deutlich unter der Verbraucherleistung, sodass von einer Unterdeckung gesprochen werden kann. In der Regel liegen die Dauerströme aktueller Generatoren je nach Typ und Fahrzeugklasse zwischen ca. 110 und ca. 250 Ampere. Um eine Über-

lastung der elektrischen Energieversorgung und somit eine Unterspannung an relevanten Verbrauchern zu vermeiden, muss die elektrische Energieversorgung hinreichend überwacht werden, um ggf. deren Quellen entsprechend nachregulieren zu können. Zu diesem Zweck werden Energie- bzw. Leistungsmanagementsysteme eingesetzt.

4.3 Energie- und Leistungsmanagement

Eine der Hauptaufgaben der elektrischen Energieversorgung besteht darin, alle Verbraucher in Abhängigkeit von der jeweiligen Architektur sowohl stationär als auch dynamisch zuverlässig mit elektrischer Energie zu versorgen. Im stationären bzw. statischen Fall versorgt der Generator bzw. der Gleichspannungswandler die Verbraucher und lädt parallel die Fahrzeugbatterie. Im dynamischen Lastfall werden die Verbraucher je nach den Eigenschaften der Vernetzung und der Architektur aus der Fahrzeugbatterie versorgt. Zur Gewährleistung der Spannungsstabilität muss dabei zumindest eine regelbare Quelle verfügbar sein. In der klassischen elektrischen Energieversorgung wird die Ausgangsspannung des Generators zu diesem Zweck auf einen festen Wert von ca. 14 bis 14,5 Volt geregelt. Der Generator selbst besitzt hierfür einen Spannungsregler, der in Abhängigkeit von seiner Klemmenspannung den Erregerstrom und somit die Ausgangsleistung regelt [140].

Aufgrund der Einführung von Start-Stopp-Funktionen und den damit einhergehenden inaktiven Phasen der VKM während des Fahrbetriebs muss sichergestellt werden, dass es nicht zu einer zu tiefen Entladung der Fahrzeugbatterie kommt bzw. dass der Wiederstart der VKM möglich bleibt. Hierzu dient das Energiemanagement (EM), bei welchem Informationen zur Fahrzeugbatterie wie Ladezustand (SOC) und Alterungszustand (State-Of-Health (SOH)) erfasst und zur Regelung der Energieverteilung genutzt werden. Ziel des Energiemanagements ist es, die Fahrzeugbatterie innerhalb des für sie optimalen Arbeitsbereichs zu betreiben und die von der VKM bereitgestellte Energie möglichst effizient zu nutzen.

In Abbildung 4.5 ist der Regelkreis der elektrischen Energieversorgung mit Energiemanagement und Leistungsmanagement (LM) dargestellt. Das Energiemanagement regelt die Generator- bzw. Quellenleistung in Abhängigkeit von der Spannungslage in der elektrischen Energieversorgung [140], [28]. Verbraucher werden in ihrer Aufnahmeleistung dabei nicht begrenzt. Dies ge-

schieht erst unter Hinzunahme des Leistungsmanagements. Das Leistungsma-

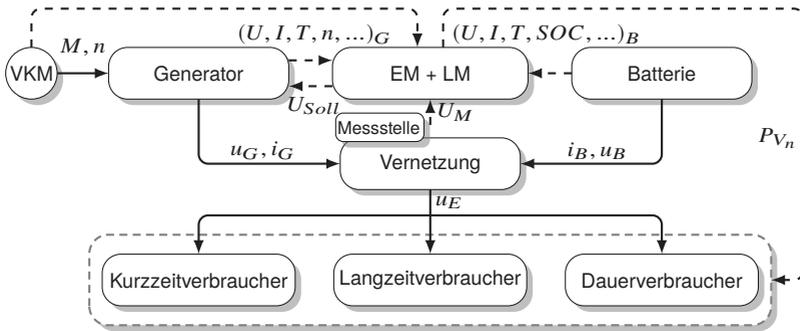


Abbildung 4.5: Schematischer Regelkreis der elektrischen Energieversorgung mit VKM-gekoppeltem Generator als Hauptenergiequelle

agement dient zur Beherrschung dynamischer Lastwechsel. Zu diesem Zweck kann entweder die Quellenleistung angehoben oder die Verbraucherleistung reduziert werden. Die kurzzeitige Bereitstellung von Energie für Leistungsspitzen ist vor allem beim Einsatz von Gleichspannungswandlern möglich, da diese eine deutlich höhere Dynamik als Generatoren besitzen und kurzzeitig überlastet werden können.

Zur Einschränkung der Leistungsaufnahme der Verbraucher gibt es mehrere Strategien. In Abhängigkeit vom jeweiligen Verbraucherprofil bzw. von der Funktion des Verbrauchers kann der Verbraucher sich in seiner Leistungsaufnahme entweder selbst begrenzen oder, wie von [139] vorgestellt, beim Erreichen einer definierten Spannungslage autonom abschalten. Die Begrenzung der Leistungsaufnahme von Verbrauchern setzt eine regelbare Leistungselektronik voraus. Nur über diese kann eine effiziente Reduktion der Leistungsaufnahme erreicht werden. Bei der autonomen Verbraucherabschaltung hingegen schalten sich bestimmte Verbrauchergruppen bei festgelegten Spannungslagen in der elektrischen Energieversorgung selbst ab und nach Erreichen von stabilen Spannungswerten wieder zu.

Eine andere Vorgehensweise ermöglicht das von [84] vorgestellte prädiktive Leistungsmanagement. Hier wird unter Hinzunahme weiterer Messgrößen sowie der Navigation, der Verkehrstelematik usw. eine Vorhersage über das zukünftige Lastszenario in der elektrischen Energieversorgung erstellt. Auf der Basis dieser Vorhersage werden vom Leistungsmanagement Degradie-

rungsstufen durchgeführt und durch das frühzeitige Abschalten bestimmter Verbrauchergruppen wird der Auslastungsgrad der elektrischen Energieversorgung deutlich reduziert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Zum Sicherstellen einer zuverlässigen elektrischen Energieversorgung in Ausnahmesituationen sind sowohl ein Energie- als auch ein Leistungsmanagement unentbehrlich. Doch auch während des Normalbetriebs ohne Fehlereintritt tragen das Energie- und das Leistungsmanagement zur Stabilität der elektrischen Energieversorgung bei.

4.4 Anforderungen an die elektrische Energieversorgung

Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung ergeben sich aus den verbauten Verbrauchern, deren Funktionen und letztendlich aus der elektrischen Energieversorgung selbst. Wie eingangs erläutert war die Einführung einer Starterbatterie bzw. eines Generators historisch betrachtet zum Anlassen der VKM sowie zur Versorgung der Lichtelektronik erforderlich. Heutzutage gibt es eine Vielzahl weiterer Verbraucher, bestehend aus Sensoren, Steuergeräten und Aktoren, die zur Umsetzung umfangreicher Fahrzeugfunktionen eingesetzt werden. In Abbildung 4.6 ist in Anlehnung an [67] und [167] eine Auswahl dieser Funktionen dargestellt. Bereits für eine vergleichsweise einfache Funktion wie das Antiblockiersystem (ABS) werden ein Steuergerät, ein Hydraulikaggregat, Hydraulikventile zur Schlupfregelung sowie Drehzahlsensoren an jedem Rad benötigt. Zur Erreichung des besten Kompromisses bei der Übertragung von Längs- und Querkräften misst die ABS-Funktion die Raddrehzahl und regelt in Abhängigkeit von diesem Wert den Bremsdruck. Die elektrische Energieversorgung muss dabei das Hydraulikaggregat und die Hydraulikventile mit hinreichend viel elektrischer Energie versorgen.

Im Falle eines Fehlers in der elektrischen Energieversorgung für das ABS ist die Gefährdungslage überschaubar, da durch die feste Kopplung zwischen Bremspedal und Hydraulikkreis weiterhin eine hinreichende Bremskraft aufgebracht und unabhängig von der elektrischen Energieversorgung ein sicherer Zustand erreicht werden kann. Bezüglich zukünftiger Assistenzsysteme wie dem Autobahn- oder dem Stadtpilot bestehen größere Risiken, da diese Assistenzsysteme vermehrt Funktionen übernehmen, die bei einem Ausfall der entsprechenden Systeme nicht weiterhin uneingeschränkt zur Verfügung ste-

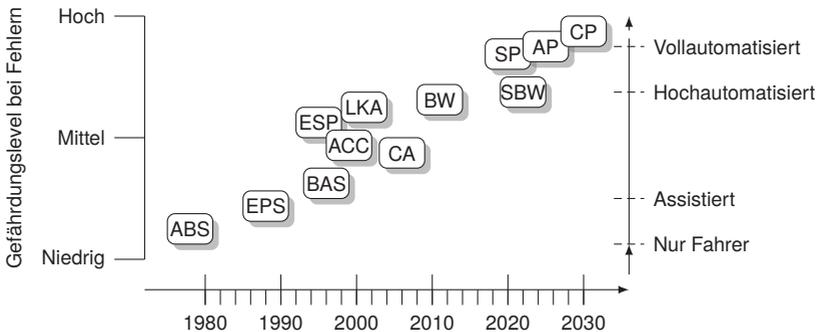


Abbildung 4.6: Darstellung aktuell im Einsatz befindlicher und zukünftig geplanter Assistenzsysteme bzw. Fahrzeugfunktionen, in Anlehnung an [67]. Bei den hier dargestellten Systemen handelt es sich um: Antiblockiersystem (ABS), Electric Power Steering (EPS), Bremsassistent (BAS), Abstandsregeltempomat (ACC), Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP), Notbremsassistent (CA), Spurhalteassistent (LKA), Brake-By-Wire (BW), Steer-By-Wire (SBW), Staupilot (SP), Autobahn-pilot (AP) und Stadtpilot (CP)

hen. Damit steigen nicht nur die Anforderungen an die entsprechenden Assistenzsysteme selbst, sondern auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung. Neben der Spannungsstabilität während der Funktionsausführung im Normalbetrieb ist vor allem das Verhalten im Fehlerfall entscheidend. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung ergeben sich dabei aus dem verbleibenden bzw. akzeptablen Risiko für einen gefährlichen Zustand.

Im Folgenden werden die Abhängigkeiten von Funktionen mit hohem Automatisierungsgrad sowie die damit verbundenen Einflüsse auf die elektrische Energieversorgung diskutiert.

4.4.1 Hochautomatisierte Fahrfunktionen

Mit der Elektrifizierung vieler Aktoren, vor allem solcher für die Längs- und Querdynamik, entstanden neue Möglichkeiten für die Umsetzung hochautomatisierter Fahrfunktionen. Als Erstes wären hier die Assistenzsysteme Abstandsregeltempomat (ACC) und Spurhalteassistent (LKA) – im Deutschen als

Spurhalteassistent bezeichnet – zu nennen, die Vorstufen zum autonomen Fahren darstellen. Das ACC regelt die Fahrzeuggeschwindigkeit auf der Basis von mittels Radar durchgeführten Abstandsmessungen zum vorausfahrenden Fahrzeug. Auf diese Weise kann es im fließenden Verkehr ohne Eingriff durch den Fahrzeugführer die Längsdynamik regeln. Der LKA wertet über Kameradaten die Fahrbahnmarkierungen bzw. -begrenzungen aus und regelt die Querdynamik über die elektronische Servolenkung. Beide Systeme weisen einen hohen Automatisierungsgrad in Bezug auf die Aktorik auf. Werden sie miteinander kombiniert, ist das Ergebnis ein in Grenzen selbstfahrendes Fahrzeug.

Während der LKA bei fehlender Fahrbahnmarkierung ausfällt und der Fahrzeugführer die Fahrzeugsteuerung übernehmen muss, regelt das ACC auch dann die eingestellte Geschwindigkeit, wenn kein vorausfahrendes Fahrzeug als Referenzobjekt vorhanden ist. Die Erhöhung des Automatisierungsgrades durch eine Verbesserung der Systemstabilität, die Erfassung von deutlich mehr Sensordaten und die grundsätzliche Erhöhung der Systemzuverlässigkeit durch Mehrspeicherarchitekturen in der elektrischen Energieversorgung ermöglichte die Erweiterung des ACC zum Staufolgefahren (wobei es sich um eine fahrspurgebundene Funktion handelt) sowie später zum Staupilot (SP), der die Spur wechseln und das Fahrzeug bis zu Geschwindigkeiten von ca. 60 km/h ohne Fahrereingriff steuern kann [167].

Teil der Weiterentwicklung von ACC und LKA zum SP ist auch, dass das System, während es aktiv ist, ebenfalls die Überwachung übernimmt. Es soll den Fahrzeugführer somit weiter entlasten. Durch den Wegfall des Fahrzeugführers als überwachende Instanz steigen jedoch abermals deutlich die Anforderungen an die Systemausführung sowie an die Reaktionsweise und -geschwindigkeit im Fehlerfall. Das System darf, während es aktiv ist, nicht plötzlich ausfallen, sondern muss jederzeit zumindest in der Lage sein, einen sicheren Zustand zu erreichen. Hierfür müssen eventuelle Fehlerzustände rechtzeitig erkannt werden und das Fahrzeug muss in Abhängigkeit von der Fahrsituation gebremst werden oder es muss ein Ausweichmanöver durchgeführt werden. Dabei muss die elektrische Energieversorgung jeden Verbraucher der beteiligten Funktionen zuverlässig mit Energie versorgen.

Die nächsthöhere Entwicklungsstufe ist der AutobahnpiLOT (AP). Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung des SP. Während das SP auf das Fahren im Stau begrenzt ist, soll das AP das autonome Fahren auf der Autobahn im Allgemeinen ermöglichen. Bereits für den SP waren ein umfangreiches Sensor- und Rechnernetzwerk sowie eine Reihe von Aktoren zur Regelung der Fahrtrajektorie notwendig. Der AP erfordert im direkten Vergleich hierzu den Einsatz

einer nochmals größeren Anzahl von zusätzlichen Komponenten. Anders als der ACC ist der AP nicht mehr auf vorausfahrende Fahrzeuge angewiesen, sondern erkennt die Umgebung sowie den Verkehr auf der Basis von Video- und anderen Sensordaten. In Abhängigkeit von den so ermittelten Eingangsdaten regelt der AP die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs unabhängig vom Fahrzeugführer. Für die hierzu nötige Objekt- und Situationserkennung sind umfangreiche Absicherungen erforderlich. So muss die Datenaufbereitung in der Lage sein, verfälschte oder fehlerhaft übermittelte Sensorwerte vor der Funktionsausführung aufzulösen. Zudem müssen die zur Ausführung der Funktion erforderlichen Berechnungen redundant bzw. abgesichert durchgeführt werden. Ein Einfachfehler darf nicht zu einer fehlerhaften Ansteuerung eines Aktors führen. Neben den Eigenfehlern der Sensoren, der Steuergeräte und der Vernetzung müssen dabei auch Fehler durch eine eingeschränkte bzw. ausgefallene elektrische Energieversorgung berücksichtigt werden.

Die letzte Erweiterungsstufe soll das vollständig autonome Fahren im Stadtverkehr durch den Stadtpilot (CP) ermöglichen. Um dies zu realisieren, muss die Funktion dazu in der Lage sein, einer Fahrtrajektorie auch bei diversen Störeinflüssen durch den umliegenden Verkehr zu folgen und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer richtig zu interpretieren, um angemessen reagieren zu können. Die Aufgabe des Fahrzeugführers beschränkt sich dann auf die Eingabe von Zieldaten. Darüber hinaus werden bereits Konzepte diskutiert und Prototypenfahrzeuge vorgestellt, die teilweise vollständig auf Schnittstellen zur Steuerung des Fahrzeugs verzichten.

Zum Betrieb von SP, AP und CP sind eine Vielzahl von Sensoren, Steuergeräten und Aktoren erforderlich. Jeder Sensor muss dabei, innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen, korrekte Daten liefern und entweder redundant ausgeführt oder zumindest so konstruiert sein, dass die Korrektheit des Sensorwertes durch Diagnosen plausibilisiert werden kann. Kein Einfachfehler darf zum Versagen bzw. zu falschen Sensordaten führen. Um dies sicherzustellen, werden Sensoren entweder redundant verbaut oder ihre Ausgangsgrößen werden über vergleichbare physikalische Messgrößen validiert.

Je nach Funktion werden bereits in aktuell verfügbaren Fahrzeugmodellen umfangreiche Sensor-Setups verwendet. Zur Bereitstellung von ACC, LKA sowie Abbiege- und Parkassistenten wird ein Teil der in Abbildung 4.7 dargestellten Sensoren in Serienfahrzeugen verbaut. Sowohl die ACC-Funktion als auch der Kreuzungsassistent benötigen zur Funktionsausführung ein Radarsystem. Während für den Kreuzungs- oder Abbiegeassistenten ein Mid-Range-Radar ausreicht, wird für den Spurhalteassistenten mindestens eine Frontkamera be-

nötigt. Für Ein- bzw. Ausparkassistenten werden bereits Ultraschallsensoren verbaut.

Grundsätzlich basiert jedes Sensor-Setup auf dem Ausstattungsumfang der jeweiligen Modellreihe. In Anbetracht der gesamten Funktionalität sind unter Umständen allerdings zusätzliche oder redundante Sensoren erforderlich. Beispielsweise werden Laserscanner wie z. B. ein Light detection and ranging (Lidar)-System notwendig, wenn die Fahrzeugtrajektorie aufgrund von Einflüssen des Verkehrs bzw. der Umgebung geändert werden soll. Laserscanner werden dabei mehrheitlich zur Erkennung der Fahrzeugumgebung eingesetzt.

Die in Abbildung 4.7 dargestellten Sensoren stellen eine Auswahl an möglichen Sensoren für das automatisierte Fahren ab Level 3 bzw. 4 dar (vgl. hierzu Tabelle 1.1 in Kapitel 1). Unabhängig davon, welche Sensoren verbaut sind,

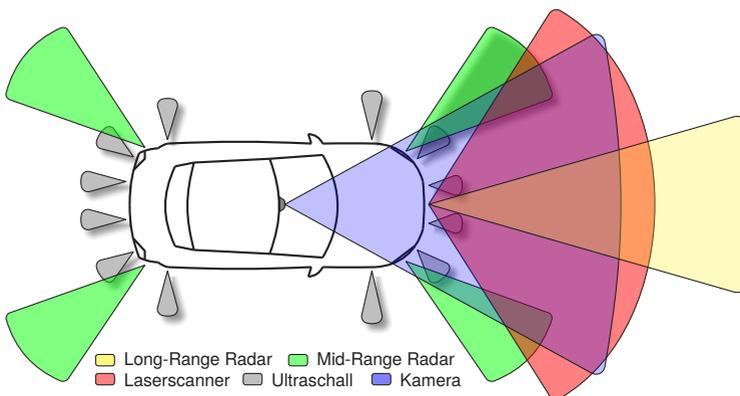


Abbildung 4.7: Exemplarische Darstellung der notwendigen Sensoren für hochautomatisierte Fahrfunktionen, nicht maßstabsgetreu

gilt, dass diese zum Zeitpunkt der Funktionsausführung zuverlässige Messgrößen liefern müssen. Hierfür ist eine stabile und ausfallsichere elektrische Energieversorgung erforderlich, was nur durch eine unabhängige elektrische Energieversorgung sichergestellt werden kann. Die Energie für die Sensoren stammt entweder aus den sensoreigenen Steuergeräten oder, wie im Fall der Ultraschallsensoren, aus Zentralsteuergeräten. Je nach Umfang der jeweiligen Funktion sind dabei mehrere Steuergeräte bzw. Prozessoren an der Funktionsausführung beteiligt. Daher wird das Steuergerät bzw. dessen Architektur red-

undant ausgeführt. In diesem Zusammenhang hat Kohn in [85] und [86] eine redundante und fail-operational-fähige Steuergerätearchitektur für ein Steer-By-Wire (SBW)-System vorgestellt. Die dort verwendete Architektur basiert auf zwei Teilsystemen A und B. In Abbildung 4.8 ist diese Architektur in Anlehnung an [85] und [125] dargestellt. Jedes Teilsystem besitzt ein Steuergerät mit Sensoren und eine Leistungsstufe zur Ansteuerung einer eigenen Synchronmaschine. Grundsätzlich können die Synchronmaschinen auch in einer Komponente zusammengefasst werden. Indem die Wicklungen der Maschine in einem Gehäuse voneinander getrennt aufgebaut werden, wird eine durchgehende Unabhängigkeit in der Funktionsbereitstellung erreicht. Um bei einem

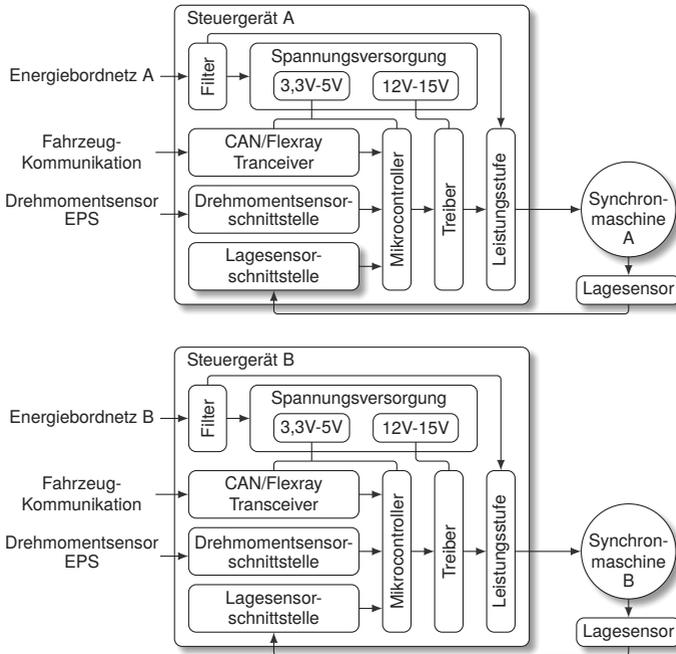


Abbildung 4.8: Redundante Steuergerätearchitektur für die elektrische Lenkung, in Anlehnung an [85] und [125]

Einfachfehler in der elektrischen Energieversorgung, im Steuergerät selbst oder in der Synchronmaschine weiterhin eine Regelung der Querdynamik zu ermöglichen, muss die Energie aus zwei voneinander unabhängigen oder zumindest

von zwei im Fehlerfall voneinander trennbaren Quellen bereitgestellt werden. Grundsätzlich muss jede Funktion inklusive der daran beteiligten Systeme hinsichtlich der notwendigen Versorgungssicherheit untersucht werden. Welche Fehler, die bezüglich der elektrischen Energieversorgung auftreten könnten, ausgeschlossen werden oder zumindest beherrschbar sein müssen, leitet sich aus der Gefahren- und Risikoanalyse für das Gesamtsystem bzw. aus den Gefahren- und Risikoanalysen für einzelne Funktionen ab. Für hochautomatisierte Fahrfunktionen wie den Staupiloten ergeben sich aus diesen Gefahren- und Risikoanalysen umfassende Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung. Sicherheitsrelevante Verbraucher auf Systemebene müssen gemäß der ISO 26262 entweder mit ASIL-C oder ASIL-D abgesichert werden (vgl. hierzu Unterkapitel 4.6).

Die eine bestimmte Funktion ermöglichenden bzw. umsetzenden Verbraucher müssen während des Fahrbetriebs in einem stabilen Spannungsbereich versorgt werden. Zur Erfüllung dieser Anforderung ist eine hinreichend große Energiemenge aus der Batterie, dem Generator bzw. dem Gleichspannungswandler erforderlich. Mit geeigneten Energiemanagementsystemen bzw. leistungsfähigen Quellen wie Generatoren oder Gleichspannungswandlern kann eine stabile Spannungslage auch während anspruchsvoller Lastzyklen gewährleistet werden. Zur Sicherstellung der Spannungsstabilität muss jedoch nicht nur die Leistungsfähigkeit der Quellen sichergestellt sein, sondern darüber hinaus muss auch eine hinreichende Dimensionierung der Vernetzung gewährleistet sein. Sowohl während statischer als auch während dynamischer Versorgungsphasen muss der Spannungsabfall, der zum einen durch den Widerstand der Verbindung sowie zum anderen durch deren induktiven Anteil über die Fahrzeuglebensdauer hinweg verursacht wird, möglichst gering sein. Im Hinblick auf die Vernetzung gelten dabei umfangreiche Anforderungen an

- die Versorgungsleitungen sowie an den Leitungsquerschnitt und die Länge der Leitungen,
- die Anbindung der Masse (0V-Potential), dabei im Wesentlichen an die Übergangswiderstände, an den Widerstand der Schraub- oder Steckverbindung, an den jeweiligen Massebolzen und an den Widerstand, der durch die Karosserie verursacht wird, sowie
- die Übergangswiderstände der Steck- und Schraubverbindungen.

Die Übergangswiderstände verändern sich vor allem durch Alterung, weshalb es wichtig ist, nicht nur auf die Quellenleistung, sondern auch auf die Vernetzung zu achten.

4.5 Fehler in der elektrischen Energieversorgung

Zur Gewährleistung der elektrischen Energieversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher muss jede Architektur auf ihre Fehlersensitivität gegenüber den zu erfüllenden Sicherheitszielen untersucht und bewertet werden. Fehler in der elektrischen Energieversorgung bzw. an Verbrauchern können zu einer kritischen Versorgungslage und damit zur Gefährdung der Fahrzeugsicherheit führen. Gefährdungen durch Überlastungen, die in der Folge zu Bränden führen können, betreffen die Zuleitungen sowie die Verbraucher selbst. Bezüglich aller Komponenten müssen deshalb geeignete Konzepte vorliegen, um im Fall zu hoher Temperaturen keinen Fahrzeugbrand zu verursachen. Diese Grundanforderung wird auch als No Thermal Incidents (NOTI) bezeichnet und betrifft alle Komponenten der elektrischen Energieversorgung.

Die Anforderung der Sicherstellung einer zuverlässigen Versorgung im Fehlerfall konkurriert mit der Anforderung, die Leitungen vor Übertemperatur zu schützen. Bei der Anbindung leistungsintensiver Verbraucher an die elektrische Energieversorgung wird der Leitungsschutz zum Großteil über Schmelzsicherungen realisiert. Bei Kleinverbrauchern hingegen, die aus Zentralsteuergeräten versorgt werden, kommen zum Schutz der Leitungen vor Überstrom häufig Smart-FETs³ zum Einsatz. Um Verbraucher gezielt schalten und deren Versorgung überwachen zu können, werden neben Zentralsteuergeräten zunehmend auch elektrische Leistungsverteiler Power Distribution Unit (PDU) auf Halbleiterbasis eingesetzt

Zwischen der jeweils verwendeten Architektur, Topologie und Spannungsebene der elektrischen Energieversorgung gibt es diverse Wechselwirkungen, deren Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung berücksichtigt werden müssen. Zur Bewertung der Kritikalität eines Fehlers werden die Fehlerfälle daher hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die elektrische Energieversorgung und die Versorgungssicherheit diskutiert. Unterschieden wird dabei zwischen

³ Smart-FETs sind Mosfets mit integrierter Eigenlogik. Sie werden als Relais- und Sicherungserersatz eingesetzt.

Fehlern, die zu einer Unterspannung in der elektrischen Energieversorgung führen, und solchen, die zu einer Überspannung führen.

Alle Komponenten in der elektrischen Energieversorgung können von Fehlern betroffen sein, die das Versagen der elektrischen Energieversorgung zur Folge haben und dadurch zu einer kritischen Versorgungslage führen können. Auf der Basis der in Abbildung 4.9 dargestellten exemplarischen elektrischen Energieversorgung werden unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel eingeführten Teilsysteme

- Energiespeicher,
- Energiewandlung,
- Vernetzung sowie
- Leistungs- und Energiemanagement

mögliche Fehlerfälle hergeleitet. Hierbei werden die wesentlichen Komponenten einer 12V-Spannungsebene sowie drei verschiedene Varianten möglicher Energiequellen berücksichtigt. Eine Basisarchitektur beinhaltet eine Batterie B_1 als Energiespeicher und einen 12V-Generator zur Energiewandlung. Als weitere Stützelemente können zusätzlich Pufferspeicher Q_S oder weitere Energiespeicher B_2 eingesetzt werden.

Wird in der Fahrzeugarchitektur eine zweite Spannungsebene realisiert, ist der in Abbildung 4.9 dargestellte Gleichspannungswandler (9) erforderlich. Über diesen werden der Energiespeicher geladen und die 12V-Spannungsebene versorgt, vorausgesetzt, der Generator speist Energie in die höhere Spannungslage ein bzw. (in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen) bei einem der Energiespeicher handelt es sich um die Traktionsbatterie. Wie bereits mehrfach angesprochen, kann prinzipiell jede in der elektrischen Energieversorgung verbaute Komponente fehlerhaft werden. Fehler in der elektrischen Energieversorgung wirken sich dabei vor allem auf die Spannungsstabilität negativ aus: Entweder tritt aufgrund von Überlastung eine kurzzeitige Unterspannung ein oder das Energiegleichgewicht wird grenzwertig. In beiden Szenarien handelt es sich um einen kritischen Zustand, der zum Ausfall von Verbrauchern führen kann. Als Standards für zulässige Spannungsbereiche gelten die ISO 16750-1 [70] bzw. die VDA LV-124, LV-148 und VDA 320 [166]. Darüber hinaus existieren herstellerspezifische Ausführungen als Werksnormen, z. B.

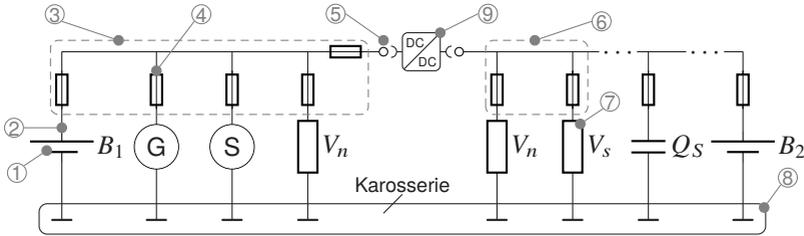


Abbildung 4.9: Exemplarische Darstellung der Komponenten eines elektrischen Energieversorgungssystems mit 12V- bzw. 48V-Spannungsebene, zwei Energiespeichern, einem Stützelement und optionalem Gleichspannungswandler

- bei der BMW AG die Werksnorm GS 95024-2 [19],
- bei der Mercedes-Benz AG die MBN 10567 [105] und
- bei der VW AG die VW 80000 [172].

In den genannten Standards werden verschiedene Prüfzenarien für elektrische Komponenten definiert, z. B. die Prüfung E-02 für transiente Überspannung oder die Prüfung E-03b für transiente Unterspannung.

Aus den vorgegebenen Prüfzyklen lassen sich allgemeingültige Spannungsbereiche ableiten, was wiederum als Grundlage für die Bestimmung dessen dient, was als eine zuverlässige elektrische Energieversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher anerkannt werden kann. Beispielsweise muss ein im Rahmen der angegebenen Standards qualifizierter sicherheitsrelevanter Verbraucher während des Fahrbetriebs in einem Spannungsbereich zwischen 9,8 und 16 Volt ohne Einschränkungen die volle Funktionsfähigkeit aufweisen. Für Spannungswerte zwischen 16 und 18 Volt gelten folgende Spannungszeitbereiche:

$$u(t) = \begin{cases} \geq 18V, & t \leq 400ms \\ \geq 17V, & t \leq 600ms \\ \geq 16V, & t \leq 2s. \end{cases} \quad (4.1)$$

Für Spannungswerte kleiner als 9,8 Volt gelten folgende Spannungszeitbereiche:

$$u(t) = \begin{cases} \geq 9V, & t \leq 500ms \\ \geq 0V, & t \leq 100\mu s. \end{cases} \quad (4.2)$$

Liegen die Werte der Versorgungsspannung außerhalb der angegebenen Spannungszeitbereiche werden die Verbraucher nicht im Rahmen der für sie vorgegebenen Spezifikationen betrieben und sind somit als ausgefallen zu werten. Neben Unterspannungen sind auch Überspannungen kritisch. Alle Teilsysteme und deren Komponenten sind auf einen festen Spannungsbereich, aber auch auf eine Maximalspannung ausgelegt. Bei Spannungswerten, welche die spezifizierte Spannungslage übersteigen, werden die Eingangsbeschaltungen der Steuergeräte irreversibel geschädigt und fallen fehlerhaft aus. Zu solchen Fällen von Überspannungen kommt es, wenn leistungsintensive Verbraucher abgeschaltet werden und dabei

- der Generator aufgrund seiner Zeitkonstante und Restremanenz die Ausgangsleistung nicht schnell genug reduziert und
- die Induktivität der Zuleitung durch die gespeicherte Energie den Strom weiter aufrechterhält, bis die Restenergie in der Zuleitung abgebaut ist.

Werden Gleichspannungswandler eingesetzt, kann das Problem der Überspannung durch eine schnellere Regelung und die damit verbundene Reduktion der Stromanstiegszeiten begrenzt werden.

Der Ausfall von Komponenten kann verschiedene Ursachen haben. Die korrekte Identifikation der Fehlerursache wird dabei durch die Komplexität der beteiligten Wirkmechanismen – die zum einen durch die Komplexität der Komponenten selbst und zum anderen durch die vorliegenden Einflussparameter bedingt ist – zusätzlich erschwert.

Für die in Abbildung 4.9 dargestellten Komponenten lassen sich mehrere Komponentenfehler angeben. In der folgenden Beschreibung werden die wesentlichen Fehler und deren Auswirkungen diskutiert. Dabei ist zwischen den Fehlerbildern „offen“, „kurzgeschlossen“ und „Parameteränderung infolge von Alterung“ zu unterscheiden .

Beim offenen Ausfall des Energiespeichers (1) wird die elektrische Energieversorgung nur aus dem Generator gespeist, erfolgt also ohne weiteres Stützele-

ment bzw. ohne zusätzlichen Energiespeicher. Da Leistungsspitzen, verursacht z. B. durch ein Lenkmanöver, über den Generator aufgrund dessen geringer Dynamik nur bedingt versorgt werden können, kann es in der elektrischen Energieversorgung zum Auftreten von Unterspannungen kommen. Die Fehlerursache liegt dabei entweder im Energiespeicher selbst (1), in der Kontaktierung und Zuleitung (2) oder der Fehler wird durch eine offene Sicherung (4) verursacht.

In Kraftfahrzeugen werden Hauptsicherungen entweder als einzelne Schmelzsicherungen oder als Sicherungsverteiler (3, 6) auf einem gemeinsamen Träger ausgeführt. Führt eine an den Sicherungsverteiler angeschlossene Komponente einen zu hohen Strom, kommt es zur Erwärmung des gesamten Verteilers. In der Folge kann es zur Vorschädigung nicht beteiligter Sicherungselemente kommen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für den offenen Ausfall anderer Sicherungen erhöht wird.

Fehler im Teilsystem Energiespeicher können zur Gefährdung der elektrischen Energieversorgung durch Unterspannung führen. Fällt bspw. aufgrund eines Kurzschlusses der Energiespeicher selbst aus oder ist dessen Zuleitung durch eine Schädigung mit der Fahrzeugmasse verbunden, kommt es aufgrund des hohen Sicherungswerts zu einem deutlichen Spannungseinbruch in der elektrischen Energieversorgung. Um hierdurch bedingte Gefahrensituationen zu vermeiden, müssen die Zuleitungen sowie der Bereich um den Hauptverteiler in konstruktiv geschützten Bereichen platziert bzw. in solche Bereiche verlegt werden.

Ein anderes Gefahrenszenario ist ein offener Ausfall des Generators. In diesem Szenario ist die elektrische Energieversorgung allerdings nicht direkt gefährdet, da die Versorgungsspannung aufgrund der Kapazitäten der typischerweise verbauten Energiespeicher sowie aufgrund der in der elektrischen Energieversorgung bestehenden Dauerlasten über einen längeren Zeitraum hinweg aufrechterhalten werden kann. Zur Verdeutlichung dieser Situation sind in Abbildung 4.10 die Entladedauern für verschiedene Energiespeicher über die Dauerlast der elektrischen Energieversorgung dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, hängt die Entladedauer von der Höhe des Entladestroms sowie vom Alterungszustand der jeweiligen Blei-Säure-Batterie ab. Zudem wird ersichtlich, dass die elektrische Energieversorgung auch bei hohen Belastungen über eine hinreichend lange Dauer hinweg eine Spannung von über 9,8 Volt bereitstellen kann, wodurch eine Gefährdung durch eine statische Unterspannung von kleiner 9,8 Volt erst nach mehreren Minuten eintritt.

Fällt im Gegensatz dazu das Teilsystem Generator aus, z. B. durch den Kurz-

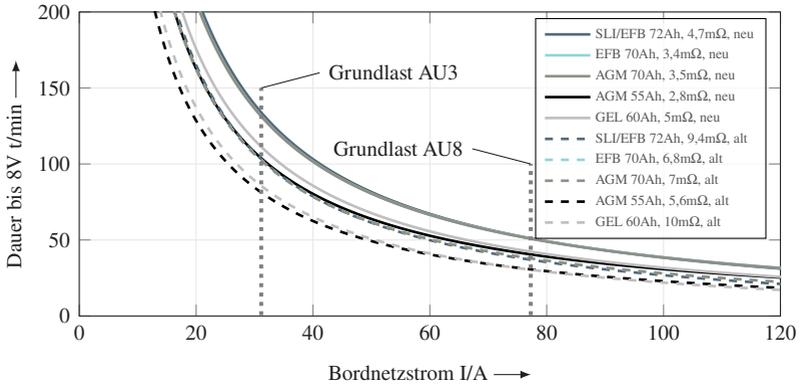


Abbildung 4.10: Entladungsdauer verschiedener Blei-Säure-Batterien in neuem sowie in gealtertem Zustand, simuliert anhand eines vereinfachten Batterie- und Bordnetzmodells. Zusätzlich eingezeichnet sind die gemessenen mittleren Grundlasten aus den in Abschnitt 5.1.3 ausgewerteten Versuchsfahrten mit einem Audi A3 und einem Audi A8.

schluss einer Gleichrichterdiode, wird das System der elektrischen Energieversorgung hoch belastet und es ist mit deutlichen Spannungseinbrüchen zu rechnen.

Unzulässige Unterspannungen können in der elektrischen Energieversorgung aufgrund unzureichender Quellenleistung und aufgrund eines kurzgeschlossenen Verbrauchers mit hohen Sicherungswerten auftreten [148]. Neben kritischen Fehlern der Quellen wird die Spannungsstabilität aber auch durch den Kurzschluss von Verbrauchern gefährdet. Hierbei korreliert die Unterspannung mit dem Absicherungswert und dem Kurzschlusspfadwiderstand. Doch nicht nur Verbraucher, sondern auch deren Zuleitungen können fehlerhaft werden. Zum Schutz von Zuleitungen werden gewöhnlich Schmelzsicherungen eingesetzt, die aufgrund ihrer Auslösecharakteristik bei einem Kurzschluss ebenfalls die Stabilität und damit die Versorgungssicherheit der elektrischen Energieversorgung gefährden.

Mit der Erweiterung der klassischen 12V-Architektur um weitere Energiespeicher, die als Pufferspeicher fungieren, können Unterspannungen für sicherheitsrelevante Verbraucher reduziert, jedoch nicht verhindert werden. Ist die Größe des Speichers unzureichend oder ist dessen Anbindung ungeeignet, ist die Möglichkeit von Kurzschlüssen nach wie vor gegeben. Außerdem können

zusätzliche Speicher durch Eigenfehler ebenfalls Unterspannungen in der elektrischen Energieversorgung verursachen.

Die Hinzunahme einer weiteren Spannungsebene, z. B. 48 Volt oder 400 Volt, geht mit dem Einsatz von Gleichspannungswandlern (9) einher. Hierbei kann es bezüglich des Gleichspannungswandlers zu mehreren Fehlerszenarien kommen. Zum einen ist ein Kurzschluss der Eingangs- und Ausgangsspannung gegen Masse und zum anderen ein Kurzschluss gegen das höhere Potential möglich. Bei einem Kurzschluss gegen Masse wird entweder die Niederspannungs- oder die Hochspannungsseite niederohmig. Da der Gleichspannungswandler hochgradig abgesichert werden muss, führt ein Kurzschluss zu einem unzulässig tiefen Spannungseinbruch, infolgedessen die Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher nicht länger sichergestellt werden kann. Die Verbraucher und deren Eingangsbeschaltung können zusätzlich irreversibel geschädigt werden, wenn beide Spannungspotentiale (12 Volt und 0 Volt) durch einen Fehler miteinander verbunden sind.

Mit Blick auf den Verbraucher (7) ist zu sagen, dass dieser dann nicht mehr versorgt wird, wenn die Zuleitung zum Verbraucher, dessen Leitungsschutz oder die Anbindung an die Fahrzeugmasse (8) fehlerhaft sind. Generell verursacht ein aufgrund eines Kurzschlusses ausgefallener Verbraucher je nach Höhe der Absicherung eine Unterspannung in der elektrischen Energieversorgung. Die elektrische Energieversorgung für sicherheitsrelevante Verbraucher muss also dazu in der Lage sein, die Versorgungsspannung für alle Verbraucher während eines Kurzschlusses stabil zu halten oder den Fehler zu isolieren.

4.6 Risikobewertung für hochautomatisierte Funktionen

Für die elektrische Energieversorgung von hochautomatisierten Funktionen ist neben der Spannungsqualität vor allem die Zuverlässigkeit wesentlich. Beim Einsatz von Assistenzsystemen bzw. Funktionen, welche selbstständig die Längs- und Querführung regeln, muss zu jedem Zeitpunkt der Fahrzeugaktivität eine hinreichende elektrische Energieversorgung gewährleistet sein. Befinden sich Verbraucher in einer kritischen Versorgungslage, können wesentliche Fahrzeugfunktionen nicht mehr ausgeführt werden und das Fahrzeug befindet sich in einem kritischen Gesamtzustand. Die Kritikalität für eine Gefährdung kann dabei abhängig vom ggf. notwendigen Fahrmanöver sowie von den je-

weils vorliegenden Umweltbedingungen deutlich zunehmen. Wird bspw. mit aktivem SP oder AP ein Bremsvorgang bzw. ein Ausweichmanöver nötig, um den sicheren Fahrzeugzustand zu erreichen, müssen beide Systeme zuverlässig funktionieren.

Das Risiko für die Gefährdung von Leib und Leben lässt sich nach der in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Methode auf der Basis der ISO 26262 Teil 3 einstuft. Aus dieser Einstufung lassen sich wiederum entsprechende Sicherheitsziele ableiten. Zu diesem Zweck werden die Fehlfunktionen der wesentlichen Fahrzeugsysteme mittels drei Haupt- und je einer Unterkategorie bewertet. Diese sind

- die Fehlerauswirkungen (classes of severity),
 - die von „keine Verletzungen (S0)“ bis „lebensbedrohliche Verletzungen (S3)“ reichen,
- die Eintrittswahrscheinlichkeit (classes of probability of exposure),
 - die von „unwahrscheinlich (E0)“ bis „hohe Wahrscheinlichkeit (E4)“ reicht, und
- die Kontrollierbarkeit (classes of controllability),
 - die von „grundsätzlich kontrollierbar (C0)“ bis „schwer oder nicht kontrollierbar (C3)“ reicht.

Eine Gefährdungslage tritt ein, wenn eines der Assistenzsysteme

- ausfällt,
- eine zu geringe oder aber
- eine zu hohe Systemleistung aufweist.

Bei hochautomatisierten Assistenzsystemen wie SP und AP ist während der Funktionsausführung zur Sicherstellung einer sicheren Fahrzeugführung der Einsatz mehrerer Sensoren, Steuergeräte und Aktoren notwendig. Fehler in diesen Komponenten können zu verschiedenen schweren Unfällen führen. Der Schweregrad des Unfalls ist dabei von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Verkehrssituation sowie vom notwendigen Ausweichmanöver abhängig [61],

[53]. Zur Einstufung der Gefährdung wird angenommen, dass die Systeme SP und AP jeweils aktiv sind und das Kraftfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von mehr als 40 km/h unterwegs ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass kein Eingriff seitens des Fahrzeugführers erfolgt, da nach [63] die Zeit, ehe der Fahrzeugführer die Kontrolle übernehmen könnte, deutlich über der Reaktionszeit liegt, deren Einhaltung notwendig wäre, um das Fahrzeug rechtzeitig in einen sicheren Zustand zu überführen.

Auf der Basis dieser Definition der erforderlichen Randbedingungen, die vorherrschen müssen, um eine Einstufung der Gefährdungslage vorzunehmen, können nun die Sicherheitsziele für die elektrische Energieversorgung abgeleitet werden. Hierfür muss zunächst hinsichtlich aller beteiligten Systeme das Risiko bewertet werden, das von Gefährdungszuständen bei Fehlfunktionen oder bei einem Ausfall der folgenden wesentlichen Fahrzeugsysteme besteht. Diese sind

- das Brems-,
- das Lenk- und
- das Antriebssystem (via VMK oder E-Maschine).

Eine Gefährdung tritt ein, wenn das *Bremssystem* kein Bremsmoment (G1), ein zu geringes Bremsmoment (G2), ein zu hohes Bremsmoment (G3) oder ein unsymmetrisches Bremsmoment (G4) aufbringt. Infolge dieser Fehler kann entweder eine Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug nicht mehr verhindert werden oder das folgende Fahrzeug fährt auf (G1 bis G3). Ist das Bremsmoment zu hoch oder unsymmetrisch, kann zusätzlich ein Unter- oder Übersteuern und dadurch ein instabiler Fahrzeugzustand verursacht werden. Somit ist die Schadensschwere für G1 bis G4 mit S3 zu bewerten.

Das *Lenksystem* verursacht eine Fahrzeuggefährdung, wenn kein (G5), ein zu geringer (G6) oder ein zu hoher Lenkwinkel (G7) eingestellt wird. Muss ein Ausweichmanöver durchgeführt werden, z. B. ein Spurwechsel, kann dies bei Eintreten von G5 und G6 nicht realisiert werden. Wie beim Versagen des Bremssystems muss in diesem Fall von einem hohen Verletzungsrisiko ausgegangen werden und die Gefährdungslage ist entsprechend mit S3 zu bewerten. Im Fall G7 kann ein Ausweichmanöver zwar ggf. durchgeführt werden, durch den zu hohen Lenkwinkel wird das Fahrzeug unter Umständen jedoch instabil. Auch hier besteht also das höchste Verletzungsrisiko S3.

Das *Antriebssystem* führt zu einer Gefährdung, wenn es keine (G8), eine zu

niedrige (G9) oder eine zu hohe Antriebskraft (G10) aufbringt. Kann keine bzw. nur eine zu geringe Antriebskraft aufgebracht werden, führt dies möglicherweise zu einer kritischen Verkehrssituation und damit zu einer Gefahr für alle Beteiligten. Bringt das System eine zu hohe Antriebskraft auf, kann das Fahrzeug instabil werden oder einen Auffahrunfall mit dem vorausfahrenden Fahrzeug verursachen. Da für die Fälle G8 bis G10 ein hohes Verletzungspotential vorliegt, wird auch hier das höchste Verletzungsrisiko S3 als Fehlerauswirkung angenommen. Da AP und SP im fließenden Verkehr aktiv sind und somit ein Großteil der Verkehrssituation betroffen ist, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit ebenfalls als hoch und dementsprechend mit E4 eingestuft. Da im Fall des Einsatzes von AP und SP das System eigenständig einen sicheren Zustand erreichen muss, wird die Kontrollierbarkeit mit C3, also als nicht kontrollierbar gewertet.

Um eine Gefährdung des Fahrzeugs bzw. des Verkehrs zu vermeiden, müssen zusätzlich zum Brems-, Lenk- und Antriebssystem weitere Verbraucher wie das Lichtsystem (Front und Heck) mit Energie versorgt werden. Bei nicht vorhandener oder schlechter Straßenausleuchtung kann durch eine fehlende Frontausleuchtung die Erfassung von Sensordaten, z. B. zur Ermittlung der Spur mittels Kameradaten, deutlich beeinträchtigt werden. Nicht funktionierende Rückleuchten bzw. bei einem Bremsvorgang nicht funktionierende Bremsleuchten können ebenfalls zu einer Verkehrsgefährdung führen. Zur Vereinfachung werden die möglichen Gefährdungen, die durch einen Ausfall der diversen Beleuchtungseinrichtungen verursacht werden können, zu der Kategorie „Ausfall des Lichtsystems (G11)“ zusammengefasst. Die Fehlerauswirkung ist bezüglich dieser Kategorie aufgrund eines möglichen Unfalls mit S3 zu werten. Da ein Ausfall des Lichtsystems vor allem bei Fahrten in Dunkelheit einen negativen Einfluss hat und sehr viele Pendlerfahrten (insbesondere im Winterhalbjahr) bei Dunkelheit unternommen werden, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit mit E3 gewertet. Die Kontrollierbarkeit wird hingegen mit C2 eingestuft, da eine Unterversorgung des Lichtsystems lediglich einen kleinen Anteil der Sensoren des SP bzw. AP beeinträchtigt; an sich bleibt das Fahrzeug jedoch steuerbar.

Auf der Basis der in Tabelle 4.1 zusammengefassten Gefährdungen lassen sich die ASIL-Einstufungen sowie die Sicherheitsziele ableiten. Das jeweilige Sicherheitsziel ist hier die Vermeidung einer Gefährdungslage durch G1 bis G11. Unter der Annahme, dass eines der genannten Systeme aufgrund einer zu geringen elektrischen Energieversorgung ausfällt und somit eine Gefährdungssituation vom Typ G1 bis G11 eintreten kann, muss auch bezüglich der

Systeme	Systemleistung	Gefährdung	S	E	C	ASIL
Bremsssystem	keine	G1	S3	E4	C3	D
	zu gering	G2	S3	E4	C3	D
	zu hoch	G3	S3	E4	C3	D
	unsymmetrisch	G4	S3	E4	C3	D
Lenksystem	keine	G5	S3	E4	C3	D
	zu gering	G6	S3	E4	C3	D
	zu hoch	G7	S3	E4	C3	D
Antriebssystem	keine	G8	S3	E4	C3	D
	zu niedrig	G9	S3	E4	C3	D
	zu hoch	G10	S3	E4	C3	D
Lichtsystem	keine	G11	S3	E3	C2	B

Tabelle 4.1: Resultat der Gefahren- und Risikoanalyse für die untersuchten Fahrzeugsysteme

elektrischen Energieversorgung für die einzelnen Systeme ein Zuverlässigkeitsniveau von ASIL-D sichergestellt werden.

4.7 Zusammenfassung

Unabhängig von der jeweiligen Funktionsausgestaltung muss die elektrische Energieversorgung in jedem Fall unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Unbedingt zu vermeiden ist ein plötzlicher Systemausfall durch einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Zudem ist sicherzustellen, dass jederzeit ein hinreichendes Maß an Energie zur zuverlässigen Funktionsausführung bereitgestellt werden kann. Im Falle eines Fehlers muss die elektrische Energieversorgung über Möglichkeiten verfügen, den Fehler zu isolieren bzw. sicherheitsrelevante Verbraucher auch dann weiter versorgen zu können, wenn die Fehlerisolierung nicht gelingt. Jeder Verbraucher, der an der Bereitstellung einer autonomen Fahrfunktion beteiligt ist, muss mindestens in dem Ausmaß mit Energie versorgt werden, das zur Funktionsausführung notwendig ist. Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Anforderungen an die elektrische Energieversorgung: Sie muss

1. jeden Verbraucher im vorgegebenen Spannungsbereich mit Energie versorgen,
2. Leistungsspitzen ausgleichen, um Unterspannung zu vermeiden,
3. eine Mindestmenge an Energie vorhalten und
4. für hochautomatisierte Assistenzsysteme wie SP und AP eine sichere elektrische Energieversorgung (Einstufungsniveau ASIL-D) gewährleisten.

Im vorgegebenen Spannungsbereich muss die Versorgung der Verbraucher durch eine geeignete Auslegung der elektrischen Energieversorgung sichergestellt werden. Diese basiert im Wesentlichen auf der Speicherkapazität der Energiespeicher sowie auf einem leistungsfähigen Generator bzw. Gleichspannungswandler und dessen Regelung [64], [138].

Ebenfalls maßgebend für eine stabile elektrische Energieversorgung ist die Vernetzung. Bei zu hohen Widerständen der Leitungen bzw. bei Kontaktstellen kann es zu erheblichen Spannungsabfällen kommen, was in kritischen Situationen dazu führen kann, dass keine ausreichende Spannungsstabilität sichergestellt werden kann [57]. Um eine stabile elektrische Energieversorgung realisieren zu können, sind exakte Leistungsprofile der Verbraucher sowie deren Betriebsprofile erforderlich.

Die Einhaltung der Spannungslage sowie die Robustheit der Komponenten der elektrischen Energieversorgung und der Verbraucher ist über die Norm LV 124 bzw. für 48V-Systeme über die Norm LV 148 sowie über zusätzliche, herstellereigenspezifische Standards geregelt. Jede in Kraftfahrzeugen eingesetzte Komponente muss diese Normen erfüllen bzw. einhalten. Dadurch wird in Teilen bereits eine robuste elektrische Energieversorgung hinsichtlich der Spannungslage erreicht.

Die Frage nach dem mindestens notwendigen Energievorhalt kann nicht allgemeingültig beantwortet werden. Der exakte Wert hängt im konkreten Fall von drei Dingen ab: erstens von der gewählten Architektur, zweitens von dem durch eine Risikobewertung als sicher definierten Zustand und drittens von der Energiemenge, die benötigt wird, um den als sicher definierten Zustand zu erreichen. An hochautomatisierte Assistenzsysteme und Funktionen wie SP und AP werden bereits erhöhte Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung und der Funktionsausführung gestellt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Architekturen, Spannungsebenen und Ver-

braucherprofile müssen hierbei Berücksichtigung finden.

Für eine umfassende Zuverlässigkeitsbewertung ist neben der Funktionalität im fehlerfreien Betrieb auch die Robustheit gegenüber Fehlern relevant. Für autonome bzw. hochautomatisierte Fahrfunktionen muss die elektrische Energieversorgung des Brems-, Lenk- und Antriebssystems mit einem Bewertungsniveau von ASIL-D gewährleistet werden; für die elektrische Energieversorgung des Lichtsystems ist ein Niveau von ASIL-B erforderlich (vgl. hierzu Tabelle 4.1). Zur Erreichung dieser Sicherheitsziele ist eine genaue Kenntnis der Prozessabläufe in der Entwicklung sowie des Fehlerverhaltens einzelner Komponenten (darunter der Verbraucher und der elektrischen Energieversorgung selbst) relevant. Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems der elektrischen Energieversorgung ist eine frühzeitige Bewertung entscheidend. Die elektrische Energieversorgung kann dabei auf der Basis

- der Spannungsstabilität,
- der Zuverlässigkeit,
- der Fehlerreaktion und deren Auswirkungen,
- der Eigensicherheit und
- der Kosten

bewertet werden. Die *Spannungsstabilität* bezieht sich auf die Einhaltung aller Spannungsgrenzen während des Normal- und Fehlerbetriebs. Mittels der *Zuverlässigkeit* lässt sich eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Fehlern treffen und somit die Einhaltung des geforderten Sicherheitsziels gewährleisten. Anhand der *Fehlerreaktion und deren Auswirkungen* wird der Einfluss auf sicherheitsrelevante Verbraucher überprüft. Die *Eigensicherheit* bezieht sich auf die Thematik NOTI sowie auf die Vermeidung von Gefährdungen durch Stromstöße bei Fahrzeugen mit höheren Spannungsebenen. Die *Kosten* der elektrischen Energieversorgung lassen sich aufgrund der vertraglich vorgegebenen Verschwiegenheitsklauseln nicht transparent bewerten. Daher werden die Kosten in dieser Arbeit nicht zur Bewertung herangezogen.

Für eine ganzheitliche Betrachtung der aufgezählten Einflussfaktoren sind neben umfangreichen Simulationen der elektrischen Energieversorgung vor allem Versuchsfahrten notwendig. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit

mit einem Fokus auf die Untersuchung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung für hochautomatisierte Systeme durchgeführt.

5 Belastungs- und Zuverlässigkeitsmodelle der Komponenten der elektrischen Energieversorgung

In diesem Kapitel werden Modelle zur Berechnung der Belastungen sowie der Ausfallwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Komponenten der elektrischen Energieversorgung entwickelt, beschrieben und anhand von Messdaten validiert.

In Unterkapitel 5.2 wird ein auf der Weibull-Verteilung basierendes Modell zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Blei-Säure-Batterien entwickelt, da sich in den einschlägigen Standards nur bedingt Ausfalldaten bzw. Fehlerratenmodelle für das Teilsystem Energiespeicher finden. Als Berechnungsgrundlage werden Daten aus Werkstattwechselintervalluntersuchungen von 436.357 fehlerhaften Blei-Säure-Batterien genutzt [110].

Mit Bezug auf das Teilsystem Energiewandlung wird in Unterkapitel 5.3 ein Modell für den 12V-Klauenpolgenerator sowie in Unterkapitel 5.4 ein Modell für den 48V/12V-Gleichspannungswandler vorgestellt. Für beide Komponenten wird jeweils ein Verlustleistungs-, Temperatur- und Fehlerratenmodell erstellt. Zusätzlich werden für beide Komponenten eigene Fehlerbäume erstellt und beschrieben, um die spezifischen Fehlerwahrscheinlichkeiten modellbasiert berechnen zu können.

Generell gilt, dass zur Berechnung der Zuverlässigkeit einer Komponente die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt aller relevanten Fehler bekannt sein müssen. Hierfür müssen die Fehlerereignisse einzelner Bauteile analysiert und ausgewertet werden, wobei der maßgebliche Faktor die Belastung der einzelnen Komponenten und deren Bauelemente ist. Die Belastung der Komponenten der elektrischen Energieversorgung ist abhängig von der Fahrzeugklasse, dem Fahrprofil und den vorliegenden Umwelteinflüssen. Wie in Unterkapitel 4.2, Abbildung 4.4 dargestellt wurde, ist der Strombedarf der Verbraucher

bei niedrigen Temperaturen, also im Winterbetrieb, besonders hoch. Folglich nimmt auch die Belastung der Teilsysteme der elektrischen Energieversorgung im Winterbetrieb zu. Zur Erfassung der genannten Einflussparameter wurden daher bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen Messfahrten mit zwei verschiedenen Fahrzeugen und vier verschiedenen Streckenprofilen durchgeführt. Im folgenden Unterkapitel 5.1 werden die untersuchten Strecken und der Messaufbau beschrieben; anschließend werden die daraus abgeleiteten Ergebnisse ausgewertet und abschließend diskutiert.

5.1 Fahrprofil

In einem Fahrprofil sind alle für die hier verfolgten Zwecke wesentlichen Einflussfaktoren zusammengefasst. In Bezug auf die Zuverlässigkeitsberechnungen ist von Interesse, welchen Einflüssen und Belastungen die elektrische Energieversorgung und deren Teilsysteme ausgesetzt sind. Dabei ist die Belastung der elektrischen Energieversorgung und deren Komponenten von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Welche Momentanleistung von den jeweiligen Verbrauchern in Summe umgesetzt wird, ist abhängig

- von den vorliegenden Umwelt- und Witterungsbedingungen,
- vom Kundenverhalten und
- von der Streckenart.

Maximalbelastungen erfährt die elektrische Energieversorgung z. B. durch das Starten der VKM. Je nach Streckentyp (Autobahn, Landstraße oder Stadt) und der davon abhängigen Häufigkeit von Start-Stopp-Zyklen wird die VKM unterschiedlich oft gestartet bzw. abgeschaltet. Durch die bei jedem Start fließenden Maximalströme nimmt die Belastung aller beteiligten Komponenten zu.

Die Belastung wird zumindest zeitweise aber auch durch andere Verbraucher erhöht, insbesondere von einer Vielzahl an leistungsintensiven Verbrauchern wie z. B. Heizelementen oder dynamischen Fahrwerkssystemen, die in Fahrzeugen der Oberklasse verbaut werden. Um zu analysieren, welche Ströme bzw. Leistungen mit welcher Häufigkeit in der elektrischen Energieversorgung auftreten, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Messfahrten mit einem Audi A3 (AU3) sowie einem Audi A8 (AU8) durchgeführt. Beide Fahrzeuge

wurden mit entsprechender Messtechnik ausgerüstet.

Im folgenden Abschnitt werden vier Streckentypen vorgestellt, die für die Zwecke der hier durchgeführten Untersuchungen entwickelt wurden. In den sich daran anschließenden Abschnitten werden der Versuchsaufbau beschrieben und die Messergebnisse ausgewertet.

5.1.1 Strecken

Mit Blick auf die elektrische Energieversorgung soll die Frage beantwortet werden, welchen Belastungen eine Komponente bzw. deren Bauelemente während des Fahrbetriebs ausgesetzt ist bzw. sind. In der Komponentenentwicklung werden für die Entscheidungsfindung und die Auslegung der Komponenten Grenzwertbetrachtungen genutzt. Zur Berechnung der Zuverlässigkeit hingegen ist von Interesse, wie die Komponenten über ihre Lebens- und Nutzungsdauer hinweg belastet werden.

Die in Unterkapitel 4.2 vorgestellten Verbrauchertypen verursachen unterschiedlich hohe Belastungsintensitäten. Während Dauerverbraucher die Grundlast bestimmen, hängt die Höhe der Leistungsspitzen von Langzeit- und Kurzzeitverbrauchern ab. Wie häufig und wie lange diese verschiedenen Verbraucher genutzt werden, hängt wiederum von den Kundenanforderungen ab. Mit sinkenden Temperaturen nehmen sowohl die Häufigkeit als auch die Dauer der Nutzung von Heizelementen zu, sodass die elektrische Energieversorgung höhere Leistungen bereitstellen muss.

Um möglichst viele Arten des Kundenverhaltens aussagekräftig abbilden zu können, wurden auf der Basis der Ergebnisse von [50] vier unterschiedliche Streckenprofile definiert. Nach [50] legen in Deutschland ca. 40 Prozent der Autofahrer täglich eine Strecke zwischen 0 und 10 Kilometer, weitere ca. 40 Prozent eine Strecke zwischen 11 und 50 Kilometer und die verbleibenden ca. 20 Prozent eine Strecke von mehr als 51 Kilometer mit dem PKW zurück. Auf der Basis dieser statistischen Erhebungen wurden vier verschiedene Streckenprofile mit unterschiedlichen Längen definiert:

- die Kurzstrecke (KS) (0-10 Kilometer),
- die Kurze Pendlerstrecke (KPS) (11-50 Kilometer),
- die Lange Pendlerstrecke (LPS) (51-100 Kilometer) und

- die Langstrecke (LS) (>100km).

Des Weiteren wurde in der Untersuchung [4] gezeigt, dass die durchschnittliche Streckennutzung eines typischen Autofahrers in Deutschland bei 40 Prozent Autobahn, 33 Prozent Landstraße, 26 Prozent Stadt und 1 Prozent Naturstrecke liegt. Auf dieser Grundlage wurden für die vier Strecken KS, KPS, LPS und LS die folgend beschriebenen Streckenverläufe gewählt.

Der Streckenverlauf der Kurzstrecke ist in Abbildung 5.1 (a) dargestellt. Die

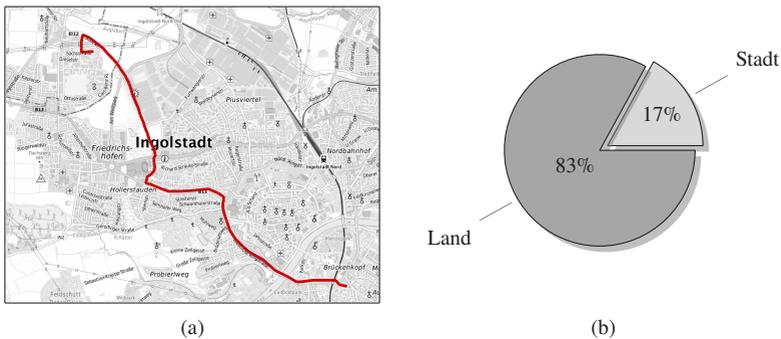


Abbildung 5.1: (a) Streckenverlauf der Kurzstrecke mit einer Länge von 7,44 Kilometer; (b) Verteilung des Streckentyps

Strecke besitzt eine Länge von 7,44 Kilometer und eine Verteilung des Streckentyps – zu sehen in (b) – von 83 Prozent Landstraße und 17 Prozent Stadt. Die Kurzstrecke repräsentiert kürzere Fahrten. Ein Großteil der Menschen in Deutschland nutzt das Fahrzeug jedoch für längere Fahrten, insbesondere für die Strecke zum Arbeitsplatz. Da die zurückgelegten Distanzen hierbei stark schwanken, wurden für das Profil Pendlerstrecke zwei Streckenlängen mit ähnlicher Verteilung der Streckentypen definiert: zum einen die in Abbildung 5.2 (a) dargestellte Kurze Pendlerstrecke mit einer Länge von 23,06 Kilometer und zum anderen die in Abbildung 5.3 abgebildete Lange Pendlerstrecke mit einer Länge von 81,17 Kilometer. Zur Untersuchung der Belastungen der elektrischen Energieversorgung während einer längeren Fahrt wurden Langstreckenfahrten mit einer Streckenlänge von 343,48 Kilometer durchgeführt. Die Streckenverteilung liegt in diesem Fall bei 1 Prozent Landstraße, 1 Prozent Stadt und 98 Prozent Autobahn. Die gefahrene Strecke ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Um während der Versuchsfahrten wesentliche Größen der Belas-

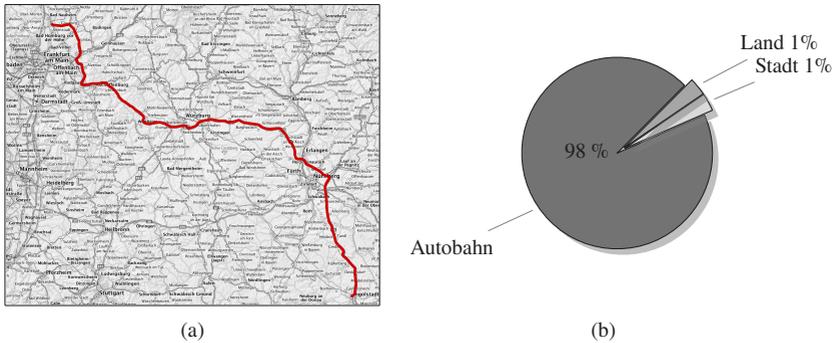


Abbildung 5.4: (a) Streckenverlauf der Langstrecke mit einer Länge von 344 Kilometer; (b) Verteilung des Streckentyps

5.1.2 Versuchsaufbau

Die für die elektrische Energieversorgung benötigte Energie wird von den Teilsystemen Energiespeicher und Energiewandlung bereitgestellt. Während die VKM inaktiv ist, werden die Verbraucher aus dem Energiespeicher versorgt. Bei aktiver VKM bzw. bei aktiven Hochvoltsystemen in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen übernimmt hingegen das Teilsystem der Energiewandlung die Versorgung. Hierbei wird die 12V-Ebene der elektrischen Energieversorgung entweder von einem Generator oder von einem Gleichspannungswandler gespeist. Aus der Summe aller Quellenleistungen ergibt sich die Gesamtleistung aller Verbraucher, aus der sich wiederum die Belastung der wesentlichen Komponenten der elektrischen Energieversorgung ableiten lässt.

Bei den beiden für die hier durchgeführten Untersuchungen eingesetzten Versuchsfahrzeugen handelt es sich um Fahrzeuge mit VKM und einer 12V-Architektur, bestehend aus einer Blei-Säure-Batterie als Hauptspeicher und einem Klauenpolgenerator zur Energiewandlung. Der AU8 besitzt eine VKM mit 6,3 Litern Hubraum, einer AGM-Fahrzeuggatterie mit 105 Ah Kapazität und einem wassergekühlten Generator mit einem Nennstrom von 190 Amperere. Das zweite Versuchsfahrzeug, der AU3, besitzt eine VKM mit 1,8 Litern Hubraum, einer Enhanced Flooded Battery (EFB)-Batterie mit 69 Ah und einem Generator mit 140 Ampere Nennleistung. Während der Versuchsfahrten wurden in beiden Fahrzeugen die folgenden Größen aufgezeichnet:

- Batteriestrom,
- Generatorstrom,
- Batteriespannung,
- Bordnetzspannung,
- Motorraumtemperatur,
- Innenraumtemperatur,
- Zwischenraumtemperatur,
- Außentemperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Fahrzeuggeschwindigkeit und
- Motordrehzahl.

5.1.3 Auswertung der Versuchsfahrten

Die Versuchsfahrten wurden im Zeitraum zwischen Herbst 2017 und Frühjahr 2018 durchgeführt. Die hierbei aufgezeichneten Daten dienen als Eingangsgrößen für die Komponentenmodelle, um die im Feld auftretenden Belastungen möglichst genau abbilden zu können. In Abbildung 5.5 sind in (a) bzw. in (c) der Geschwindigkeits- bzw. der Motordrehzahlverlauf über die Zeit sowie in (b) und (d) die zugehörigen Dichteverteilungen dargestellt. Da der Streckenverlauf der Kurzstrecke mehrere Kreuzungen bzw. Haltepunkte aufweist, betrug die Fahrzeuggeschwindigkeit wiederholt 0 km/h, d. h., das Fahrzeug stand. Anhand der Motordrehzahl lässt sich ableiten, ob ein Start-Stopp-Zyklus (SSZ) aktiv ist. Während der hier dargestellten Versuchsfahrt wurden insgesamt vier SSZs durchgeführt. Bei jedem dieser Zyklen wird die elektrische Energieversorgung so lange über die Fahrzeugbatterie gespeist, bis die VKM wieder angelassen wird. Dies geschieht entweder durch die Weiterfahrt oder wenn die Fahrzeugbatterie zu tief entladen ist und das Energiemanagement den Start der VKM veranlasst.

Auf der zurückgelegten Strecke wären prinzipiell Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h möglich, jedoch ist die Geschwindigkeit auf dem Großteil der Strecke

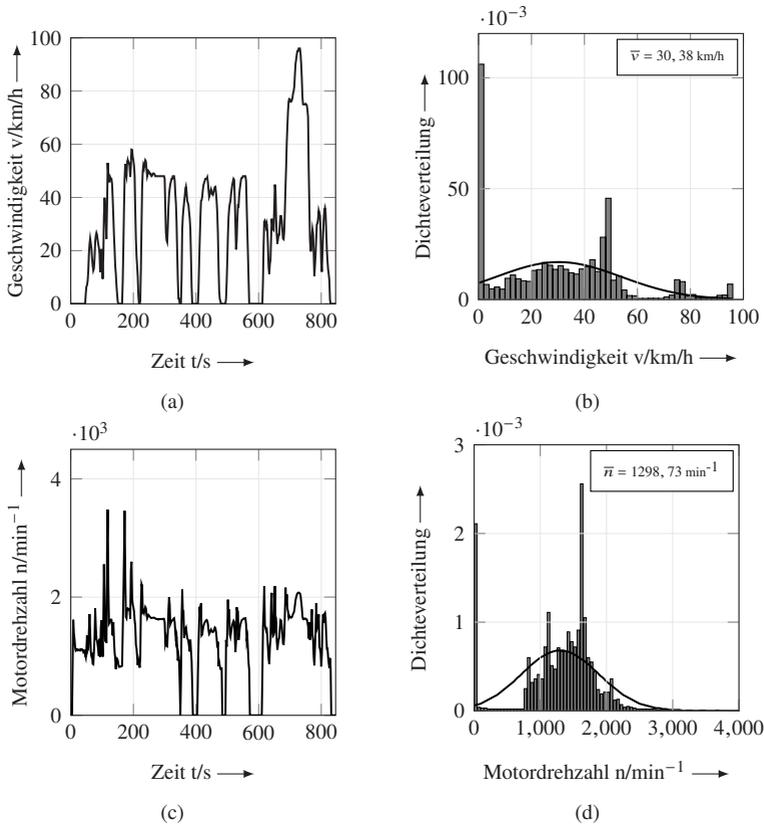


Abbildung 5.5: (a) Geschwindigkeits- und (c) Motordrehzahlverlauf während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke mit dem AU3. Die Dichteverteilung ist in (b) für die Geschwindigkeit sowie in (d) für die Motordrehzahl ersichtlich. Die Versuchsfahrt wurde bei einer mittleren Außentemperatur von $8,82$ °C durchgeführt. Die Streckenlänge betrug $7,13$ Kilometer und wurde in $14,13$ min mit vier Start-Stopp-Zyklus zurückgelegt.

begrenzt. Die mittlere Geschwindigkeit betrug im Verlauf der Versuchsfahrten ca. 30 km/h und die mittlere Motordrehzahl lag bei ca. 1300 min^{-1} .

Die Belastung der elektrischen Energieversorgung während der Kurzstreckenfahrt lässt sich aus den in Abbildung 5.6 dargestellten Stromverläufen für die Batterie (a) und den Generator (c) ableiten. Mit Blick auf den Batteriestrom

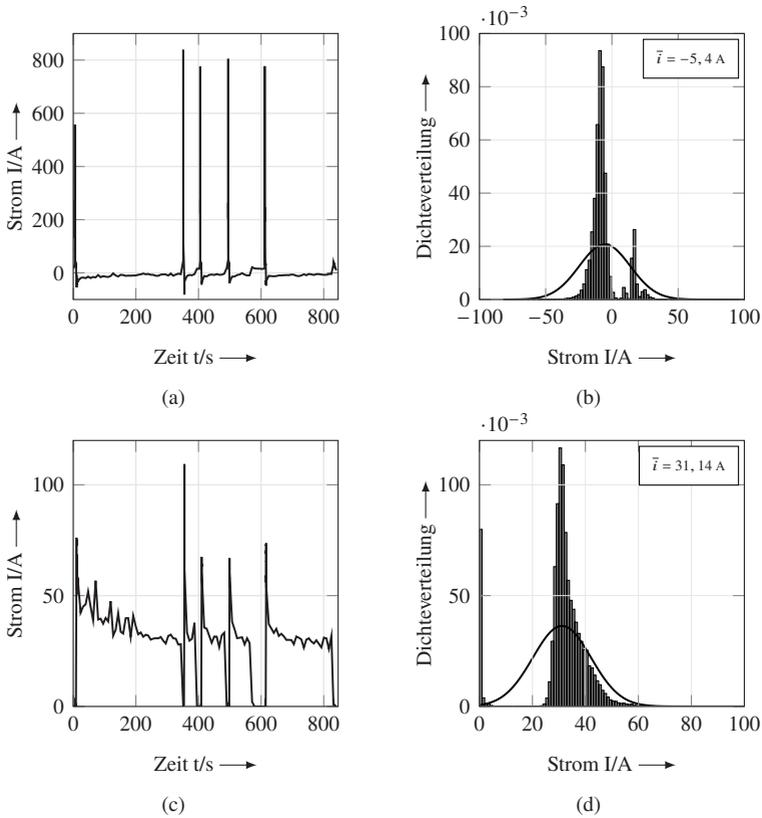


Abbildung 5.6: (a) Batterie- und (c) Generatorstromverlauf sowie in (b) bzw. (d) Dichteverteilung für Batterie- bzw. Generatorstrom während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke mit dem AU3 als Versuchsfahrzeug

sind vor allem die Ströme des Starters deutlich erkennbar. Hier werden von der Fahrzeugbatterie kurzzeitig bis zu 850 Ampere bereitgestellt. Über eine längere Dauer hinweg betrachtet liegen die Ströme jedoch deutlich unter diesem Wert. Wie auch in Abbildung 5.6 (b) gut zu erkennen ist, liegt der Batteriestrom im Mittel bei ca. 5 Ampere und ist negativ. Der in (a) dargestellte Batteriestrom ist positiv, wenn die Batterie Energie bereitstellt, und negativ, wenn die Batterie geladen wird. Während eines normalen Fahrzyklus sollte die Batterie immer

geladen werden, um einen erneuten Start der VKM zu ermöglichen. Zu diesem Zweck speist der Generator einen mittleren Strom von ca. 31 Ampere in die elektrische Energieversorgung ein. In der hier dargestellten Messung liefert der Generator kurz nach dem Starten der VKM Maximalströme mit anschließend abnehmender Tendenz. Der im Mittel durch die Verbraucher aufgenommene Strom lässt sich aus der Summe von Batterie- und Generatorstrom berechnen. In diesem Fall flossen im Mittel ca. 26 Ampere über die Verbraucher.

Unabhängig von der gefahrenen Strecke lassen sich in Summe aus allen Versuchsfahrten die in Abbildung 5.7 dargestellten Verteilungen angeben. Die sich so ergebende Dichteverteilung für die Geschwindigkeit aller Kurzstreckenfahrten ist in (a) dargestellt. Die Verteilung ist mit den Ergebnissen der Einzelfahrtauswertung vergleichbar. Die mittlere Geschwindigkeit liegt mit ca. 27 km/h etwas niedriger als bei der Einzelfahrtauswertung. Dem korrespondierend liegt auch der Mittelwert für die Dichteverteilung der Motordrehzahl (b) mit einer Drehzahl von ca. 1200 min^{-1} leicht unter dem Wert aus der Einzelfahrtauswertung.

Der Streckencharakter spiegelt sich auch in der Batteriestromverteilung in (c) deutlich wider. Im Mittel lag der Batterieladestrom bei ca. 4,8 Ampere. Bezüglich der Verteilung des Generatorstroms (d) ergab sich eine mittlere Grundlast von ca. 38 Ampere. Mit geringerer Häufigkeit lieferte der Generator auch Ströme oberhalb von 90 Ampere. In Abbildung 5.8 sind die Dichteverteilungen für den AU8 in Gegenüberstellung zur Gesamtauswertung der Kurzstrecke für den AU3 dargestellt. Der Geschwindigkeitsverlauf in (a) unterscheidet sich nur geringfügig von dem des AU3; die mittlere Geschwindigkeit fällt mit 22 km/h etwas geringer aus. Die Verteilung der Motordrehzahl (b) zeigt ebenfalls den spezifischen Verlauf einer Kurzstrecke. Die Verteilung der Motordrehzahl ist deutlich in den niedrigeren Drehzahlbereich verschoben. Aufgrund der leistungsfähigeren VKM lag die Motordrehzahl des AU8 auf der Kurzstrecke im Mittel bei ca. 880 min^{-1} und damit etwas niedriger als die des AU3. Die in (c) abgebildete Verteilung des Batteriestroms für den AU8 weist ebenfalls die für eine Kurzstrecke typische Stromverteilung auf. Aufgrund der häufigeren Versorgungsphasen aus der Batterie fallen die Werte für den Entladestrom und den mittleren Ladestrom höher aus. Die Batterie des AU8 wird im Mittel mit ca. 6 Ampere nachgeladen. Deutlich höher fällt die Verteilung des Generatorstroms aus. Dieser liefert im Mittel ca. 77 Ampere und abnehmend Ströme von bis zu 250 Ampere. Die Verteilungen der Versuchsfahrten mit dem AU8 auf der Kurzstrecke sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Geschwindigkeitsverlauf mit dem des AU3 vergleichbar ist, während die

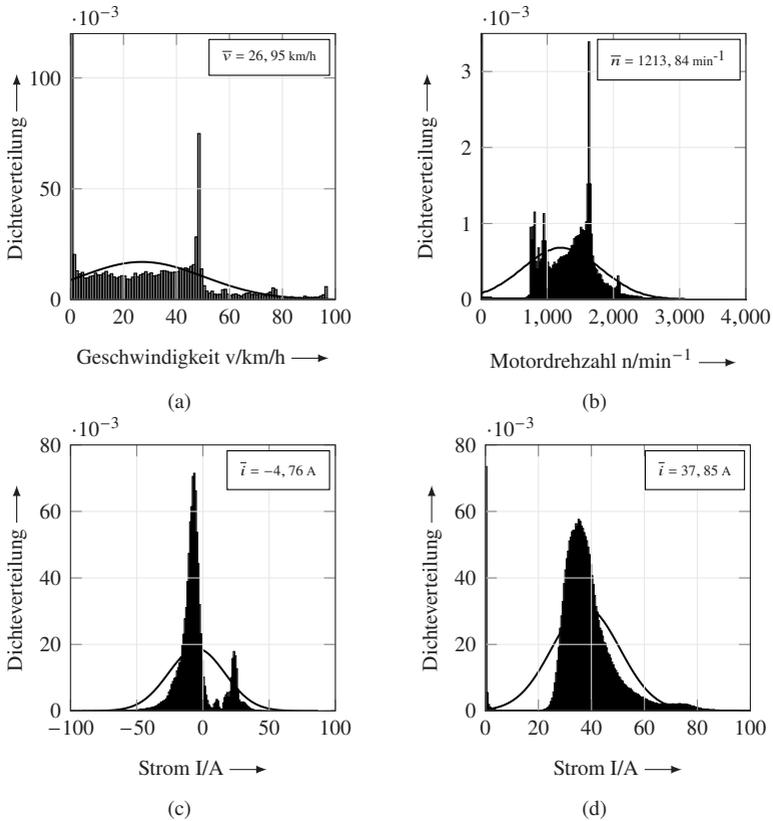


Abbildung 5.7: (a) Geschwindigkeits-, (b) Motordrehzahl-, (c) Batteriestrom- und (d) Generatorstromverteilung für alle durchgeführten Messfahrten auf der Kurzstrecke mit dem AU3.

Motordrehzahl aufgrund des deutlich größeren Hubraums der VKM im Mittel geringer ausfällt. Im Folgenden werden die wesentlichen Messgrößen für alle weiteren Versuchsfahrten diskutiert und zusammengefasst. Die Verteilungen für die kurze und die lange Pendlerstrecke sowie für die Langstrecke sind in Anhang A.1 bis A.6 dargestellt.

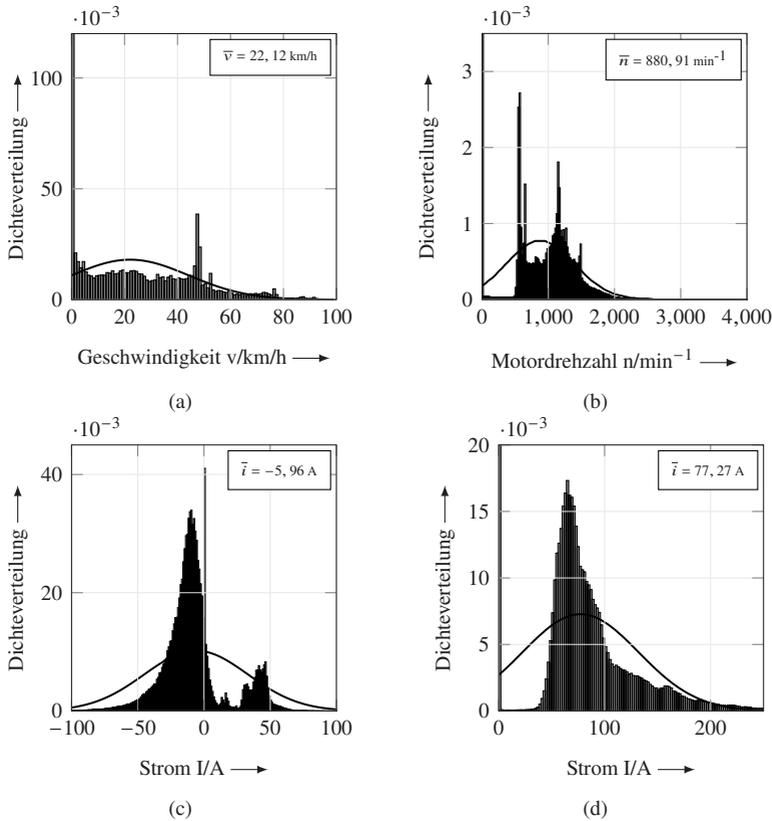


Abbildung 5.8: (a) Geschwindigkeits-, (b) Motordrehzahl-, (c) Batteriestrom- und (d) Generatorstromverteilung für alle durchgeführten Messfahrten auf der Kurzstrecke mit dem AU8.

5.1.4 Zusammenfassung

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung ist eine genaue Kenntnis der Belastung der beteiligten Komponenten erforderlich. Im vorangegangenen Unterkapitel wurden vier verschiedene Streckentypen vorgestellt – die Kurzstrecke, die Kurze Pendlerstrecke und die Lange Pendlerstrecke sowie die Langstrecke –, auf Basis derer die Belastung für die

entsprechenden Fahrprofile ermittelt werden kann. Um die Bordnetzbelastung in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse zu bestimmen, wurden die Messfahrten mit zwei verschiedenen Modellen, dem AU3 und dem AU8, durchgeführt. In Tabelle 5.1 sind die wesentlichen Größen für alle ausgewerteten Strecken zusammengefasst. Wie aus der Tabelle zu erkennen ist, wurden die meisten

Streckentyp	Fahrzeug	\bar{T} [°C]	\bar{v} [km/h]	\bar{n} [min ⁻¹]	\bar{i}_B [A]	\bar{i}_G [A]
Kurzstrecke	AU3	7,75	26,95	1213,84	-4,76	37,85
Kurzstrecke	AU8	10,16	22,12	880,91	-5,96	77,27
Kurze Pendlerstrecke	AU3	9,4	41,38	1432,94	-3,95	33,25
Kurze Pendlerstrecke	AU8	12,69	39,91	1242,62	-8,83	66,95
Lange Pendlerstrecke	AU3	7,47	53,59	1645,78	-2,47	32,36
Lange Pendlerstrecke	AU8	10,57	47,88	1157,78	-3,24	71,54
Langstrecke	AU3	9,84	104,95	2385,55	-1,9	33,71
Langstrecke	AU8	4,25	93,92	1597,76	-1,6	66,37

Tabelle 5.1: Strecken- und fahrzeugspezifische Mittelwerte der wesentlichen Messgrößen für alle durchgeführten Versuchsfahrten

Messfahrten bei mittleren Außentemperaturen zwischen 0 und 13°C durchgeführt. Die Verläufe für die mittlere Geschwindigkeit sowie für die mittlere Motordrehzahl liegen in den für die jeweilige Versuchsstrecke zu erwartenden Wertebereichen.

Mit zunehmender Streckenlänge nimmt der mittlere Batterieladestrom deutlich ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass mit zunehmender Streckenlänge die Wahrscheinlichkeit dafür steigt, dass die Fahrzeugbatterie vollständig geladen ist. Außerdem kommt es auf Langstrecken deutlich seltener zu Entladezyklen, wodurch im Mittel der Ladestrom sinkt.

Aufgrund der unterschiedlichen Modellklassen unterscheiden sich die mittleren Grundlasten für die beiden Fahrzeuge deutlich voneinander. Für den AU3 ergibt sich aus dem gemittelten Generatorstrom eine Grundlast von ca. 34 Ampere, für den AU8 hingegen eine Grundlast von ca. 70 Ampere. Vergleicht man die Ergebnisse für die verschiedenen Fahrprofile hingegen nicht zwischen, sondern innerhalb der beiden Modelle, unterscheiden sich die Grundlasten nur geringfügig voneinander.

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Das Fahrprofil bzw. der Streckentyp haben einen geringen Einfluss auf die Belastung der elektrischen Energieversorgung. Zwar kommt es bei kurzen Strecken und vor allem im Stadtverkehr aufgrund der häufigeren Start-Stopp-Zyklen vermehrt zu Maximalbelastungen; auf die gesamte Strecke bezogen wird die Grundlast der elektrischen Energieversorgung jedoch von der Anzahl und Nutzung von Dauer- und Komfortverbrauchern bestimmt.
2. Über die gesamte Fahrdauer hinweg betrachtet wird der Energiespeicher in Summe nachgeladen. Der Ladestrom sinkt dabei mit zunehmender Streckenlänge kontinuierlich ab.
3. Als Teilsystem der Energiewandlung stellt der Generator die insgesamt benötigte Energiemenge für die Versorgung der Verbraucher und zum Nachladen des Energiespeichers bereit.

Die zeitlichen Verläufe der aus den Versuchsfahrten gewonnenen Messdaten dienen als Eingangsgrößen für die nachfolgend vorgestellten Modelle. Um die Ergebnisse der Berechnungen voneinander unterscheiden zu können, werden die Eingangsdaten streckenspezifisch bereitgestellt. In Kapitel 6 werden auf der Basis dieser Eingangsdaten die Zuverlässigkeiten für die Kurz-, die Pendler- und die Langstrecke berechnet, ausgewertet und diskutiert.

5.2 Modell der Blei-Säure-Batterie

Die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung steht und fällt mit der Zuverlässigkeit der Energiespeicher. Um letztere gewährleisten zu können, ist es entscheidend herauszufinden, mit welcher Wahrscheinlichkeit während des Fahrbetriebs bzw. während des Fahrens mit aktiven Assistenzsystemen Fehler im Energiespeicher auftreten. Im Folgenden wird ein Modell der Blei-Säure-Batterie entwickelt und diskutiert, anhand dessen sich diese Wahrscheinlichkeiten bestimmen lassen.

Sowohl in der elektrischen Energieversorgung von Fahrzeugen mit VKM als auch in der elektrischen Energieversorgung von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb werden in der 12V-Spannungsebene aktuell vorrangig Blei-Säure-Batterien eingesetzt. In Zukunft wird der Einsatz von neuen Technologien wie bspw. der 12V-Lithium-Ionen-Starterbatterie zwar zunehmen. Derzeit sind diese Technologien allerdings noch Kleinserien vorbehalten [171]. Die Gründe für die Dominanz der Blei-Säure-Batterie liegen zum einen in ihrer hohen Leistungs- und Kaltstartfähigkeit sowie zum anderen in ihrer Wirtschaftlichkeit, wozu auch das gut funktionierende Recyclingsystem zählt, das mit einer sehr hohen Rücklaufquote und einer Recyclingeffizienz von 81,9 Prozent etabliert ist [163].

Aufgrund ihrer aktuell hohen Bedeutung für die 12V-Spannungsebene wird in diesem Unterkapitel die Blei-Säure-Batterie näher untersucht, und zwar mit besonderem Fokus auf den Aspekt der Zuverlässigkeit. Zunächst werden in Abschnitt 5.3.1 die grundlegenden Eigenschaften von Blei-Säure-Batterien vorgestellt. Anschließend folgt in Abschnitt 5.2.2 eine Beschreibung der wesentlichen Alterungs- und Ausfallmechanismen. Das Unterkapitel schließt mit einer Studienauswertung der Tauschintervalle von Blei-Säure-Batterien, auf deren Basis die Parameter für eine Weibull-Verteilung abgeleitet werden, anhand derer sich die Ausfallrate für Blei-Säure-Batterien bestimmen lässt, die als Maß für die Zuverlässigkeit dient.

5.2.1 Technologie

Die Blei-Säure-Batterie ist der am häufigsten eingesetzte Energiespeichertyp in der 12V-Spannungsebene und wurde über die letzten Jahrzehnte hinweg zur Anpassung an neue Funktionen und Assistenzsysteme kontinuierlich weiterentwickelt [91]. Neue Anforderungen ergaben sich dabei vor allem aus der Notwendigkeit der CO₂-Reduktion und somit aus der Entlastung der VKM. In diesem Zusammenhang wurde u. a. das Start-Stopp-System entwickelt. Dieses trägt zu einer Reduktion der Belastung der VKM und damit zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes bei; zugleich führt es jedoch zu einer Erhöhung der Entladungstiefe der Batterie. Hinzu kommt, dass ein Großteil der aktiven Verbraucher in Kraftfahrzeugen weiterhin aus der Batterie gespeist werden. Bei langen Start-Stopp-Zyklen kann dies dazu führen, dass die Batterie bis zur Mindestspannung bzw. bis zum Mindestenergiegehalt für den VKM-Start entladen wird. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Vollzyklen der Batterie. Um diesen nachteiligen Effekt zu kompensieren, wurden Blei-Säure-Batterien mit höherer Zyklenfestigkeit entwickelt. Je nachdem, welche Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und die Zyklenfestigkeit bestehen, kommen in der elektrischen Energieversorgung heute dementsprechend verschiedene Blei-Säure-Batterietechnologien zum Einsatz. Im unteren Leistungsbereich und bei geringeren Anforderungen an die Zyklenfestigkeit ist der am häufigsten eingesetzte Typ die Nassbatterie. Mit steigenden Anforderungen an die Zyklenfestigkeit werden Enhanced Flooded Battery (EFB) und Absorbent Glass Mat (AGM)-Batterien verwendet. Der Unterschied zwischen Nassbatterien wie der EFB und Vliesbatterien wie der AGM besteht hauptsächlich in der Art und Weise, wie der Elektrolyt (verdünnte Schwefelsäure) mit der Aktivmasse verbunden ist. Bei Nassbatterien sind die Zellen in verdünnte Schwefelsäure getaucht, während der Elektrolyt bei Vliesbatterien vom Vlies adsorbiert wird. Abgesehen von diesem essentiellen Unterschied sind Blei-Säure-Batterien jedoch recht ähnlich aufgebaut (vgl. hierzu Abbildung 5.9). Grundsätzlich existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Materialzusammensetzungen und Aufbauvarianten von Blei-Säure-Batterien. In der Fahrzeugtechnik haben sich jedoch vor allem Blei-Säure-Batterien mit Gitterlegierungen aus Blei/Kalzium, Taschenseparatoren und flüssigem Elektrolyt

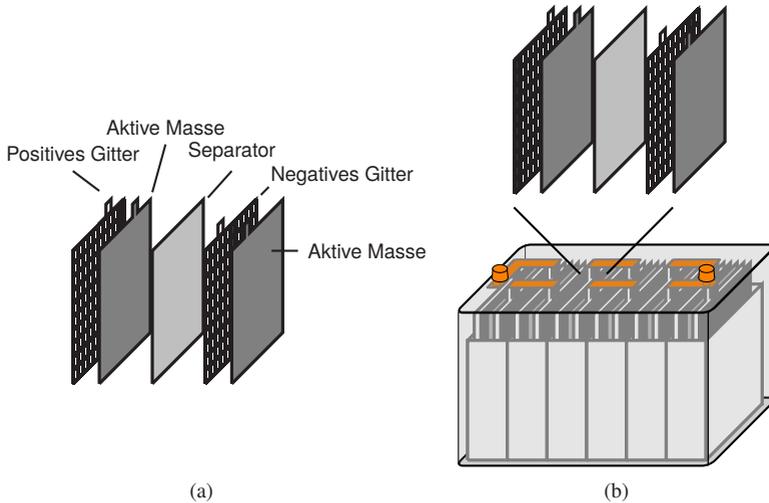


Abbildung 5.9: Exemplarische Darstellung des Aufbaus einer Blei-Säure-Fahrzeugbatterie. In (a) ist der Aufbau einer Zelle, in (b) der Aufbau der gesamten Batterie dargestellt.

bzw. in Vlies oder Gel¹ gebundenem Elektrolyt durchgesetzt.

Allen Bauformen von Blei-Säure-Batterien ist gemeinsam, dass das positive und das negative Gitter mit Aktivmasse gefüllt sind. Am positiven Gitter besteht die Aktivmasse aus porösem Bleidioxid und am negativen Gitter aus porösem Blei. Als Elektrolyt dient meist verdünnte Schwefelsäure. Anders als bei Nasszellen wird bei AGM-Batterien der Elektrolyt vollständig in einem Glasfaservlies adsorbiert. Pro Zelle werden dabei zur Erhöhung der Kapazität mehrere Platten parallel verbaut. Zwischen den Platten mit Aktivmasse ist zum Schutz vor Kurzschlüssen sowie zur Stabilisierung der Konstruktion ein Separator platziert. Bei AGM-Batterien ist anstelle des in (a) dargestellten Blattseparators ein Taschenseparator verbaut.

Eine einzelne Zelle besitzt im vollgeladenen Zustand eine Ruhespannung von ca. 2,1 Volt. Um eine Gesamtspannung von mehr als 12 Volt zu erreichen, werden mehrere Zellen seriell miteinander verschaltet. Die konstruktive Größe

¹ Bei der Blei-Gel-Batterie ist der Elektrolyt in Kieselsäure gebunden. Da aufgrund des erhöhten Innenwiderstands kein ausreichender Strom zum Starten der VKM bereitgestellt werden kann, wird die Blei-Gel-Batterie in Kraftfahrzeugen jedoch nicht als Hauptspeicher eingesetzt.

von Blei-Säure-Batterien ist genormt, wobei die Speicherkapazität variiert und zwischen ca. 40 Amperestunden (H4) und 110 Amperestunden (H9) liegt.

5.2.2 Alterungs- und Ausfallmechanismen

Blei-Säure-Batterien unterliegen verschiedenen Alterungsmechanismen, infolge derer sich ihre Eigenschaften mit der Nutzungsdauer verändern. Ein Großteil der Batterien wird aufgrund der Alterung fehlerhaft und kann dann keine zuverlässige Versorgung mehr gewährleisten. Gealterte Batterien weisen zudem einen deutlichen Kapazitätsverlust auf, wodurch der Innenwiderstand zunimmt. In diesem Unterkapitel werden daher die wesentlichen Alterungs- und Ausfallmechanismen vorgestellt und diskutiert. Das Alterungsverhalten von Blei-Säure-Batterien ist im Wesentlichen auf die Belastung und die kalendarische Alterung zurückzuführen. Hierbei ist zwischen

- mechanischen,
- thermischen und
- elektrischen Belastungen

zu unterscheiden.

Mechanische Belastungen treten vor allem in Form von Vibrationen bzw. Erschütterungen auf. Bezüglich *thermischer Belastungen* ist als Hintergrundinformation zunächst festzuhalten, dass Blei-Säure-Batterien in Kraftfahrzeugen bei Umgebungstemperaturen zwischen $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ fehlerfrei funktionieren müssen. Bei tiefen Temperaturen sinkt die verfügbare Kapazität aufgrund der geringeren Reaktionsgeschwindigkeit deutlich ab. Im Gegenzug nimmt die Rate der Selbstentladung jedoch ab, wodurch eine längere Standzeit möglich wird. Bei hohen Temperaturen kehren sich die Verhältnisse um. Vor allem während des Ladens sind hohe Temperaturen kritisch, da diese die Gasbildung und somit den Wasserverlust fördern. Letzteres führt nach [60] und [141] infolge der gestiegenen Säurekonzentration zwar zu einem Anstieg der Ruhespannung um wenige Millivolt, jedoch auch zu einer Abnahme der Kapazität.

Bedeutender für die Alterung bzw. den Ausfall von Blei-Säure-Batterien als mechanische und thermische Belastungen sind *elektrische Belastungen*. So sind nach [3] 60,3 Prozent der Ausfälle von Blei-Säure-Batterien auf einen durch Ladungsdurchsatz bedingten Verschleiß zurückzuführen. Weitere 23 Prozent

fallen durch extreme Tiefentladung aus. Blei-Säure-Batterien werden dabei niemals während des Betriebs, sondern nur in Start-Stopp-Zyklen bzw. während langer Ruhephasen vollständig entladen. Als Ursachen für eine Tiefentladung kommen also lange Standzeiten, häufige Kurzstreckenfahrten und die damit verbundene Abnahme des Ladezustands bei Fahrzeugstillstand sowie die Entladung durch Verbraucher bei inaktiver VKM in Frage. Tiefentladungen bzw. unzureichende Ladungen begünstigen die Sulfatierung der positiven und der negativen Platte, was eine Verringerung der Säuredichte und der Kapazität zur Folge hat. Weiterhin können hohe Stromdichten beim Entladen zum Ausfall der aktiven Masse und damit ebenfalls zu Kapazitätsverlusten führen. Darüber hinaus werden Kurzschlüsse zwischen den Platten gefördert. Diese können auch die Folge des Wachstums von Dendriten sein, die ihrerseits häufig infolge von hohen Stromdichten beim Entladen, geringen Säuredichten oder Tiefentladung der Batterie entstehen. Dendriten schädigen den Separator zwischen den Platten und können so zu Kurzschlüssen und letztendlich zum Ausfall der Batterie führen. Als Folge hoher Ladungsdurchsätze bzw. hoher Temperaturen ist häufig auch eine Verbleiung der negativen aktiven Masse zu beobachten, was zu einem Abfall der Kapazität der Batterie und infolgedessen zu einer Zunahme des Innenwiderstands führt.

AGM-Batterien sind gegenüber Schwankungen im Elektrolytvolumen empfindlich. Mit zunehmendem Alter verringert sich der Elektrolytvolumen, wodurch der Innenwiderstand zunimmt. Letzteres führt zu einer Reduktion der Klemmspannung und letztendlich zur Gefährdung der elektrischen Energieversorgung.

In Tabelle 5.2 sind typische Alterungsmechanismen geschlossener Blei-Säure-Batterien nach [74], [143], [119], [11] und [38] zusammengefasst.

Mechanismus	Folge	Ursache
Korrosion des positiven Ableiters	Ohmscher Widerstand des Ableiters nimmt zu, Ableiter bricht	Hohe Ladespannung, hohe Temperaturen, geringe Säuredichten
Ausfall der aktiven Masse	Kapazitätsverlust, Kurzschluss	Mechanischer Stress, hohe Stromdichten beim Entladen, hohe Ladespannungen, Tiefentladungen und Umpolung
Sulfatierung der positiven und negativen Platte	Verringerung der Kapazität sowie der Säuredichte	Lange Standzeiten, unzureichendes Laden, hohe Säuredichte
Verbleiung der negativen aktiven Masse	Verringerung der Kapazität	Hoher Ladungsdurchsatz, hohe Temperaturen, häufiges und starkes Gasen
Gitterwachstum	Kurzschluss zwischen den Platten	Alle Ursachen der Korrosion, ungünstige Gitterlegierungen
Dendritenwachstum	Kurzschluss zwischen den Platten	Hohe Stromdichten beim Entladen, geringe Säuredichten, Tiefentladungen
Änderung der Struktur der positiven Masse	Verringerung der Kapazität, Änderung der Ruhespannung	Zyklisierung, Gasung
Zerstörung des Separators	Kurzschlüsse	Gitterwachstum, Dendritenwachstum, Oxidation des Separators

Tabelle 5.2: Alterungs- und Ausfallmechanismen von Blei-Säure-Batterien und deren Ursachen

5.2.3 Fehlerverteilung

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, führen Alterungsprozesse zu einer Abnahme der Kapazität der Batterie und zu einem Anstieg des Innenwiderstands, infolgedessen es dazu kommen kann, dass die elektrische Energieversorgung nicht mehr in einem hinreichenden Maß sichergestellt werden kann. Wie in diesem Zusammenhang in [148] gezeigt wurde, treten allerdings auch bei wenig gealterten und entsprechend leistungsfähigen Energiespeichern mit niedrigem Innenwiderstand zwischen 2 und 4 Milliohm bei Kurzschlüssen in der elektrischen Energieversorgung Unterspannungen an den sicherheitsrelevanten Verbrauchern auf. Nicht nur bei gealterten Batterien, sondern auch dann, wenn die Batterie sich in einem guten Zustand befindet, handelt es sich bei der Erhöhung des Innenwiderstands also um einen kritischen Fehler. Im Allgemeinen ist die Erhöhung des Innenwiderstandes von Blei-Säure-Batterien mittels Batteriesensor mess- bzw. berechenbar, und durch zyklische Diagnosen kann ein rechtzeitiger Austausch veranlasst werden. Dies ist indes nur ein mögliches Fehlerbild, das zu einer Beeinträchtigung der elektrischen Energieversorgung führen kann. Für die Sicherstellung einer zuverlässigen elektrischen Energieversorgung müssen jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller verschiedenen Fehlerbilder bekannt sein und die Fehler müssen zumindest teilweise diagnostizierbar sein. Der entscheidende Faktor für eine mathematische Beschreibung der Zuverlässigkeit ist dabei die Kenntnis der Fehlerhäufigkeiten bzw. -verteilungen. Die bisher diskutierten Fehlerursachen führen zu einem Anstieg des Innenwiderstands in Blei-Säure-Batterien. Dieser Anstieg findet über einen längeren Zeitraum statt und ist daher sehr gut beobachtbar. Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Fehlerursachen weisen die Einflüsse und Faktoren, die zu zufälligen Fehlern² führen, eine deutlich größere Komplexität auf. Aus diesem Grund muss die modellbasierte Beschreibung der Zuverlässigkeit von Blei-Säure-Batterien auf der Basis von Felduntersuchungen erfolgen. Im Folgenden beziehe ich mich auf die Untersuchungen in [3]. In dieser Studie wurden ca. 800 AGM-Batterien mit unterschiedlicher Einsatzdauer und verschiedenen Fehlerbildern analysiert. Die sich hierbei ergebende Fehlerverteilung ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Wie ersichtlich wird, fielen ca.

² Wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, treten diese Fehler nicht im buchstäblichen Sinne zufällig auf. Die Bezeichnung wurde deshalb so gewählt, weil diese Fehler im hier entwickelten Modell wie Zufallsvariablen behandelt werden.

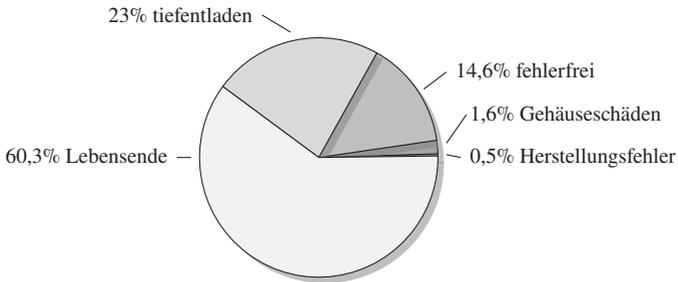


Abbildung 5.10: Fehlerverteilung von ca. 800 analysierten AGM-Batterien

60,3 Prozent der untersuchten Blei-Säure-Batterien infolge einer zu geringen Restkapazität aus (also deshalb, weil sie am „natürlichen“ Ende ihrer Lebensdauer angekommen waren). Für gewöhnlich werden Blei-Säure-Batterien so betrieben, dass eine möglichst lange Lebensdauer gewährleistet werden kann. Häufig werden die Batterien dabei auch über die vorgesehene Lebensdauer hinaus betrieben und erst dann getauscht, wenn der Start der VKM nicht mehr möglich ist. Dies ist nicht unvernünftig. Denn auch wenn die Funktionalität von Blei-Säure-Batterien am Ende ihrer Lebensdauer eingeschränkt ist, bleiben sie in den meisten Belastungssituationen dazu in der Lage, die elektrische Energieversorgung zu stützen bzw. Verbraucher mit hohen Stromgradienten (di/dt) zuverlässig zu versorgen. Treten zusätzlich zu den Kapazitätsverlusten bzw. anstelle dieser jedoch schwerwiegende Fehler auf, können energieintensive Fahrsituationen mit großen Stromgradienten (di/dt) wie z. B. Brems- und Lenkmanövern zu einem kritischen Zustand in der elektrischen Energieversorgung führen. Grundsätzlich muss eine zu geringe Kapazität jedoch nicht zwingend zu einer Gefährdung der elektrischen Energieversorgung führen, da der Energiespeicher im laufenden Fahrbetrieb stetig nachgeladen wird, sodass eine zu geringe Kapazität nur direkt nach dem Start der VKM problematisch ist. Wenn weitere Verbraucher, z. B. Heizverbraucher, hinzukommen und die Belastung der elektrischen Energieversorgung steigt, wird der Energiespeicher unter Umständen aber so weit entladen, dass es zu Kurzschlüssen und, während des Auslösens der Sicherung, in letzter Folge zur Unterversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher kommen kann. Eine zu geringe Restkapazität wird im Folgenden daher als kritischer Fehler eingestuft.

Neben einer zu geringen Restkapazität wurde in der Untersuchung [3] bei

23,0 Prozent der Batterien eine Tiefentladung festgestellt. Unklar ist dabei allerdings, ob die Batterien bereits mit einer Tiefentladung aus den jeweiligen Fahrzeugen ausgebaut wurden oder ob es erst später, bspw. während der Anlieferung, zur Tiefentladung kam. In jedem Fall weist eine Tiefentladung aber auf eine deutlich erhöhte Selbstentladung der Batterie hin und lässt daher bedingt Rückschlüsse auf Zellkurzschlüsse zu. Letztere sind vor allem dann kritisch, wenn sie zu einer deutlichen Abnahme der Gesamtspannung oder zu einer schnellen Entladung des Energiespeichers führen. In beiden Fällen kann es zur Unterversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher kommen.

Etwa 14,6 Prozent der in [3] analysierten Batterien waren in einem guten Zustand, was auf einen vorzeitigen Austausch hindeutet. Daneben wurden 1,6 Prozent der Batterien mit beschädigtem bzw. zerstörtem Gehäuse vorgefunden. Die robuste Containerbauweise von Blei-Säure-Batterien macht enorme Kräfte zur Deformation bzw. Beschädigung erforderlich. Diese treten entweder infolge äußerer Einflüsse, z. B. beim Ein- und Ausbau der Batterie, oder als Folge falscher Lagerung auf. Daher ist anzunehmen, dass die beobachteten Verformungen, die zum Ausfall der untersuchten Blei-Säure-Batterien geführt haben, nicht im Normalbetrieb aufgetreten sind.

Bei 0,5 Prozent der untersuchten Blei-Säure-Batterien wurden Herstellungsfehler gefunden. Bei diesen Fehlern handelte es sich um ein verbogenes Gitter, um einen zu geringen Säuregehalt, um eine fehlerhafte Verschweißung der Platten oder um einen unvollständigen Verschluss des Glasfaservlies um die äußeren Platten. Keiner dieser Fehler führte direkt zu einem kritischen Ausfall der Batterie. Während längerer Betriebsphasen können sich die genannten Fehlerbilder –insbesondere dann, wenn sie unentdeckt bleiben –jedoch durchaus kritisch auf die elektrische Energieversorgung auswirken.

Eine Gefahr für die elektrische Energieversorgung stellt die Batterie dann dar, wenn sie in hohen Lastphasen entladen wird, wenn Verbraucher hohe Stromgradienten (di/dt) anfordern oder wenn Kurzschlüsse auftreten. Auch offene Ausfälle der Batterie sind möglich. Diese treten jedoch seltener und infolge direkter Fehler in der Batterie auf. Hauptursache für offene Ausfälle sind falsch montierte Batterieklemmen, die sich während der Fahrt lösen und somit die Verbindung trennen. In [3] konnten keine kritischen Fehler gefunden werden, die zum offenen bzw. kurzgeschlossenen Ausfall einer Batterie geführt haben. In einer anderen Untersuchung (vgl. [129]) wurden jedoch 12 Prozent der untersuchten Blei-Säure-Batterien kurzgeschlossen sowie 4 Prozent offen ausgefallen vorgefunden. Auch in [55] werden kritische Fehler beschrieben, die auf ein falsches Zeldesign bzw. auf eine falsche Auswahl der Komponenten

zurückzuführen sind und die zu Kurzschlüssen durch Platten- und Separatorfehler führen können. Auch ein mangelhaftes Qualitätsmanagement in der Batterieherstellung kann zu offenen Ausfällen führen, bspw. dann, wenn sich die Terminals von den Platten lösen oder die Verbindungen zwischen den Zellen ausfallen. Auch Verunreinigungen in den verbauten Materialien können zum Ausfall führen.

5.2.4 Alterungsmodelle der Blei-Säure-Batterie

Alle Alterungsvorgänge führen langfristig zum Ausfall von Blei-Säure-Batterien. Entscheidend ist zu wissen, welche Vorgänge im Einzelnen welche Effekte haben und wie sich dem Ausfall oder anderen negativen Einflüssen vorbeugen lässt. Grundsätzlich lässt sich die Zuverlässigkeit von Blei-Säure-Batterien über die Modellierung der möglichen Fehler abbilden, die zu einer Beeinträchtigung oder zum Ausfall führen können. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls von Blei-Säure-Batterien hängt dabei im Wesentlichen von der zyklischen und der kalendarischen Alterung ab. Zusätzlich begünstigen bspw. Gitterfehler in der mikroskopischen Struktur ungleiche Zellladungen sowie ungleiche Säuredichten der jeweiligen Zellen, was zu einem Ausfall des Energiespeichers führen kann. Sowohl die kalendarische als auch die zyklische Alterung sind langsame und beobachtbare Prozesse, was eine modellbasierte Beschreibung der dadurch bedingten Alterung ermöglicht. Bezüglich chemischer Energiespeicher wie der Blei-Säure-Batterie ist zwischen Fehlern durch Alterung (Verschleiß) und plötzlichen Fehlern zu unterscheiden. Durch Alterung bedingte Fehler lassen sich mit Alterungsmodellen mathematisch beschreiben. Dabei kann nach [5] zwischen drei verschiedenen Arten von Alterungsmodellen unterschieden werden:

- ereignisorientierte Modelle,
- Modelle mit gewichtetem Kapazitätsdurchsatz sowie
- physikochemische Modelle (Kombinationsmodelle).

Ereignisorientierte Modelle basieren auf der Berechnung der Entladungstiefe und der daraus folgenden Zyklen bzw. dem Ladungsdurchsatz (Amperestunden-Durchsatz). Auf der Basis der kalendarischen Alterung und unter Hinzunahme

von Lebensdauerangaben der Batteriehersteller kann eine Aussage über das zu erwartende Lebensdauerende getroffen werden. In [136] wird ein ereignisorientiertes Modell für Blei-Säure-Batterien vorgestellt. Neben spezifischen Batterieeigenschaften wie dem Spannungsverhalten werden auch die Selbstentladung, die Gasung, der Wasserverlust und die Wärmeentwicklung modelliert. Bei der Berechnung des Alterungsverhaltens wird in diesem Modell neben der kalendarischen Alterung auch der Ladungsdurchsatz berücksichtigt.

In Erweiterung dieses Ansatzes werden in *Modellen mit gewichtetem Kapazitätsdurchsatz* zusätzliche Faktoren berücksichtigt, z. B. die Abhängigkeit der Alterung von der Entladungstiefe. Um geeignete Gewichtungsfaktoren ermitteln zu können, sind Erkenntnisse aus Versuchsreihen notwendig.

Kombinationsmodelle setzen auf die Modellierung von Alterungsprozessen. In [144] werden die Korrosion der Platten, die Veränderung des Säuregehalts, die Gasung, die Sulfatierung und das Kristallwachstum berücksichtigt. Anhand des so erstellten Modells lassen sich die durch die verschiedenen Alterungsmechanismen bedingten Eigenschaften der zu untersuchenden Energiespeicher während der verschiedenen Alterungsstufen detailliert untersuchen. Ein weiteres physikochemisches Modell wird in [37] diskutiert. Zur Beschreibung von Alterungsvorgängen werden hier ebenfalls die Korrosion der Platten und die irreversible Sulfatierung genutzt. Beide Mechanismen führen infolge der Reduktion der aktiven Masse an den Platten und der Abnahme der Säuredichte zu einer Zunahme des Gitterwiderstandes.

Eine weitere Möglichkeit der Lebensdauerschätzung ist die Berechnung von Zustandsgrößen in Abhängigkeit von der Belastung. Hierzu können datengetriebene Modelle eingesetzt werden. Für Valve Regulated Lead Acid Battery (VLRA)-Batterien wird in [35] ein auf einem Kalman-Filter beruhender Lebensdauerschätzer vorgestellt. Zur Entwicklung wurden Messdaten und Zustandsgrößen (SOC, SOH) genutzt.

Vor dem Hintergrund bekannter Belastungsprofile kann anhand der vorgestellten Alterungsmodelle der Zustand einer gegebenen Blei-Säure-Batterie berechnet und prognostiziert werden. Die vorgestellten Modellierungsmethoden liefern jedoch keine Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit und bieten auch keine Möglichkeit, um Aussagen über das Auftreten plötzlicher Fehler zu treffen.

5.2.5 Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Fehler kann nur auf der Basis von Felddaten ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Feldstudie durchgeführt. In diesem Abschnitt werden diese Studie sowie das daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeitsmodell, wie bereits in [110] veröffentlicht, vorgestellt.

Die Felddaten der hier erörterten Studie stammen aus Datenbankeinträgen über Batteriewechselintervalle aus Vertragswerkstätten der AUDI AG aus den Jahren 2009 bis 2017. Bei der Datenaufbereitung und -analyse wurden für alle Batterien die folgenden Arten von Daten genutzt:

- Reparaturdaten,
- Produktionsdaten,
- Vertriebsdaten und
- weitere spezifische Batteriedaten (Nennkapazität, Kaltstartstrom usw.)

Bei der Auswertung der Daten wurde die grundsätzliche Annahme getroffen, dass eine in der Vertragswerkstatt getauschte Batterie fehlerhaft ausgefallen ist. Diese Annahme wurde deshalb getroffen, weil sie die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit ermöglicht. Aufgrund der gewählten Stichprobengröße und der Art der Auswertung können jedoch keine Rückschlüsse auf die Fehlerart gezogen werden.³ Darüber hinaus führt die Annahme zu Ungenauigkeiten bei Aussagen über die Lebensdauerverteilung, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit für relevante Fehler, die im Rahmen zyklischer Wartungsintervalle in den Vertragswerkstätten festgestellt werden, besonders stark zunimmt. [110]

Die genannten Datenquellen ermöglichten die Auswertung von insgesamt 1.043.463 ausgetauschten Blei-Säure-Batterien. In Abbildung 5.11 sind die jährlich getauschten Blei-Säure-Batterien über alle Fahrzeugmodelle pro Jahr dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, unterscheidet sich die Anzahl der ausgefallenen Batterien von Jahr zu Jahr nur geringfügig voneinander. Da in den Daten alle Fahrzeugmodelle und Produktionsjahre berücksichtigt sind, können keine direkten Schlussfolgerungen bezüglich der Lebensdauerverteilung

³ Dies ist aber bspw. auf der Basis der in Abschnitt 5.2.3 diskutierten Studie (vgl. [3]) möglich.

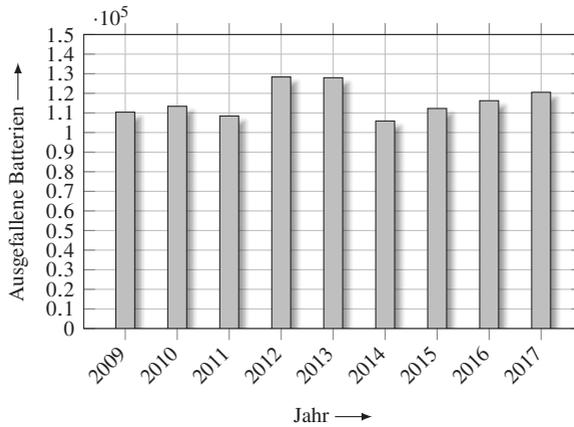


Abbildung 5.11: Anzahl der pro Jahr ausgefallenen Blei-Säure-Batterien im Zeitraum zwischen 2009 und 2017 nach [110]

gezogen werden. Für diesen Zweck müssen die Daten zunächst so aufbereitet werden, dass gezielt Batterien mit gleichem Produktionsjahr untersucht und miteinander verglichen werden können. [110]

Jeder Datensatz enthält spezifische Fahrzeug- und Batteriemerkmale. Zur Analyse wurden die Daten anhand der in Tabelle 5.3 aufgeführten Merkmale aufbereitet und ausgewertet. Für die Datenanalyse wurden ausschließlich Blei-Säure-Batterien mit dem Produktionsjahr 2009 berücksichtigt. Daten von Batterien, deren Produktionsdatum vor dem Jahr 2009 lag, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Zusätzlich wurden fehlerbehaftete Daten wie Ausreißer aussortiert oder mit statistischen Methoden plausibilisiert. Anhand des Isolation-Forest-Algorithmus wurden die geeigneten Merkmale analysiert und daraufhin fehlerhafte Datensätze aus der Stichprobe entfernt [94]. Abschließend stand für die Erstellung des Zuverlässigkeitsmodells ein Datensatz mit Daten von 436.357 Blei-Säure-Batterien zur Verfügung. [110]

Das Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien basiert im Wesentlichen auf der kalendarischen und durch Lastzyklen verursachten Alterung. Zufällige bzw. konstante Fehler sind in den Daten jedoch ebenfalls enthalten. Da die meisten Fehler von Blei-Säure-Batterien mit zunehmender Alterung auftreten, muss das Zuverlässigkeitsmodell sowohl durch Verschleiß bedingte als auch konstante Fehler berücksichtigen. Da ein datenbasiertes Zuverlässigkeitsmo-

Batteriedaten	Fahrzeugdaten
Kapazität	Modell
Kaltstartstrom	Fahrzeuggeschwindigkeit
Kilometerleistung	Fahrzeugtyp
Lebensdauer	Fahrzeugplattform
Kilometer pro Jahr	Leistung
Standzeit	Kraftstofftyp
	Start-Stop-Assistent
	Getriebeart
	Hybridklasse
	Rekuperationslevel
	Standheizung

Tabelle 5.3: Datenmerkmale der untersuchten Blei-Säure-Batterien und bei der Auswertung berücksichtigte Fahrzeugeigenschaften nach [110]

dell abgeleitet werden soll, sind die Daten als Kontrollprobe zu betrachten und werden wie in Abbildung 5.12 dargestellt zensiert. Die bei der Auswertung be-

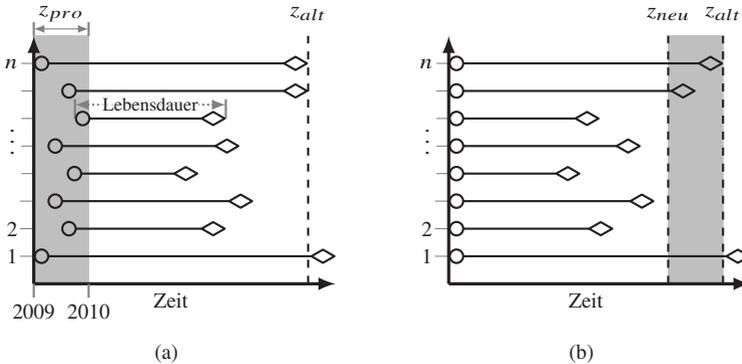


Abbildung 5.12: Exemplarische Erläuterung der zensierten Daten: (a) Daten vor und (b) nach der Zensur nach [110]

rücksichtigten Batterien wurden im Zeitraum 01. Januar 2019 bis 31. Dezember 2019 z_{pro} produziert (vgl. Abbildung 5.12 (a)). Das Beobachtungsende wurde mit z_{alt} im Jahr 2017 gewählt. Um aus den Daten eine Lebensdauerverteilung ableiten zu können, mussten diese zunächst zensiert werden. Da nicht alle

ausgewählten Blei-Säure-Batterien zum selben Zeitpunkt produziert wurden, war es notwendig, die Startzeit jeder beobachteten Batterielebensdauer auf das Datum der zuerst hergestellten Batterie zu verschieben. Hierzu wurde das Beobachtungsende z_{alt} auf z_{neu} verschoben. Auf der Basis der so zensierten Daten konnte eine geeignete Verteilung gewählt werden. In Abbildung 5.13 ist die Massenverteilung der zensierten ausgefallenen Blei-Säure-Batterien dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, musste ein geringer Anteil der Batterien

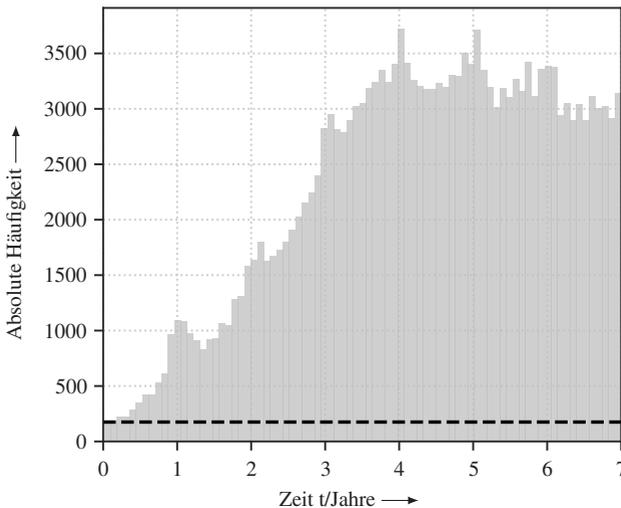


Abbildung 5.13: Massenverteilung der zensierten Batteriedaten für ausgefallene bzw. in den Vertragswerkstätten als fehlerhaft getauschte Blei-Säure-Batterien nach [110]

bereits zu Beginn der vorgesehenen Lebensdauer wegen Ausfall getauscht werden. Mit zunehmendem Alter wurden deutlich mehr Batterien getauscht, vor allem anlässlich der Wartungsaufenthalte nach dem ersten, zweiten und dritten Jahr. [110]

Für die mathematische Modellierung verschleißbehafteter Systeme eignet sich die in Abschnitt 2.4.1 vorgestellte Weibullverteilung besonders gut. Die dar-

gestellten Daten lassen sich mit der folgenden Gleichung der Dichtefunktion beschreiben.

$$f_{\mu}(t) = \begin{cases} \frac{k}{\mu} \left(\frac{t}{\mu}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t}{\mu}\right)^k} & k > 0, \quad \mu > 0 \\ 0 & \mu < 0. \end{cases} \quad (5.1)$$

Zur Berechnung des Formparameters k und des Skalenparameters μ der Weibull-Verteilung ist ein Schätzer erforderlich. Normalerweise liefert der Maximum-Likelihood-Schätzer hinreichend gute Ergebnisse. Dieser kann hier jedoch nicht sinnvoll eingesetzt werden, weil bezüglich der hier vorliegenden Stichprobe nur die Menge der ausgefallenen Blei-Säure-Batterien bekannt ist. Da die Daten aufgrund der fehlenden Informationen zur Gesamtgröße der Stichprobe also unvollständig sind, wird zunächst ermittelt, wie viele Batterien gegen Ende des Beobachtungszeitraums noch nicht ausgefallen waren. Hierzu wird anhand der Freedman-Diaconis-Regel über die absolute Häufigkeit eine Massenverteilung erzeugt [54]. Als Stützpunkt für die Kurvenanpassung werden die Mitten der jeweiligen Datenbereiche verwendet. Wie in Abbildung 5.13 zu erkennen, ist bereits zu Beginn der Beobachtungen eine konstante Anzahl von Fehlern zu beobachten. Da dies nicht anhand einer einfachen Weibull-Dichtefunktion darstellbar ist, wird der Anteil der konstanten Fehler durch Hinzufügen einer weiteren Weibull-Dichtefunktion modelliert. Dies dient auch dazu, den verzögerten Beginn des Alterungsprozesses darstellen zu können. Mit einer drei-parametrischen Weibull-Verteilung ergibt sich als Modellfunktion zur Minimierung der Residuen:

$$f_m(t) = n_a \frac{k_a}{\mu_a} \left(\frac{t - t_0}{\mu_a}\right)^{k_a-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\mu_a}\right)^{k_a}} + n_r \frac{1}{\mu_r} e^{-\frac{t}{\mu_r}}. \quad (5.2)$$

Hier sind n_a die Anzahl der Alterungsfehler, n_r die Anzahl der konstanten Fehler, t_0 der Zeitpunkt ohne Alterungsfehler, k_a der Formparameter für Alterungsfehler und k_r der Formparameter für konstante Fehler. Der Skalierungsparameter für Alterungsfehler ist μ_a und für konstante Fehler μ_r . Die Parameter wurden anhand einer Partikelschwarmoptimierung (PSO) nach [65] ermittelt. Die PSO verwendet die oben genannten Parameter als Partikelkoordinaten im Lösungsraum und findet mithilfe der Schwarmintelligenz geeignete Parameter. Ein wesentlicher Vorteil der PSO besteht in der Möglichkeit zur Einführung von Parametergrenzen, wodurch eine schnellere Berechnung der

Lösung erzielt werden konnte. Die mittels PSO gefundenen Parameter sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die auf der Basis von Gleichung 5.2 entwi-

n_a	n_r	t_0	k_a	k_r	μ_a	μ_r
261718	1899	1.334	2.385	1	2314.635	272.875

Tabelle 5.4: Mittels PSO gefundene Parameter für die Weibull-Verteilung aus Gleichung 5.2 nach [110]

ckelte Weibull-Verteilung weicht wie in Abbildung 5.14 dargestellt von den ursprünglich vorliegenden Daten ab. Hierbei ist der absolute Fehler im zeitlichen Verlauf abgebildet. Wie in den Abbildungen 5.13 und 5.14 zu erkennen

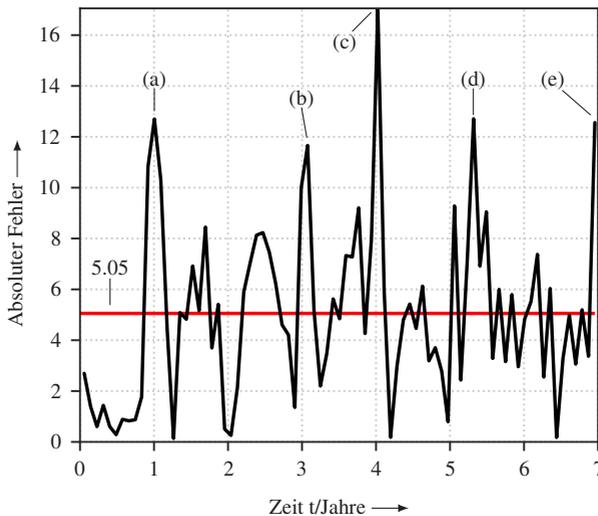


Abbildung 5.14: Absoluter Fehler zwischen der ermittelten Weibull-Verteilung und den aufbereiteten Daten nach [110]

ist, steigt der absolute Fehler vor allem zu den Zeitpunkten der Serviceaufenthalte nach den typischen Intervallen an. Die erste Wartung ist nach einem Jahr bzw. nach ca. 15.000 Kilometern fällig (je nachdem, welches Ereignis früher eintritt). Im Allgemeinen ist dann alle zwei Jahre bzw. nach jeweils weiteren

30.000 Kilometern eine Wartung fällig. Die größten Fehler treten hierbei zeitlich nach einem Jahr (a), nach drei Jahren (b) und nach vier Jahren (c) auf. Zwar treten auch nach fünf (d) und nach sieben Jahren (e) Maximalabweichungen auf. In diesen Fällen wird die Fehlerverteilung jedoch durch die Anhäufung von Batteriewechseln anlässlich der Wartungsaufenthalte nach den typischen Intervallen verfälscht, sodass die Abweichungen teilweise durch zu früh getauschte, also noch funktionsfähige Batterien zustande kommen. Zusätzlich fehlt die Information, wie nahe die Batterien zum Zeitpunkt des Ausbaus der zu erwartenden Lebensdauer waren. [110]

Es ist nicht möglich zu beurteilen, inwieweit sich unter den gefundenen Daten kritische Batteriefehler befinden. Für diesbezügliche Aussagen fehlen Informationen zur Restkapazität und zum Innenwiderstand der getauschten Batterien. Dennoch können Aussagen zur Fehlerwahrscheinlichkeit über die gesamte Stichprobe getroffen werden. Hierzu werden folgend die Dichtefunktion $F(t)$ und der Erwartungswert $E(T)$ hergeleitet sowie der Verlauf der Ausfallrate berechnet. [110]

Die Dichtefunktion basiert auf der Mischverteilung aus Gleichung 5.2. Daher ist die Dichtefunktion ebenfalls eine Mischverteilung, bestehend aus der Summe

$$f(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot f_i(t). \quad (5.3)$$

Mit den Faktoren $a_a = \frac{n_a}{n_a+n_r}$, $a_r = \frac{n_r}{n_a+n_r}$ und $k_r = 1$ kann Gleichung 5.3 geschrieben werden als

$$f(t) = a_a \cdot f_a(t) + a_r \cdot f_r(t). \quad (5.4)$$

Hierbei ist die Dichtefunktion $f_a(t)$

$$f_a(t) = \frac{k_a}{\mu_a} \left(\frac{t - t_0}{\mu_a} \right)^{k_a - 1} \cdot e^{-\left(\frac{t - t_0}{\mu_a} \right)^{k_a}} \quad (5.5)$$

und $f_r(t)$

$$f_r(t) = \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{-\frac{t}{\mu_r}}. \quad (5.6)$$

Für die kumulierte Verteilungsfunktion folgt aus den Gleichungen 5.4 bis 5.6 die Beziehung

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt = a_a \int_0^{\infty} f_a(t)dt + a_r \int_0^{\infty} f_r(t)dt. \quad (5.7)$$

Durch Auflösen der Gleichung folgt für

$$F_a(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\mu_a}\right)^{k_a}} \quad (5.8)$$

und für

$$F_r(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\mu_r}\right)}. \quad (5.9)$$

Auf der Grundlage der Gleichungen 5.8 und 5.9 lässt sich die Überlebensfunktion angeben. Diese berechnet sich mittels Umkehrfunktion zu

$$R(t) = 1 - F(t) = a_a (1 - F_a(t)) + a_r (1 - F_r(t)) \quad (5.10)$$

bzw.

$$R(t) = a_a R_a(t) + a_r R_r(t). \quad (5.11)$$

Auf der Basis der Definition der Ausfallrate aus Unterkapitel 2.4 sowie anhand der Gleichungen 5.4 und 5.11 wird die Ausfallrate berechnet mit

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{a_a f_a(t) + a_r f_r(t)}{a_a R_a(t) + a_r R_r(t)}. \quad (5.12)$$

Bezüglich der Ausfallrate kann zwischen zwei Anteilen unterschieden werden: Unter der Annahme, dass die Ausfallrate der konstanten Fehler $\lambda_k = \lambda(t)$ für $t \in [0, t_0]$ konstant ist, ergibt sich $\lambda_k = \lambda(0)$. Daraus folgt für den durch Alterung bzw. Verschleiß verursachten Anteil an der Ausfallrate

$$\lambda_a(t) = \lambda(t) - \lambda(0). \quad (5.13)$$

Unter Berücksichtigung beider Anteile kann die Ausfallrate angegeben werden mit

$$\lambda(t) = \lambda_a(t) + \lambda_k. \tag{5.14}$$

Neben der Ausfallrate ist auch der Erwartungswert von Interesse, da anhand dessen eine Aussage über die zu erwartende Lebensdauer getroffen werden kann. Der Erwartungswert berechnet sich mit Gleichung 2.31 zu

$$E(T) = \sum_{i=1}^k a_i E(T_i) = a_a \lambda_a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_a}\right) + a_r \lambda_r. \tag{5.15}$$

In Abbildung 5.15 sind die zuvor hergeleiteten Funktionen über die Massenverteilung der fehlerhaften Blei-Säure-Batterien dargestellt. Hierbei sind der Verlauf des altersbedingten Anteils $f_a(t)$ in schwarz, der Verlauf des konstanten Anteils $f_r(t)$ in grau und die daraus resultierende Verteilung in rot dargestellt. Wie aus der Abbildung deutlich wird, bildet der resultierende Verlauf

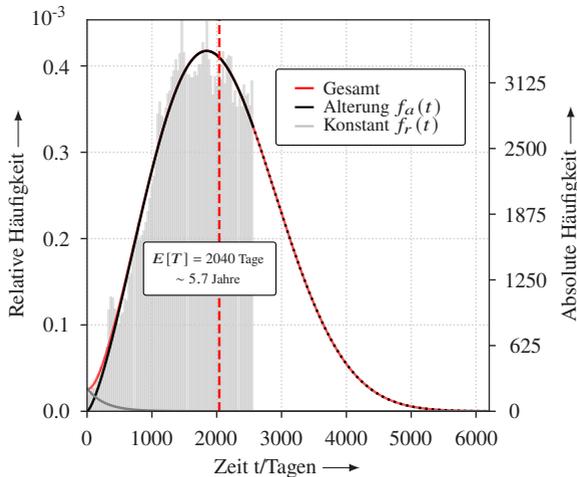


Abbildung 5.15: Dichtefunktion und Massenverteilung der ausgefallenen Blei-Säure-Batterien nach [110]

die vorliegenden Daten sehr gut ab. Der sich nach Gleichung 5.15 ergebende

Erwartungswert für die Lebensdauer einer Blei-Säure-Batterie liegt bei ca. 2040 Tagen bzw. 5,7 Jahren. Hierbei muss erwähnt werden, dass der zur Berechnung verwendete Datensatz auch Daten von solchen Blei-Säure-Batterien enthält, die durch fehlerhafte Anwendung ausgefallen sind. Die häufigste in diesem Zusammenhang zu nennende Ursache ist die Tiefentladung, durch die es zum Batteriefehler und somit zum Austausch kommt. Tiefentladungen bei Blei-Säure-Batterien können entweder durch zu lange Lagerzeiten, durch zu lange Standzeiten der Fahrzeuge vor der Auslieferung oder durch Fehlanwendung durch den Fahrzeugkunden verursacht werden. [110]

In Abbildung 5.16 ist die Wahrscheinlichkeitsfunktion $F(t)$ nach den Gleichungen 5.8 und 5.9 der Blei-Säure-Batterien dargestellt. Die aus den Daten

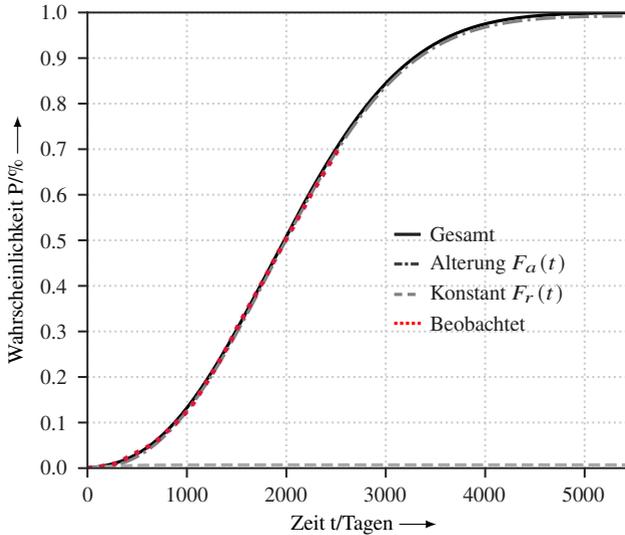


Abbildung 5.16: Wahrscheinlichkeitsfunktion für den Ausfall von Blei-Säure-Batterien nach [110]

gewonnene Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Batterie basiert auf der Annahme, dass für die beobachteten Daten $n_g = n_a + n_r$ gilt. [110]

Wie sich zeigt, wurde jede zweite Batterie bereits nach ca. 2000 Tagen (ca. 5,5 Jahren) fehlerhaft und musste getauscht werden. Aus dem Verlauf ist weiter zu erkennen, dass nach ca. 5000 Tagen (ca. 14 Jahren) alle Blei-Säure-Batterien

ausgefallen waren. Für die Verwendung des stochastischen Modells aus Gleichung 5.4 zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Blei-Säure-Batterien und letztendlich der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung muss die Ausfallrate $\lambda(t)$ von Blei-Säure-Batterien berechnet werden, da diese als Basisereignis für die quantitative Analyse benötigt wird. Die Ausfallrate $\lambda(t)$ berechnet sich mit der Dichtefunktion $f(t)$ aus Gleichung 5.4 und der Überlebenswahrscheinlichkeit $R(T)$ aus Gleichung 5.10 zu $\lambda(t) = f(t)/R(T)$. Der so berechnete Verlauf der Ausfallrate ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Aus-

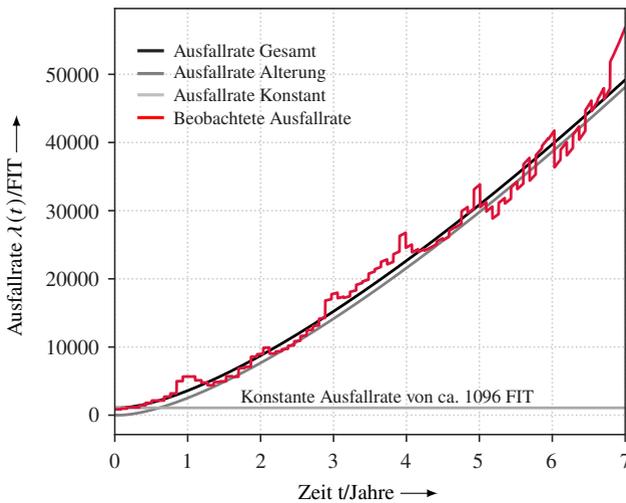


Abbildung 5.17: Die Ausfallrate von Blei-Säure-Batterien nach [110]

fallrate ist eine aggregierte Größe und beinhaltet alle Fehler, die zum Tausch einer Blei-Säure-Batterie in einer Fachwerkstatt geführt haben können. Die konstante Ausfallrate beträgt 1096 FIT und fällt damit so hoch aus wie erwartet. Mit zunehmender Alterung steigt die Ausfallrate aufgrund verschleißbedingter Fehler deutlich an und erreicht Ausfallraten von bis zu 50.000 FIT. Aus der Ausfallrate selbst können keine Rückschlüsse darauf gezogen werden, welche Fehler welches Gefährdungsniveau verursachen. Hierzu wird, wie oben erwähnt, die aus [3] bekannte Fehlerverteilung angewendet. [110]

5.3 Modell des Generators

Die wesentliche Komponente in der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen mit VKM ist der Generator. Über ihn wird die Spannungslage in der elektrischen Energieversorgung geregelt und er versorgt die Verbraucher während des Fahrbetriebs mit Energie. Entsprechend der zentralen Rolle, die der Generator für die elektrische Energieversorgung spielt, lassen sich Aussagen über die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung im Allgemeinen nur in Abhängigkeit von Aussagen über die Zuverlässigkeit des Generators im Besonderen treffen. In diesem Unterkapitel soll daher auf der Basis einschlägiger Standardwerke sowie eigener Untersuchungen ein belastungsabhängiges Zuverlässigkeitsmodell für den in Kraftfahrzeugen am weitesten verbreiteten Typ von Generatoren, den Klauenpolgenerator, entwickelt werden. Hierfür werden zunächst anhand der in Unterkapitel 3.3 entwickelten Gleichungen die Erwärmungen sowie die daraus resultierenden Verlustleistungen der einzelnen Komponenten von Generatoren berechnet. Die Ergebnisse dieses physikalischen Modells dienen anschließend zusammen mit den in Unterkapitel 5.1 vorgestellten Messdaten als Eingangsgrößen für ein Zuverlässigkeitsmodell zur Berechnung der Ausfallraten der einzelnen Komponenten des hier untersuchten Typs von Generatoren. Zwecks Zusammenfassung von Fehlerszenarien für diese Art von Generatoren wird ein Fehlerbaum modelliert. Die Hauptereignisse werden später in der Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung als Eingangsgrößen genutzt (vgl. hierfür Kapitel 6). Im Folgenden werden zunächst die grundsätzlichen Funktionen eines Generators vorgestellt. Anschließend folgen die Beschreibung der oben genannten Temperatur- und Verlustleistungsmodelle sowie deren Validierung.

5.3.1 Technologie

Die primäre Funktion eines Generators ist die Wandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie. Hierfür ist der Generator mittels Riementrieb als Nebenaggregat in einem festen Übersetzungsverhältnis mit der Kurbelwelle der VKM gekoppelt.

Bezüglich der Bauart ist zwischen Gleichstrom- und Wechselstromgeneratoren zu unterscheiden. Erstere wurden aufgrund ihrer deutlich geringeren

Leistungsdichte in den letzten Jahrzehnten vollständig durch letztere ersetzt; dementsprechend wird der Fokus im Folgenden auf Wechselstromgeneratoren liegen. Wechselstromgeneratoren sind fremderregte Synchronmaschinen, deren Läufer mittels eines in die Erregerwicklung eingeprägten Stroms ein Magnetfeld aufbaut. Dieses Feld wird durch zwei Ringe mit schrägen Polen, den sogenannten Klauen, verstärkt. Aufgrund dieser Art der Läuferbauform werden diese Generatoren auch als Klauenpolgeneratoren bezeichnet. In Abbildung 5.18 ist ein Klauenpolgenerator mit den für seine Funktionsweise wesentlichen Komponenten im Schnitt dargestellt. Über die Bürsten wird in

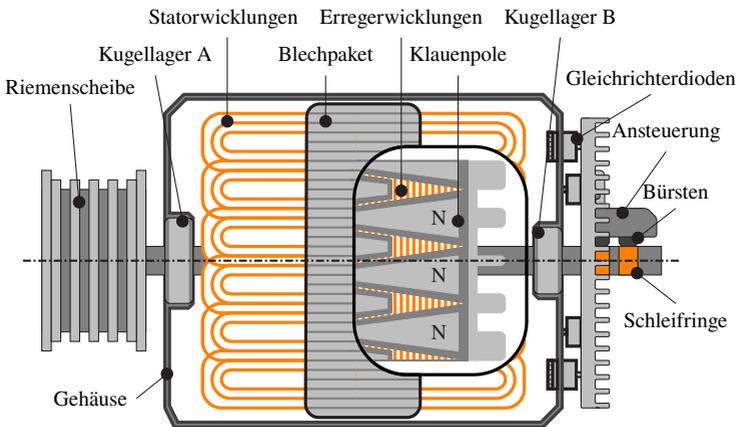


Abbildung 5.18: Darstellung eines Klauenpolgenerators mit Diodengleichrichtung im Schnitt nach [109]

die Erregerwicklung ein Strom eingeprägt. In Abhängigkeit vom Erregerstrom und der auf die Riemenscheibe aufgebrauchten Drehzahl wird durch die Flussänderung in den Statorwicklungen eine Spannung induziert, die anschließend mittels Dioden gleichgerichtet und in die elektrische Energieversorgung eingespeist wird.

Bei dem hier dargestellten Typ von Generatoren ist die Gleichrichtung über Dioden realisiert. Zur Erhöhung der Effizienz werden teilweise auch aktive und auf Leistungshalbleitern (z. B. Mosfets) basierende Gleichrichtungen eingesetzt.

Auf der 48V-Spannungsebene können Generatoren dieses Typs zum Starten der VKM sowie zur kurzzeitigen Erhöhung der Antriebsleistung (Boost-Betrieb)

verwendet werden. Zur Gleichrichtung und Regelung der Antriebsleistung besitzen diese Generatoren einen Inverter. Der Leistungsteil dieses Inverters ist meistens als B6-Brücke mit Mosfets als Leistungsschaltern ausgeführt, wobei die B6-Brücke entweder via Mikrocontroller oder mittels Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) geregelt wird [134], [155], [71], [114], [142], [158]. Die Ausgangsleistung von Generatoren des hier betrachteten Typs wird auf die Summe der mittleren Verbraucherleistungen ausgelegt. Abhängig vom Ausstattungsumfang und damit von der Verbraucherleistung werden in den verschiedenen Kraftfahrzeugklassen Generatoren mit einer Leistung zwischen 100 und 250 Ampere Dauerstrom eingesetzt. Während in Fahrzeugklassen unterhalb der Oberklasse Generatoren mit einer Ausgangsleistung von bis zu 180 Ampere mit passiver Gleichrichtung und erzwungener Konvektion verbaut werden, kommen in Fahrzeugen der Oberklasse Generatoren mit aktiver Gleichrichtung und teilweise auch solche mit Wasserkühlung zum Einsatz. Unabhängig von der Kühlungsart ist in Abbildung 5.19 in Anlehnung an [147] und [114] der Schaltplan eines Klauenpolgenerators mit einer Diodengleichrichtung und Statorwicklungen in Sternschaltung dargestellt. Bei Generatoren

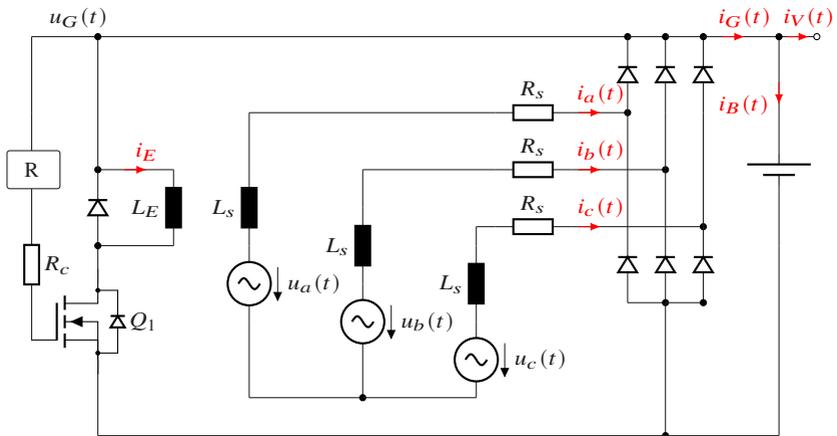


Abbildung 5.19: Schaltplan eines Klauenpolgenerators mit Diodengleichrichtung und Statorwicklungen in Sternschaltung, angelehnt an [147] und [114]

dieser Bauart wird der Ausgangsstrom i_G in Abhängigkeit von der Drehzahl über die Höhe des Erregerstroms i_E geregelt. Der Regler erfasst dabei die

Ausgangsspannung $u_G(t)$ und nutzt diese als Führungsgröße für die Regelung des Erregerstroms. Die Ausgangsspannung des Generators setzt sich aus den um jeweils 120 Grad gegeneinander versetzten Phasenspannungen $u_a(t)$, $u_b(t)$ und $u_c(t)$ zusammen, die sich nach [114] wie folgt berechnen lassen:

$$u_a(t) = K \cdot \omega_e \cdot i_f \cdot \sin(\omega_e \cdot t), \quad (5.16)$$

$$u_b(t) = K \cdot \omega_e \cdot i_f \cdot \sin(\omega_e \cdot t - \frac{2}{3}\pi) \text{ und} \quad (5.17)$$

$$u_c(t) = K \cdot \omega_e \cdot i_f \cdot \sin(\omega_e \cdot t + \frac{2}{3}\pi). \quad (5.18)$$

Hierbei sind der Parameter K der Verstärkungsfaktor des Generators, i_f der Feldstrom und ω_e die Drehzahl des Läufers.

Grundsätzlich werden Generatoren dieser Bauart auf der Basis von Drehzahlkollektiven und den zu erwartenden Strömen in der elektrischen Energieversorgung ausgelegt, wobei die Generatoren für einen Betrieb im niedrigen Drehzahlbereich optimiert sind, d. h., das Optimum des Wirkungsgrads liegt im niedrigen Drehzahlbereich. Mit zunehmender Drehzahl und Ausgangsleistung nehmen die Verluste deutlich zu.

Zur Beschreibung der Zuverlässigkeit bzw. zur Berechnung von belastungsabhängigen Ausfallraten für Generatoren dieses Typs müssen die einzelnen Verlustanteile und die dadurch verursachten Belastungen bekannt sein. Daher werden im Folgenden die einzelnen Verlustleistungen diskutiert.

5.3.2 Verlustleistung

Die Gesamtverluste von Klauenpolgeneratoren setzen sich nach [59] aus den folgenden Teilverlusten zusammen:

- Wicklungsverluste,
- Gleichrichterverluste,
- Eisenverluste sowie

- Lager- und Bürstenverluste.

Wicklungsverluste lassen sich weiter unterteilen in Stator- und Erregerwicklungsverluste, wobei der größte Anteil der Wicklungsverluste auf statische Verluste in den Statorwicklungen entfällt. Im Vergleich hierzu tragen die Verluste in der Erregerwicklung nur geringfügig zum Gesamtverlust bei. In Abhängigkeit von der Temperatur und dem Ausgangsstrom berechnet sich die Verlustleistung der Statorwicklung zu

$$p_{V_{WS}}(t) = R_S(\vartheta) \cdot \left(\frac{i_G(t)}{\sqrt{3}} \right)^2. \quad (5.19)$$

Die statischen Verluste in der Erregerwicklung lassen sich angeben mit

$$p_{V_{WE}}(t) = R_E(\vartheta) \cdot i_E(t)^2. \quad (5.20)$$

Bezüglich der *Gleichrichterverluste* ist allgemein zu sagen, dass die Zusammensetzung der hier eingebrachten Verlustleistungen primär vom Aufbau der Gleichrichtung abhängt. Sowohl für die passive als auch für die aktive Gleichrichtung setzen sich die Verluste dabei aus einem statischen sowie aus einem dynamischen Anteil zusammen. Für die Diodengleichrichtung teilen sich die Verluste demnach wie folgt auf:

$$p_{V_{GD}}(t) = \underbrace{U_F \cdot i_D(t) + r_D(t, \vartheta) \cdot i_D(t)^2}_{\text{statisch}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot u_D(t) \cdot i_D(t) \cdot t_S \cdot f_S}_{\text{dynamisch}}. \quad (5.21)$$

Der statische Verlustanteil setzt sich zusammen aus der im Arbeitspunkt konstanten Durchflussspannung U_F , dem temperaturabhängigen differentiellen Widerstand r_D der Diode und dem Strom $i_D(t)$. Die dynamischen Verlustanteile sind auf die Schaltfrequenz f_S und die Schaltzeit der Diode t_S zurückzuführen. Aufgrund der niedrigen Schaltfrequenz tragen die dynamischen Verluste nur geringfügig zu den Gesamtverlusten der Diode bzw. der Diodengleichrichtung bei. Die Verluste in der aktiven Gleichrichtung basieren auf der Annahme, dass Mosfets als Leistungsschalter genutzt werden. Die Verlust-

leistung für einen Leistungsschalter der aktiven Gleichrichtung berechnet sich zu

$$P_{VGM}(t) = \underbrace{R_{DS(on)} \cdot i_M(t)^2}_{\text{statisch}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot u_{DS}(t) \cdot i_M(t) \cdot t_S \cdot f_S}_{\text{dynamisch}}. \quad (5.22)$$

Hierbei setzen sich die statischen Verluste aus dem strom- und temperaturabhängigen Drain-Source-Widerstand ($R_{DS(on)}$) und dem Strom $i_M(t)$ zusammen. Im Vergleich zur Diode fällt der Kanalwiderstand von Mosfets deutlich geringer aus, wodurch in Abhängigkeit vom Strom respektive von der Temperatur ebenfalls deutlich geringere Verluste als in der Diode auftreten.

Die Schaltverluste der Mosfets berechnen sich anhand des im Schaltvorgang fließenden Stroms $i_M(t)$, der Spannung u_{DS} , der Summe aus Ein- und Ausschaltzeit t_S und der Schaltfrequenz f_S . Letztere ist – unter der Annahme, dass die gleiche Anzahl von Polpaaren wie in der Diode vorliegt – mit der Schaltfrequenz der Diodengleichrichtung identisch. Daher sind auch die Schaltverluste deutlich geringer.

Leistungsschalter in Form von Mosfets werden mit dem Ziel der Reduktion des Bahnwiderstands $R_{DS(on)}$ stetig weiterentwickelt. Während der Modelerstellung wurden als Datengrundlage aktuelle N-Kanal-Mosfets für die aktive Gleichrichtung herangezogen. Hierbei bewegt sich der Bahnwiderstand $R_{DS(on)}$ bei 25°C zwischen $1m\Omega < R_{DS(on)} < 5m\Omega$. Dadurch fallen die einzelnen Verlustanteile gegenüber den Verlusten der Diodengleichrichtung ebenfalls geringer aus.

Neben den Gleichrichtungsverlusten haben auch *Eisenverluste* einen signifikanten Beitrag zu den Gesamtverlusten der hier betrachteten Generatoren. Hierbei teilen sich die magnetischen Verluste in Wirbelstrom- und Hystereseverluste auf [77], [78], [36]. In Näherung lassen sich die Eisenverluste berechnen mit

$$P_{VFE} \approx P_{VW} + P_{VHys} \approx \frac{\pi \cdot d^2}{6 \cdot \rho} \cdot (f \cdot B_{max})^2 + 2 \cdot f \cdot H_C \cdot B_{max}. \quad (5.23)$$

Hierbei sind f die Frequenz der Feldänderung, B_{max} die maximale magnetische Flussdichte, $\sigma = 1/\rho$ die Leitfähigkeit, H_C die magnetische Feldstärke und d die Materialstärke senkrecht zur Feldrichtung. Sowohl im Läufer als auch im Stator treten beide Verlustanteile, also sowohl Wirbelstrom- als auch

Hystereseverluste, auf.

In dem hier beschriebenen Modell wurden die Eisenverluste aus Verlustleistungsmessungen berechnet, da die Parametrierung der Parameter in Gleichung 5.23 zu ungenauen Ergebnissen geführt hat. In [59] wurde gezeigt, dass sich die Eisenverluste bei guter Genauigkeit mit folgender Gleichung berechnen lassen:

$$P_{V_{FE}} = P_{abs} - P_{V_{WS}} - P_{V_{GD,GM}}(t) - P_{V_L} - P_{V_B} - P_A \quad (5.24)$$

mit

$$P_{abs} = M_G \cdot \Omega + P_{V_{WE}} \text{ und } P_A = i_G \cdot U_G. \quad (5.25)$$

Hierbei sind M_G das Drehmoment an der Generatorwelle, Ω die Generatordrehzahl, i_G der Ausgangsstrom und U_G die Ausgangsspannung des Generators. Der Anteil mechanischer Verluste *Lager- und Bürstenverluste* an der gesamten Verlustleistung ist gering. Für die Lebensdauerbetrachtung der mechanischen Komponenten ist dennoch relevant, inwieweit diese zusätzlich belastet werden. Die Läufer-Welle ist mittels Kugellagern gelagert. In diesen treten vor allem Reibungsverluste auf. Die Verlustleistung berechnet sich in Abhängigkeit von den Eigenschaften der jeweils verwendeten Lager mit

$$P_{V_L} = k_L \cdot M_L \cdot n_G. \quad (5.26)$$

Dabei sind k_L ein konstanter Faktor von $1,05 \cdot 10^{-5}$ [89], M_L das Gesamtreibmoment und n_G die Generatordrehzahl.

Ein ebenfalls vergleichsweise geringer Verlustanteil ist auf die Bürsten zur Kontaktierung der Erregerwicklung zurückzuführen. Aufgrund der Läuferrotation treten an der Kontaktstelle zwischen Bürste und Schleifring Reibungsverluste auf. Zusätzlich besitzt die Kontaktstelle einen temperaturabhängigen ohmschen Widerstand, was dazu führt, dass die Belastung der Bürsten mit zunehmender Drehzahl und ansteigendem Erregerstrom deutlich zunimmt. Die Reibungsverluste berechnen sich analog zu Gleichung 5.26. Unter Hinzunahme des elektrischen Verlustanteils berechnen sich die Bürstenverluste zu

$$P_{V_B} = M_B \cdot n_G + R_B(\vartheta) \cdot i_E(t)^2. \quad (5.27)$$

Der mechanische Anteil des Reibmoments M_B resultiert aus der Anpresskraft der Kohlebürste und dem Reibungskoeffizienten zwischen Kohlebürste

und Schleifring. Zu den gesamten Verlusten der Bürsten kommen der elektrische Anteil R_B und der Erregerstrom i_E hinzu. Die gesamte Generatorverlustleistung berechnet sich in jedem Arbeitspunkt durch Aufsummierung aller Einzelverluste:

$$P_{VG} = P_{V_{WS}} + p_{V_{GD,GM}}(t) + P_{VL} + P_{VB}. \quad (5.28)$$

5.3.3 Verlustleistungsmodell

Nachdem im vorausgegangenen Abschnitt die Verlustleistungen für die verschiedenen Komponenten eines Klauenpolgenerators erörtert wurden, können diese Teilbetrachtungen nun zu einem gesamthaften Verlustleistungsmodell zusammengeführt werden. Das Modell ist so aufgebaut, dass die in Unterkapitel 5.1 beschriebenen Messdaten als Eingangsgrößen für die Berechnung der Verlustleistungen genutzt werden können. Auf der Basis dieser Eingangsdaten erfolgt eine iterative Berechnung der Verlustleistungen der einzelnen Komponenten des Generators. Um den realen Belastungsverlauf abbilden zu können, ist zu jedem Zeitschritt die Verlustleistung mit der Temperatur aus dem jeweils vorangegangenen Zeitschritt zu berechnen, da sich durch eine Temperaturänderung auch die nicht linearen Parameter der einzelnen Generatorkomponenten ändern. Zum Zweck der iterativen Berechnung wird im folgenden Abschnitt ein Temperaturmodell entwickelt, anhand dessen sich für jeden Zeitschritt die Temperaturdifferenz der einzelnen Komponenten berechnen lässt. Unter Berücksichtigung beider Modelle sind in Abbildung 5.20 die Verlustleistungsverläufe der einzelnen Komponenten eines Klauenpolgenerators über eine konstante Drehzahl bei zunehmendem Ausgangsstrom i_G dargestellt. An den Verläufen in (a) ist deutlich zu erkennen, dass die Gleichrichtungsverluste den größten Anteil an den Gesamtverlusten haben. Die im Stator umgesetzten Verlustleistungen steigen mit zunehmender Höhe des Ausgangsstroms quadratisch an, wobei die statischen Verluste der Statorwicklungen dominieren. Die Eisenverluste nehmen mit steigender Ausgangsleistung ebenfalls zu, allerdings fällt die Steigung hier deutlich geringer aus. Die Verlustleistungen der Schleifringe sind in (b) fokussiert dargestellt. Wie deutlich wird, sind die Verlustleistungsanteile der Schleifringe und der Lager im Verhältnis als gering

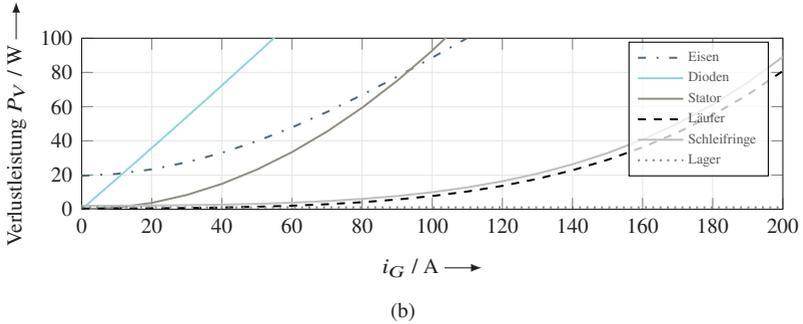
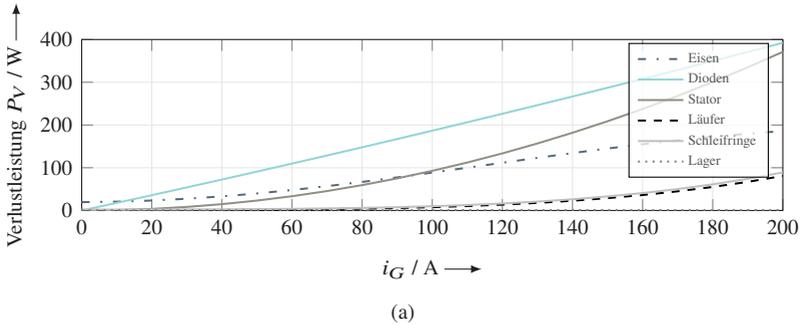


Abbildung 5.20: Verlustleistungen der einzelnen Komponenten eines Klauenpolgenerators bei einer Motordrehzahl von 3000 min^{-1} und einer Anfangstemperatur von 20°C

einzustufen.

Das Verlustleistungsmodell für die hier betrachteten Klauenpolgeneratoren wurde auf der Basis von Messdaten aus eigenen Generatorversuchen validiert [173]. In Abbildung 5.21 ist der Wirkungsgradverlauf über den Ausgangsstrom bei Motordrehzahlen von 1800 , 2000 und 2500 min^{-1} dargestellt. Wie anhand der eingezeichneten Datenpunkte erkennbar wird, liefert der Wirkungsgradverlauf für geringe Ausgangsströme gute Ergebnisse. Sowohl bei zunehmender Ausgangsleistung als auch bei zunehmender Drehzahl weist die Modellberechnung nur geringfügige bzw. leichte Abweichungen auf. Das Verlustleistungsmodell liefert also bereits hinreichend gute Ergebnisse. Wie oben bereits angedeutet wurde, ist das hier vorgestellte Verlustleistungsmodell jedoch temperaturabhängig. Für optimale Ergebnisse ist es daher notwendig,

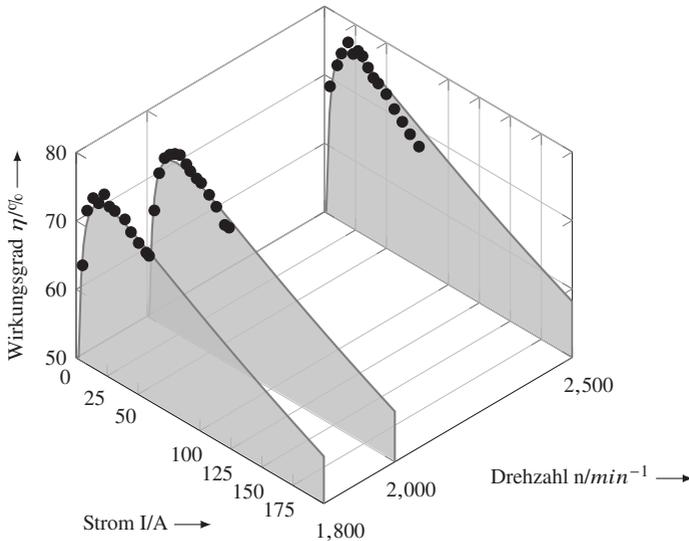


Abbildung 5.21: Modellberechnung der Wirkungsgradverläufe bei verschiedenen Motordrehzahlen mit Messpunkten, aufgezeichnet mit einem 12V-Klauenpolgenerator und $I_{max} = 180\text{A}$ als Ausgangsstrom

das Verlustleistungsmodell mit einem entsprechenden Temperaturmodell zu koppeln. Dieses wird im nun folgenden Abschnitt entwickelt.

5.3.4 Temperaturmodell

Die Temperaturentwicklung in den hier betrachteten Klauenpolgeneratoren ist eine wesentliche Größe für die Bewertung ihrer Zuverlässigkeit. Durch eine unzulässig hohe Erwärmung können irreversible Schäden verursacht werden, infolge derer der Generator ausfallen kann. Zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten ist es daher relevant zu wissen, wie sich der Generator bei Normal- sowie bei Maximalbetrieb erwärmt. Hierzu wird im Folgenden auf der Basis der Kirchhoffschen Gesetze ein Temperaturmodell entwickelt, anhand dessen in Abhängigkeit von der Verlustleistung und der Umgebungstemperatur für jeden Zeitschritt die Temperaturveränderung innerhalb der einzelnen Komponenten bzw. im Generator als Ganzen berechnet werden kann. Das Mo-

dell beruht dabei auf den Annahmen, dass die Generatoren luftgekühlt sind und dass die Verlustleistung sowie die Temperaturverteilung in den jeweiligen Komponenten homogen ist.

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Verlustleistungen werden in den jeweiligen Komponenten umgesetzt und verursachen dort eine lokale Temperaturerhöhung. Diese lässt sich in Abhängigkeit von den Verlustleistungen im jeweiligen Arbeitspunkt anhand des hier zu entwickelnden Temperaturmodells bestimmen. Maßgebliche Faktoren hierfür sind die Geometrie und die Kühlart des fraglichen Generators. Denn der Wärmetransport zwischen den Komponenten untereinander und an die Umgebung erfolgt über

- Wärmeleitung,
- Konvektion und
- Wärmestrahlung.

Eine gute *Wärmeleitung* besteht vor allem zwischen den einzelnen Baugruppen Läufer, Stator und Gleichrichtung, und zwar aufgrund der konstruktiven Kopplung und der sich daraus ergebenden guten Wärmeleitfähigkeit zwischen diesen Komponenten. Zusätzlich wird der Generator durch fest mit dem Läufer verbundene Lüfterräder gekühlt. Die hierdurch erzwungene Konvektion nimmt mit steigender Generator Drehzahl zu. Vereinzelt kommen zwar auch wassergekühlte Generatoren zum Einsatz, insbesondere dann, wenn hohe Ausgangsleistungen gefragt sind. In den meisten Kraftfahrzeugen werden jedoch luftgekühlte Generatoren verbaut. Dementsprechend bezieht sich das im Folgenden entwickelte Temperaturmodell auf luftgekühlte Klauenpolgeneratoren. Das hier entwickelte thermische Modell baut auf den in den Arbeiten [100] und [98] vorgestellten thermischen Netzwerken auf. Für jede Art des Wärmetransports wird im Folgenden ein eigener Widerstand bzw. eine Kombination aus Widerständen definiert. Die Parametrierung erfolgt dabei auf der Basis von Messdaten und Thermographiken bzw. Aufheizkurven aus eigenen Generatorversuchen [173].

Die thermischen Widerstände bzw. Wärmetransportmechanismen sind durch die erzwungene Konvektion von der Läuferdrehzahl abhängig. Zur Erstellung der thermischen Netzwerke für die hier betrachteten Klauenpolgeneratoren müssen die Geometrien der darin verbauten Komponenten sowie die dominanten Transportmechanismen berücksichtigt werden. Grundlegende Arbeiten diesbezüglich finden sich in [20], [21], [100], [27], [157], [179] und [98]. Das

von [100] vorgeschlagene thermische Modell für Klauenpolgeneratoren wurde dabei als Grundlage für das im Folgenden entwickelte Modell ausgewählt. In Abbildung 5.22 (a) ist das Verlustleistungsmodell und in (b) das Widerstandsnetzwerk der Transportmechanismen des untersuchten Klauenpolgenerators dargestellt. Hierbei speisen die Verlustleistungsquellen in die jeweiligen

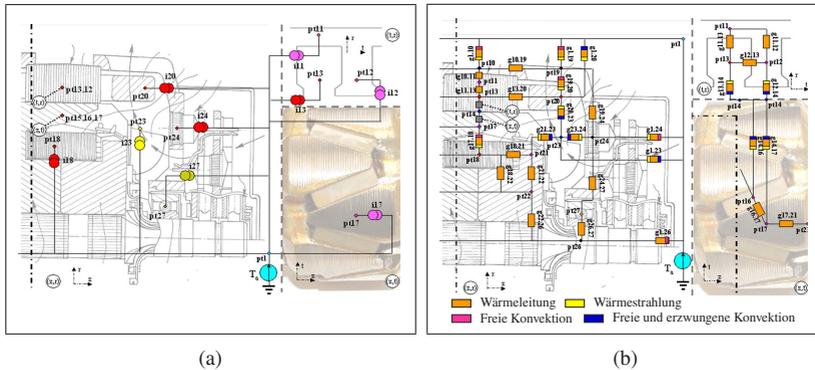


Abbildung 5.22: Temperaturmodell eines Klauenpolgenerators nach [100]; (a) Verlustleistungsquellen, (b) thermisches Ersatzschaltbild des untersuchten Klauenpolgenerators. Die in (b) dargestellten Widerstände sind bezüglich der jeweiligen Wärmetransportart gekennzeichnet.

Netzwerkknoten des thermischen Netzwerks ein (pt23, pt24 usw.). Jede Verlustleistungsquelle führt durch den Widerstand des Wärmetransports zunächst zur Erwärmung der einzelnen Komponente. Die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz zwischen der erwärmten Komponente und ihrer Umgebung führt zu einem entsprechenden Wärmetransport. Die in Abbildung 5.22 (a) dargestellten Verlustleistungsquellen stimmen – bis auf die dort zusätzlich berücksichtigten Lüfterradverluste – mit den Verlustleistungsquellen aus Abschnitt 5.3.2 überein.

In [100] wird bezüglich der Verlustleistungsquellen zwischen Eisen-, Kupfer-, Gleichrichter- und mechanischen Verlusten unterschieden. Die in (a) dargestellten Verlustleistungsquellen sind dementsprechend:

- Eisenverluste (i_{11} Stator-Blechkpaket, i_{12} Stator-Verzahnung und i_{17} Eisenverluste des Rotors)

- Kupferverluste (i_{13} Kupferverluste der Statorwicklung, i_{18} Kupferverluste der Erregerwicklung, i_{20} Kupferverluste der Statorwicklung)
- Gleichrichterverluste (i_{24} Verlustleistung der Gleichrichterdioden)
- Mechanische Verluste (i_{23} Lüfterradverluste und i_{27} Lagerverluste)

Die Erwärmung der verschiedenen Komponenten sowie der Wärmetransport zwischen ihnen und ihrer Umgebung ist von den eingebrachten Verlustleistungen abhängig. Die hierbei relevanten Mechanismen des Wärmetransports sind in (b) mittels Widerstandsnetzwerk dargestellt. Wie erkennbar wird, dominieren die Wärmeleitung und die Kombination aus freier bzw. erzwungener Konvektion.

Ein mit dem in [100] entwickeltes vergleichbares thermisches Netzwerk für den Klauenpolgenerator wurde in [98] vorgestellt. In beiden thermischen Netzwerken werden als Modellelemente für die Wärmetransportmechanismen elektrische Widerstände genutzt. Die Parameter der Widerstände können dabei entweder analytisch oder mittels Messdaten berechnet werden. Beide Modelle liefern hinreichend gute Resultate. In Abbildung 5.23 ist in (a) das thermische Netzwerk nach [100] und in (b) das nach [98] dargestellt. Das in (b) dargestellte

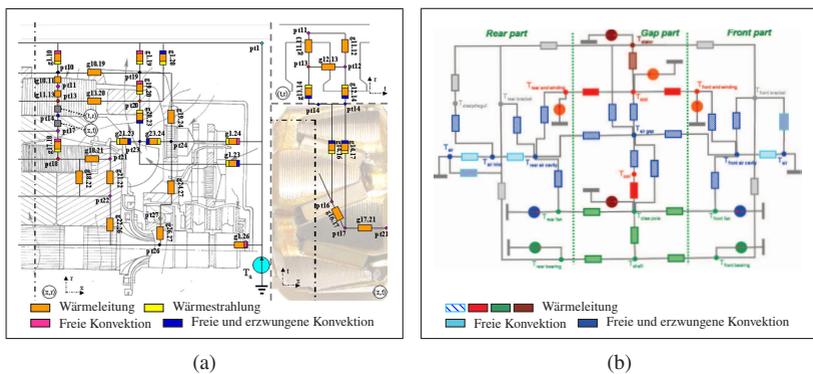


Abbildung 5.23: Thermische Netzwerke für die Temperaturmodelle von Klauenpolgeneratoren; in (a) das thermische Netzwerk nach [100] und in (b) das nach [98].

Modell beinhaltet als Verlustleistungsquellen Kupfer-, Eisen- und mechanische Verluste. Anders als in dem Modell nach [100] werden Gleichrichterverluste in dem hier gezeigten Modell also nicht berücksichtigt.

Auf der Grundlage dieser beiden Netzwerke wurde, ausgehend von den Verlustleistungsquellen für die Teilkomponenten, ein eigenes thermisches Modell für Klauenpolgeneratoren entwickelt. Dabei wurden zur Parameterberechnung verschiedene Quellen genutzt: Informationen über die Materialeigenschaften (die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität), Messdaten aus eigenen Generatorversuchen [173] sowie thermische Ersatzschaltbilder für Halbleiterbauelemente in Form von Cauer- oder Foster-Netzwerken, die von den Halbleiterherstellern bereitgestellt werden. Unbekannte Parameter wurden mittels einer PSO ermittelt. Die Grundlage für die Parameterberechnung mittels PSO bildet das in Abbildung 5.24 dargestellte Temperaturmodell eines Klauenpolgenerators. Die einzelnen in der Abbildung zu sehenden Widerstände

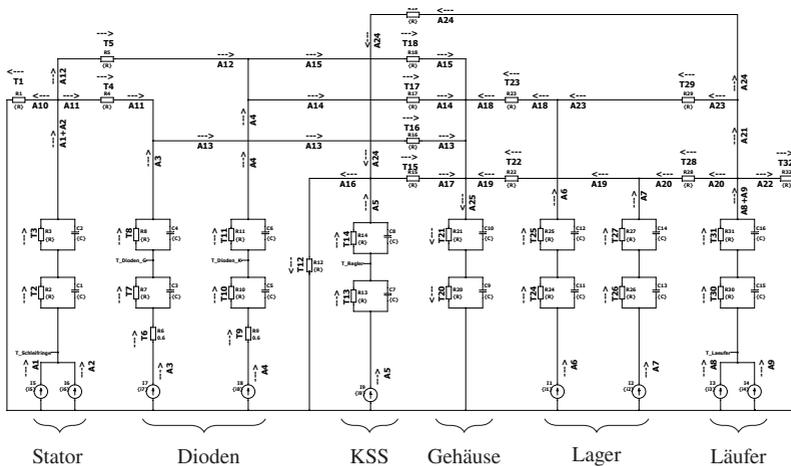


Abbildung 5.24: Thermisches Netzwerk eines Klauenpolgenerators

repräsentieren die verschiedenen Wärmetransportmechanismen. Im Fall der Wärmeleitung werden in den Materialien Foster-RC-Netzwerke mit thermischen Widerständen und Wärmekapazitäten berücksichtigt. Das dargestellte Netzwerk wurde analytisch beschrieben. Aus dieser Beschreibung wurde die Fehlerfunktion für die PSO abgeleitet. Unter Hinzunahme der Verlustleistungsmodelle aus Abschnitt 5.3.2 konnten so mittels PSO aus den Generatormessdaten der eigenen Generatorversuche die fehlenden Parameter für das hier entwickelte thermische Modell eines Klauenpolgenerators berechnet werden.

Das in Abbildung 5.24 vorgestellte Temperaturmodell wurde auf der Basis von Messdaten eines Klauenpolgenerators mit Diodengleichrichtung und einem maximalen Ausgangsstrom von 180 Ampere erstellt. Der Generator wurde dabei mit unterschiedlichen Drehzahlen und Ausgangsleistungen beaufschlagt, wobei die Temperaturveränderungen mittels Infrarotkamera gemessen wurden. In Abbildung 5.25 (a) bis (c) sind die Wärmebildaufnahmen der Generatorrückseite dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die eingepressten Gleich-

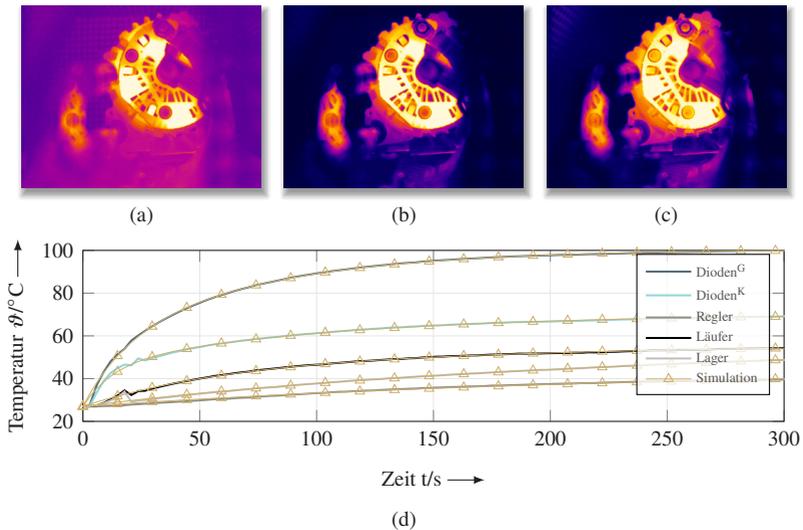


Abbildung 5.25: Wärmebildaufnahmen des untersuchten Klauenpolgenerators mit Fokus auf die Gleichrichtung, den Regler, den Läufer und die Lager. Die Messungen erfolgten bei $n_G = 4047 \text{ min}^{-1}$ und $i_G = 106$ Ampere nach 50 Sekunden (a), nach 150 Sekunden (b) und nach 300 Sekunden (c). In (d) sind die dabei gemessenen sowie die simulierten Temperaturverläufe dargestellt.

richterioden und die hier auftretenden Temperaturerhöhungen. Während der thermischen Vermessung des Klauenpolgenerators betrug die Umgebungstemperatur ca. 25°C . Der Generator wurde mit einer Drehzahl n_G von 4047 min^{-1} angetrieben und dabei auf einen Ausgangsstrom von 106 Ampere geregelt (was bei einer Spannung von 14,5 Volt einer Leistung von ca. 1,5 kW entspricht). Die Spitztemperatur nach 300 Sekunden betrug bei den Gleichrichterioden auf der Gehäuseseite ca. 100°C und bei den zusätzlich in einen Kühlkörper eingepressten Dioden ca. 70°C . In (d) sind zusätzlich die Temperaturverläufe

der einzelnen Komponenten über die gesamte Messreihe dargestellt. Mit den so ermittelten Parametern liefert die Simulation die in (d) dargestellten Verläufe. Wie zu sehen ist, sind die Abweichungen über den gesamten Verlauf hinweg äußerst gering. Die größten Abweichungen sind zu Beginn feststellbar. Für die Messung der Statortemperatur und damit für die Berechnung der Modellparameter wurden die in Abbildung 5.26 dargestellten Wärmebildaufnahmen genutzt. Die hier dargestellten Messungen wurden an dem gleichen

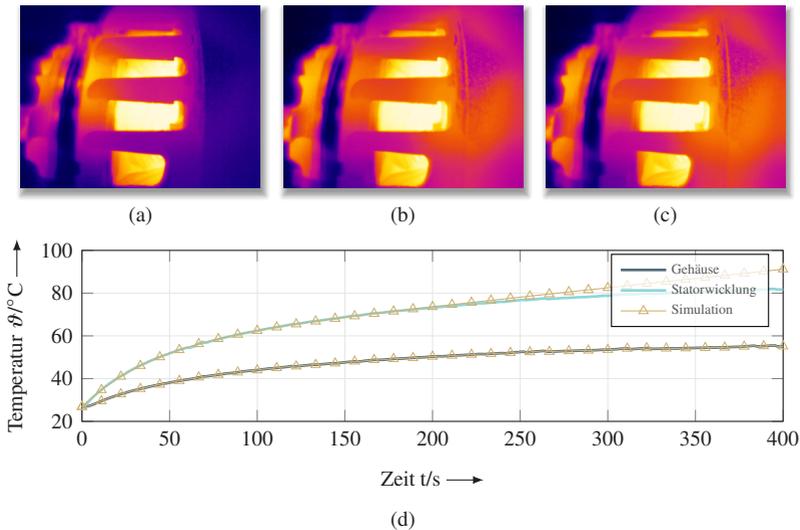


Abbildung 5.26: Wärmebildaufnahmen des untersuchten Klauenpolgenerators mit Fokus auf die Statorwicklung und das Gehäuse bei $n_G = 8000 \text{ min}^{-1}$ und $i_G = 184 \text{ Ampere}$. Die Aufnahmen wurden nach ca. 50 Sekunden (a), nach ca. 200 Sekunden (b) und nach ca. 400 Sekunden (c) gemacht. In (d) sind die gemessenen Temperaturverläufe sowie die Ergebnisse der Simulation abgebildet.

Generator wie oben vorgenommen, jedoch bei einer Generatordrehzahl von 8000 min^{-1} und einem Ausgangsstrom von 184 Ampere (was bei einer Spannung von 14,5 Volt einer Leistung von ca. 2,7 kW entspricht). Die in (d) dargestellten berechneten und gemessenen Temperaturverläufe stimmen hinreichend gut miteinander überein. Die simulierte Temperatur der Statorwicklung weicht ab einem Zeitpunkt von ca. 250 Sekunden zunehmend von der gemessenen Temperatur ab. Dieser Fehler basiert auf Messpunkten, an denen der Wärmestrom durch die Kühlung überlagert wurde. Trotz dieser geringfügigen Fehler

liefert das Modell eine hinreichende Genauigkeit, um die Zuverlässigkeit des Generators bestimmen zu können.

5.3.5 Zuverlässigkeitsmodell des Generators

Die wesentliche Aufgabe des Generators ist die Versorgung der Verbraucher während des Fahrbetriebs. Dynamische Ströme mit hohen Stromgradienten (di/dt) werden hingegen von der Batterie bereitgestellt. Eine kritische Lage in der elektrischen Energieversorgung tritt dann ein, wenn der Generator keine, eine reduzierte oder die maximale Leistung liefert. Um eine Zuverlässigkeitsbewertung für den Generator abgeben zu können, muss bekannt sein, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu diesen Fehlern und damit zu kritischen Situationen kommt und welche Auswirkungen diese genau haben.

Bei fehlender Ausgangsleistung des Generators wird die Batterie sukzessive entladen. Je nach aktueller Verbrauchslage der aktiven Verbraucher bzw. je nach Aktivität der Assistenzsysteme und des Energiemanagements kann dies zu Unterspannungen und damit zu einem Ausfall wesentlicher Verbraucher führen. Eine reduzierte Leistungsausgabe seitens des Generators wird dann kritisch, wenn die Batterie eine negative Ladebilanz aufweist bzw. wenn die Fahrzeuglast für eine Quelle zu hoch ist. Liefert der Generator eine zu hohe Ausgangsleistung, führt dies zu einer Überspannung in der elektrischen Energieversorgung, auch als Lastabwurf (Load Dump) bekannt. Je nach Energieeintrag und Impedanz des Bordnetzes können Verbraucher dabei irreversibel geschädigt werden.

In diesem Abschnitt werden zunächst die typischen Fehler, ihre Häufigkeitsverteilungen sowie ihre Auswirkungen vorgestellt und diskutiert. Auf dieser Basis wird anschließend ein Teilfehlerbaum für Klauenpolgeneratoren entwickelt. Der Abschnitt schließt mit der Beschreibung der Zuverlässigkeitsmodelle aus den Handbüchern FIDES [48], HDBK-217Plus [130], NSWC-11 [111], SN29500 [151] und TR62380 [12], die zur Berechnung der Ausfallraten einzelner Komponenten des hier untersuchten Generatortyps dienen.

Generatorfehler

Alle Komponenten eines Generators können fehlerhaft werden und dadurch die Funktionalität des Generators einschränken. In welcher Art und in welchem

Umfang die elektrische Energieversorgung beeinträchtigt wird, hängt von der Fehlerauswirkung ab. Wenn bspw. die Kopplung zur VKM ausgefallen ist, die Statorwicklung bzw. die Erregerwicklung unterbrochen ist oder der Regler inklusive der Bürsten und Schleifringe defekt ist, stellt der Generator nur noch eine reduzierte bzw. gar keine Ausgangsleistung mehr bereit. Auch offen ausgefallene Gleichrichterioden führen zur Reduktion der Leistung oder sogar zum gänzlichen Ausfall des Generators.

Neben den Fehlern der Komponente selbst kann auch die Kontaktierung zwischen Generator und der elektrischen Energieversorgung fehlerhaft werden. Die Anbindung des Massepotentials erfolgt über den Rumpf der VKM und mittels Masseleitung zur Karosserie. Das positive Potential wird über eine abgesicherte Leitung an die zentrale Verteilstelle angebunden. Dabei kann die Masseverbindung einen erhöhten Übergangswiderstand aufweisen bzw. offen ausfallen (vgl. Abbildung 5.27 (a) [135]). In (b) ist ein fehlerhafter Anschluss-



(a)



(b)

Abbildung 5.27: Darstellungen aus der Untersuchung [135]; in (a) fehlerhafte Leitung der Masseanbindung an die Karosserie und in (b) ein Anschlussbolzen mit beschädigtem Gewinde.

bolzen dargestellt. Die Beschädigung der Schraubverbindung führt zu einer verringerten Anpresskraft und infolgedessen zu einem erhöhten Übergangswiderstand zwischen Kabelschuh und Auflage- bzw. Kontaktfläche. Durch Erschütterungen kann die Verbindung kurzzeitig oder dauerhaft offen ausfallen.

Neben Fehlern in oder an den Verbindungsstellen überwiegen bei Klauen-

polgeneratoren Ausfälle, die durch die Gleichrichtung, den Regler bzw. die Statorwicklungen verursacht werden. Hauptausfallursache sind allgemein alle Komponenten, die hohen Temperaturen und Wechselbelastungen ausgesetzt sind. In den Studien [109], [92], [128] und [127] finden sich entsprechende Fehlerverteilungen, die für die Zwecke der hier vorliegenden Arbeit zusammengefasst wurden und nun Tabelle 5.5 zu entnehmen sind. Zu beachten ist, dass den genannten Studien unterschiedliche Stichprobenumfänge zugrunde liegen, sodass die Ergebnisse nicht gleichermaßen aussagekräftig und untereinander nicht uneingeschränkt vergleichbar sind. Aus den Daten geht klar

Fehlerursache	[109]	[92]	[128]	[127]	Gesamt
Ausfall Regler	30%	19%	17%	17%	21.01%
Ausfall Gleichrichterioden	11%	2%	30%	28%	17.97%
Kurzschluss der Statorwicklung	30%		20%	17%	16.96%
Fehler Kohle-Schleifring-System	7%	11%	18%	14%	12.66%
Andere Fehler		39%		6%	11.39%
Lagerschäden	7%	13%	10%	10%	10.13%
Herstellerefehler	15%	5%			5.06%
Offene Wicklung			5%	8%	3.3%
Riemenscheibe		6%			1.52%

Tabelle 5.5: Fehlerverteilungen aus den Arbeiten [109], [92], [128] und [127]

hervor, dass es sich bei der am häufigsten fehlerhaft werdenden Komponente um den Regler handelt. Die Fehlerart „Ausfall Regler“ umfasst dabei die Ansteuerung der Erregerwicklung, die Logik und die Kommunikation. Wird eines dieser Teilsysteme fehlerhaft, fällt der gesamte Regler aus. Im Mittel fallen ca. 21 Prozent der Generatoren aufgrund eines fehlerhaften Reglers aus. Mit ähnlicher Häufigkeit wird die Gleichrichtung des Generators fehlerhaft. Über die Fehlerhäufigkeit und die Fehlerverteilung von Generatoren mit aktiver Gleichrichtung kann im Rahmen dieser Arbeit aufgrund noch nicht vorhandener Fehlerdaten von Generatoren mit aktiver Gleichrichtung aus dem Feld keine Aussage getroffen werden. Bei Fehlern in der Gleichrichtung handelt es sich um Fehler der Gleichrichterioden. Dieser Fehleranteil ist in den Studien unterschiedlich hoch. Während in [128] und [127] Ausfallhäufigkeiten von ca. 30 Prozent genannt werden, wurden in [92] lediglich 2 % der Generatoren mit fehlerhafter Gleichrichtung gefunden. Die Gründe für diesen Unterschied werden in [92] nicht erläutert, es werden jedoch andere, nicht weiter spezifizierte

Fehler mit 39 Prozent angegeben. Hier liegt die Vermutung nahe, dass Fehler der Gleichrichtung unberücksichtigt geblieben sind.

Mit einer geringfügig geringeren Häufigkeit von ca. 17 Prozent treten Kurzschlüsse in der Statorwicklung auf. Hierbei muss zwischen zwei Arten von Kurzschlüssen unterschieden werden: solchen zwischen den Wicklungen und solchen zwischen der Wicklung und dem Gehäuse. Die Auswirkungen eines Gehäusekurzschlusses sind aufgrund der direkten Verbindung des Gehäuses mit dem Massepotential bzw. der infolgedessen auftretenden hohen Fehlerströme kritisch. Kurzschlüsse zwischen den Wicklungen sind mit geringem Kurzschlusswiderstand kritisch, da hierbei die einzelnen Phasenspannungen deutlich abnehmen, wodurch die Versorgung nicht mehr gewährleistet werden kann.

Eine weitere und mit ca. 13 Prozent relativ häufig auftretende Fehlerursache ist der Ausfall des Kohle-Schleifring-Systems (KSS)s. Mögliche Ursachen für diesen Fehler sind abgelaufene oder verklemmte Bürsten oder eine beschädigte Federaufhängung. Fehler dieser Art können zum Großteil auf Verunreinigungen und damit auf die Zerstörung der Bürsten zurückgeführt werden.

Die Kugellager der Generatorwelle fallen mit einer Häufigkeit von ca. 10 Prozent aus. Ursache hierfür ist ein beschädigtes Lager, durch das die Generatorwelle entweder gebremst oder ganz an der Rotation gehindert wird. Da der Generator infolgedessen an einem ineffizienteren Arbeitspunkt betrieben wird, sind weitere Folgeschädigungen möglich. Wenn das Bremsmoment des Lagers das übertragbare Drehmoment des Riemensystems übersteigt, nimmt die Ausgangsleistung des Generators und somit dessen Ausgangsspannung ab. Bei einem Ausfall des Lagers kann kein Drehmoment mehr auf die Läuferwelle aufgebracht werden, sodass der Generator keine Ausgangsleistung mehr bereitstellt und somit *offen* ausgefallen ist.

Beim Ausfall einer Statorwicklung nimmt die Höhe der Spannung und der Ausgangsleistung um den Faktor $\sqrt{3}$ ab. In diesem Szenario kann der Generator die Spannungslage in der elektrischen Energieversorgung nicht mehr wesentlich beeinflussen und die elektrische Energieversorgung fällt in Abhängigkeit von der Batterie aus.

Weitere Fehlerursachen wie bspw. ein Ausfall des Generators durch eine defekte Riemenscheibe konnten nur in [92] festgestellt werden. Ein möglicher Grund für die niedrige Ausfallhäufigkeit aufgrund eines Fehlers im Riemensystem besteht in der Einführung von Decoupler-Riemenscheiben, durch welche die Belastungen des Riemensystems deutlich reduziert werden konnten.

Fehlerbaum

Basierend auf den im vorigen Unterabschnitt erarbeiteten Erkenntnissen soll in diesem Unterabschnitt ein Fehlerbaum für Klauenpolgeneratoren erstellt werden. Zu diesem Zweck müssen auf der Grundlage der betrachteten Fehler und ihrer Häufigkeiten die Ausfallraten für die jeweiligen Komponenten berechnet werden.

Jeder der im vorigen Unterabschnitt beschriebenen Fehler führt entweder zur *Leistungsreduktion*, zum *offenen* oder direkt zum *kurzgeschlossenen* Ausfall des Generators. Um zu beurteilen, welche Fehler mit welcher Häufigkeit auftreten und welche Auswirkungen sie haben, werden die Wirkmechanismen bzw. Fehler im Folgenden auf der Grundlage der Arbeiten [128] und [127] analysiert. In Abbildung 5.28 sind die einzelnen Teilsysteme und Einflussgrößen sowie deren Abhängigkeiten voneinander dargestellt. Ausfälle des Generators,

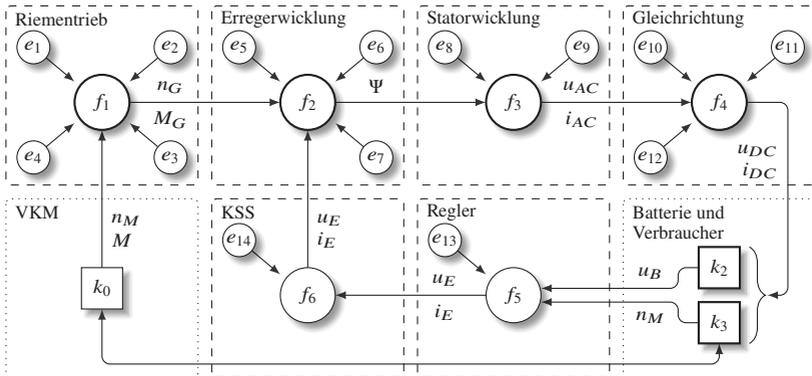


Abbildung 5.28: Modell der Wirkmechanismen und Fehlereinflüsse des hier untersuchten Generortyps, in Anlehnung an [128]

die durch Fehler der VKM bedingt sind, werden im Folgenden bei der Berechnung der Zuverlässigkeit nicht berücksichtigt, da eine gesamthafte Betrachtung der VKM, deren Aggregate und deren Zuverlässigkeit den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde. Die Systemgrenze liegt beim Riementrieb, welcher in seiner Funktion die Motordrehzahl n_M und das Motormoment M auf die Läuferwelle überträgt.

Zu einem offenen Ausfall des Generators kommt es u. a. dann, wenn die Generator Drehzahl n_G bzw. das Moment M_G nicht mehr aufgebracht und somit

keine Ausgangsleistung mehr bereitgestellt werden kann. Mögliche Ursachen hierfür sind

- e_1 eine zu geringe Riemenspannung,
- e_2 ein defekter Antriebsriemen,
- e_3 ein defekter Freilauf der Riemenscheibe und
- e_4 ein Lagerschaden.

Eine weitere mögliche Ursache für einen offenen Ausfall des Generators ist ein Ausfall der Erregerwicklung. Diese fällt entweder durch einen Fehler in der Spule selbst oder durch einen Ausfall der Teilsysteme Riemetrieb und KSS aus. Ohne Drehzahl n_G , Drehmoment M_G und Erregerstrom i_E kann kein Magnetfeld aufgebaut werden. Die Folge ist ein offener Ausfall des Generators. Dieser tritt auch dann ein,

- e_5 wenn die Erregerwicklung offen bzw.
- e_6 kurzgeschlossen ausgefallen ist oder
- e_7 wenn die Schleifringe oxidiert sind.

Treten Fehler in einer der Statorwicklungen auf, ist für die Rückwirkung auf die elektrische Energieversorgung entscheidend, ob die jeweilige Statorwicklung

- e_8 kurzgeschlossen oder
- e_9 unterbrochen (offen)

ausgefallen ist. In letzterem Fall kann der Generator weiter Strom in die elektrische Energieversorgung einspeisen, allerdings mit reduzierter Ausgangsleistung. Fällt eine weitere Statorwicklung aus, ist der Generator offen ausgefallen. Bezüglich der Fehlerart „Kurzschluss einer Statorwicklung“ ist zu unterscheiden, ob der Kurzschluss durch Kontakt mit dem Gehäuse (Masse), mit der Statorwicklung selbst oder mit einer weiteren Statorwicklung zustande kommt. Der Gehäusekurzschluss ist aufgrund der guten elektrischen Anbindung besonders kritisch und führt zum direkten Ausfall des Generators. Zusätzlich hat dieser Fehler auch insofern Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung, als der Fehlerstrom zu einem unzulässig hohen Spannungseinbruch führt. Fehlerströme fließen auch dann, wenn zwei Windungen zueinander kurz-

geschlossen sind; sie fließen dann allerdings innerhalb der Maschine, sodass der Generator in diesem Fall (wie beim offenen Ausfall der Statorwicklung) als offen ausgefallen zu betrachten ist.

Die gleiche Kritikalität besitzen Fehler in der Gleichrichtung. Hierbei kann entweder die Gleichrichterdiode fehlerhaft werden oder der Anschluss zur elektrischen Energieversorgung ausfallen. Die ursächlichen Fehler sind dabei

e_{10} eine offene bzw.

e_{11} eine durch Kurzschluss ausgefallene Gleichrichterdiode oder

e_{12} eine beschädigte Verbindung zur elektrischen Energieversorgung.

Die Fehlerauswirkungen einer offenen Diode sind mit denen einer unterbrochenen Statorwicklung vergleichbar. Auch hier wird die Ausgangsleistung um den Faktor $\sqrt{3}$ reduziert und die elektrische Energieversorgung kann nicht hinreichend mit Strom versorgt werden. Eine kurzgeschlossene Diode hingegen führt zu großen Fehlerströmen innerhalb des Generators und somit direkt zu dessen Ausfall.

Zu einem offenen Ausfall des Generators kann es auch in Zusammenhang mit der Regelung des Erregerstroms kommen. Diese erfolgt durch Messung der Batteriespannung mittels ASIC oder Mikrocontroller. Hierbei wird davon ausgegangen, dass bei

e_{13} einem defekten Integrated Circuit (IC) oder einer fehlerhaften Leistungsstufe

kein Erregerstrom eingepreßt werden kann. Der Erregerstrom wird auch unterbrochen, wenn

e_{14} die Bürsten ausfallen.

Beide Fehler, e_{13} und e_{14} , führen zum offenen Ausfall des Generators, was bedeutet, dass von diesem keine Ausgangsleistung mehr bereitgestellt werden kann.

Für die folgende Berechnung der Ausfallraten des Generators werden die Fehler e_4 bis e_{14} berücksichtigt. Die Fehler e_1 bis e_3 des Riementreibs und der Riemenscheibe werden hingegen nicht mit in die Untersuchung einbezogen, da die in dieser Arbeit durchgeführte Zuverlässigkeitsbewertung auf die Komponenten der elektrischen Energieversorgung fokussiert.

Auf der Basis der bisher diskutierten Fehler und deren Auswirkungen lässt sich

der in Abbildung 5.29 dargestellte Teilfehlerbaum erstellen. Hierbei werden die Oder-Verknüpfungen der Hauptereignisse in die jeweiligen Fehlerbäume der elektrischen Energieversorgung integriert. Die Wahrscheinlichkeit für das Auf-

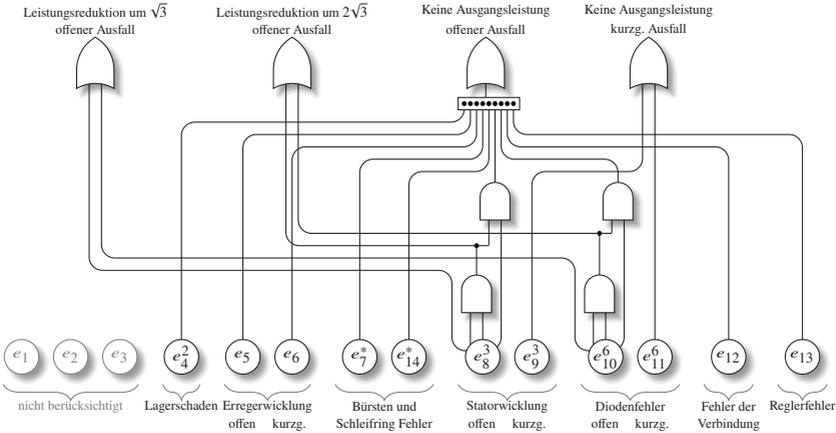


Abbildung 5.29: Teilfehlerbaum für Generatoren mit Diodengleichrichtung

treten eines Fehlerereignisses wird auf der Basis der Exponentialverteilung mit konstanten Ausfallraten berechnet. Jeder Fehler ist dabei ein Basisereignis im Fehlerbaum, welches entweder über eine weitere Verknüpfung oder direkt zu einer der Top-Verknüpfungen führt. Die Fehler e_4, e_8, e_9, e_{10} und e_{11} sind hierbei als einzelne Elemente dargestellt, werden für den Fehlerbaum jedoch in deren jeweiliger Häufigkeit berücksichtigt. Die Hochzahl repräsentiert dabei die Anzahl der Komponenten und somit der Basisereignisse. Berücksichtigt werden zwei Kugellager unterschiedlicher Geometrie, drei Statorwicklungen und sechs Gleichrichterioden. Die einzelnen Ausfallraten werden anhand der im folgenden Unterabschnitt beschriebenen Modelle und in Abhängigkeit von den auftretenden Verlustleistungen und der Temperaturerhöhung während eines Fahrzyklus berechnet. Der Teilfehlerbaum erhält als Basisereignis den Mittelwert der berechneten Verteilungen für die Ausfallraten.

Berechnung der Ausfallrate

Die Ausfallrate des Generators ergibt sich aus einer Kombination der konstanten und der modellbasierten Ausfallraten. Die Grundlage für die Berechnung der Ausfallraten für die mechanischen Komponenten des Generators bilden das Handbuch NSWC-11 [111] bzw. die darin vorgestellten Modelle. Die Ausfallraten für die elektronischen Komponenten, Dioden bzw. Mosfets der Gleichrichtung und Regler (ASIC oder Mikrocontroller) werden auf der Basis der Handbücher FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151] berechnet. Jedes der genannten Handbücher greift auf die in Unterkapitel 2.5 vorgestellten Alterungsmodelle zurück. Auf der Basis der in den unterschiedlichen Handbüchern jeweils vorliegenden Felddaten entstehen unterschiedliche Parametrierungen und Sensitivitäten gegenüber den Einflussgrößen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Qualität und elektrischem Stress [62], [73], sodass die Ausfallraten für die unterschiedlichen Standards teilweise deutlich voneinander abweichen können. Daher wird im Allgemeinen empfohlen, für eine Zuverlässigkeitsberechnung auf einen Standard zurückzugreifen, um eine Vergleichbarkeit der Resultate zu ermöglichen. Da für die Komponente Generator kein unabhängiges Ausfallratenhandbuch existiert, wird auf die genannten Handbücher zurückgegriffen. Die Ausfallraten der Basisereignisse werden mit den aus den genannten Handbüchern berechneten Ausfallraten und den Fehlerverteilungen aus Tabelle 5.5 gebildet. Mit dem Handbuch NSWC-11 für die Prädiktion der Zuverlässigkeit mechanischer Komponenten werden die Ausfallraten für

- die Lager sowie für
- die Stator- und
- die Läuferwicklung berechnet.

Für KSS-Fehler stehen konstante Ausfallraten aus Grundlagenuntersuchungen zur Verfügung, wobei die Ausfallraten für

- Bürsten- und
- Gehäusefehler

als konstant angenommen werden. Für die Bestimmung der Ausfallrate für Gehäusefehler wurde zur Vereinfachung der Ausfall der Verbindung zur elektrischen Energieversorgung mit eingeschlossen, wobei angenommen wurde, dass der Ausfall des Gehäuses den Verlust der Verbindungsstelle bedingt. Die Ausfallraten der Komponenten

- Diode,
- Mosfet und
- Regler

werden auf der Grundlage der Handbücher FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151] berechnet.

Die Ausfallrate für den Generator im Ganzen, λ_G , lässt sich auf der Basis von [111] angeben zu

$$\lambda_G = (\lambda_{G,B} \cdot C_{SF}) + \lambda_{WI} + \lambda_{BS} + \lambda_{ST} + \lambda_{BE} + \lambda_D + \lambda_R. \quad (5.29)$$

Die einzelnen Bestandteile der Gleichung sind die Basisfehlerrate⁴ $\lambda_{G,B}$ (DC 2,17 bis AC 10) und der Lastfaktor C_{SF} (wobei der Wert 1.0 einer geringen und der Wert 3.0 einer hohen Last entspricht).

Für die einzelnen Komponenten werden spezifische Ausfallratenmodelle angewendet. Die Berechnung der Ausfallrate einer Wicklung λ_{WI} basiert auf der Annahme, dass durch die Temperaturerhöhung Alterungsmechanismen einsetzen und somit die Ausfallwahrscheinlichkeit zunimmt. Die Ausfallrate einer Wicklung berechnet sich – unabhängig davon, ob es sich um eine Stator- oder um eine Läuferwicklung handelt – zu

$$\lambda_{WI} = \lambda_{WI,B} \cdot C_T \cdot C_V \cdot C_{alt}. \quad (5.30)$$

Die Ausfallrate der Wicklung $\lambda_{WI,B}$ hängt von den Faktoren für die Temperatur C_T , die Spannungsschwankungen C_V und die Einsatzhöhe C_{alt} des Generators ab. Für die Temperaturabhängigkeit C_T sind die Wicklungen in die vier Klassen A, B, F und H eingeteilt. Jede dieser Klassen repräsentiert

⁴ Die Fehlerraten sind in NSWC-11 als $\frac{10^{-6}}{h}$ angegeben und werden daher in $\frac{10^{-9}}{h}$ (FIT) umgerechnet.

verschiedene Stufen der Temperaturbeständigkeit der Wicklung und damit den zulässigen Temperaturhub T_K . Damit berechnet sich C_T zu

$$C_T = 2^{\frac{(T_o - 40)}{10}}. \quad (5.31)$$

Hierbei besteht der Faktor $T_o = T_W + T_U - T_K$ aus den Temperaturen der Wicklung T_W , der Umgebung T_U und dem maximal zulässigen Temperaturhub T_K . Der Faktor für die Spannungsabhängigkeit C_V berechnet sich für dreiphasige Maschinen zu

$$C_V = 1 + (0,4 \cdot V_U)^{2,5}, \quad (5.32)$$

wobei V_U ein prozentualer Faktor aus dem Verhältnis von auftretender zu durchschnittlicher Spannung an den Wicklungen ist.

Bei einem Betrieb von Klauenpolgeneratoren in Höhen von über 1000 Meter Normalnull (NN) muss aufgrund der geringeren Luftdichte und der dadurch bedingten geringeren Kühlleistung eine zusätzliche Belastung berücksichtigt werden. Das Verhältnis von schlechterer Kühlleistung zu geringerer Umgebungstemperatur wird über den Faktor C_{alt} berücksichtigt und ist über die Einsatzhöhe h_B definiert zu

$$C_{alt} = 1 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot (h_B - 1000m). \quad (5.33)$$

Die Ausfallrate λ_{BS} des KSS bzw. der Bürsten ist wie die Ausfallrate λ_{ST} des Gehäuses konstant.

Für die Kugellager des Generators berechnet sich die Ausfallrate λ_{BE} zu

$$\lambda_{BE} = \lambda_{BE,B} \cdot C_Y \cdot C_R \cdot C_V \cdot C_{CW} \cdot C_I \cdot C_{SF} \cdot C_C. \quad (5.34)$$

Hierbei sind $\lambda_{BE,B}$ die Basisfehlerrate und C_Y , C_R , C_V , C_W , C_I , C_{SF} sowie C_C Belastungs- bzw. Materialfaktoren.

Die Berechnung der Ausfallraten für die Gleichrichtung, für die Dioden und Mosfets sowie für den Regler beruht auf den entsprechenden Modellen, die sich in den Handbüchern FIDES, HDBK-217Plus und SN29500 finden. Im Hinblick auf die grundlegenden Gleichungen und Modellansätze für die Berechnung der Ausfallraten der Komponenten Diode, Mosfet und Regler gibt es keine Unterschiede zwischen den genannten Handbüchern. Bezüglich der Modellierung unterscheiden sich die Handbücher jedoch durch verschiedene Ansätze zur Berechnung der Ausfallraten sowie durch Bezugnahme auf ver-

schiedene Datengrundlagen voneinander.
Die Grundgleichung nach FIDES ist

$$\lambda_{D,M,R} = \lambda_{PH} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{PR}. \quad (5.35)$$

Die Parameter Π_{PM} und Π_{PR} sind konstante Faktoren, welche die Qualität und den Herstellungsprozess abbilden. Die physikalische Ausfallrate λ_{PH} des jeweils zu untersuchenden Bauelements berechnet sich auf der Grundlage weiterer Belastungsfaktoren. Hierbei werden als Einflussgrößen Modelle für die Temperatur (TH), die Zyklisierung (TCY), die Alterung der Lötverbindung (SJ), die Luftfeuchtigkeit (RH) und die Beschleunigung (ME) berücksichtigt. Die physikalische Ausfallrate λ_{PH} ist damit definiert zu

$$\lambda_{PH} = \sum_i^n k_{Z,i} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_{TH} \cdot \Pi_{TH} \\ +\lambda_{TCY} \cdot \Pi_{TCY} \\ +\lambda_{SJ} \cdot \Pi_{SJ} \\ +\lambda_{RH} \cdot \Pi_{RH} \\ +\lambda_{ME} \cdot \Pi_{ME} \end{pmatrix}_i \cdot \Pi_{IN,i}. \quad (5.36)$$

Dabei steht n für die Anzahl der Einsatzphasen. k_Z ist der Faktor für die Einsatzdauer und Π_{IN} der Faktor für zusätzliche Stressbelastungen.

Ähnlich wie FIDES berücksichtigt das Handbuch HDBK-217Plus physikalische Modelle und durch den Herstellungsprozess bedingte Faktoren. Die Ausfallrate berechnet sich mit

$$\lambda_{D,M,R} = \pi_G \cdot \begin{pmatrix} \lambda_{OB} \cdot \pi_{DCO} \cdot \pi_{TO} \cdot \pi_S \\ +\lambda_{EB} \cdot \pi_{DCN} \cdot \pi_{TE} \\ +\lambda_{TCB} \cdot \pi_{CR} \cdot \pi_{DT} \end{pmatrix} + \lambda_{SJB} \cdot \pi_{SJDT} + \pi_{IN}. \quad (5.37)$$

Hierbei sind die gegebenen Basisfehlerraten λ_{OB} für den Betrieb, λ_{EB} für die Umgebung, λ_{TCB} für die thermische Zyklisierung und λ_{SJB} für die Lötstellen. Die Ausfallrate bestimmt sich über die jeweiligen Basisfehlerraten sowie über die modellbasierten Faktoren für die Zyklisierung π_{DCO} , π_{DCN} , π_{CR} , für die Temperatur π_{TO} , π_{TE} , π_{DT} und die Lötstellen π_{SJDT} . Die zusätzliche Ausfallrate π_{IN} stellt einen konstanten Korrekturfaktor dar. Des Weiteren werden mit π_G die kalendarische Veränderung der Zuverlässigkeit und mit π_S die von der Spannung abhängige Stressbelastung abgebildet.

Das Handbuch SN29500 berücksichtigt bei der Berechnung der Ausfallraten deutlich weniger Einflussgrößen als die zuvor besprochenen Handbücher. Die Ausfallrate der Diode berechnet sich hier für die Diode und den Regler mit

$$\lambda_{D,R} = \lambda_{ref} \cdot \pi_T. \quad (5.38)$$

Hierbei sind λ_{ref} die Basisausfallrate der jeweiligen Komponente und π_T der Faktor für die Temperaturabhängigkeit. Für die aktive Gleichrichtung mit Mosfets als Leistungsschaltern berechnet sich die Ausfallrate für einen Mosfet mit

$$\lambda_M = \lambda_{ref} \cdot \pi_T \cdot \pi_U. \quad (5.39)$$

Mit dem Faktor π_U wird die Spannungsabhängigkeit der Ausfallrate des Mosfets skaliert.

Auf der Basis der in diesem Unterkapitel vorgestellten Modelle bzw. Gleichungen können die Ausfallraten in Abhängigkeit von realen Belastungsszenarien berechnet werden. Hierzu erfolgt eine zyklische Berechnung der Verlustleistung, der Temperatur und der Ausfallrate in dem jeweiligen Arbeitspunkt der Eingangsdaten. Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten erfolgt dabei mittels Exponentialverteilung, weshalb über alle Zyklen hinweg der Mittelwert der berechneten Ausfallraten für die Komponenten des Generators genutzt wird. Die Ausfallrate der Basisereignisse berechnet sich unter Hinzunahme der Fehlerverteilungen aus Tabelle 5.5.

5.4 Modell des Gleichspannungswandlers

Die Einführung neuer Spannungsebenen macht die Integration von Gleichspannungswandlern (GSW) in die Architektur der elektrischen Energieversorgung erforderlich. Die Hauptfunktion eines GSWs besteht darin, eine stabile Spannungslage in der elektrischen Energieversorgung sicherzustellen. Hierbei sind vor allem zwei Eigenschaften von GSWs von Vorteil: ihr schnelles Regelverhalten sowie die kurzzeitige Überlastfähigkeit. GSWs speisen die 12V-Spannungsebene entweder aus der 48V-Spannungsebene oder aus einem Hochspannungssystem mit 400 bzw. 800 Volt. Je nach Bauart und eingebauten Reserven können GSWs Spannungseinbrüche auf der 12V-Ebene deutlich besser ausregeln als Generatoren. In Abhängigkeit vom Ausstattungs- bzw. Verbraucherumfang sowie von den Umgebungsbedingungen ergeben sich mehr oder weniger hohe Leistungsanforderungen an den GSW. Der genaue Wert hängt dabei im Wesentlichen von den mittleren Leistungen der zu versorgenden Verbraucher ab.

Um die Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher zu gewährleisten, müssen GSWs nicht nur eine hinreichend hohe Leistungsfähigkeit, sondern auch eine hinreichend hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Im Folgenden soll daher ein Modell entwickelt werden, anhand dessen sich die Zuverlässigkeit von GSWs für die 12V/48V-Ebene bestimmen lässt. Zunächst werden die in GSWs grundsätzlich verbauten Technologien sowie die primären Funktionen eines mehrphasigen GSW vorgestellt. Im nächsten Schritt wird mit der Modellbildung für einen bidirektionalen 12V/48V-GSW begonnen, wobei die dafür notwendigen Annahmen und Gleichungen erläutert werden. Auf dieser Basis werden anschließend verschiedene Modelle zur Berechnung der Ausfallraten der Komponenten bzw. eines GSW im Gesamten vorgestellt. Aufgrund der Komplexität von GSWs, die zum einen aus deren Architektur und zum anderen aus den an ihre Leistungsfähigkeit gestellten Anforderungen resultiert, wird für die quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit ein Teilfehlerbaum eingeführt. Das Unterkapitel schließt mit der Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse.

5.4.1 Technologie

Es gibt verschiedene Bauformen von GSWs (eine gute Übersicht findet sich in [80]). In Bezug auf Kraftfahrzeuge mit VKM haben sich für die Wandlung

von 12 auf 48 Volt je nach geforderter Ausgangsleistung ein- bzw. mehrphasige Wandlersysteme durchgesetzt. In mehrphasigen GSWs kommen entweder mehrere voneinander unabhängige oder mehrere miteinander gekoppelte Phasen zum Einsatz, wobei das Koppeln der Phasen eine signifikante Steigerung der Effizienz ermöglicht. Bei der Wandlung von 12 auf 400 Volt bzw. von 12 auf 800 Volt sind spezielle Maßnahmen erforderlich, um eine sichere Trennung der Spannungsebenen voneinander zu gewährleisten. Bei hoher Differenz der beiden Eingangsspannungen werden Halb- und Vollbrückenwandler eingesetzt [174]. Für den Einsatz in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind neben den soeben umrissenen Bauarten auch GSW-Architekturen entstanden, welche direkt über den Inverter der E-Maschine betrieben werden [150]. Trotz dieser Unterschiede sind alle GSWs ihrem Aufbau nach grundsätzlich miteinander vergleichbar. In Abbildung 5.30 ist in Anlehnung an [80] das Blockschaltbild eines GSWs mit den wesentlichen Teilsystemen Leistungsstufe und Logik dargestellt. Die Leistungsstufe besteht aus den Komponenten

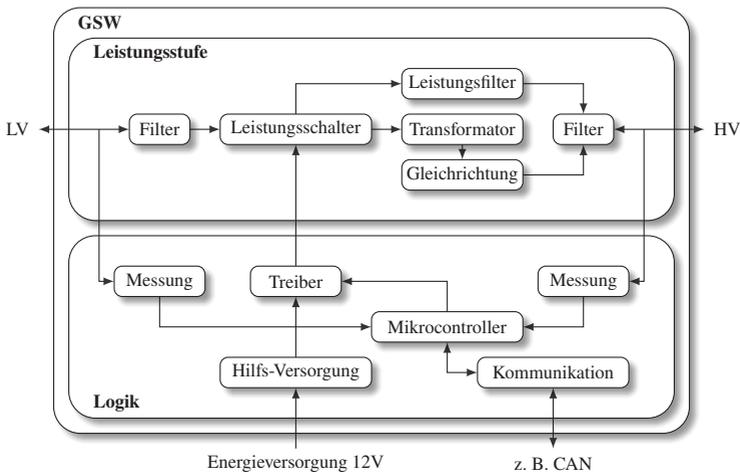


Abbildung 5.30: Blockdiagramm eines Gleichspannungswandlers mit den Teilsystemen Leistungsstufe und Logik, in Anlehnung an [80]

ten Eingangsfilter, Leistungsschalter, Leistungsfilter und Ausgangsfilter. Bei Wandlern mit Hochvolt-Spannungen von 400 bzw. 800 Volt werden Halb- und Vollbrücken eingesetzt. Mit diesen wird die Eingangsspannung auf der einen Seite des Transformators getaktet und auf der anderen Seite gleichgerichtet.

So lässt sich auf beiden Seiten des Transformators eine Bidirektionalität erreichen.

Das zweite Teilsystem, die Logik, dient zur Regelung des GSWs. Hierzu werden die Ein- und Ausgangsspannungen sowie die Ströme in den Leistungsfiltern gemessen; darüber hinaus werden über einen diskreten Schaltkreis bzw. mittels eines Mikrocontrollers die Höhe der Ausgangsspannung und der Ausgangsleistung geregelt. Die Anpassung der Ausgangsleistung des GSWs erfolgt über die Leistungsschalter, welche mittels Treiberstufe und einer Schaltfrequenz f_S zyklisch geschaltet werden. Die elektrische Energieversorgung für das Teilsystem Logik wird entweder extern oder über einen internen Abgriff auf der 12V-Spannungsebene realisiert.

Während des Fahrbetriebs werden über die jeweils verbaute Kommunikationsschnittstelle, z. B. Controller Area Network (CAN), Messdaten und Sollgrößen zwischen GSW und Fahrzeug bzw. Energiemanagement ausgetauscht. Dies ist wichtig, da übergeordnete Systeme wie das Energiemanagement Informationen darüber erhalten müssen, ob das System belastbar ist und ob ggf. degradiert werden muss. Ist bspw. der GSW aufgrund von hohen Umgebungstemperaturen und einem ungünstigen Betriebspunkt im Derating, muss das Energiemanagement diesen Zustand erkennen und entsprechend reagieren. Hierfür meldet der GSW seinen Zustand, woraufhin das Energiemanagement eine Reduktion der Leistungs- bzw. Stromaufnahme von bestimmten Verbrauchern vorgibt (bspw. Sitzheizung auf 50 Prozent, Frontscheibenheizung auf 25 Prozent usw.) oder diese ganz abschaltet.

In Abbildung 5.31 ist die Basisarchitektur eines mehrphasigen 12V/48V-GSWs mit gekoppelter Leistungsinduktivität dargestellt. Der hier dargestellte Schaltplan repräsentiert Architekturen mit und ohne gekoppelte Leistungsfiler. Durch die Kopplung und eine gezielte Schaltstrategie wird die Amplitude des magnetischen Flusses im Leistungsfiler deutlich reduziert. Dadurch werden die im Leistungsfiler entstehenden Verluste minimiert und der Wirkungsgrad des GSWs wird gesteigert [154], [164], [165]. Für kleine Leistungen (< 500 Watt) kann die Kopplung der 48V- mit der 12V-Spannungsebene mit einphasigen GSWs umgesetzt werden. Aufgrund der deutlich höheren Durchschnittsleistungen in der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen (2 bis 5 kW) werden dort hingegen mehrphasige GSW eingesetzt. Grundsätzlich ist der Verbau mehrerer Einphasenwandler möglich, kosteneffizienter ist allerdings der Verbau eines Mehrphasenwandlers.

In einphasigen GSWs wird der Ausgangsstrom durch Variation des Tastverhältnisses zwischen Ein- und Ausschaltdauer der Leistungsschalter geregelt.

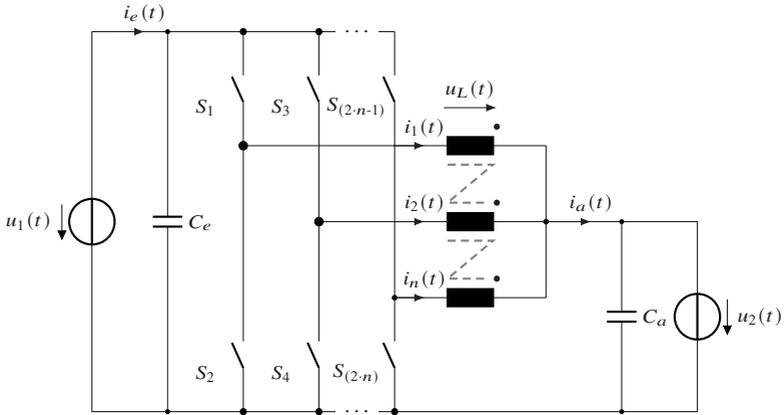


Abbildung 5.31: Vereinfachter Schaltplan eines 12V/48V-Gleichspannungswandlers mit mehreren Phasen und gekoppelter Leistungsinduktivität

Hierbei kommen als Leistungsschalter ausschließlich Mosfets zum Einsatz, und zwar aufgrund ihrer guten Leitwerte und Schaltgeschwindigkeiten.

Auch in mehrphasigen GSWs ohne und mit gekoppelten Leistungsfiltern erfolgt die Regelung der Höhe und Richtung des Ausgangsstrom durch Variation des Tastverhältnisses von High-Side- und Low-Side-Leistungsschaltern (im Folgenden kurz HS- und LS-Leistungsschalter). Zur weiteren Reduktion der Ausgangswelligkeit können zusätzlich die Phasen der Ansteuersignale gegeneinander verschoben werden. Die maximale Reduktion der Stromwelligkeit wird dabei erreicht, wenn das Ansteuersignal der jeweiligen Leistungsstufe k um $(k - 1) \cdot T/n$ verschoben wird, wobei n die Anzahl der Leistungsstufen ist. In Abbildung 5.32 (a) sind die Stromwelligkeiten und in (b) die Ansteuersignale für einen GSW mit $n = 3$ dargestellt. Wie in (a) zu erkennen ist, wird die Stromwelligkeit von GSWs mit nicht gekoppeltem Leistungsfilter um den Faktor $1/n$ reduziert. Zum Vergleich ist zusätzlich die Welligkeit eines gekoppelten Leistungsfilters mit $nc = 3$ dargestellt. Wie man sieht, kann die Stromwelligkeit durch die Kopplung des Leistungsfilters auf weniger als die Hälfte reduziert werden. Aufgrund dieses technologischen Vorteils werden im Folgenden GSWs mit gekoppeltem Leistungsfilter näher betrachtet.

In Abbildung 5.32 (b) sind mit P_1 die Ansteuersignale der ersten, mit P_2 die der zweiten und mit P_3 die der dritten Phase dargestellt. Das Tastverhältnis d

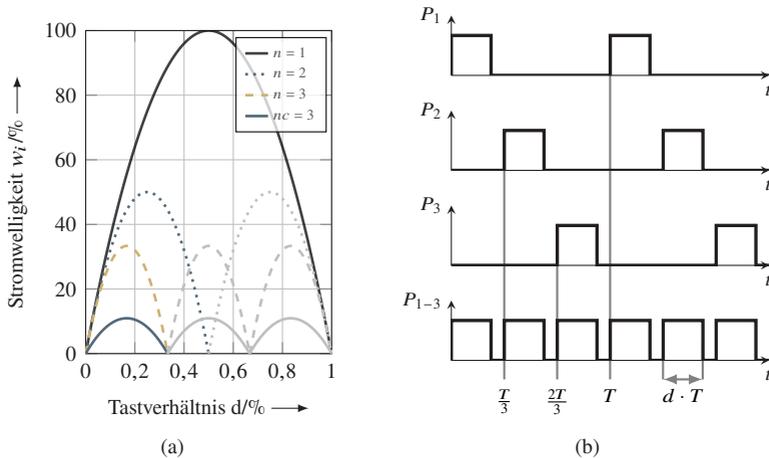


Abbildung 5.32: (a) Stromwelligkeit eines Mehrphasen-Gleichspannungswandlers mit $n = 1, 2, 3$ Phasen ungekoppelt und mit $nc = 3$ Phasen gekoppelt ($M/L_s = 5\%$). (b) Gegeneinander phasenverschobene Ansteuersignale der einzelnen Phasen eines 12V/48V-Gleichspannungswandlers mit $n = 3$ nach [108]

und die Schaltfrequenz f_S bestimmen die Länge der Ein- und Ausschaltdauer ($d \cdot 1/f_S$) der Leistungsschalter einer Phase.

5.4.2 Modellbildung für einen bidirektionalen 12V/48V-GSW

Zur Erstellung einer Zuverlässigkeitsvorhersage für einen bidirektionalen 12V/48V-GSW ist die genaue Kenntnis der Lastbedingungen der ihn konstituierenden Komponenten entscheidend. Daher werden in diesem Abschnitt zunächst die essentiellen Grundgleichungen für den hier betrachteten Typ von GSW vorgestellt. Basierend auf den Grundgleichungen können die Gleichungen für die einzelnen Verlustleistungen der Komponenten des GSWs angegeben werden.

Während des Fahrbetriebs können GSWs mit hohen Leistungen und damit auch mit hohen Temperaturschwankungen belastet werden. Beides kann zu einer beschleunigten Alterung der einzelnen Komponenten und somit zu einer

höheren Fehlerwahrscheinlichkeit führen. Zur Berechnung der Ausfallraten der einzelnen Komponenten bzw. des GSWs im Gesamten müssen die Ströme und Belastungen bekannt sein, denen die wesentlichen Komponenten ausgesetzt sind. Durch eine Erweiterung der mathematischen Beschreibungen der in Abbildung 5.31 dargestellten Leistungsschalter und Leistungsfilter um deren Widerstandsanteile berechnet sich die Spannung über dem Leistungsfilter, während S_1 geschlossen ist, zu

$$u_{L,Z1}(t) = u_1(t) - u_2(t) - u_{S_1}(t) - u_{RL}(t). \quad (5.40)$$

Im zweiten Zustand ist S_1 geöffnet und S_2 geschlossen, sodass die Spannung definiert ist zu

$$u_{L,Z2}(t) = -u_2(t) - u_{S_2}(t) - v_{RL}(t). \quad (5.41)$$

Für den durch den Leistungsfilter fließenden Strom i_L gilt

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}. \quad (5.42)$$

Unter der Annahme, dass sich die mittlere Spannung über dem Leistungsfilter $\overline{u_L(t)}$ aus Gleichung 5.40 und Gleichung 5.41 bilden lässt, ist $\overline{u_L}$ definiert zu

$$\overline{u_L} = \overline{u_{L,Z1}} + \overline{u_{L,Z2}}. \quad (5.43)$$

Bei geschlossenem HS-Leistungsschalter S_1 hängt die mittlere Spannung $\overline{u_L}$ von der Einschaltzeit und bei geschlossenem LS-Leistungsschalter S_2 von der Ausschaltzeit ab. Daher berechnet sich $\overline{u_L}$ mit dem Tastverhältnis d zu

$$\overline{u_L} = u_{L,Z1}(t) \cdot d + u_{L,Z2}(t) \cdot (1 - d). \quad (5.44)$$

Der durch den Leistungsfilter fließende Strom i_L kann dementsprechend mit der folgenden Gleichung 5.44 berechnet werden:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_1 d - v_2 - R_{S_1} i_1 d - R_{S_2} i_1 (1 - d) - R_L i_1}{L}. \quad (5.45)$$

Der Ausgangsstrom eines mehrphasigen, nicht gekoppelten GSWs berechnet sich über die Summe aller Einzelströme. Der Gesamtstrom $i_a(t)$ eines GSWs

mit n Phasen berechnet sich dementsprechend unter Anwendung von Gleichung 5.45 zu

$$i_a(t) = \sum_{p=1}^n i_p = i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_n(t). \quad (5.46)$$

Werden gekoppelte Leistungsfiler eingesetzt, beeinflussen sich die Phasenströme i_1 bis i_n gegenseitig. Zur Berechnung der Phasenströme und des Gesamtstroms für diesen Fall muss das magnetische Netzwerk des gekoppelten Leistungsfilters analysiert werden.

Nach [165] kann für den Strom eines GSWs mit n Phasen, der Streuinduktivität L_s und der Hauptinduktivität M folgender Zusammenhang angenommen werden:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s(L_s + nM)} \begin{bmatrix} M + L_s & M & \dots & M \\ M & M + L_s & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M & M & \dots & M + L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ \vdots \\ U_{Ln} \end{bmatrix}. \quad (5.47)$$

Der Gesamtstrom eines Multiphasen-GSW mit gekoppelten Leistungsfilern ergibt sich über die Summierung aller Einzelströme. Die Summe aller Ströme $i_\Sigma(t)$ ist dabei definiert zu

$$\frac{d}{dt} i_\Sigma(t) = \sum_{p=1}^n \frac{d}{dt} i_{Lp} = \frac{1}{L_s} (V_{L1} + V_{L2} + \dots + V_{Ln}). \quad (5.48)$$

Unter der Annahme, dass die Streuinduktivität L_s signifikant kleiner ist als die Hauptinduktivität M , $L_s \ll M$, gilt für die Berechnung des jeweiligen Phasenstroms

$$\frac{d}{dt} i_{p_1, p_2, \dots, p_n}(t) = \frac{1}{n \cdot L_s} (U_{L1} + U_{L2} + \dots + U_{Ln}) + \frac{1}{n \cdot M} \cdot U_{Lp}. \quad (5.49)$$

5.4.3 Verlustleistung

Die Zuverlässigkeit von GSWs hängt hauptsächlich von den elektrischen und thermischen Belastungen ihrer Komponenten ab. Zur Berechnung der Temperaturentwicklung innerhalb eines GSWs ist daher die Kenntnis der Verlustleistungen der beteiligten Komponenten erforderlich, wobei zu beachten ist, dass jede Komponente eigene Verlustanteile aufweist, die in unterschiedlicher Weise zur Gesamterwärmung beitragen. Zur Ermittlung der Verlustleistung des hier untersuchten bidirektionalen 12V/48V-GSW werden folgende Verlustanteile näher untersucht:

- statische Verluste (Logik, Ansteuerung etc.),
- statische und dynamische Verluste der HS- und LS-Mosfets,
- statische Verluste serieller Mosfets⁵ sowie
- statische und dynamische Verluste des Leistungsfilters.

Auch dann, wenn der GSW nicht aktiv ist, fallen bei der Versorgung des Mikrocontrollers, der Logik und der Ansteuerung statische Wandlerverluste an. Ein Großteil der Verluste entsteht dabei an den Leistungsschaltern und Leistungsfilters des GSWs. Für die hier angestellten Berechnungen werden die statischen Wandlerverluste auf der Basis der benötigten Leistung für die Treiberstufe ermittelt und als konstant angenommen.

Mit Bezug auf den Leistungsschalter setzen sich die Verluste aus statischen und dynamischen Anteilen zusammen. Die Verlustleistung berechnet sich dabei mit dem aus Gleichung 5.22 bekannten Zusammenhang und $t_S = t_{ein} + t_{aus}$ zu

$$P_{V_{LS}}(t) = \underbrace{R_{DS(on)} \cdot i_M(t)^2}_{\text{statisch}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot u_{DS}(t) \cdot i_M(t) \cdot t_S \cdot f_S}_{\text{dynamisch}}. \quad (5.50)$$

⁵ Das Sicherheitsziel zur Vermeidung von Überspannung im 12V-Bordnetz erfordert zur Absicherung gegen Einfachfehler einen zusätzlichen Schalter zwischen U_1 bzw. U_2 und der Leistungsstufe. Hierbei werden nur die statischen Verlustanteile berücksichtigt, da die Schalter während des aktiven, fehlerfreien Betriebs dauerhaft geschlossen sind.

Die in den GSWs von Kraftfahrzeugen verbauten Leistungsschalter werden häufig mit Frequenzen zwischen 50 und 150 kHz betrieben. Die hierbei anfallenden Schaltverluste fallen deutlich höher aus als die statischen Verluste, und zwar auch deshalb, weil die Leistungsschalter mehrfach parallel geschaltet werden, um den Gesamtwiderstand und damit die Verlustleistungen zu reduzieren.

Die Verluste im Leistungsfiler setzen sich ebenfalls aus statischen und dynamischen Anteilen zusammen. Der statische Anteil der Verluste kann berechnet werden mit

$$P_{Vw} = R_{Ln} \cdot i_{Ln}^2. \quad (5.51)$$

Infolge zyklischer Ummagnetisierungen unterliegen alle Leistungsfiler Hystereseverlusten. Für die Berechnung der Verlustleistung ist daher das Kernmaterial des Leistungsfilters entscheidend. Aufgrund der hohen Schaltfrequenzen werden hauptsächlich Kerne aus Ferrit eingesetzt. In der vorliegenden Untersuchung erfolgt die Berechnung der Kernverluste auf der Basis von Herstellerangaben sowie anhand der Steinmetzgleichung. Bei nicht sinusförmigem Strom bzw. nicht sinusförmiger Erregung berechnen sich die Hystereseverluste nach [152] zu

$$P_{Vc} = \frac{1}{\tau} \cdot K_1 \cdot f_{eq}^{K_2-1} \cdot \hat{B}^{K_3} \left(ct_2 T^2 - ct_1 T + ct \right) \cdot V_c. \quad (5.52)$$

Dabei sind τ die Schaltperiode, K_1 , K_2 und K_3 Verlustkoeffizienten, ct , ct_1 und ct_2 Temperaturkoeffizienten, T die Kerntemperatur, B die Flussdichte, f_{eq} die äquivalente Frequenz und V_c das Kernvolumen. Für pulsweitengeregelte GSWs berechnet sich die äquivalente Frequenz f_{eq} mit der Schaltfrequenz f_s zu

$$f_{eq} = \frac{2}{\pi^2} f_s \frac{1}{d(1-d)}. \quad (5.53)$$

Anhand der oben hergeleiteten Gleichungen lässt sich der erste Teil des angestrebten Modells für GSWs erstellen, nämlich jener Teil, der zur Berechnung der Verlustleistungen der einzelnen Komponenten des zu untersuchenden GSWs dient. Wie eingangs erläutert, bezieht sich das hier entwickelte Modell auf einen vierphasigen GSW zum bidirektionalen Energieaustausch zwischen der 12V- und der 48V-Spannungsebene. Die im Modell berücksichtigten Komponenten und Parameter basieren auf einem existierenden vierphasigen GSW mit gekoppeltem Leistungsfiler. Der Leistungsteil dieses GSWs ist so aufge-

baut, dass zwecks Erhöhung der Stromtragfähigkeit mehrere Leistungsschalter parallel geschaltet sind. Die auf der Basis dieses GSW-Modells berechneten Verlustleistungen sind, zusammen mit Verlustleistungsmessungen aus Versuchsreihen mit dem vorliegenden GSW, in Abbildung 5.33 dargestellt. Wie

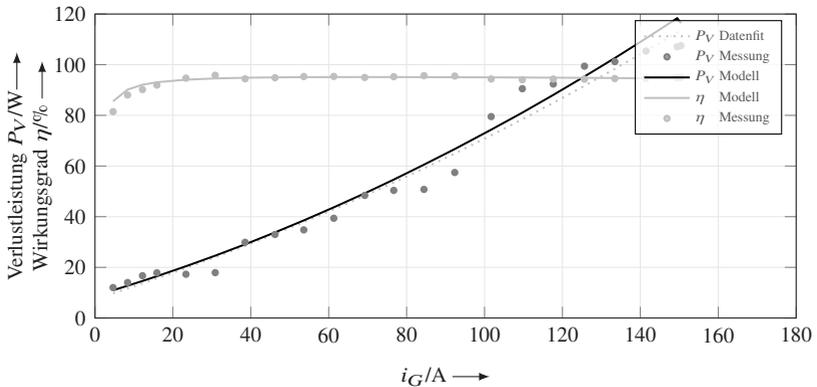


Abbildung 5.33: Gesamtverlustleistung des Gleichspannungswandler-Modells sowie Messdaten des vierphasigen Gleichspannungswandlers mit gekoppeltem Leistungsfilter

deutlich zu erkennen ist, fallen die Abweichungen zwischen den Messungen und den Berechnungen anhand der Gleichungen 5.50 bis 5.52 gering aus. Über den gesamten Leistungsbereich hinweg liefert das erstellte Modell hinreichend präzise Ergebnisse. Zu beachten ist, dass die Verlustanteile der Ein- und Ausgangsfilter bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden, da diese im Vergleich zur Höhe der Verluste der Leistungsschalter und des Leistungsfilters zu vernachlässigen sind.

5.4.4 Temperaturmodell

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit des GSWs ist entscheidend, welchen Belastungen die einzelnen Komponenten während des Fahrbetriebs ausgesetzt sind. Maßgeblich sind hierbei die Temperaturveränderungen innerhalb des GSWs. Zu deren Untersuchung wird im Folgenden ein datenbasiertes Temperaturmodell entwickelt, das auf den in Abschnitt 5.3.4 vorgestellten

Untersuchungen zu den Wärmetransportmechanismen in Generatoren basiert. Auf der Basis des im vorigen Abschnitts vorgestellten Modells für einen bidirektionalen 12V/48V-GSW soll nun ein thermisches Netzwerk entwickelt werden, dessen Grundlage die einzelnen Verlustleistungsquellen sowie die thermischen Teilmodelle des Leistungsschalters sowie des Transformators bilden [101].

Das in Abbildung 5.34 dargestellte thermische Ersatzschaltbild ist den Arbeiten [124] und [152] entnommen. Der linke Teil des thermischen Netzwerks

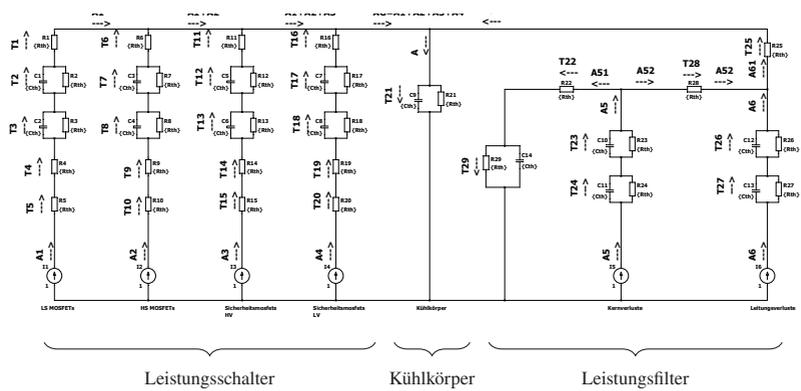


Abbildung 5.34: Thermisches Netzwerk eines 12V/48V-Gleichspannungswandlers

repräsentiert die Leistungsschalter der jeweiligen Phase sowie die thermischen Modelle der seriellen Leistungsschalter zur sicheren Trennung des GSWs von der elektrischen Energieversorgung. Unabhängig von der Anzahl der Mosfets wird dabei von einer homogenen Erwärmung ausgegangen. Die seriellen Trennschalter, auch als Sicherheitsschalter (SS) bezeichnet, trennen den GSW im Fehlerfall von der elektrischen Energieversorgung. Hierzu werden zwischen dem 12V- bzw. dem 48V-Eingang und den Leistungsschaltern mehrere Mosfets parallel geschaltet. Der SS ist nur im Fehlerfall geöffnet und ansonsten dauerhaft geschlossen. Bei der Ermittlung der Verlustleistung werden daher nur statische Verluste berücksichtigt.

Die thermischen Teilmodelle aller Leistungsschalter sind prinzipiell identisch. Unter der Annahme, dass der hauptsächliche Wärmetransport zwischen der Verlustleistungsquelle (Chip) und der Umgebung auf der Wärmeleitung basiert, lassen sich die wesentlichen Kennzahlen der Wärmewiderstände des

Leistungsschalters nachbilden [101]. Ein Teil der Parameter, die hierbei zur Berechnung nötig sind, stammen aus Herstellerangaben. Die verbleibenden Parameter, die aus dem thermischen Netzwerk abgeleitet werden müssen, sind die Parameter für den Kühlkörper und den Leistungsfilter. Der Kühlkörper wird über eine Gehäusehälfte des GSWs realisiert. Durch Kühlrippen und natürliche Konvektion wird die Verlustleistung an die Umgebung abgeführt. Ein Teil der Wärmetransportmechanismen wurde durch analytisches Lösen des thermischen Netzwerks und mittels Partikelschwarmoptimierung (PSO) ermittelt. Auf der Grundlage der Verlustleistungsgleichungen für das thermische Modell berechnet die PSO zyklisch passende Parameter. Der geeignete Parameter für den jeweiligen Wärmetransport wird über das Minimieren des Fehlers zwischen Messdaten und Modell ermittelt.

Zur Aufzeichnung von Messdaten wurde ein Exemplar des bereits in Serie produzierten Typs von GSW während unterschiedlicher Belastungszyklen vermessen. In Abbildung 5.35 sind die Thermographieaufnahmen des hier untersuchten bidirektionalen GSW bei einer Ausgangsleistung von zwei Kilowatt dargestellt. Der Leistungsfilter und dessen Erwärmung sind deutlich zu erkennen. Nach ca. 900 Sekunden haben der Kern eine Temperatur von 70°C und die Windung eine Temperatur von 80°C erreicht.

Im unteren bzw. im linken Bereich der Wärmebilddaufnahmen sind die Erwärmungen der Stromschienen und der Filter zu erkennen. Die Stromschienen werden eingesetzt, um eine kostengünstige Leiterplatte für hohe Ströme zu ertüchtigen. Grundsätzlich werden dadurch die in der Platine auftretenden Verluste deutlich reduziert. Zusätzlich erhöhen Stromschienen durch ihr Volumen und die elektrisch sowie thermisch gute Anbindung an die Platine die thermischen Eigenschaften und damit das Aufheizverhalten des GSWs. In dem hier erstellten Modell wurden die thermischen Modelle auf der Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche mit den entsprechenden GSW-Messdaten parametrisiert.⁶ Daher wurden die Stromschienen nicht als einzelne Elemente, sondern als Ersatzgrößen in den thermischen Übergangswiderständen berücksichtigt. Der in (d) dargestellte Verlauf zeigt deutlich, dass das Modell dennoch hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Die Vermessung der Leistungsschalter muss, bedingt durch deren konstruktive

⁶ In den genannten Versuchen wurde ein Seriengleichspannungswandler mit jeweils Quellen und Senken auf beiden Seiten verwendet. Der GSW wurde mit einer Restbus-Simulation betrieben, durch welche die Ausgangsleistung geregelt werden konnte. Auf diese Weise wurden zum Modellabgleich sowohl Leistungs- als auch Temperaturmessungen durchgeführt.

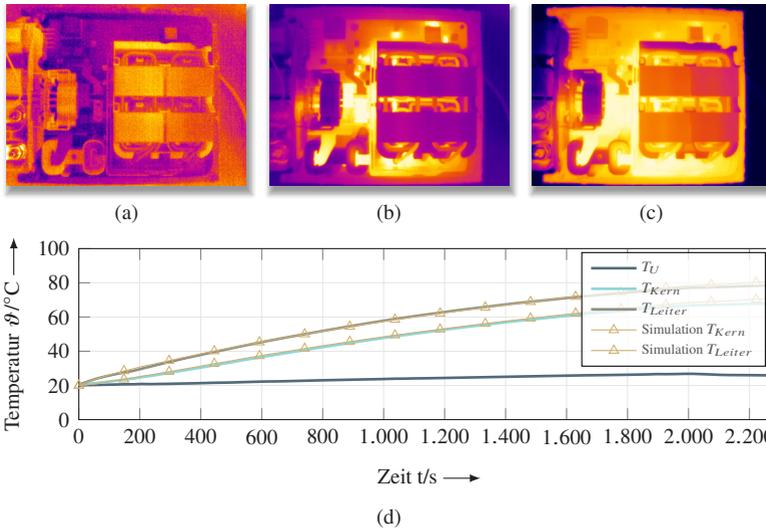


Abbildung 5.35: Wärmebildaufnahme eines 12V/48V-Gleichspannungswandler bei zwei Kilowatt Ausgangsleistung. Sichtbar sind die Eingangsfiler, die Stromschienen und der Leistungsfiler. Dargestellt sind in (a) die Aufnahmen zu Beginn, in (b) nach 100 Sekunden und in (c) nach 900 Sekunden. Die dabei gemessenen sowie die simulierte Temperaturverläufe sind in (d) dargestellt.

Lage, über die Kühlkörperseite des GSWs erfolgen. Für die Parametrierung des thermischen Modells der Leistungsschalter wurde der GSW ohne Kühlkörper vermessen. Auf der Basis der so gewonnenen Messdaten und der Parameterbestimmung mittels PSO wurden die Wärmetransportwiderstände der Leistungsschalter zum Kühlkörper berechnet. In Abbildung 5.36 sind die Wärmebildaufnahmen der Leistungsschalter bei einer Ausgangsleistung von 500 Watt dargestellt. Wie aus den in (a) bis (f) dargestellten Wärmebildaufnahmen hervorgeht, sind nach ca. 10 Sekunden (b) lokale Temperaturerhöhungen im Bereich der Schaltzellen zu erkennen. Nach ca. 20 Sekunden (c) werden Temperaturunterschiede zwischen den LS- und den HS-Mosfets der Leistungsschalter erkennbar. Der Grund für das zeitlich versetzte Aufheizen ist die unterschiedliche Einschaltdauer der Leistungsschalter. Mit zunehmender Erwärmung der anderen Komponenten und der näheren Umgebung hat sich nach etwa 150 Sekunden die Kühlfläche der LS-Mosfets auf ca. 80 $^{\circ}\text{C}$ und die Temperatur der HS-Mosfets auf ca. 60 $^{\circ}\text{C}$ erwärmt.

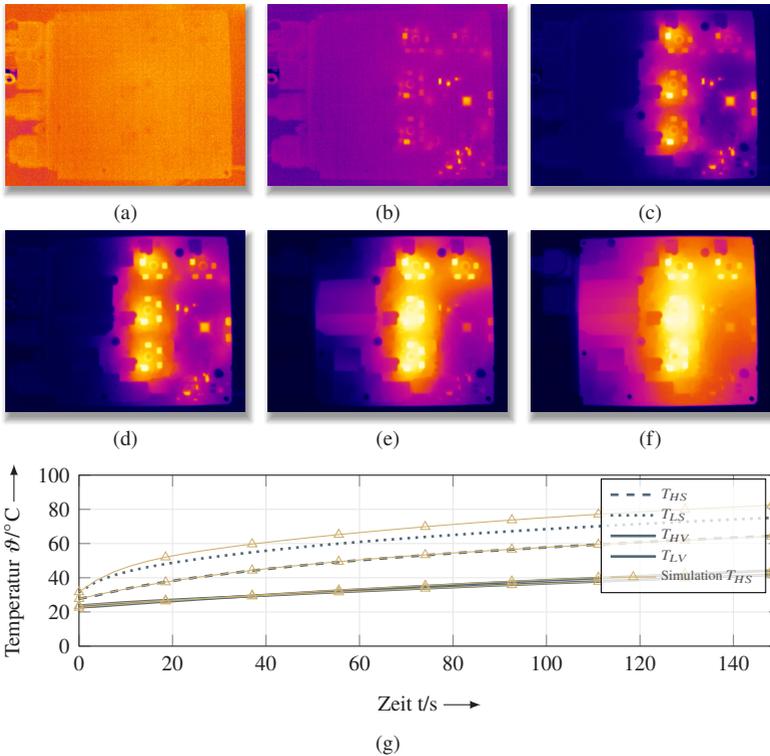


Abbildung 5.36: Wärmebildaufnahme eines 12V/48V-Gleichspannungswandlers bei 500 Watt Ausgangsleistung. Dargestellt sind die Erwärmungen der vier Zellen des Leistungsschalters zu Beginn der Messungen (a), nach 10 Sekunden (b), nach 20 Sekunden (c), nach 30 Sekunden (d), nach 60 Sekunden (e) und nach 150 Sekunden (f). Die dabei gemessenen und simulierten Temperaturverläufe sind in (g) dargestellt.

Die in (g) dargestellten Temperaturverläufe für die HS-Mosfets T_{HS} zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturen. Der Verlauf der simulierten Temperatur der LS-Mosfets T_{LS} weicht aufgrund der etwas niedriger ausfallenden Schaltverluste zwar geringfügig vom Verlauf der gemessenen Temperatur ab; die Abweichungen liegen jedoch in einem akzeptablen Bereich. Auch die berechneten Temperaturverläufe der seriell verbauten Sicherheitsschalter T_{HV} und T_{LV} zeigen gute Übereinstim-

mungen mit den gemessenen Daten. Korrespondierend den im Vergleich mit der Leistungsstufe deutlich geringeren Verlusten fällt auch die Erwärmung in dem hier betrachteten Zeitbereich deutlich geringer aus.

5.4.5 Zuverlässigkeitsmodell des GSW

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit des hier betrachteten bidirektionalen 12V/48V-GSWs ist entscheidend, welche Auswirkungen mögliche Fehler im GSW nach sich ziehen und mit welcher Häufigkeit diese eintreten. Zur Beantwortung dieser Fragen werden in diesem Abschnitt die möglichen Fehler der wesentlichen Komponenten vorgestellt. Anschließend werden die Auswirkungen dieser Fehler diskutiert und die Ausfallraten der einzelnen Komponenten berechnet. In Architekturen mit 12V- und 48V-Spannungsebene wird ein GSW zur Kopplung der Spannungsebenen benötigt. Während die 48V-Spannungsebene von einem 48V-Generator gespeist wird, besteht die Hauptaufgabe des GSWs in der Versorgung der 12V-Spannungsebene. Dies kann dann nicht mehr gewährleistet werden, wenn interne Fehler zum Ausfall oder externe Fehler zur Überlastung des GSWs führen. Dabei ist der GSW von der Spannungslage in der 48V-Spannungsebene abhängig. Fällt der 48V-Generator aus, kann also auch der GSW keine Ausgangsleistung für die 12V-Spannungsebene bereitstellen. In den nächsten Abschnitten werden zunächst die typischen Fehlerverteilungen der einzelnen Komponenten eines GSWs diskutiert. Anschließend wird auf der Basis der gefundenen Fehler und ihrer möglichen Auswirkungen zur Bewertung der Zuverlässigkeit ein Teilfehlerbaum abgeleitet. Das Unterkapitel schließt mit der Beschreibung der Ausfallratenmodelle für Komponenten des GSWs aus den Handbüchern FIDES [48], HDBK-217Plus [130], SN29500 [151] und TR62380 [12].

Fehler des GSW

Da bei der folgenden Betrachtung nur Erst- und keine Folgefehler von Relevanz sind, werden nur interne Fehler der grundlegenden Komponenten des GSWs berücksichtigt; externe Fehler (bspw. infolge eines Fahrzeugbrands, eines Unfalls oder fehlerhafter Benutzung), die zu einer unzulässig hohen Erwärmung

bzw. zur Verformung von Komponenten oder zum Anlegen einer nicht spezifizierten Spannung führen, werden hingegen nicht berücksichtigt.

Alle Fehler, die den GSW betreffen können, lassen sich auf Fehler zurückführen, die aus der Leistungselektronik bekannt sind. In den meisten Fällen sind die Leistungsschalter, die Leistungsfilter oder die Ein- bzw. Ausgangsfilter betroffen. Aber auch infolge eines Kurzschlusses ausgefallene Filterkondensatoren führen häufig zum Ausfall des GSWs [66] [82].

Der hier untersuchte und in Abbildung 5.37 dargestellte GSW besitzt vier parallele Phasen, wobei jede Leistungsstufe aus insgesamt vier parallelen LS- und HS-Leistungshalbleitern aufgebaut ist. Zusätzlich sind zwischen Ein- und Ausgang des GSWs serielle Trennschalter S_{HV} und S_{LV} integriert, um bei einem Kurzschluss der Leistungsschalter die elektrische Energieversorgung vom GSW trennen zu können. Dies ist eine wesentliche Anforderung, die erfüllt sein muss, um das Sicherheitsziel *Vermeiden von Überspannung* auf der 12V-Spannungsebene gewährleisten zu können. Dementsprechend werden in den folgenden Berechnungen für die Zuverlässigkeit des GSWs die Trennschalter zur Verhinderung des dauerhaften Zusammenschlusses beider Spannungsebenen in der Architektur explizit berücksichtigt. Für die Modellbildung wird angenommen, dass die Trennschalter auf der HV-Seite aus zwei und auf der LV-Seite aus fünf parallel geschalteten Mosfets aufgebaut sind. Zusätzlich wird angenommen, dass auf der LV-Seite Mosfets mit Körperdiode in Blockrichtung integriert sind, um Fehlerströme in beiden Richtungen verhindern zu können. Diese Architektur erlaubt –sofern eine schnelle Reaktionszeit gegeben ist –⁷ die Trennung des GSWs von der elektrischen Energieversorgung, bevor die Spannungslage auf der 12V-Ebene auf eine unzulässig hohe und damit kritische Spannung ansteigt. Ein interner Kurzschluss des GSWs führt zu einem offenen Ausfall. Letztendlich reduziert sich durch den Trennschalter die Kritikalität des internen Kurzschlusses deutlich, jedoch wird die Wahrscheinlichkeit für eine Leistungsreduktion bzw. den offenen Ausfall erhöht.

Die hier durchgeführte vereinfachte Betrachtung des Aufbaus eines vierphasigen GSWs lässt keine allgemeingültigen Aussagen über die Zuverlässigkeit aller GSWs zu, sondern nur Aussagen über die Zuverlässigkeit des hier betrachteten und modellierten GSWs. In der Detailbetrachtung bzw. in der Se-

⁷ Je nach Anforderung, der Höhe des Kurzschlussstroms, der Dauer des Kurzschlusses, dem Zustand der Batterie (SOC, SOH usw.) und der Verbraucherleistung muss der Trennschalter den GSW innerhalb $t_o < 1ms$ von der elektrischen Energieversorgung trennen können.

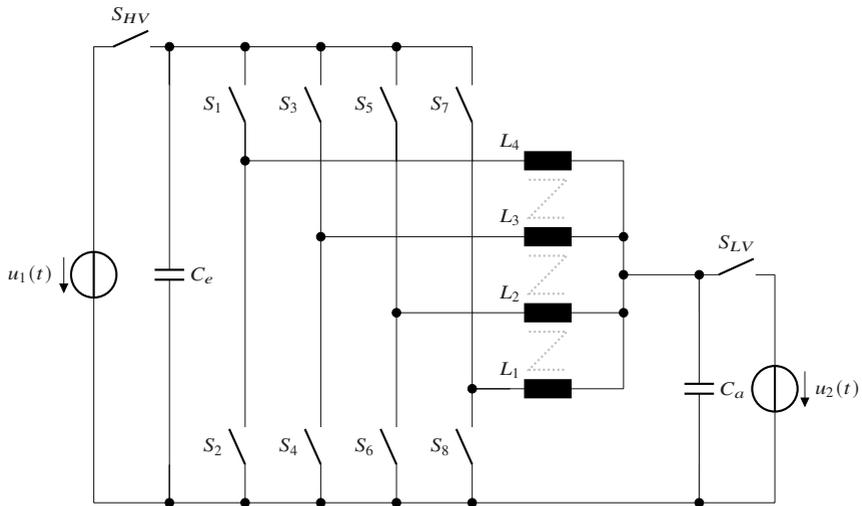


Abbildung 5.37: Schaltplan eines vierphasigen 12V/48V-Gleichspannungswandlers mit gekoppeltem Leistungsfilter

riententwicklung müssen bei der Auswertung weitere Schaltkreise berücksichtigt werden (welche das sind, hängt von der verwendeten Technologie und der GSW-Architektur ab); vor allem Fehler in Teilsystemen, die deutlich unterhalb der Hauptfunktionsebene angesiedelt sind, spielen hierbei eine wichtige Rolle. Ein Beispiel hierfür ist der Ausfall der internen Hilfsspannung, infolgedessen ein Großteil der Logikschaltkreise nicht mehr versorgt werden können, sodass der GSW ausfällt.

Für das folgend betrachtete Zuverlässigkeitsmodell des GSWs werden die in Abbildung 5.37 dargestellten Komponenten berücksichtigt. Die in diesen Komponenten möglicherweise auftretenden Fehler lassen sich nach [17] unterteilen in die Kategorien

- kurzgeschlossen,
- offen und
- Parameterdrift.

Die Mosfets der Komponenten S_{HV} , S_{LV} und S_{14-84} fallen in 80 Prozent der Fälle aufgrund eines Kurzschlusses, in 15 Prozent der Fälle offen und in weiteren 5 Prozent der Fälle aufgrund von Parameterdrift aus. Die gleichen Fehlerverteilungen zeigen sich in Bezug auf die Mosfets der Leistungsschalter. Durch den Aufbau der Leistungsschalter führt der offene Ausfall eines Mosfets bei vier parallel geschalteten Mosfets nicht zu einem kritischen Fehler. Je nach Arbeitspunkt kann der GSW die 12V-Spannungsebene weiterhin speisen, sodass sicherheitskritische Verbraucher versorgt bleiben. Zu beachten ist allerdings, dass die verbleibenden Leistungshalbleiter deutlich stärker belastet werden. Durch einen Mitkopplungseffekt verursachte Folgefehler sind wahrscheinlicher; damit wird der offene Ausfall aller Mosfets möglich.

Da es sich bei dem hier betrachteten GSW um einen Wandler mit vier Phasen handelt, führt der Ausfall einer Gruppe von Leistungsschaltern zu einer Leistungsreduktion von 25 Prozent gegenüber der Normalleistung. Hinzu kommt, dass der gekoppelte Leistungsfilter infolge des Ausfalls einer Phase unsymmetrisch betrieben wird, wodurch die Kern- und Kupferverluste deutlich zunehmen. Trotz dieser Verluste kann weiterhin eine ausreichende Ausgangsleistung bereitgestellt werden. Beim offenen Ausfall von zwei Phasen muss dahingegen angenommen werden, dass keine hinreichende Ausgangsleistung mehr bereitgestellt werden kann und der Wandler offen ausgefallen ist.

Im Allgemeinen wird bei der Auslegung von GSWs der Parameterdrift von Leistungshalbleitern berücksichtigt. Gealterte Mosfets können sich jedoch deutlich stärker erwärmen als bei der Auslegung angenommen und infolge hoher Belastungen fehlerhaft werden.

Für die Spannungsstabilität in der elektrischen Energieversorgung und damit die zuverlässige Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher sind vor allem im Kurzschluss ausgefallene Mosfets in der Leistungsstufe kritisch. Im Fall der hier betrachteten Architektur führen ein im Kurzschluss ausgefallener HS- und LS-Leistungsschalter mit dem Einschalten des jeweils konträr angesteuerten Mosfets zum Kurzschluss der Eingangsquelle. Durch die beschriebene Schutzbeschaltung verhält sich dieser Kurzschluss im GSW wie ein offener Ausfall. Die möglichen Fehlerursachen in Bezug auf den seriellen Trennschalter sind dabei, dass ein Mosfet

$e_{1,2}$ $S_{HV,LV}$ offen,

$e_{3,4}$ $S_{HV,LV}$ kurzgeschlossen oder

*e*_{5,6} $S_{HV,LV}$ mit Parameterveränderung

ausgefallen ist. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall eines Mosfets des Trennschalters $S_{HV,LV}$ hängt dabei von der Summe der Belastungen aus allen Fahrzyklen über die gesamte Nutzungsdauer hinweg ab.

Die Leistungshalbleiter der getakteten Leistungsstufe sind deutlich höheren Belastungen ausgesetzt als die Mosfets des Trennschalters. Ein im Kurzschluss ausgefallener Mosfet der Leistungsstufe führt zu einem Stromanstieg, bis die Trennschalter den Fehler isolieren und der GSW offen ausfällt. Die möglichen Ursachen für den Ausfall eines Mosfets der Leistungsstufe sind dabei, dass ein Mosfet

*e*_{7,8} $S_{HS,LS}$ offen,*e*_{9,10} $S_{HS,LS}$ kurzgeschlossen oder*e*_{11,12} $S_{HS,LS}$ mit Parameterveränderung

ausgefallen ist.

Der in Abbildung 5.37 dargestellte Schaltplan enthält die Kondensatoren C_e und C_a als Ersatzgrößen für das Teilsystem Filter. Zur Modellberechnung wurden Multilayer Ceramic Capacitors (MLCC)-Kondensatoren als Ein- und Ausgangsfilter verwendet. Die Verwendung von MLCCs führt zwar dazu, dass die tatsächlichen EMV-Eigenschaften des Filters nur bedingt repräsentiert werden; durch die hierbei vorgenommene Vereinfachung wird jedoch eine Abschätzung der Filterzuverlässigkeit möglich. Nach [17] fallen die Filterkondensatoren C_e und C_a zu 70 Prozent im Kurzschluss, zu 10 Prozent offen und zu 20 Prozent mit Parameterdrift aus. Infolge der verwendeten Technologie können MLCC-Kondensatoren alterungsbedingte Abweichungen von bis zu 20 Prozent gegenüber der Ausgangskapazität des Neuteils aufweisen. Der Parameterdrift beeinflusst zwar die Filterleistung und erhöht damit die EMV-Belastung; die grundsätzliche Funktion des GSWs wird jedoch erst dann gefährdet, wenn einer der Kondensatoren kurzgeschlossen ausfällt.

Offen ausgefallene Kondensatoren sind im Feld selten zu beobachten; da ein offen ausgefallener Filter jedoch zu kritischen Fehlern des GSWs führen kann, ist auch eine nähere Betrachtung dieser Fälle wichtig. Beim Abschalten der

Leistungsschalter treten aufgrund der parasitären Induktivität der AVT⁸ und der Induktivität des Leistungsfilters hohe Abschaltenergien auf. Diese müssen zum Schutz vor Überspannung abgebaut werden. Fehlen wesentliche Dämpfungselemente, werden die Leistungshalbleiter in Avalanche betrieben und dadurch irreversibel beschädigt.

Die Fehlerursachen der Filterkondensatoren lassen sich somit wie folgt zusammenfassen:

$e_{13,14}$ $C_{e,a}$ Filter ist offen,

$e_{15,16}$ $C_{e,a}$ Filter ist kurzgeschlossen und

$e_{17,18}$ $C_{e,a}$ Filter ist mit Parameterveränderung ausgefallen.

Im Vergleich zu den im Vorigen betrachteten Komponenten ist der Leistungsfiler eine recht robuste Komponente. Nach [17] fallen 80 Prozent der Leistungsfiler offen und 20 Prozent aufgrund eines Kurzschlusses aus. Fällt ein Leistungsfiler offen aus, kann der GSW die elektrische Energieversorgung, wenn auch mit Einschränkungen, weiterhin aufrechterhalten. Im Gegensatz zum Kurzschluss führt ein offener Ausfall eines Leistungsfilters also zwar zu einer Leistungsreduktion, aber nicht zum Ausfall des GSWs. Im Fall eines Kurzschlusses hingegen steigt der Fehlerstrom an, sodass die seriellen Trennschalter öffnen und der GSW offen ausfällt.

Die Fehlerfälle des Leistungsfilters lassen sich somit zusammenfassen mit

e_{19} $L_{1,\dots,4}$ ist offen und

e_{20} $L_{1,\dots,4}$ ist kurzgeschlossen ausgefallen.

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Fehlern werden bei der Zuverlässigkeitsbewertung nach dem hier entwickelten Modell auch Fehler des Mikrocontrollers berücksichtigt, wobei angenommen wird, dass ein Fehler des Mikrocontroller zum offenen Ausfall des GSWs führt. Damit ist der Fehler e_{21} definiert zu

e_{21} $L_{1,\dots,4}$ Mikrocontroller ist ausgefallen.

⁸ AVT steht für Aufbau und Verbindungstechnik und beschreibt die Stromführung von der Platine zu den Anschlüssen des GSWs.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Großteil der Fehlerursachen des GSWs, vor allem aufgrund des hohen Anteils von Fehlern im Trennschalter, zu einem offenen Ausfall führt. Dies ist, wie im Falle eines offenen Ausfalls des Generators, besonders dann kritisch, wenn der Ladezustand der Batterie unzureichend bzw. der Innenwiderstand der Batterie durch Alterung angestiegen ist. In diesen Fällen kann die Versorgungsspannung einbrechen, sodass die Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher nicht mehr gewährleistet ist. Auf der Basis der im Vorigen diskutierten Fehler und deren Verteilung lässt sich nun der in Abbildung 5.38 dargestellte Teilfehlerbaum zur Berechnung der Zuverlässigkeit des GSWs ableiten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit

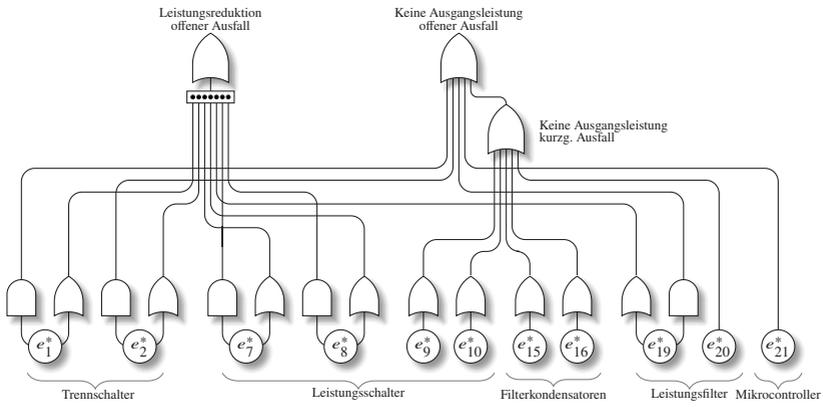


Abbildung 5.38: Vereinfachter Teilfehlerbaum des bidirektionalen 12V/48V-Gleichspannungswandlers mit zusammengefassten Basisfehlern

wurden die Basisereignisse bei mehreren gleichen Bauelementen einer Komponente mit e_n^* zusammengefasst. Die Basisfehler e_1 bis e_{21} teilen sich auf die einzelnen Bauelemente der Komponenten auf. Beispielsweise ist der HV-Trennschalter aus zwei parallel geschalteten Mosfets aufgebaut; fällt einer der beiden aus, ist mit einer Leistungsreduktion zu rechnen; fallen hingegen beide aus, kann der GSW gar keine Ausgangsleistung mehr bereitstellen.

5.4.6 Berechnung der Ausfallrate

Zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des GSWs im Gesamten müssen die Ausfallraten der einzelnen Komponenten bekannt sein. Zu diesem Zweck werden im Folgenden die wesentlichen Ausfallmodelle vorgestellt und diskutiert.

Die Ausfallraten der elektronischen Komponenten des hier betrachteten GSWs werden auf der Basis der Angaben in den Handbüchern FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151] berechnet. Für alle Komponenten werden dabei die Belastungen aus den Verlustleistungs- und Temperaturberechnungen berücksichtigt. Die während der Fahrzyklen auftretenden Verluste führen zu unterschiedlich hohen Erwärmungen und somit auch zu unterschiedlich hohen Ausfallraten der Komponenten. Die Ausfallratenmodelle für die Trenn- und Leistungsschalter werden mit den aus Abschnitt 5.3.5 bekannten Gleichungen 5.36, 5.37 und 5.38 berechnet. In Abbildung 5.39 sind die Berechnungsergebnisse für den HS-Mosfet des Leistungsschalters während eines Fahrzyklus abgebildet. In (a) ist der Ausgangsstrom des GSWs während der Kurzstrecke, in (b) die Summe der Verlustleistung aller HS-Mosfets und in (c) die dadurch verursachte Temperaturveränderung dargestellt. In (d) sind die berechneten Ausfallraten des HS-Mosfets zu sehen.

Wie sich an dem in (d) dargestellten Verlauf der Ausfallraten zeigt, ist dieser sensitiv gegenüber den in (c) dargestellten Temperaturveränderungen. Die Ausfallraten der Standards unterscheiden sich im Mittel, wobei die mittlere Ausfallrate

- nach FIDES bei 2,8 FIT,
- nach HDBK217 bei 13,9 FIT und
- nach SN29500 bei 9,6 FIT liegt.

Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Handbüchern resultieren daraus, dass darin unterschiedlich hohe Basisausfallraten sowie verschiedene Belastungsmodelle inklusive den jeweils darin enthaltenen Faktoren verwendet werden.

Für den Leistungsfilter berechnet sich die Ausfallrate nach FIDES [48] mit dem aus Gleichung 5.35 bekannten Zusammenhang zu

$$\lambda_{LF} = \lambda_{PH} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{PR}. \quad (5.54)$$

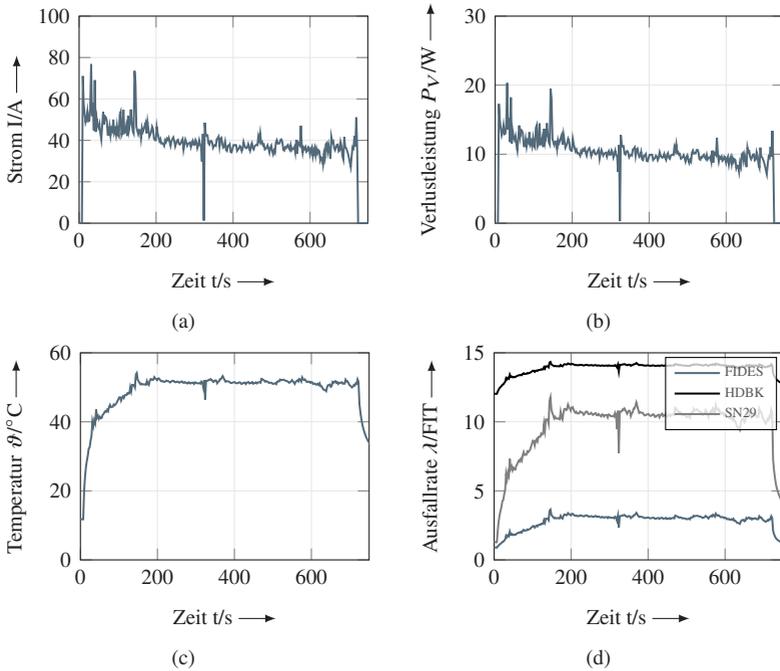


Abbildung 5.39: (a) Ausgangsstrom des Gleichstromwandlers auf der Grundlage der Kurzstrecke; (b) Summe der Verlustleistungen aller HS-Mosfets; (c) Temperaturverlauf; (d) Ausfallraten eines HS-Mosfets, berechnet mit FIDES, HDBK-217Plus und SN29500

Hierbei sind λ_{PH} die physikalische, belastungsabhängige Ausfallrate sowie Π_{PM} und Π_{PR} Faktoren zur Berücksichtigung der Qualität sowie des Herstellungsprozesses. Die belastungsabhängige Ausfallrate λ_{PH} des Leistungsfilters setzt sich zusammen aus

$$\lambda_{PH} = \lambda_{BM} \cdot \sum_i^n k_{Z,i} \cdot (\Pi_{TH} + \Pi_{TCY} + \Pi_{ME})_i \cdot \Pi_{IN,i}. \quad (5.55)$$

Die Grundbedeutung der Parameter ist mit den aus Abschnitt 5.3.5 bekannten Zusammenhängen identisch. Die Grundlage der Berechnung bildet die Basisfehlerrate λ_{BM} . Für Leistungsfiler werden die Belastungsmodelle der

Temperatur Π_{TH} , der Zyklisierung Π_{TCY} und der Beschleunigung bzw. mechanischen Belastung Π_{ME} berücksichtigt.

Die Anzahl der Einsatzphasen n und der Faktor der Einsatzdauer k_Z werden aus den jeweiligen Eingangsdaten gewonnen und bilden das Verhältnis zur jährlichen Gesamtbelastung. Anders als nach der FIDES-Norm berechnet sich die Ausfallrate des Leistungsfilters auf der Grundlage des Handbuchs HDBK-217Plus zu

$$\lambda_{LF} = \pi_G \cdot \left(\begin{array}{l} \lambda_{OB} \cdot \pi_{DCO} \cdot \pi_{TO} \\ + \lambda_{EB} \cdot \pi_{DCN} \cdot \pi_{TE} \\ + \lambda_{TCB} \cdot \pi_{CR} \cdot \pi_{DT} \end{array} \right) + \pi_{IN}. \quad (5.56)$$

Hierbei sind π_G der Faktor für die kalendarische Veränderung der Zuverlässigkeit und λ_{OB} , λ_{EB} sowie λ_{TCB} die Basisfehlerraten mit den jeweiligen Belastungsfaktoren π_n . Die zusätzliche Ausfallrate π_{IN} stellt einen konstanten Korrekturfaktor dar.

Das Modell zur Berechnung der Ausfallraten auf der Basis der Siemens-Norm SN29500 berücksichtigt deutlich weniger Einflussgrößen als die beiden zuvor dargestellten Modelle. Die Ausfallrate der Leistungsfiler berechnet sich hier mit dem aus Gleichung 5.38 bekannten Zusammenhang:

$$\lambda_{LS} = \lambda_{ref} \cdot \pi_T. \quad (5.57)$$

Zur Berechnung der Ausfallrate der EMV-Filter werden MLCC-Kondensatoren als Bauelemente genutzt. Die Spezifizierung des Kondensatortyps ist insofern relevant, als in Bezug auf das Alterungs- und Ausfallverhalten zwischen den verschiedenen Technologien wichtige Unterschiede bestehen. Im Automobilbereich werden in der Leistungselektronik zum Großteil Keramikkondensatoren eingesetzt. In diesem Fall berechnet sich die Ausfallrate nach FIDES mit dem Modell aus den Gleichungen 5.54 und 5.55. Für Kondensatoren wird das elektrothermische Belastungsmodell mit dem spannungsabhängigen Faktor

$$F_U = \left(\frac{1}{S_R} \cdot \frac{U_a}{U_r} \right)^3. \quad (5.58)$$

erweitert. Dabei sind S_R ein konstanter, von der Bauart abhängiger Referenzfaktor, U_a die auftretende und U_r die spezifizierte Bauteilspannung. Laut dem Handbuch HDBK217Plus berechnet sich die Ausfallrate der Kondensatoren

mit Gleichung 5.37.

Die Siemens-Norm SN29500 berücksichtigt demgegenüber zusätzliche Faktoren für die Spannungsabhängigkeit π_u und die Qualität π_Q . Dementsprechend berechnet sich die Ausfallrate nach SN29500 zu

$$\lambda_{FI} = \lambda_{ref} \cdot \pi_U \cdot \pi_T \cdot \pi_Q. \quad (5.59)$$

Die Ausfallrate des Mikrocontrollers berechnet sich nach dem Handbuch FIDES mit Gleichung 5.54 bzw. 5.55. Laut dem Handbuch HDBK217Plus berechnet sie sich unter zusätzlicher Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit π_{RH} über Gleichung 5.37, und laut der Siemens-Norm SN29500 mittels Gleichung 5.38.

Wie deutlich wurde, ähneln sich die vorgestellten Ausfallratenmodelle sehr. Der größte Unterschied besteht in der jeweils verwendeten Datengrundlage und den daraus abgeleiteten Faktoren.

5.5 Zusammenfassung

Jede Modellbildung bzw. Simulation erfordert die Definition von Ein- und Ausgangsgrößen. Für die in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen werden als Eingangsdaten die in Unterkapitel 5.1 vorgestellten Fahrprofile sowie die daraus gewonnenen Messgrößen genutzt. Die Grundlage für die Berechnung der Zuverlässigkeit bildet die in Unterkapitel 3.3 hergeleitete und in Abbildung 3.6 dargestellte Methode zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen.

Die Stabilität der Spannungsversorgung und damit die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung sicherheitskritischer Verbraucher steht und fällt mit der Zuverlässigkeit der einzelnen Teilsysteme

- Energiespeicher,
- Energiewandlung und
- Vernetzung.⁹

Der am häufigsten eingesetzte Energiespeicher in Kraftfahrzeugen ist die Blei-Säure-Batterie. Aus diesem Grund wurde in Unterkapitel 5.2 auf der Grundlage von Felddaten ein Zuverlässigkeitsmodell für Blei-Säure-Batterien entwickelt. Anhand dieses Modells sowie anhand der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Alterungs- und Ausfallmechanismen und der Fehlerverteilungen aus [3] lassen sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten für Blei-Säure-Batterien ableiten.

Die beiden wesentlichen Komponenten der Energiewandlung sind der Generator und der Gleichspannungswandler. Wegen ihrer Bedeutung für moderne Kraftfahrzeuge liegt der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf Klauenpolgeneratoren sowie auf bidirektionalen 12V/48V-Gleichspannungswandlern. Für erstere wurde in Unterkapitel 5.3, für letztere in Unterkapitel 5.4 ein Zuverlässigkeitsmodell vorgestellt.

Das Modell des Generators wurde auf der Datenbasis für einen 180A-Klauenpol-

⁹ Das Teilsystem Vernetzung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur mit Bezug auf Schmelzsicherungen berücksichtigt, da eine umfassende Untersuchung aller Teilkomponenten dieses Systems (Leitungen, Sicherungen, Splices, Relais etc.) den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

generator entwickelt und validiert. Eine maßgebliche Rolle spielen in diesem Modell die Verlustleistungen $P_V(t_i)$. Auf dem Weg einer detaillierten Beschreibung der hier relevanten physikalischen Zusammenhänge wurden die Gleichungen 5.19 bis 5.27 hergeleitet, anhand derer sich die Verlustleistungen der Komponenten eines Klauenpolgenerators mathematisch beschreiben und vorhersagen lassen. Auf der Grundlage der Studien [100] und [98] konnte darüber hinaus ein vereinfachtes thermisches Netzwerk für Klauenpolgeneratoren entwickelt werden. Die einzelnen Parameter für dieses Netzwerk konnten zu einem Teil durch analytische Berechnungen und zu einem anderen Teil durch Partikelschwarmoptimierung (PSO) ermittelt werden. Wie die Validierung gezeigt hat, liefern sowohl das Verlustleistungsmodell als auch das datenbasierte Temperaturmodell hinreichend genaue Ergebnisse. Die Berechnung der Ausfallraten des Generators bzw. seiner Komponenten erfolgt für die mechanischen Komponenten Lager, Stator- und Läuferwicklung, Kohle-Schleifring-System und die Verbindungsstelle zur elektrischen Energieversorgung auf der Grundlage des Handbuchs NSWC-11 [111] anhand der Gleichungen 5.30 bis 5.39. Zur Berechnung der Ausfallraten der elektronischen Komponenten Gleichrichtung und Regler wurden auf der Grundlage der Handbücher FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151] die Gleichungen 5.35 bis 5.39 hergeleitet.

Die zweite wesentliche Komponente der Energiewandlung neben dem Generator ist der Gleichspannungswandler. Im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen gibt es immer mehr Architekturen, die zusätzlich zur 12V-Spannungsebene eine 48V- bzw. eine Hochvoltspannungsebene (400 bzw. 800 Volt) vorsehen. Da auch bei Einsatz dieser zusätzlichen Spannungsebenen ein Großteil der Steuergeräte bzw. Aktoren auf der 12V-Spannungsebene verbleibt, ist zu deren Versorgung ein Gleichspannungswandler erforderlich. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb ein Zuverlässigkeitsmodell für einen bidirektionalen 12V/48V-Gleichspannungswandler entwickelt. Wie beim Modell des Generators spielt auch hier die Berechnung der Verlustleistungen eine zentrale Rolle. Diese erfolgt anhand der Gleichungen 5.50 bis 5.52. Für das mit der Verlustleistungsberechnung gekoppelte Temperaturmodell wurde ein passendes thermisches Netzwerk entwickelt. Die hierfür benötigten Parameter wurden zum einen aus Herstellerangaben bezogen sowie zum anderen auf der Grundlage von Messdaten mittels PSO berechnet. Auch hier konnte gezeigt werden, dass sowohl das Verlustleistungs- als auch das Temperaturmodell hinreichend genaue Ergebnisse liefern. Die Ergebnisse beider Modelle dienen

anschließend zur Berechnung der Ausfallraten auf der Basis der oben erwähnten Handbücher FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151].

6 Anwendung und Auswertung der Methode

Im Folgenden wird die in den vorigen Kapiteln entwickelte Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Systeme in der automobilen Vorentwicklung auf das Beispiel der elektrischen Energieversorgung von hochautomatisierten Verbrauchern angewendet. Zunächst wird die Anwendung der Methode in Bezug auf die klassische Architektur der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen schrittweise erläutert. Anschließend werden die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten kritischer Zustände in der elektrischen Energieversorgung hochautomatisierter Verbraucher berechnet, ausgewertet und diskutiert. Um einen Vergleich herstellen zu können, wird – ebenfalls anhand der hier entwickelten Methode – zusätzlich eine Architektur mit zwei Spannungsebenen untersucht. Beide Architekturen werden abschließend auf ihre Sensitivität gegenüber Variationen in den jeweiligen Verteilungen der Fehler in den verschiedenen Komponenten untersucht. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse.

6.1 Zuverlässigkeitsbewertung der klassischen Architektur zur elektrischen Energieversorgung

Im Folgenden wird anhand der in Unterkapitel 3.2 vorgestellten Methode die Zuverlässigkeit der klassischen Architektur zur elektrischen Energieversorgung bewertet. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt von kritischen Fehlern in der elektrischen Energieversorgung sind laut der hier entwickelten Methode die folgenden Schritte durchzuführen:

1. Definition der Architektur der elektrischen Energieversorgung sowie Auswahl der Komponentenmodelle für die Teilsysteme Energiespeicher, Energiewandlung und Vernetzung;
2. Festlegung des zu untersuchenden Streckenprofils (Kurzstrecke (KS), Kurze Pendlerstrecke (KPS) und Langstrecke (LS));¹
3. Berechnung der Verlustleistungen, der Temperaturen und der Ausfallraten der eingesetzten Komponenten in Abhängigkeit vom gewählten Fahrprofil;
4. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von verschiedenen Fehlern auf der Grundlage von Fehlerbäumen für die jeweils untersuchten Komponenten;
5. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der gesamten elektrischen Energieversorgung auf der Basis der Hauptereignisse der Komponentenfehlerbäume;
6. Auswertung der berechneten Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Basisereignissen sowie Bestimmung des Einflusses derselben auf die Hauptereignisse;
7. Analyse der Sensitivität der verschiedenen Architekturen gegenüber verschiedenen Ausfallraten der Komponenten sowie gegenüber Variationen der komponentenspezifischen Fehlerverteilungen.

¹ Um das tatsächliche Nutzungsverhalten verschiedener Kunden abbilden zu können, müsste man unterschiedliche Kombinationen aus diesen drei Streckenprofilen betrachten. Dies wäre ggf. Gegenstand weiterer, auf dieser Arbeit aufbauender Untersuchungen. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit werden jedoch bewusst die einzelnen Streckenprofile untersucht, da so sichergestellt werden kann, dass die Ergebnisse untereinander vergleichbar sind und somit verlässliche Aussagen darüber getroffen werden können, welchen Einfluss die verschiedenen Streckenprofile auf die Zuverlässigkeit haben.

6.1.1 Definition der Architektur und Auswahl der Komponentenmodelle

Im ersten Schritt werden die Architektur und damit die für die elektrische Energieversorgung notwendigen Komponenten festgelegt. In Abbildung 6.1 sind die Architektur sowie die wesentlichen Komponenten und die zugehörigen physikalischen Größen der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen klassischen elektrischen Energieversorgung dargestellt. Zur Untersuchung des Energiespei-

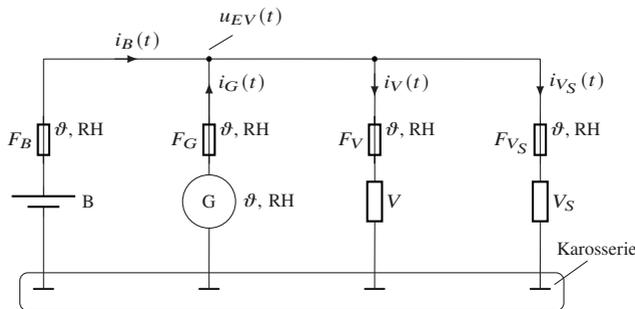


Abbildung 6.1: Vereinfachter Schaltplan und Topologie einer klassischen elektrischen Fahrzeugenergieversorgung mit einem Energiespeicher und einem Generator

chers wird das in Unterkapitel 5.2 vorgestellte Modell einer Blei-Säure-Batterie genutzt. Da es sich dabei um ein stochastisches Modell handelt, wird kein Bezug zu physikalischen Messgrößen hergestellt. Grundsätzlich wäre auch die Anwendung eines belastungsabhängigen Modells möglich; hierfür wären jedoch zusätzliche Messdaten erforderlich, um einen Zusammenhang zwischen den Belastungen der einzelnen Komponenten bzw. des Energiespeichers im Gesamten und den jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten herzustellen.

Zur Untersuchung des Generators wird das in Unterkapitel 5.3 vorgestellte Modell eines Klauenpolgenerators eingesetzt.

Bezüglich der Verbraucher wird zwischen relevanten und nicht relevanten unterschieden, d. h. zwischen Verbrauchern ohne und Verbrauchern mit Sicherheitsziel. Verbraucher ohne Sicherheitsziel sind bezüglich des eigenen Fehlerverhaltens nicht abgesichert. Daher können Fehler in diesen Verbrauchern bzw. in deren Zuleitungen die Stabilität der elektrischen Energieversorgung stark beeinträchtigen. In der Folge kann es neben dem Ausfall von Energiequellen

auch zu Rückwirkungen auf andere nicht abgesicherte Verbraucher kommen, was seinerseits zur Unterversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher und damit im schlimmsten Fall zum Funktionsverlust betroffener Steuergeräte führen kann. Nicht relevante Verbraucher – also solche ohne Sicherheitsziel – werden im Folgenden mit V und relevante Verbraucher – also solche mit Sicherheitsziel sowie Rückwirkungsfreiheit – mit V_S gekennzeichnet.

6.1.2 Festlegung der Fahrprofile

Als Fahrprofil kann entweder eine einzelne Streckenart, z. B. die Kurzstrecke, oder eine Kombination aus den in Unterkapitel 5.1 vorgestellten Streckenarten festgelegt werden. Die folgenden Berechnungen werden in Bezug auf verschiedene Streckenarten durchgeführt. Die ausgewählten Streckenarten sowie deren wesentliche Eigenschaften sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Strecke			Batterie	Start-Stopp		Verbraucher
Typ	Abk.	Länge [km]	Durchsatz [Ah]	Anzahl	Länge [min]	Umsatz [kWh]
Kurzstrecke A	KA	6,99	2,13	0	0,63	0,10
Kurzstrecke B	KB	7,13	2,71	4	1,46	0,08
Kurzstrecke C	KC	6,87	4,79	11	3,43	0,12
Kurze Pendlerstrecke	PK	22,34	4,81	10	2,83	0,19
Lange Pendlerstrecke	PL	78,74	12,41	21	7,24	0,66
Langstrecke A	LA	316,20	15,58	15	3,06	1,48
Langstrecke B	LB	321,75	10,05	0	0,37	1,54

Tabelle 6.1: Zur Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung verwendete Streckenarten sowie deren spezifische Eigenschaften

Die verschiedenen Kurzstrecken unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der auftretenden Start-Stopp-Häufigkeiten voneinander. Mit Zunahme der Start-Stopp-Häufigkeit und der jeweiligen Start-Stopp-Länge nehmen der Ladungsdurchsatz des Energiespeichers und damit die Belastung desselben zu. Des Weiteren variiert die von den Verbrauchern während des jeweiligen Fahrzyklus aufgenommene Energiemenge.

Für die Pendlerstrecken werden zwei verschiedene Profile genutzt: ein Profil mit der Bezeichnung *kurz* mit einer Streckenlänge von 22,34 Kilometern sowie ein Profil mit der Bezeichnung *lang* mit einer Streckenlänge von 78,74 Kilometern.

Für die Langstrecke wurden eine Strecke ohne und eine Strecke mit Start-Stopp-

Szenarien ausgewählt. Beide Strecken unterscheiden sich dementsprechend bezüglich des Ladungsdurchsatzes und der Belastung der Batterie voneinander. In den folgenden Abschnitten wird untersucht, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Fahrprofile bzw. die dadurch bedingten Belastungen auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung haben.

6.1.3 Durchführung der Berechnung

Der Ablauf zur Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Nach den ersten beiden Schritten,

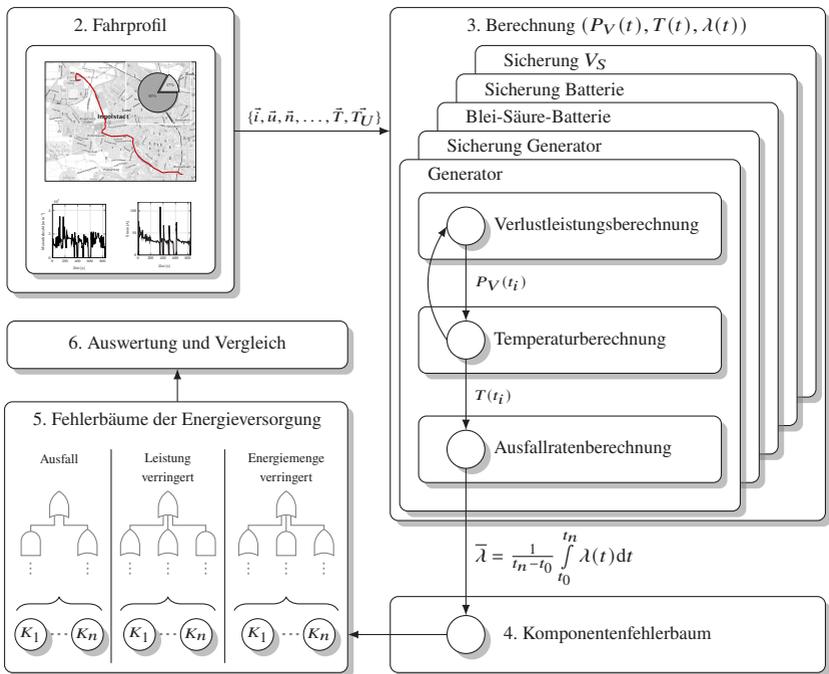


Abbildung 6.2: Übersicht über die Anwendung der Methode zur Berechnung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung

der Festlegung der Architektur und der Auswahl der Komponenten, werden

im dritten Schritt die physikalischen Eigenschaften aller Komponenten in Abhängigkeit von deren individuell verschiedenen Belastungen berechnet. Die Berechnung der Verlustleistungen $P_V(t_i)$, der Temperatur $T(t_i)$ und der Ausfallraten $\lambda(t_i)$ erfolgt dabei iterativ mit jedem Zeitschritt t_i . Im vierten Schritt werden die Mittelwerte der berechneten Ausfallraten berechnet und als Parametrierung für die Basisereignisse der Komponentenfehlerbäume genutzt (vgl. die Abschnitte 5.3.5 und 5.4.5). Im fünften Schritt werden schließlich die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der wesentlichen Fehlerzustände der elektrischen Energieversorgung berechnet. Zu diesem Zweck werden drei verschiedene Hauptereignisse ausgewertet, die eine große Auswirkung auf die elektrische Energieversorgung haben: (a) der Ausfall der elektrischen Energieversorgung, (b) eine verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie und (c) eine reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators.

6.1.4 Fehlerbäume der klassischen elektrischen Energieversorgung

In der automobilen Vorentwicklung ist bei der Untersuchung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugsystemen von Interesse, mit welcher Wahrscheinlichkeit die elektrische Energieversorgung

- ausfällt,
- eine verringerte Leistungsfähigkeit aufweist oder
- nur eine reduzierte Energiemenge bereitstellen kann.

Bei einem Ausfall der elektrischen Energieversorgung können weder die Verbraucher ohne Sicherheitsziel V noch die sicherheitsrelevanten Verbraucher V_S mit Energie versorgt werden. Fällt die elektrische Energieversorgung über einen hinreichend langen Zeitraum aus, fallen in der Folge auch die sicherheitsrelevanten Verbraucher wegen Unterversorgung aus. Hierdurch gehen wiederum wesentliche Funktionen wie z. B. das Steer-By-Wire-System verloren. Der Ausfall der elektrischen Energieversorgung für einen sicherheitsrelevanten Verbraucher tritt für die in Abbildung 6.1 dargestellte klassische Architektur dann ein, wenn

- weder der Generator noch die Batterie Ausgangsleistung bereitstellen,
- die Batterie kurzgeschlossen ausfällt,
- eine mit entsprechend hohen Schmelzsicherungswerten abgesicherte Zuleitung oder ein Verbraucher V ohne Sicherheitsziel kurzgeschlossen ausfällt,
- die Sicherungen von Batterie und Generator offen ausfallen oder
- die Sicherung eines sicherheitskritischen Verbrauchers offen ausfällt.

Die hier gelisteten Fehlerfälle werden über die jeweiligen Komponentenfehlerbäume im Gesamtfehlerbaum der elektrischen Energieversorgung berücksichtigt. Der Fehlerbaum für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung für einen bzw. für eine Gruppe von sicherheitsrelevanten Verbrauchern ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Neben dem Gesamtausfall der elektrischen Ener-

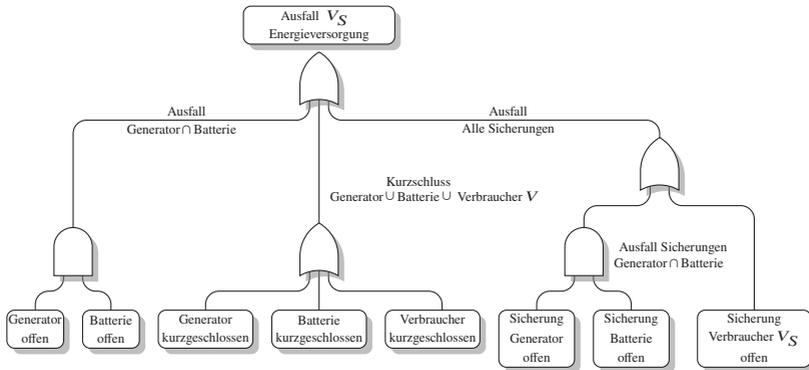


Abbildung 6.3: Abstrahierter Fehlerbaum für einen Ausfall der klassischen elektrischen Energieversorgung

gieversorgung gehört zu den besonders kritischen Ereignissen auch der offene Ausfall der Batterie und somit des Energiespeichers. Zu einem solchen Szenario kann es kommen, wenn die Batterie

- sich am Lebensdauerende befindet,
- tiefentladen,
- kurzgeschlossen oder
- offen ist,
- oder wenn die Sicherung der Batterie ausgefallen ist.

Wird ein solcher Fehler frühzeitig erkannt, gibt es in Abhängigkeit von dessen Kritikalität verschiedene Möglichkeiten, um wahrscheinlich eintretende negative Auswirkungen zu reduzieren oder ganz zu verhindern.² Grundsätzlich ist außerdem zu sagen, dass ein Ausfall der Batterie die elektrische Energieversorgung nicht unmittelbar zum Zeitpunkt des Fehlereintritts gefährdet. Denn

² In Fällen mit geringer Kritikalität erfolgt eine entsprechende Warnung. In Fällen mit hoher Kritikalität, in denen die Weiterfahrt nicht möglich ist, muss das Fahrzeug hingegen festgesetzt, d. h., bis auf 0 km/h heruntergebremst werden, bis der sichere Zustand (z. B. Stillstand) erreicht ist.

der Generator dient sozusagen als Rückfallebene. Er ist so dimensioniert, dass im Normalbetrieb auch dann eine hinreichende Menge von Energie zur Versorgung der Grundlast bereitgestellt werden kann, wenn es zu einem Ausfall der Batterie kommen sollte. Zur Destabilisierung der elektrischen Energieversorgung kommt es erst dann, wenn zusätzlich zum Ausfall der Batterie ein Lastwechsel mit hohen Stromgradienten (di/dt) auftritt, der auch durch den Generator nicht abgefangen werden kann und so zu einem signifikanten Spannungseinbruch in der elektrischen Energieversorgung führt.³

Auch dann, wenn der Generator ausfällt, ist die elektrische Energieversorgung nicht unmittelbar zum Zeitpunkt des Fehlereintritts gefährdet. Zwar nimmt die Menge der über den Energiespeicher zur Verfügung stehenden Energie stetig ab, wobei die Rate des Absinkens von der Auslastung der elektrischen Energieversorgung abhängt. Aufgrund der typischerweise verbauten Energiespeichergrößen (vgl. hierzu Unterkapitel 5.2.1.) kommt es im Fall der gemessenen Grundlasten (vgl. hierzu Tabelle 5.1) bei einem Ausfall des Generators aber erst nach geraumer Zeit dazu, dass wesentliche Spannungsgrenzen unterschritten werden und keine hinreichende Versorgung der Verbraucher mehr sichergestellt werden kann. Wenn eine gealterte⁴ Batterie zum Einsatz kommt, sinkt die Spannung in der elektrischen Energieversorgung bei typischen Grundlasten wie in Unterkapitel 4.5 diskutiert und in Abbildung 4.10 veranschaulicht allerdings erst nach mehreren Minuten unter kritische Spannungswerte (z. B. 9,8 Volt). Aus den in Abbildung 4.10 dargestellten Verläufen lässt sich auch erkennen, dass die elektrische Energieversorgung bei relativ hohen Belastungen, z. B. durch ein gleichzeitiges Lenk- und Bremsmanöver bedingt, über mehrere Minuten hinweg bei einer Spannungslage von 9,8 Volt stabil bleibt. Im Gegensatz dazu ist der Ausfall des Energiespeichers kritisch, da der Generator ein schwingungsfähiges System ist und durch den Wegfall des Energiespeichers keine hohen Stromgradienten mehr bereitgestellt werden können, ohne dass die Spannung in der elektrischen Energieversorgung auf einen unzulässig tiefen Wert und über eine unzulässig lange Dauer hinweg einbricht. Daher werden beide Fehler im Folgenden als kritisch eingestuft: der Fehler „Batterieausfall“

³ Solche Ereignisse können z. B. durch gebremste Spurwechsel verursacht werden, die deshalb besonders kritisch sind, weil es bei ihnen zu einer Überlagerung der Ströme der Bremsaktoren (Pumpe und Ventile) und der elektrischen Lenkung kommen kann, und zwar in ihren jeweiligen Maxima.

⁴ Es wurde eine gealterte Batterie simuliert, wobei eine Kapazitätsreduktion um ca. 20 Prozent und ein Anstieg des Innenwiderstandes um ca. 50 Prozent angenommen wurden.

als sofort gefährdend und der Fehler „Ausfall des Generators“ als nicht sofort gefährdend.

Für das Fehlerhaftwerden des Generators können die folgenden Hauptereignisse zusammengefasst werden. Es wird angenommen, dass die Batterie unzulässig entladen wird, wenn

- die Ausgangsleistung des Generators reduziert ist,
- der Generator keine Ausgangsleistung bereitstellen kann oder
- die Sicherung des Generators offen ausgefallen ist.

Der zugehörige Fehlerbaum für eine klassische elektrische Energieversorgung mit reduzierter Leistungsfähigkeit ist in Abbildung 6.4 dargestellt. In Abbil-

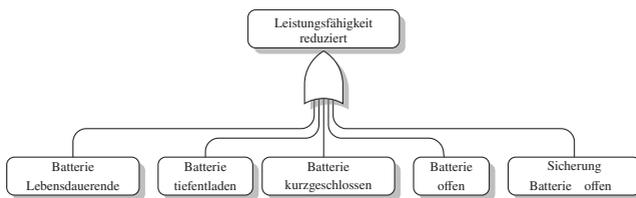


Abbildung 6.4: Abstrahierter Fehlerbaum für eine klassische elektrische Energieversorgung mit reduzierter Leistungsfähigkeit

dung 6.5 ist der auf der Grundlage der Komponentenfehlerbäume erstellte abstrahierte Fehlerbaum für die Reduktion der verfügbaren Energie dargestellt. Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten: Grundsätzlich kann jede Komponente im Gesamtsystem der elektrischen Energieversorgung fehlerhaft werden und die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung negativ beeinflussen. Dementsprechend könnten im Rahmen der Bewertung der elektrischen Energieversorgung in Kraftfahrzeugen sehr viele verschiedene Komponentenfehler und Fehlermechanismen untersucht werden. Die hier vorgestellte Methode fokussiert allerdings auf die beiden wesentlichen Komponenten der elektrischen Energieversorgung, den Energiespeicher und die Energiewandlung, da diese eine zentrale Bedeutung haben. In Bezug auf das dritte wesentliche Teilsystem der elektrischen Energieversorgung, die Vernetzung, wird nur die Zuverlässigkeit des Leitungsschutzes in Form einer automobilen Schmelzsicherung in die Modellierung einbezogen. Die Zuleitungen,

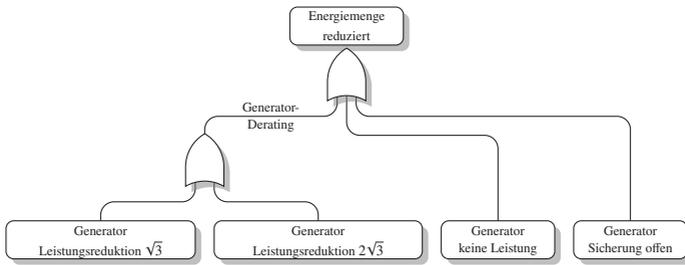


Abbildung 6.5: Abstrahierter Fehlerbaum für die Reduktion der verfügbaren Energie in der klassischen elektrischen Energieversorgung

die Splices sowie die Kontakt- und Verteilstellen werden aus den in Kapitel 5 genannten Gründen in der folgenden Analyse hingegen nicht untersucht.

6.1.5 Auswertung des Einflusses der Basisereignisse

Die Auswertung der Wahrscheinlichkeiten für die Hauptereignisse der Fehlerbäume der elektrischen Energieversorgung wurde nach einer durchschnittlichen Fahrzeugnutzungsdauer von 8000 Betriebsstunden (bzw. ca. 250.000 Kilometern) durchgeführt. Als Ausfallrate bezüglich der nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher infolge eines Kurzschlusses wird zunächst ein Wert von 1000 FIT angenommen. Nach den in Tabelle 2.1 angegebenen Ausfallraten für die verschiedenen Integritätsstufen entsprechen 1000 FIT einem ASIL-A-Verbraucher. Der niedrige Wert für die Ausfallrate wurde gewählt, um den Einfluss anderer Komponentenfehler deutlicher hervortreten zu lassen und somit leichter auswerten zu können. Diese Ausfallraten werden in Abschnitt 6.1.6 variiert, um so die Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber dem Fehler „Kurzschluss und damit einhergehender Ausfall der elektrischen Energieversorgung infolge eines Fehlers in einem nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher“ untersuchen zu können. In Abbildung 6.6 sind die Wahrscheinlichkeitskurven für das Eintreten der Hauptereignisse „Ausfall der elektrischen Energieversorgung“, „verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie“ und „reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators“ dargestellt. Wie die Kurvenverläufe zeigen, ist die Exponentialfunktion im linearen Bereich. Aus den Verläufen lassen sich die Wahrscheinlichkeiten

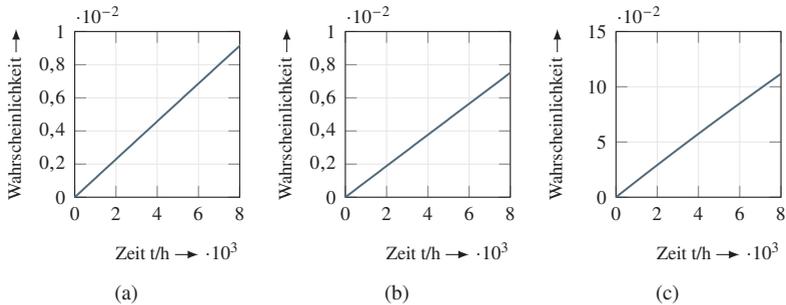


Abbildung 6.6: Wahrscheinlichkeitsverläufe der Hauptereignisse (a) Ausfall der elektrischen Energieversorgung, (b) verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie und (c) reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators bis 8000 Betriebsstunden, berechnet bezüglich des Fahrprofils KA 6.1

für das Eintreten der genannten Hauptereignisse nach 8000 Betriebsstunden unmittelbar ablesen. Diese liegen

- für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung bei 0,91 Prozent,
- für das Eintreten reduzierter Leistungsfähigkeit bei 0,75 Prozent und
- für den Zustand der elektrischen Energieversorgung mit einer reduzierten Energiemenge bei 11,17 Prozent.

Wie deutlich wird, ist die Wahrscheinlichkeit eines Zustands der elektrischen Energieversorgung mit reduzierter Energiemenge am höchsten. Maßgeblich für den Eintritt dieses Fehlerereignisses sind die Fehlerwahrscheinlichkeiten des Generators; sie beeinflussen die Gesamtwahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Zustands wesentlich.

Die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung oder eine reduzierte Leistungsfähigkeit fallen geringer aus. Die hauptsächliche Ursache für eine reduzierte Leistungsfähigkeit sind Batteriefehler. Während eines PKW-Lebenszyklus wird die Fahrzeugbatterie regelmäßig ausgetauscht, wodurch die Batterie am mittleren Lebensdauerende seltener fehlerhaft ist als der Generator. Daher ist auch die Wahrscheinlichkeit für eine reduzierte Leistungsfähigkeit geringer.

Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung liegt nach 8000 Betriebsstunden bei 0,91 Prozent. Bezogen auf die typischen

Produktionsmengen der jeweiligen Hersteller bedeutet dies, dass mehrere tausend Fahrzeuge im Feld aufgrund dieses Fehlers ausfallen werden.

Zur Beurteilung des Einflusses der unterschiedlichen Streckenprofile aus Tabelle 6.1 auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Hauptereignisse sind in Abbildung 6.7 die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die betrachteten Hauptereignisse nach 8000 Betriebsstunden dargestellt. Die Variation der Wahrscheinlichkeiten

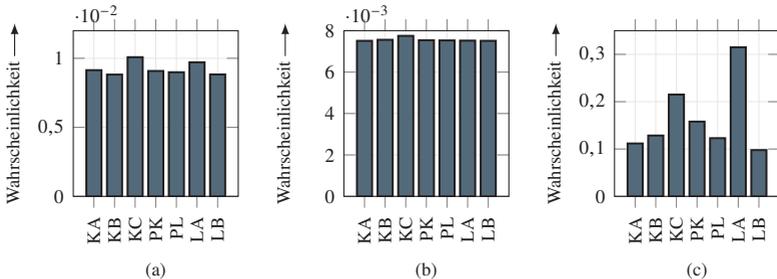


Abbildung 6.7: Wahrscheinlichkeiten der Hauptereignisse (a) Ausfall der elektrischen Energieversorgung, (b) verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie und (c) reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators nach 8000 Betriebsstunden in Abhängigkeit von den verschiedenen Streckenprofilen

für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung in Abhängigkeit von den verschiedenen Streckenprofilen ist nur geringfügig ausgeprägt. Das Minimum von 0,88 Prozent tritt beim Streckenprofil KB auf, das Maximum von 1 Prozent beim Streckenprofil KC. Unter Berücksichtigung des Fehlerbaums aus Abbildung 6.3 und den in Abbildung 6.8 dargestellten Wahrscheinlichkeiten lässt sich die Ursache für die Unterschiede in den Wahrscheinlichkeiten im Wesentlichen auf das Ereignis „Generator, Batterie und Verbraucher kurzgeschlossen (h)“ zurückführen. Ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung haben die Fehler der Statorwicklung (d). Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler in der Statorwicklung ist größer als die Wahrscheinlichkeiten für andere Fehler. Die Ursache hierfür sind die Belastungen der Statorwicklung, die über die verschiedenen Streckenprofile hinweg vergleichsweise hoch ist. Die Anzahl der Start-Stopp-Zyklen nimmt von KA (0) bis KC (11) stetig zu, was eine jeweils höhere Belastung des Generators bedeutet, da die während der Start-Stopp-Zyklen aus der Batterie entnommene Energie vom Generator zusätzlich zur Grundlast be-

reitgestellt werden muss. Befindet sich der Generator darüber hinaus in einem Betriebspunkt mit geringem Wirkungsgrad, nehmen die Verluste und damit die Eigenerwärmungen des Generators und der Wicklungen deutlich zu. So erklärt sich die hohe Wahrscheinlichkeit für einen Fehler in der Statorwicklung.

Die Wahrscheinlichkeiten für das Ereignis „verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie“ reichen im Minimum von 0,751 Prozent für die Streckenprofile Kurzstrecke A (KA) und Langstrecke B (LB) bis hin zum Maximum von 0,775 Prozent für das Streckenprofil Kurzstrecke C (KC). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Wahrscheinlichkeiten sind gering und werden in erster Linie durch Fehler der Batterie beeinflusst. Ein Teil der Wahrscheinlichkeiten für Batteriefehler ist bereits in Abbildung 6.8 (b) Batterie offen und (f) Batterie kurzgeschlossen dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Batterie nach 8000 Betriebsstunden setzt sich aus den Wahrscheinlichkeiten für die folgenden Einzelfehler zusammen. Die Batterie fällt mit einer Wahrscheinlichkeit von

- 0,5257 Prozent am Lebensdauerende (EOL),
- 0,2008 Prozent tiefentladen,
- 0,0087 Prozent kurzgeschlossen und
- 0,0087 Prozent offen

aus. Wie sich zeigt, sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Streckenprofilen in Abbildung 6.7 (b) auf die Wahrscheinlichkeit des Eintritts des Ereignisses „Ausfall der Batterie Sicherung (i)“ zurückzuführen. Die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der Sicherungen hängen von den unterschiedlich hohen Belastungen der verschiedenen Streckenprofile ab. Zwischen den Belastungen und der Fehlerwahrscheinlichkeit der Sicherung bestehen dabei folgende Zusammenhänge: Der Erwartungswert des Sicherungsstroms und die mittlere Temperatur der Streckenprofile korrelieren stark positiv mit der Fehlerwahrscheinlichkeit (am Beispiel der Sicherung der 12V-Batterie ausgedrückt korrelieren die gemessenen Änderungen der Temperatur mit einem Wert von $R_T = 0,86$ $P_T = 0,01$ mit den Veränderungen der Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung; für die Korrelation zwischen Änderungen im Strom und Veränderungen der Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung beträgt der Wert $R_I = 0,81$ $P_I = 0,03$).

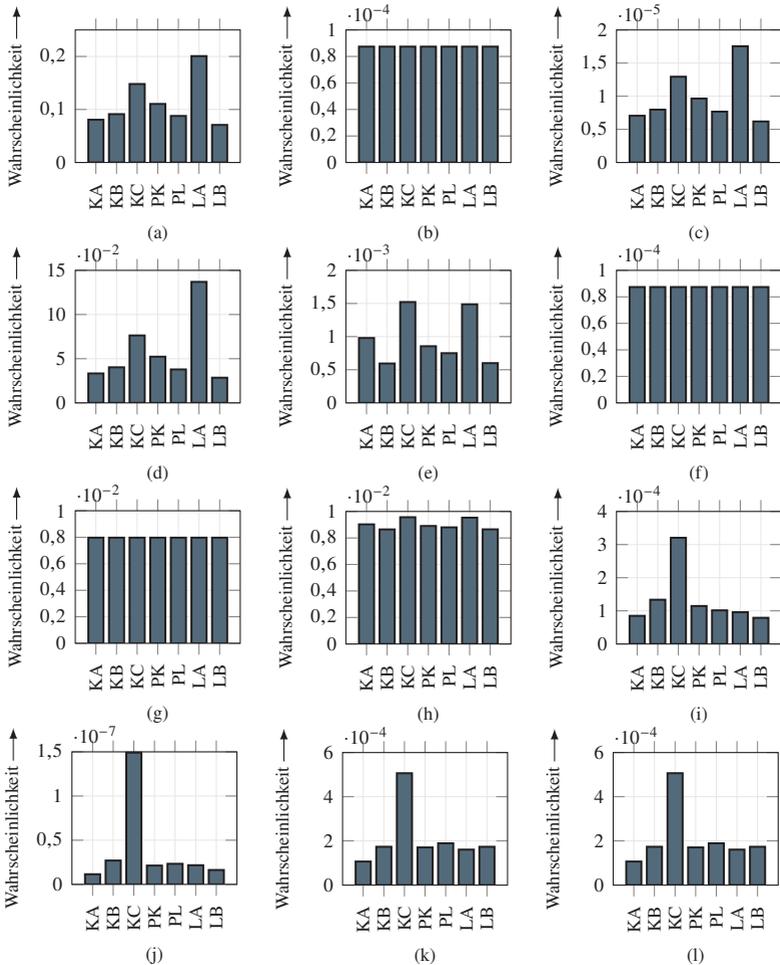


Abbildung 6.8: Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse nach 8000 Betriebsstunden über alle Streckenprofile. Die dargestellten Fehler sind: (a) Generator offen, (b) Batterie offen, (c) Generator und Batterie offen, (d) Generator Statorwicklung kurzgeschlossen, (e) Generator Gleichrichtung kurzgeschlossen, (f) Batterie kurzgeschlossen, (g) Verbraucher V kurzgeschlossen, (h) Generator, Batterie und Verbraucher kurzgeschlossen, (i) Sicherung Batterie offen, (j) Sicherung Batterie und Generator offen, (k) Sicherung Verbraucher V_S offen und (l) Sicherungen Generator, Batterie und Verbraucher V_S offen

In Abbildung 6.7 (c) sind auf der Grundlage des Fehlerbaums aus Abbildung 6.5 die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Zustandes „reduzierte Energiemenge (Versorgung aus dem Energiespeicher) in der elektrischen Energieversorgung“ dargestellt. Hierbei variieren die Wahrscheinlichkeiten zwischen einem Minimum von 9,78 Prozent für das Streckenprofil LB und einem Maximum von 31,5 Prozent für das Streckenprofil Langstrecke A (LA). In den Abbildungen 6.8 (a) und 6.9 sind die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der verschiedenen Generatorfehler in Abhängigkeit von den verschiedenen Streckenprofilen dargestellt. Die Unterschiede in den Wahrscheinlichkeiten für

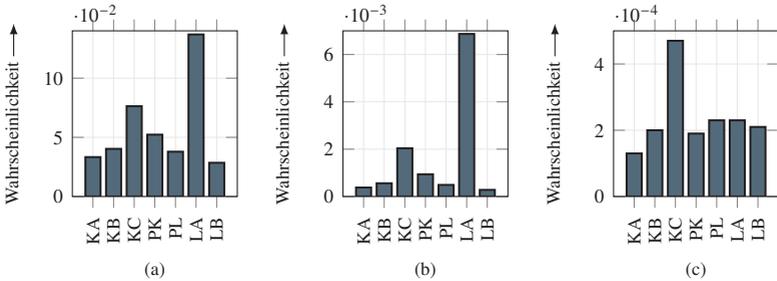


Abbildung 6.9: Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der verschiedenen Generatorfehler in Abhängigkeit von den verschiedenen Streckenprofilen; in (a) Wahrscheinlichkeit einer Leistungsreduktion um $\sqrt{3}$, in (b) Wahrscheinlichkeit einer Leistungsreduktion um $2\sqrt{3}$ und in (c) die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers in der Generatorsicherung

den Ausfall des Generators sind im Wesentlichen auf die beiden Fehlerursachen „Leistungsreduktion um $\sqrt{3}$ “ und „keine Ausgangsleistung“ zurückzuführen. Hierbei korrelieren die Belastungen der Stator- und Läuferwicklung sowie deren Ausfallwahrscheinlichkeiten stark positiv mit den Fehlerwahrscheinlichkeiten über die verschiedenen Streckenprofile hinweg (Ausfallrate Statorwicklung zu Wahrscheinlichkeit $R_S = 0,986$ $P_S = 0,00$, Ausfallrate Läuferwicklung zu Wahrscheinlichkeit $R_L = 0,89$ $P_L = 0,007$).

6.1.6 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern

Kurzschlüsse in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern können zu einem Ausfall der elektrischen Energieversorgung führen und stellen somit ein erhebliches Risiko dar. In klassischen Architekturen für elektrische Energieversorgungen werden Verbraucher ohne Sicherheitsziel für den Fall eines Kurzschlusses nicht hinsichtlich deren Rückwirkung auf die Spannungsstabilität abgesichert. Daher ist die Rückwirkung eines Kurzschlusses in einem nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher ein kurzzeitiger Ausfall der elektrischen Energieversorgung.

In der bisherigen Diskussion wurde für die Ausfallrate von nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern für alle Streckenprofile ein Wert von 1000 FIT angenommen. In Wirklichkeit variieren die Ausfallraten von Verbrauchern ohne Sicherheitsziel je nach Anzahl und Art der Verbraucher jedoch deutlich. In Abbildung 6.10 ist dargestellt, wie Veränderungen der Ausfallraten von nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung bezogen auf die Streckenart Kurzstrecke beeinflussen. Die dargestellten Wahrscheinlichkeiten sind normiert auf die

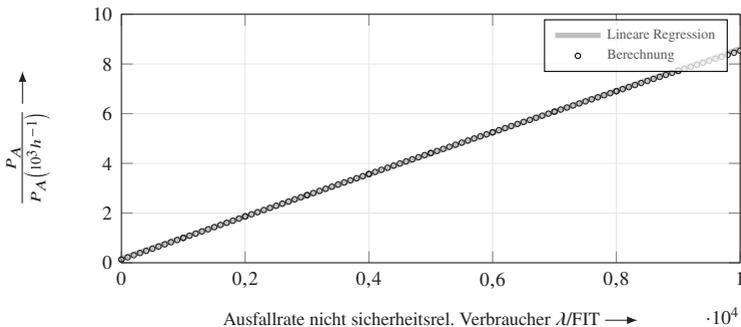


Abbildung 6.10: Normierte Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Ereignisses „Ausfall der elektrischen Energieversorgung“ in Abhängigkeit von der Ausfallrate nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher V

Ausfallwahrscheinlichkeiten der elektrischen Energieversorgung bei den Belastungen der Kurzstrecke KA als Eingangsdaten und mit einem Wert der Aus-

fallraten von nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern aufgrund eines Kurzschlusses von 1000 FIT. Der Kurvenverlauf entspricht für kleine Ausfallraten einer ganzrationalen Funktion ersten Grades, welche in dem hier dargestellten Verlauf angenähert werden kann mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 8,44 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{nsV} + 0,17. \quad (6.1)$$

Für Ausfallraten $> 1 \cdot 10^4$ FIT entspricht die dargestellte Regression nicht mehr dem Kurvenverlauf und der Fehler der Approximation nimmt zu. Der Verlauf für Ausfallraten $> 1 \cdot 10^4$ FIT kann mit einer ganzrationalen Funktion zweiten Grades angenähert werden. Für die Näherung gilt

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = -2,4 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_{nsV}^2 + 8,4 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{nsV} + 0,28. \quad (6.2)$$

Auf der Grundlage des dargestellten Verlaufs der normierten Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung lässt sich anhand der Gleichungen 6.1 und 6.2 ableiten, dass die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung signifikant von den Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall eines Verbrauchers infolge eines Kurzschlusses abhängt.

6.1.7 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Batteriefehlern

In der klassischen elektrischen Energieversorgung ist die Batterie eine der wesentlichen Komponenten und hat einen dementsprechend großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung. Um die Sensitivität klassischer elektrischer Energieversorgungsarchitekturen gegenüber Batteriefehlern zu bestimmen, sind in Abbildung 6.11 die normierten Wahrscheinlichkeiten für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung bezogen auf die Streckenart Kurzstrecke gegenüber der Variation der folgenden Arten von Batteriefehlern dargestellt: Die Batterie ist

- am Lebensdauerende (EOL) angelangt,
- tiefentladen,

- kurzgeschlossen oder
- offen.

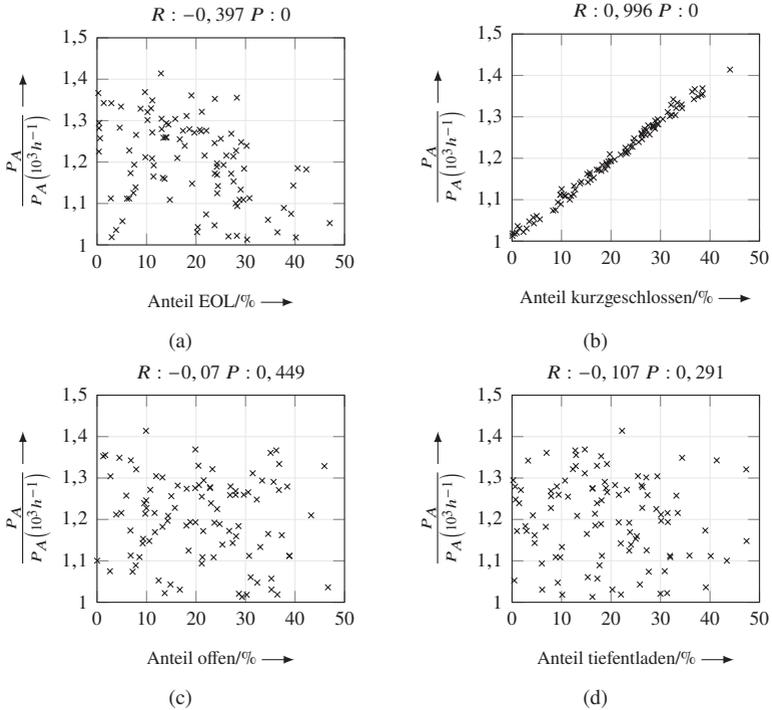


Abbildung 6.11: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den typischen Batteriefehlern „am Lebensdauerende (EOL) angelangt“, „tiefentladen“, „kurzgeschlossen“ und „offen“

Die Batteriefehler „am Lebensdauerende (EOL) angelangt“, „tiefentladen“ und „offen“ korrelieren nicht mit der normierten Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Bezüglich des Fehlers „Batterie kurzgeschlossen“ gibt es hingegen eine stark positive Korrelation. Der Kur-

venverlauf entspricht einer ganzrationalen Funktion ersten Grades und kann angenähert werden mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 93,14 \cdot 10^{-3} \cdot FA_{B_k} + 1,0095. \quad (6.3)$$

Für das in Unterkapitel 5.2 vorgestellte Modell einer Blei-Säure-Batterie ist der Fehleranteil des Batteriefehlers „Kurzschluss“ gegenüber den weiteren Fehleranteilen gering. Wie aus Gleichung 6.3 ersichtlich wird, nimmt der Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung mit zunehmendem Fehleranteil des Kurzschlusses FA_{B_k} deutlich zu.

6.1.8 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Generatorfehlern

Die Generatorfehler „offen“ und „kurzgeschlossen“ sind im Wesentlichen auf Fehler in der Statorwicklung und in der Gleichrichtung zurückzuführen. Zur Untersuchung, wie Variationen der Verteilungen der Fehler im Generator die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung beeinflussen, sind in den Abbildungen 6.12 und 6.13 die Wahrscheinlichkeiten für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung in Abhängigkeit von der Fehlerverteilung der Statorwicklung dargestellt. Für das hier entwickelte Mo-

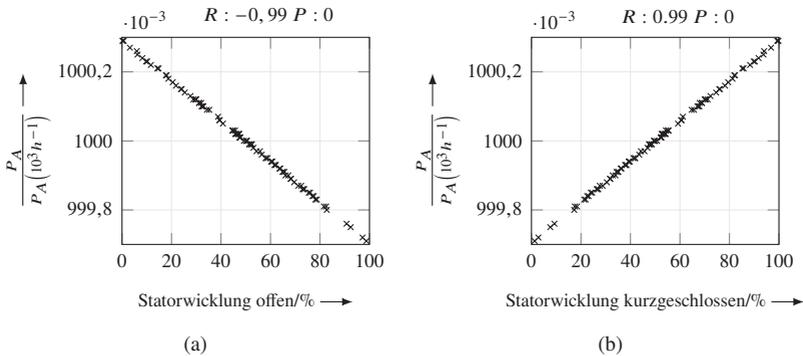


Abbildung 6.12: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den Generatorfehlern „Statorwicklung offen“ und „Statorwicklung kurzgeschlossen“

dell des Generators wurde die Fehlerverteilung der Statorwicklung initial auf 50 Prozent „Statorwicklung kurzgeschlossen“ und 50 Prozent „Statorwicklung offen“ festgelegt. Bezüglich der hier durchgeführten Variation der Verteilung zeigt sich eine stark positive Korrelation des Fehlers „Kurzschluss der Statorwicklung“ mit der normierten Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Im Vergleich zu den Fehlern „Kurzschluss nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher“ und „Kurzschluss der Batterie“ hat der Fehler „Statorwicklung kurzgeschlossen“ einen geringeren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls der elektrischen Energieversorgung. Die lineare Regression der normierten Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der

elektrischen Energieversorgung zur Verteilung des Fehlers „Statorwicklung kurzgeschlossen“ lässt sich angeben zu

$$\frac{P_A}{P_A(10^3 h^{-1})} = 5,89 \cdot 10^{-6} \cdot FA_{GS_k} + 0,9997. \tag{6.4}$$

Hier repräsentiert FA_{GS_k} den Anteil des Kurzschlussfehlers der Statorwicklung am Gesamtfehler der Statorwicklung des Generators. In Abbildung 6.13 ist die Variation der Fehlerverteilung der Gleichrichterdioden dargestellt. Wie in (b) deutlich wird, ist die normierte Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung stark mit dem Ausfall der elektrischen Energieversorgung korreliert. Die Korrelationskoeffizienten der Fehlerfälle „Diode

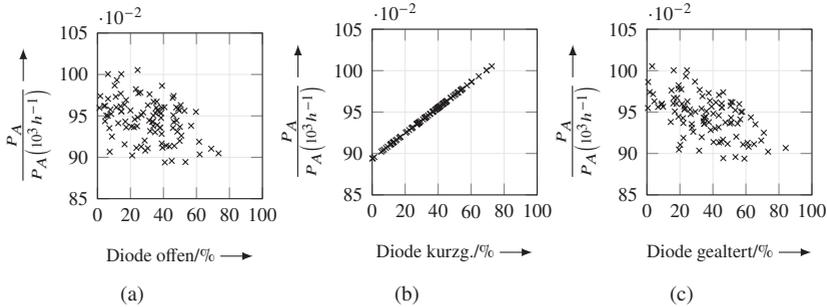


Abbildung 6.13: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den Generatorfehlern „Gleichrichterdiode offen“, „Gleichrichterdiode kurzgeschlossen“ und „Gleichrichterdiode gealtert“

offen“ in (a) und „Diode gealtert“ in (c) weisen auf eine schwache negative Korrelation hin; jedoch ist ein solcher Zusammenhang aufgrund des stark positiven Zusammenhangs zwischen dem Diodenfehler „kurzgeschlossen“ und der vorliegenden Verteilung auszuschließen. Die Regression ersten Grades zur normierten Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung gegenüber der Fehlerverteilung des Fehlers „Kurzschluss Gleichrichterdiode“ lässt sich angeben zu

$$\frac{P_A}{P_A(10^3 h^{-1})} = 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot FAGG_k + 0,894. \tag{6.5}$$

Hier repräsentiert FA_{GG_k} den Anteil des Kurzschlussfehlers der Gleichrichtung am Gesamtfehler der Gleichrichtung des Generators.

6.1.9 Zusammenfassung Zuverlässigkeit der klassischen elektrischen Energieversorgung

Im vorangegangenen Unterkapitel wurde auf der Grundlage der in Unterkapitel 3.2 beschriebenen Methode die Zuverlässigkeit einer klassischen Architektur zur elektrischen Energieversorgung von Kraftfahrzeugen untersucht. Die Ergebnisse basieren auf den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellen und den bei deren Entwicklung getroffenen Annahmen. Eine Vergleichbarkeit mit Zuverlässigkeitskenngrößen, die im Zuge der Serienentwicklung gewonnen wurden, ist dabei nur bedingt gegeben, da die in dieser Arbeit genutzten Daten zum einen aus recherchierten Quellen und zum anderen aus eigenen Felduntersuchungen stammen, sodass die hier erstellten Modelle mit einer entsprechenden Ungenauigkeit behaftet sind. Zusätzlich ist anzumerken, dass die Parameter der angegebenen Regressionsgeraden nur dann gültig sind, wenn die Fehlerverteilungen und die Wahrscheinlichkeiten der Basisfehler als konstant angenommen werden.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Streckenprofile bzw. die jeweils auftretenden Belastungen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit einer klassischen elektrischen Energieversorgung haben. Des Weiteren konnte durch die Veränderung verschiedener Fehlerverteilungen nachgewiesen werden, dass Kurzschlüsse in Energiequellen bzw. nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern mit Ausfällen der elektrischen Energieversorgung korrelieren. Somit lässt sich sagen, dass in klassischen elektrischen Energieversorgungen vor allem die Fehlerart Kurzschluss durch die daraus resultierende Unterversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher ein enormes Risiko für die elektrische Energieversorgung darstellt. Im Folgenden wird analysiert, welchen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung die Einführung einer Architektur mit einer zweiten Spannungsebene und einem Gleichspannungswandler hat.

6.2 Zuverlässigkeitsbewertung von elektrischen Energieversorgungsarchitekturen mit zwei Spannungsebenen und Gleichspannungswandler

In den folgenden Abschnitten wird die Architektur einer elektrischen Energieversorgung mit zwei Spannungsebenen und einem Gleichspannungswandler analysiert. Zunächst werden die Architektur und deren Komponenten erläutert. Darauf folgend werden die bei der Zuverlässigkeitsbewertung zu berücksichtigenden Fehlerfälle beschrieben und basierend darauf die Fehlerbäume für wesentliche Hauptereignisse diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und mit den Resultaten der Analyse klassischer elektrischer Energieversorgungsarchitekturen verglichen. Das Unterkapitel schließt mit der Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse.

6.2.1 Definition der Architektur und Auswahl der Komponentenmodelle

Die im Folgenden untersuchte Architektur mit zwei Spannungsebenen und einem Gleichspannungswandler basiert auf den in den Unterkapiteln 5.2, 5.3 und 5.4 vorgestellten Modellen. Zusätzlich wird auf der Grundlage der Arbeit [113] für die bei diesen Architekturen neben der 12V-Spannungsebene zusätzlich vorhandene 48V-Spannungsebene ein Zuverlässigkeitsmodell für einen Lithium-Ionen-Pufferspeicher eingeführt und in die Auswertung miteinbezogen.

Eine elektrische Energieversorgung mit zwei Spannungsebenen kann in unterschiedlichen Varianten ausgeführt werden. Unterscheiden kann sich diese Art der Architektur bezüglich

- der Kapazität und der Technologie der Energiespeicher,
- des Einspeisepunktes des Generators und
- der Leistungsfähigkeit des Gleichspannungswandlers.

Die Größe und Kapazität der Energiespeicher auf beiden Spannungsebenen ist in Abhängigkeit von der Charakteristik und Anzahl der Verbraucher auf der jeweiligen Spannungsebene auszulegen. Gegenwärtig werden in Kraftfahrzeugen sicherheitsrelevante Systeme wie das Lenk- und Bremssystem sowie ein Großteil der leistungsintensiven Verbraucher wie z. B. die Front- und Heckscheiben sowie die Sitzheizungen über die 12V-Spannungsebene versorgt. Dementsprechend wurde für die folgenden Berechnungen als Energiespeicher auf der 12V-Spannungsebene eine 68Ah-Blei-Säure-Batterie gewählt.

Ob der Generator in die 12V- oder in die 48V-Spannungsebene einspeist, hängt von den jeweiligen kosten- und leistungsspezifischen Anforderungen auf Architekturebene ab. Die 12V-Spannungsebene kann über einen 12V-Generator verfügen. In der hier untersuchten Architektur wird allerdings ein 48V-Booster-Generator berücksichtigt, und zwar aufgrund seiner höheren Effizienz und der zusätzlichen Möglichkeit, ihn als Antriebsunterstützung zu nutzen (vgl. Abbildung 6.14). Das hier verwendete Modell unterscheidet sich von dem in Unterkapitel 5.3 vorgestellten Modell hinsichtlich der Modellierung der Gleichrichtung und des Aufbaus der Wicklungen. Anders als bei klassischen Generatoren, die mit einer passiven Gleichrichtung mittels Dioden ausgestattet sind, wird in 48V-Generatoren eine aktive Gleichrichtung mit Leistungshalbleiter genutzt. Darüber hinaus werden im Zuge der folgenden Untersuchungen sowohl auf der 12V- als auch auf der 48V-Spannungsebene nicht sicherheitsrelevante Verbraucher berücksichtigt. Auf der 12V-Spannungsebene wird stellvertretend nur ein sicherheitsrelevanter Verbraucher V_S berücksichtigt, da sich die Ergebnisse auf alle anderen sicherheitsrelevanten Verbraucher übertragen lassen. Zusätzlich verfügt in dieser Architektur jede physikalische Vernetzung der Verbraucher über mindestens ein Leitungsschutzelement in Form einer automobilen Schmelzsicherung. Je nach physikalischem Aufbau und den Verlegewegen der Zuleitungen im jeweiligen Kraftfahrzeug ist eine Absicherung der Leitungen des Gleichspannungswandlers (GSW) erforderlich. In der hier dargestellten Architektur werden auf beiden Zuleitungen Schmelzsicherungen eingeführt. Grundsätzlich muss allerdings die Frage beantwortet werden, inwieweit die Leitung gefährdet ist, kurzgeschlossen zu werden. Kann nicht ausgeschlossen werden, dass es z. B. durch externe Beschädigungen (Marderbisse) oder interne Beschädigungen (Klemmen oder Quetschen durch Karosserieverformungen) zu einem Kurzschluss der Zuleitung kommt, ist zu prüfen, ob die Absicherung der Energiespeicher als Quellen hinreichend gering dimensioniert ist. Im Folgenden wird angenommen, dass die Zuleitung der Batterie so hoch abgesichert ist, dass ein Kurzschlussfehler in der GSW-Zuleitung nicht durch die

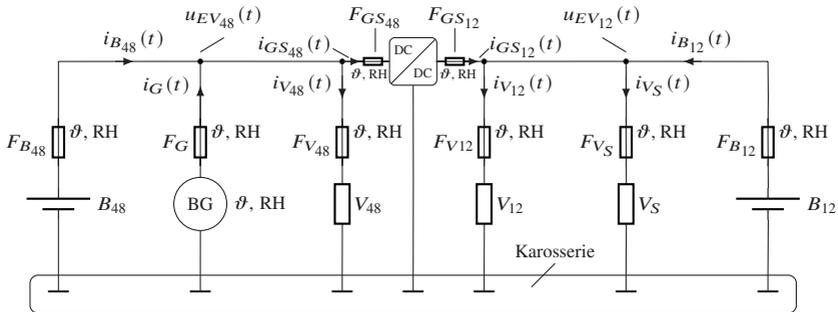


Abbildung 6.14: Architektur einer elektrischen Energieversorgung mit 12V- und 48V-Spannungsebene

Schmelzsicherung der Batteriezuleitung abgesichert ist. Daher wird sowohl auf der Hochvolt (HV)- als auch auf der Niedervolt (LV)-Seite des GSWs eine Schmelzsicherung zum Schutz der Zuleitungen vor Übertemperatur benötigt.

6.2.2 Fehlerbäume für eine elektrische Energieversorgungsarchitektur mit zwei Spannungsebenen

Wie im Fall der oben untersuchten klassischen Architektur ist auch mit Blick auf die hier untersuchte Architektur mit zwei Spannungsebenen von Interesse, mit welcher Wahrscheinlichkeit die elektrische Energieversorgung

- ausfällt,
- eine reduzierte Leistungsfähigkeit aufweist oder
- eine verminderte Energiemenge bereitstellen kann.

Grundsätzlich ließe sich mit dem hier entwickelten Modell sowohl die 12V- als auch die 48V-Spannungsebene analysieren. Die folgende Untersuchung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung bezieht sich jedoch ausschließlich auf den Ausfall der 12V-Spannungsebene, da auf dieser die

sicherheitsrelevanten Verbraucher positioniert sind. Ein Ausfall der elektrischen Energieversorgung eines sicherheitsrelevanten Verbrauchers auf der 12V-Spannungsebene tritt bezüglich der in Abbildung 6.14 dargestellten Architektur dann ein, wenn

- die 48V-Spannungsebene und die 12V-Batterie ausfallen,
- die 12V-Batterie kurzgeschlossen ausfällt,
- ein entsprechend hochabgesicherter Verbraucher V_{12} ohne Sicherheitsziel kurzgeschlossen ausfällt,
- die Sicherungen der 12V-Batterie und des GSWs offen ausfallen oder
- die Sicherung des sicherheitskritischen Verbrauchers fehlerhaft offen ausfällt.

Die genannten Fehlerfälle werden über die einzelnen Komponentenfehlerbäume im Gesamtfehlerbaum der elektrischen Energieversorgung berücksichtigt. Der Fehlerbaum für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung mit zwei Spannungsebenen für einen bzw. eine Gruppe von sicherheitsrelevanten Verbrauchern ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Es wird angenommen, dass der 48V-Energiespeicher hinreichend groß dimensioniert ist, sodass die 12V-Spannungsebene auch nach einem offenen Ausfall des Generators versorgt werden kann. Die elektrische Energieversorgung für die 12V-Spannungsebene ist unterbrochen, wenn

- der 48V-Generator offen und der 48V-Energiespeicher offen bzw. kurzgeschlossen ausfallen oder
- der GSW offen bzw. kurzgeschlossen fehlerhaft wird.

Bezüglich des 48V-Energiespeichers wird angenommen, dass dessen Aufbau ein Trennelement⁵ zwischen den Zellen und dem Batteriepol enthält. Da Kurzschlüsse innerhalb des Energiespeichers zum Öffnen dieses Trennelements führen, kommt es infolge eines Kurzschlusses des 48V-Energiespeichers zu

⁵ In 48V-Lithium-Ionen-Energiespeichern werden zum Schutz vor Überladung Trennschalter eingesetzt. Der Trennschalter ist ein wesentliches Teilsystem des Batteriemanagementsystems (BMS), welches zur Überwachung und zum Schutz der Lithium-Ionen-Zellen eingesetzt wird.

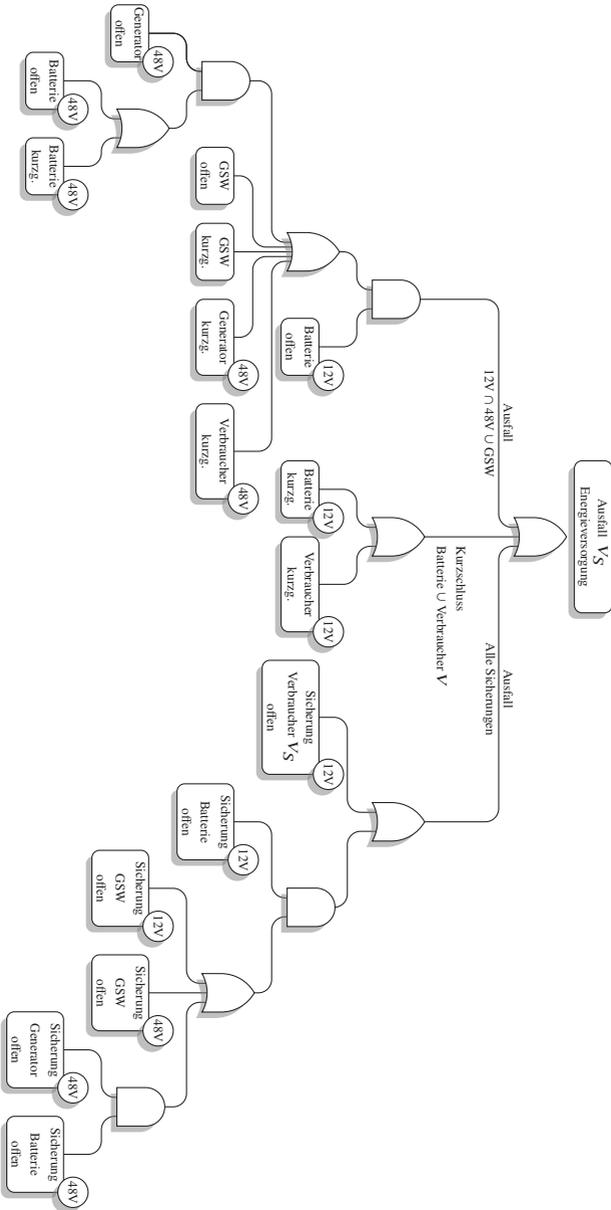


Abbildung 6.15: Abstrahierter Fehlerbaum für den Ausfall einer elektrischen Energieversorgung mit zwei Spannungsebenen

einem offenen Ausfall der 48V-Batterie.

Das Modell des GSWs aus Unterkapitel 5.4 wurde auf der Grundlage der Schaltung aus Abbildung 5.37 entwickelt. Hier sind zwischen den Anbindungen der 48V- und der 12V-Spannungsebenen an den GSW ebenfalls Trennschalter integriert, die im Fall eines Kurzschlusses einer Leistungsstufe den GSW von der jeweiligen Spannungsebene trennen. Daher führt ein Kurzschluss des GSWs zu dessen offenem Ausfall. Die 48V-Spannungsebene fällt auch dann aus, wenn der 48V-Generator oder ein leistungsfähiger 48V-Verbraucher im Kurzschluss ausfällt.

Da GSWs deutlich dynamischer sind als Generatoren, führt ein offener Ausfall der 12V-Batterie nicht unmittelbar zu einem Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Anders als in klassischen Architekturen ist ein offener Ausfall der 12V-Batterie in Architekturen der hier betrachteten Art also weniger kritisch. Grundsätzlich gilt aber, dass gegenwärtig eingesetzte GSWs nur in begrenztem Maße hohe Stromgradienten bereitstellen und auf diese Weise hohe Laständerungen abfangen können. Für die folgende Analyse wird angenommen, dass in solchen Fällen dennoch ein Großteil der 12V-Verbraucher mit einer hinreichend großen Menge an Energie versorgt werden kann, sodass es nicht zu einem Ausfall der elektrischen Energieversorgung durch Unterspannung kommt. Die elektrische Energieversorgung für die 12V-Spannungsebene ist in der Leistungsfähigkeit eingeschränkt, wenn die 12V-Batterie

- am Lebensdauerende (EOL) angelangt,
- tiefentladen,
- kurzgeschlossen oder
- offen ist,
- oder wenn die Sicherung der Batterie ausgefallen ist.

Der zugehörige Fehlerbaum unterscheidet sich nicht von dem der klassischen elektrischen Energieversorgung für die reduzierte Leistungsfähigkeit (vgl. Abbildung 6.4.)

Aufgrund der höheren Dynamik von GSWs ist die Kritikalität eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung bei reduzierter Leistungsfähigkeit geringer als bei einer klassischen Architektur. Der Grund ist, dass auch im Falle eines Ausfalls der 12V-Batterie auf der 48V-Spannungsebene weiterhin ein Ener-

giespeicher vorhanden ist, sodass höhere Lastwechsel als mit einem Generator realisiert werden können. Dennoch wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Verlust der 12V-Batterie einen kritischen Versorgungszustand darstellt.

In klassischen elektrischen Energieversorgungsarchitekturen ist ein Ausfall des Generators weniger kritisch, da der 12V-Energiespeicher sukzessive entladen wird und die elektrische Energieversorgung durch die verbleibende Energie noch mehrere Minuten lang aufrechterhalten werden kann (vgl. Unterkapitel 4.5, Abbildung 4.10). In Architekturen mit zwei Spannungsebenen und zwei Energiespeichern führt der Ausfall des Generators ebenfalls zu einer sukzessiven Abnahme der gespeicherten Energie und somit zu einer Reduktion der Versorgungsspannung. Je nach Größe der Energiespeicher steht in diesen Architekturen allerdings mehr Energie zur Verfügung, wodurch die Spannung auf der 12V-Versorgungsebene deutlich länger stabilisiert werden kann als in einer klassischen Architektur. Ein Ausfall des Generators ist daher als kritisch, jedoch nicht als gefährdend einzustufen. Für die in Abbildung 6.14 dargestellte Architektur ist die Energiemenge für die 12V-Spannungsebene reduziert, wenn

- die Ausgangsleistung des Generators reduziert ist,
- der Generator keine Ausgangsleistung bereitstellen kann oder
- die Sicherung des Generators offen ausgefallen ist.

Der GSW koppelt die beiden Spannungsebenen miteinander und versorgt im Normalbetrieb die 12V-Spannungsebene. Diese kann nicht weiter versorgt werden, wenn

- es zu einer Leistungsreduktion im GSW kommt,
- der GSW kurzgeschlossen oder
- offen ausfällt,
- oder wenn eine der Leitungsabsicherungen in den GSW-Zuleitungen ausfällt.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass bei einem Ausfall des 48V-Energiespeichers die 48V-Spannungsebene instabil wird und die Versorgung, trotz aktiven Generators, nur eingeschränkt realisiert werden kann. Daher

werden für den Zustand der reduzierten Energiemenge auch die Fehler des 48V-Energiespeichers berücksichtigt. Der 48V-Energiespeicher wird als ausgefallen eingestuft, wenn dieser

- mit einer Leistungsreduktion (BMS-Eingriff),
- kurzgeschlossen oder
- offen ausfällt,
- oder wenn dessen Sicherung offen ausgefallen ist.

In Abbildung 6.16 ist der Fehlerbaum für das Ereignis „reduzierte Energiemenge“ bezüglich einer Architektur mit zwei Spannungsebenen dargestellt. In den beiden folgenden Abschnitten werden die berechneten Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der hier betrachteten Fehlerzustände ausgewertet. Dabei wird, wie bei der klassischen Architektur, das Teilsystem Vernetzung nur in Form der Schmelzsicherung berücksichtigt. Aufgrund dieser Betrachtungsgrenze werden die Zuleitungen, Splices, Steckkontakte und Verteilstellen nicht mit in die Untersuchung eingebunden.

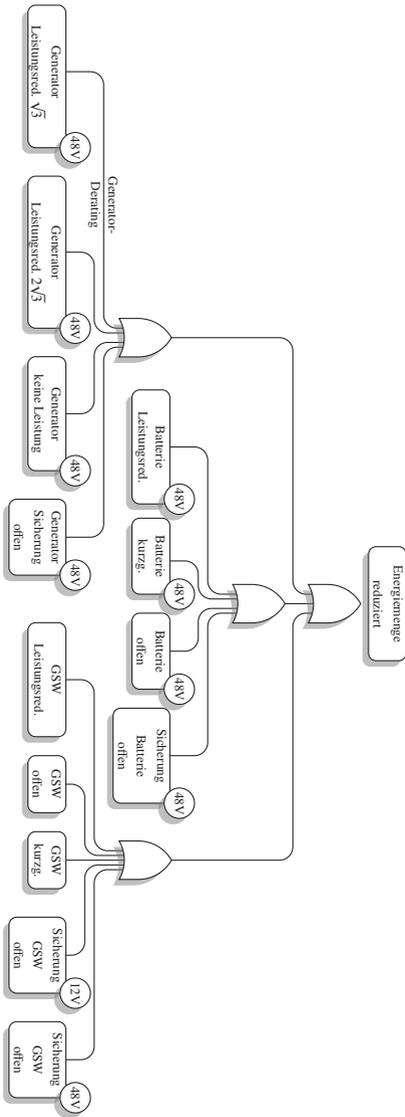


Abbildung 6.16: Abstrahierter Fehlerbaum für das Ereignis „reduzierte Energiemenge“ im Rahmen einer Architektur mit 12V- und 48V-Spannungsebene

6.2.3 Auswertung des Einflusses der Basisereignisse

In der folgenden Untersuchung werden die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines der drei Hauptereignisse nach 8000 Betriebsstunden ausgewertet. Die Ausfallrate nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher auf der 12V- und 48V-Spannungsebene infolge eines Kurzschlusses wird dabei zunächst mit jeweils 1000 FIT angenommen und in Abschnitt 6.2.4 variiert. In Abbildung 6.17 sind die Wahrscheinlichkeitskurven für das Eintreten der Hauptereignisse in der oben analysierten klassischen Architektur und der hier betrachteten Architektur mit zwei Spannungsebenen dargestellt. Wie bei der obigen Betrachtung der

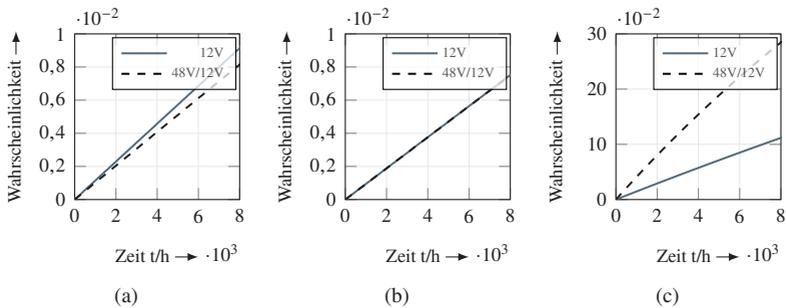


Abbildung 6.17: Wahrscheinlichkeitsverläufe der Hauptereignisse (a) Ausfall der elektrischen Energieversorgung, (b) verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie und (c) reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators bis 8000 Betriebsstunden in Bezug auf eine Architektur mit zwei Spannungsebenen, berechnet auf der Basis der Eingangsparameter der Kurzstrecke KA

klassischen Architektur bewegt sich der Kurvenverlauf der Exponentialfunktion für den Ausfall der elektrischen 12V-Energieversorgung und für den Ausfall mit verringerter Leistungsfähigkeit auch bezüglich der hier untersuchten Architektur mit zwei Spannungsebenen im linearen Bereich. Für die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung aufgrund reduzierter Energie ist bezüglich der Architektur mit zwei Spannungsebenen ein exponentieller Kurvenverlauf zu erkennen. Darüber hinaus wird deutlich, dass in Architekturen mit zwei Spannungsebenen eine geringere Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen 12V-Energieversorgung besteht.

Da die Fehlerursachen für eine verringerte Leistungsfähigkeit der elektrischen Energieversorgung in beiden Architekturen identisch sind und die Belastung der 12V-Blei-Säure-Batterie im hier vorgestellten Zuverlässigkeitsmodell nicht

berücksichtigt wird, unterscheiden sich auch die entsprechenden Kurven nicht voneinander.

Ein Ausfall der elektrischen Energieversorgung infolge einer reduzierten Menge an der zur Verfügung gestellten Energie ist in einer Architektur mit zwei Spannungsebenen deutlich wahrscheinlicher als in klassischen Architekturen. Dies ist auf die Fehler des Generators zurückzuführen, vor allem aber auf die laut dem hier verwendeten Zuverlässigkeitsmodell hohe Ausfallwahrscheinlichkeit der Lithium-Ionen-Batterie. In diesem Fall werden für den Kurzschluss der Lithium-Ionen-Batterie die Fehler der inhärenten Kontakte und des Separators berücksichtigt. Beide Fehler führen zu einer hohen Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Ereignisses „Kurzschluss durch einen Fehler am Ende der Lebensdauer“ von ca. 19 Prozent.

Aus den dargestellten Kurven lassen sich die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens der folgenden Fälle bezüglich der Architektur mit zwei Spannungsebenen nach 8000 Betriebsstunden angeben. Diese sind für

- den Ausfall der elektrischen Energieversorgung 0,82 Prozent,
- das Eintreten einer verringerten Leistungsfähigkeit 0,75 Prozent und
- den Zustand einer reduzierten Energiemenge 25,46 Prozent.

In Abbildung 6.18 ist für beide Architekturen dargestellt, welchen Einfluss die unterschiedlichen Streckenarten aus Tabelle 6.1 auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der untersuchten Zustände nach 8000 Betriebsstunden haben. Für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung ist in (a) zu erkennen, dass der Einfluss der Belastungen durch die unterschiedlichen Fahrprofile im Vergleich zur klassischen Architektur hier geringer ausfällt. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass ein Kurzschluss des Generators durch den GSW von der 12V-Spannungsebene isoliert wird. Darüber hinaus ist die Verlustleistung des 48V-Generators bei gleicher Ausgangsleistung aufgrund der höheren Spannungslage geringer. Die Wicklungsverluste der Statorwicklung nehmen ebenfalls deutlich ab (vgl. Gleichung 5.19). Mit der Abnahme der Verlustleistung nehmen auch die Wahrscheinlichkeiten dafür ab, dass die oben genannten Fehler im Generator auftreten. In Abbildung 6.19 sind diesbezüglich in (a), (f) und (g) die Fehlerwahrscheinlichkeiten des Generators für beide Architekturen dargestellt. Wie zu erkennen ist, wurde die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Ereignisses „Kurzschluss des Generators“ am deutlichsten reduziert.

Die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung

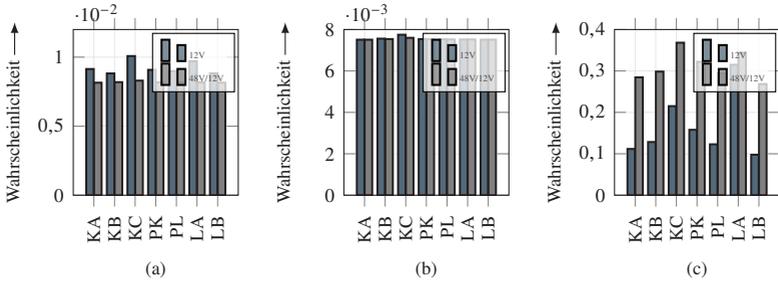


Abbildung 6.18: Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der Hauptereignisse (a) Ausfall der elektrischen Energieversorgung, (b) verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie und (c) reduzierte Energiemenge durch den Ausfall des Generators nach 8000 Betriebsstunden in Abhängigkeit von den verschiedenen Streckenarten in Bezug auf die klassische Architektur und die Architektur mit zwei Spannungsebenen

variieren über die verschiedenen Streckenarten hinweg nur geringfügig. Das Minimum von 0,815 Prozent ist den Streckenarten KA und LB zuzuordnen, das Maximum von 0,83 Prozent der Streckenart KC.

In Abbildung 6.18 (b) sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Ereignis „verringerte Leistungsfähigkeit durch den Ausfall der Batterie“ dargestellt. Wie zu sehen ist, sind diese nahezu identisch mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten für dieses Ereignis im Rahmen einer klassischen Architektur. Da durch den Ausfall des 12V-Energiespeichers sowohl in klassischen als auch in Architekturen mit zwei Spannungsebenen eine speicherlose Versorgung entsteht, sind der Fehlerbaum und die Basisereignisse für beide Architekturarten identisch. Die Unterschiede in den Wahrscheinlichkeitswerten entstehen durch die unterschiedlich hohen Belastungen der Absicherung. In Abbildung 6.19 (i) sind die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall aller Sicherungen und in Abbildung 6.20 die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der einzelnen Sicherungen dargestellt. Die Unterschiede in den Fehlerwahrscheinlichkeiten zwischen den Fahrprofilen KA bis LB resultieren aus den Unterschieden in den Belastungen, die mit den unterschiedlichen Fahrprofilen einhergehen. Hierbei gibt es eine stark positive Korrelation zwischen den Fehlerwahrscheinlichkeiten der einzelnen Sicherungen und der Sicherungstemperatur sowie dem Sicherungsstrom (z. B. für die 12V-Batteriesicherung korreliert die Temperatur zur Wahrscheinlichkeit mit $R_T = 0,87$ $P_T = 0,01$ und der Strom zur Wahrscheinlichkeit mit

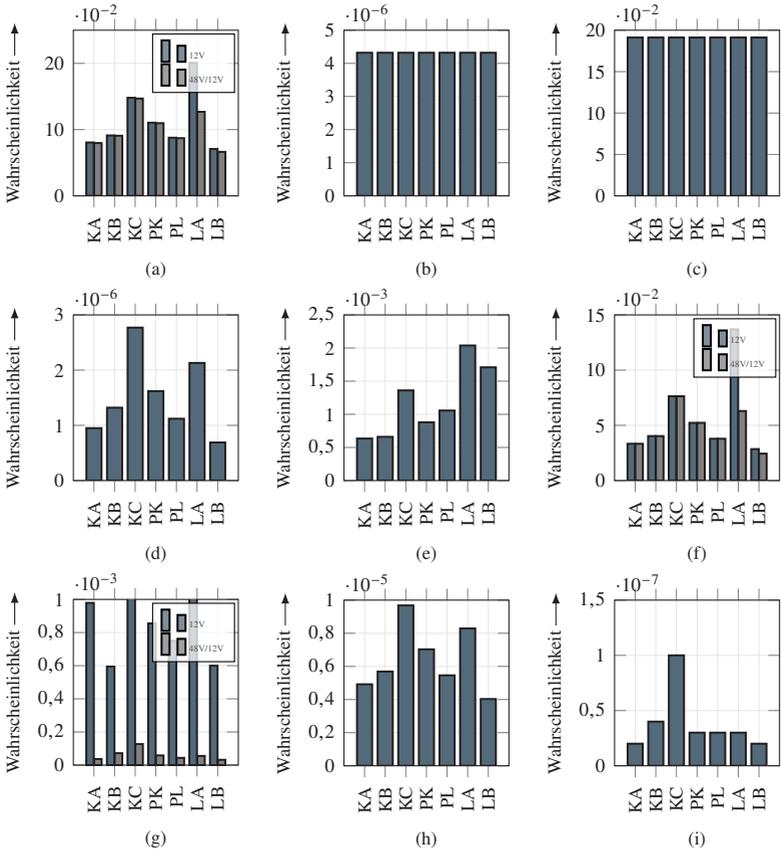


Abbildung 6.19: Eintrittswahrscheinlichkeiten der Basiseignisse nach 8000 Betriebsstunden für alle Streckenarten bezüglich der Architektur mit zwei Spannungsebenen, einem Gleichspannungswandler und zwei Energiespeichern. Dargestellt sind die folgenden Fehlerarten: (a) 48V-Generator offen, (b) 48V-Energiespeicher offen, (c) 48V-Energiespeicher kurzgeschlossen, (d) Gleichspannungswandler offen, (e) Gleichspannungswandler kurzgeschlossen, (f) 48V-Generator Satorwicklung kurzgeschlossen, (g) 48V-Generator Gleichrichtung kurzgeschlossen, (h) Ausfall der elektrischen 48V- und 12V-Energieversorgung, (i) alle Sicherungen offen ausgefallen

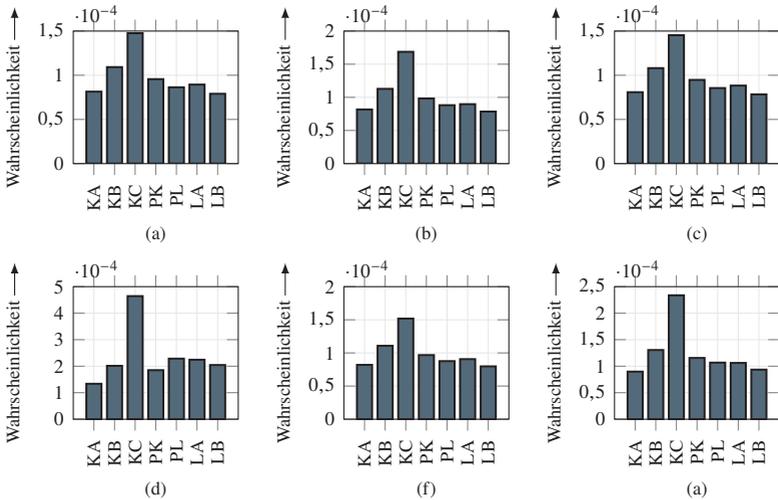


Abbildung 6.20: Eintrittswahrscheinlichkeiten der Basisereignisse nach 8000 Betriebsstunden für alle Streckenarten bezüglich der Architektur mit zwei Spannungsebenen, einem Gleichspannungswandler und zwei Energiespeichern. Dargestellt sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Fehler der Art „offener Ausfall der Schmelzsicherung“ bezüglich der Sicherung für die folgenden Komponenten: (a) 48V-Generator, (b) 12V-Energiespeicher, (c) 48V-Energiespeicher, (d) 12V-Ausgang Gleichspannungswandler, (e) 48V-Ausgang Gleichspannungswandler, (f) sicherheitsrelevanter 12V-Verbraucher V_S

$R_I = 0,84$ $P_I = 0,02$).

In Abbildung 6.18 (c) sind auf der Grundlage des Fehlerbaums aus Abbildung 6.16 die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Ereignisses „reduzierte Energie (Versorgung aus dem 12V-Energiespeicher) in der elektrischen Energieversorgung“ dargestellt. Die Wahrscheinlichkeiten nach 8000 Betriebsstunden variieren dabei zwischen einem Minimalwert von 26,84 Prozent für das Streckenprofil LB und einem Maximalwert von 36,82 Prozent für das Streckenprofil KC. Die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung sind deshalb deutlich höher als bei der oben untersuchten klassischen Architektur, weil zu den in der klassischen Architektur vorhandenen Fehlern die Fehler des 48V-Energiespeichers und des Gleichspannungswandler hinzukommen. Dabei erhöht der 48V-Energiespeicher die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung für jedes

Fahrprofil gleichermaßen. Auch hier dominieren die Fehler des Generators, wobei die Belastungen der Stator- und Läuferwicklung und somit deren Ausfallwahrscheinlichkeit stark positiv mit der Fehlerwahrscheinlichkeit über die verschiedenen Streckenprofile korreliert (Ausfallrate Statorwicklung zu Wahrscheinlichkeit $R_S = 0,99$ $P_S = 0$, Ausfallrate Läuferwicklung zu Wahrscheinlichkeit $R_L = 0,99$ $P_L = 0$).

6.2.4 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Kurzschlusses in einem nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher variiert in Abhängigkeit von der Art der jeweils fraglichen Komponente ohne Sicherheitsziel, wobei es teils deutliche Unterschiede gibt. In einer Architektur mit zwei Spannungsebenen ist die Rückwirkungsfreiheit der einzelnen Verbraucher nur bedingt gewährleistet. Für die folgende Auswertung wird angenommen, dass der Ausfall eines nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchers infolge eines Kurzschlusses zu einer kritischen Versorgungslage in der jeweiligen Spannungsebene führt. Hiervon sind sowohl sicherheitsrelevante als auch nicht sicherheitsrelevante Verbraucher betroffen. Auf der 48V-Spannungsebene führt ein Kurzschluss nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher zwar zu einem kurzzeitigen Ausfall der 48V-Spannungsebene, doch der Kurzschluss wird durch den Gleichspannungswandler isoliert. Auf die 12V-Spannungsebene wirkt sich der Fehler „Kurzschluss eines 48V-Verbrauchers“ daher wie ein offener Ausfall aus.

In Abbildung 6.21 (a) und (b) sind die normierten Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Ereignisses „Ausfall der elektrischen Energieversorgung“ in Gegenüberstellung zu den Ausfallraten der nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher auf der 12V- und der 48V-Spannungsebene dargestellt. Hierbei sind in (a) die normierten Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung in Abhängigkeit von der Ausfallrate des stellvertretend für die gesamte Gruppe betrachteten nicht sicherheitsrelevanten 12V-Verbrauchers für die klassische Architektur sowie für die Architektur mit zwei Spannungsebenen dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, weichen die Sensitivitätswerte für kleine Ausfallraten nur geringfügig voneinander ab. Mit zunehmender Ausfallrate nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher nimmt die Sensitivität der

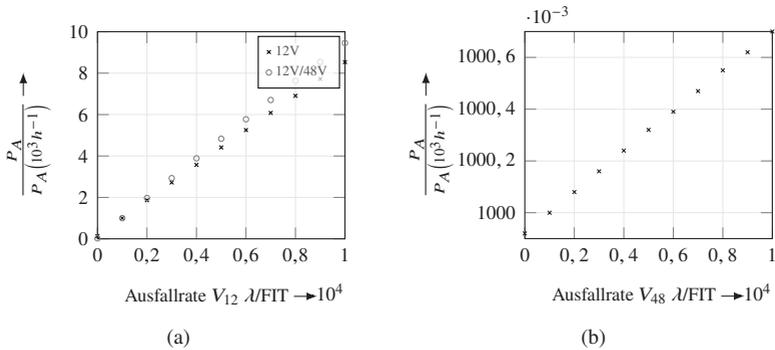


Abbildung 6.21: Normierte Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Ereignisses „Ausfall der elektrischen Energieversorgung“ in Gegenüberstellung zu den Ausfallraten der nicht sicherheitsrelevanten Verbraucher V

Architektur mit zwei Spannungsebenen gegenüber einem Kurzschluss in einem Verbraucher hingegen deutlich zu. Für kleine Ausfallraten entspricht der Kurvenverlauf einer ganzrationalen Funktion ersten Grades, welche angenähert werden kann mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 9,47 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{nsV} + 0,07. \quad (6.6)$$

Für Ausfallraten $> 1 \cdot 10^4$ FIT entspricht die dargestellte Regression nicht dem Kurvenverlauf und der Fehler zwischen Regression und dem tatsächlichen Kurvenverlauf nimmt zu. Zur Verringerung des Fehlers lässt sich der Verlauf für Ausfallraten $> 1 \cdot 10^4$ FIT mit einer ganzrationalen Funktion zweiten Grades annähern. Es gilt:

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = -2,7 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_{nsV}^2 + 9,36 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_{nsV} + 0,38. \quad (6.7)$$

Bezogen auf die Architektur mit zwei Spannungsebenen fällt die Ausfallwahrscheinlichkeit absolut betrachtet geringer aus, jedoch nimmt die Sensitivität der Architektur mit zwei Spannungsebenen gegenüber einem Kurzschluss in einem Verbraucher zu, da Kurzschlüsse im Generator durch den Gleichspannungswandler isoliert werden und so keine Auswirkungen auf die 12V-Spannungsebene haben.

Ein Kurzschluss des 48V-Verbrauchers hat zwar deutliche Auswirkungen auf die 48V-Spannungsebene, jedoch verhindert der Gleichspannungswandler auch hier, dass der Fehler Auswirkungen auf die 12V-Spannungsebene hat. Daher ist die Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen der 48V-Verbraucher vernachlässigbar gering (vgl. hierzu Abbildung 6.21 (b)).

6.2.5 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Batteriefehlern

Ein Ausfall des 12V-Energiespeichers beeinträchtigt auch in Architekturen mit zwei Spannungsebenen die Versorgung sicherheitskritischer Verbraucher. Zur Untersuchung der Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Batteriefehlern werden die folgenden Fehlerbilder des Energiespeichers analysiert:

- am Lebensdauerende (EOL) angelangt,
- tiefentladen,
- kurzgeschlossen und
- offen.

In Abbildung 6.22 sind die Variationen der einzelnen Fehlerverteilungen gegenüber der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung der vorgestellten Architekturen dargestellt. Wie zu sehen ist, korrelieren die Batteriefehler „am Lebensdauerende (EOL) angelangt“, „tiefentladen“ und „offen“ in keiner der beiden Architekturen mit der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Bezüglich des Fehlers „Batterie kurzgeschlossen“ besteht hingegen eine stark positive Korrelation. Der Kurvenverlauf entspricht einer ganzrationalen Funktion ersten Grades, deren Verlauf sich annähern lässt mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 10,47 \cdot 10^{-2} \cdot FA_{B_k} + 1,0051. \quad (6.8)$$

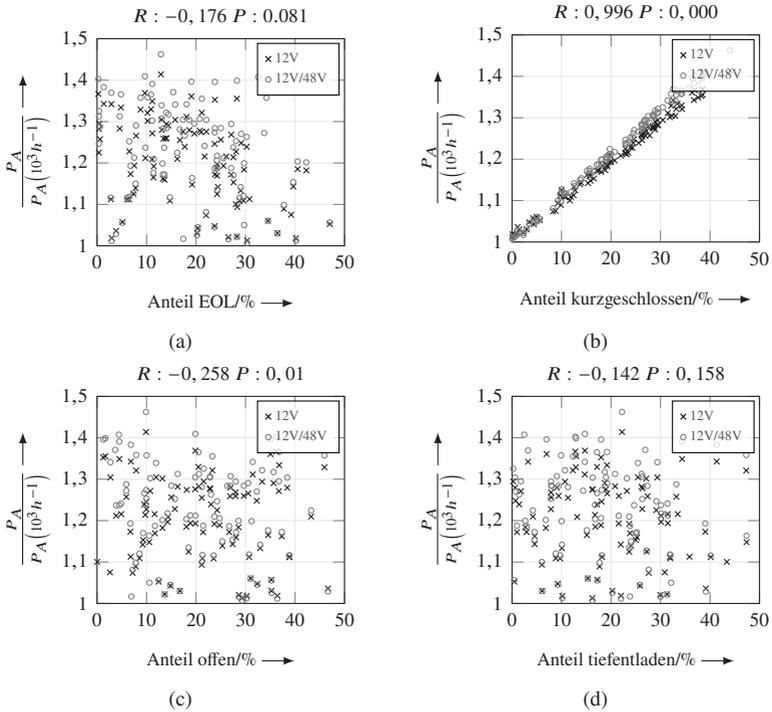


Abbildung 6.22: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den typischen Batteriefehlern „Lebensdauerende (EOL) angelangt“, „tiefentladen“, „kurzgeschlossen“ und „offen“ bezüglich der klassischen Architektur und der Architektur mit zwei Spannungsebenen

In Abbildung 6.22 (b) ist außerdem zu erkennen, dass die Sensitivität der elektrischen 12V-Energieversorgung gegenüber Kurzschlüssen des 12V-Energiespeichers geringfügig höher ist als im Fall einer klassischen Architektur. Dies lässt sich ebenfalls aus dem Vergleich der Steigungen der beiden Gleichungen 6.3 und 6.8 ableiten. Die Sensitivität der 12V-Spannungsebene gegenüber dem kurzgeschlossenen Ausfall des 12V-Energiespeichers ist im Fall einer Architektur mit zwei Spannungsebenen deshalb höher als im Fall einer klassischen Architektur, weil in den Fehler „Ausfall der elektrischen Energieversorgung“ weniger Basisfehler direkt einwirken. Hierdurch ist auch die Wahrnehmlich-

keit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung niedriger, die Sensitivität gegenüber den Basisfehlern „Verbraucher kurzgeschlossen“ bzw. „Batterie kurzgeschlossen“ jedoch erhöht.

6.2.6 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Generatorfehlern

Wie bereits mit Bezug auf die klassische Architektur diskutiert, ist auch hinsichtlich der Architektur mit zwei Spannungsebenen von Interesse, wie sich die Generatorfehler „offen“ und „kurzgeschlossen“ auf die Zuverlässigkeit der 12V-Spannungsebene auswirken. Den größten Fehleranteil und damit den größten Anteil an der Ausfallwahrscheinlichkeit des Generators haben innerhalb des in dieser Arbeit verwendeten Generatormodells (vgl. Unterkapitel 5.3 die Fehler der Statorwicklungen und der Gleichrichtung. Daher wird im Folgenden untersucht, wie sich verschiedene Variationen der Verteilungen von Fehlern des Generators auf die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung auswirken. In den Abbildungen 6.23 und 6.24 sind die normierten Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung über die Fehlerverteilung der Statorwicklung dargestellt. Wie

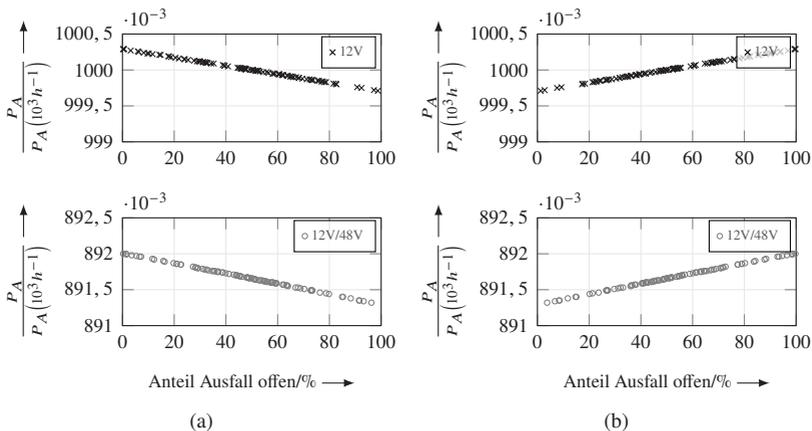


Abbildung 6.23: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung mit zwei Spannungsebenen gegenüber den Generatorfehlern „Statorwicklung offen“ und „Statorwicklung kurzgeschlossen“

bei der klassischen Architektur sind auch für die Architektur mit zwei Spannungsebenen Ausfälle aufgrund kurzgeschlossener Statorwicklungen für die elektrische Energieversorgung kritisch. Bei einem Vergleich der Architekturen zeigt sich, dass auch in der Architektur mit zwei Spannungsebenen eine stark positive Korrelation des Kurzschlusses der Statorwicklung mit der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung zu beobachten ist. Die lineare Regression der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung zur Verteilung des Fehlers „Statorwicklung kurzgeschlossen“ lässt sich mit dem Anteil der kurzgeschlossenen Statorwicklung am Gesamtfehler FA_{GS_k} angeben zu

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 7,13 \cdot 10^{-6} \cdot FA_{GS_k} + 0,891. \quad (6.9)$$

Im Vergleich zu den Kurzschlussfehlern nicht sicherheitsrelevanter 12V-Verbraucher und dem Kurzschluss der Batterie ist der Einfluss des Fehlers „Statorwicklung kurzgeschlossen“ auf die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ausfalls der elektrischen Energieversorgung in beiden Architekturen vernachlässigbar gering.

Die Gleichrichtung des 48V-Generators wird in Architekturen mit zwei Spannungsebenen über Leistungsschalter (z. B. Mosfets) realisiert. Dies führt zu geringeren Verlusten zu geringeren Ausfallwahrscheinlichkeiten als bei Diodengleichrichtungen. Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 6.13 zu erkennen. Im Fall der klassischen Architektur liegt die Steigung der normierten

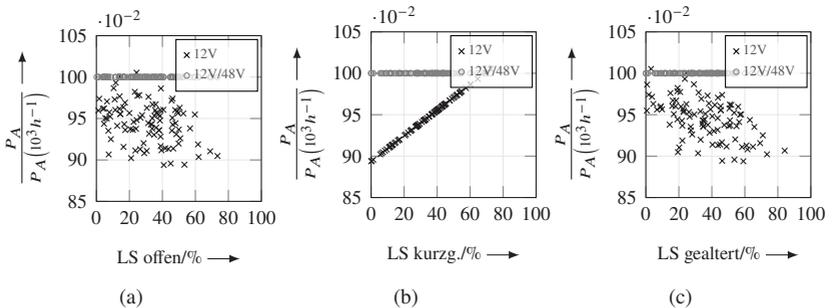


Abbildung 6.24: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den Generatorfehlern „Leistungsschalter offen“, „Leistungsschalter kurzgeschlossen“ und „Leistungsschalter gealtert“

Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung gegenüber der Zunahme der Wahrscheinlichkeit für Ausfälle der Generatorgleichrichtung infolge von Kurzschlüssen bei ca. $1,54 \cdot 10^{-3}$. Im Vergleich hierzu ist der Einfluss der Gleichrichtung auf die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung gering. Die Funktion der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung über den Anteil des Fehlers „Kurzschluss eines Leistungsschalters der Gleichrichtung“ FA_{GG_k} lässt sich angeben mit

$$\frac{P_A}{P_A(10^3 h^{-1})} = 5,1 \cdot 10^{-9} \cdot FA_{GG_k} + (1 - 5 \cdot 10^{-7}). \quad (6.10)$$

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass die Variation der Fehlerverteilung des Generators und dessen Gleichrichtung keinen signifikanten Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung besitzt.

6.2.7 Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Fehlern des Gleichspannungswandlers

Der Gleichspannungswandler koppelt die 12V- mit der 48V-Spannungsebene und versorgt im Wesentlichen die 12V-Verbraucher sowie den 12V-Energiespeicher mit Energie aus der 48V-Spannungsebene. Das für die vorliegende Untersuchung eingesetzte Modell aus Unterkapitel 5.4 ist das Modell eines mehrphasigen Wandlersystems, bei dem die Leistungsstufen aus mehreren parallel geschalteten Leistungsschaltern sowie Leistungs- und EMV-Filtern aufgebaut sind. Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung verändert, wenn die Fehlerverteilungen der Komponenten

- Leistungsschalter,
- Leistungsfilter und
- EMV-Filter

variiert werden.

Zusätzlich zu den wesentlichen Komponenten des GSWs werden in dem hier

verwendeten Modell auch horizontale Trennschalter berücksichtigt. Diese erfüllen, wenn innerhalb des GSWs ein Kurzschlussfehler auftritt, folgende Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.4.5):

1. Im Fehlerfall *Kurzschluss eines High-Side-Leistungsschalters* werden die horizontalen Trennschalter geöffnet, um die niederohmige Verbindung zwischen der 12V- und der 48V-Spannungsebene zu verhindern.
2. Im Fehlerfall *Kurzschluss eines Low-Side-Leistungsschalters* werden die horizontalen Trennschalter geöffnet, um die niederohmige Verbindung zwischen dem 12V- und dem 0V-(GND)-Potential zu verhindern.
3. Im Fehlerfall *Kurzschluss eines Leistungsfilters* werden die horizontalen Trennschalter geöffnet, um die niederohmige Verbindung zwischen der 12V- und der 48V-Spannungsebene zu verhindern.
4. Im Fehlerfall *Kurzschluss eines EMV-Filters* werden die horizontalen Trennschalter geöffnet, um die niederohmige Verbindung zwischen dem 12V- und dem 0V-(GND)-Potential zu verhindern.

Da alle Fehlerfälle auf eine der genannten Weisen abgesichert sind, führt der Kurzschluss eines Bauelements der fraglichen Komponenten in keinem Fall zu einem Ausfall der 12V-Spannungsebene. Im Allgemeinen gilt, dass alle internen Kurzschlussfehler des GSWs, die durch Fehler im seriellen Sicherheitstrennschalter bedingt sind (dessen Funktion in der Verhinderung eines Kurzschlusses zwischen der niederohmigen HV- und LV-Verbindung besteht), zu einem offen ausgefallenen GSW führen. Somit wird die Wahrscheinlichkeit für einen internen GSW-Kurzschluss mathematisch als Teil der Wahrscheinlichkeit für einen offenen Ausfall des GSWs behandelt.

Zur Untersuchung der Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Fehlern in den Komponenten des GSWs werden im Folgenden die Fehlerverteilungen der oben genannten Komponenten Leistungsschalter, Leistungsfilter und EMV-Filter variiert. Im Automobilsektor werden sowohl in der 12V- als auch in der 48V-Spannungsebene als Leistungsschalter Mosfets eingesetzt. Mosfets können

- offen,
- kurzgeschlossen oder
- mit Parameterveränderung ausfallen.

Zur Untersuchung der Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber diesen Fehlern wurde die Verteilung der hier genannten Fehlerfälle variiert. Das Ergebnis dieser Parametervariation ist in Abbildung 6.25 dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, nimmt mit Zunahme der Fehlerarten „offen“ und

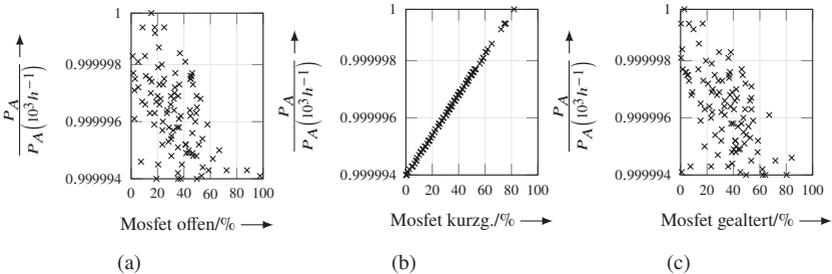


Abbildung 6.25: Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber den Fehlern der Leistungsstufe des Gleichspannungswandlers, mit den Einfachfehlern Mosfet fällt (a) offen, (b) kurzgeschlossen und (c) mit Parameterveränderung aus

„gealtert“ die normierte Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung leicht ab. Es gibt jedoch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dieser Abnahme der Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung und der Verringerung des Parameterwerts für „Mosfet offen bzw. gealtert“. Der Verlauf der normierten Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung korreliert hingegen stark positiv mit der Zunahme des Fehlers „kurzgeschlossen“. Die lineare Regression der normierten Wahrscheinlichkeit über den Anteil des Fehlers „Mosfet kurzgeschlossen“ FA_{GLS_k} lässt sich angeben mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 7,1 \cdot 10^{-8} \cdot FA_{GLS_k} + (1 - 7 \cdot 10^{-6}). \quad (6.11)$$

Aus Gleichung 6.11 lässt sich entnehmen, dass die Fehlerverteilung der Leistungsschalter keinen signifikanten Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung hat.

Die Leistungs- und EMV-Filter können

- offen oder
- kurzgeschlossen

ausfallen. Auch anhand der Variationen der Fehlerverteilungen der Leistungs- und EMV-Filter lässt sich kein wesentlicher Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung beobachten. Bei beiden Komponenten korreliert die Zunahme des Fehlers „kurzgeschlossen“ stark positiv mit der normierten Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung. Die Funktion der Regression für die normierte Wahrscheinlichkeit über der Zunahme des Anteils von Kurzschlussfehlern der Leistungsfiler FA_{GLE_k} lässt sich angeben mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot FA_{GLE_k} + (1 - 2 \cdot 10^{-7}). \quad (6.12)$$

Bei einer Zunahme des Fehleranteils „EMV-Filter kurzgeschlossen“ FA_{GEM_k} nimmt die normierte Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung nicht wesentlich zu. Die Funktion der Regression mit den simulierten Datenpunkten lässt sich angeben mit

$$\frac{P_A}{P_A (10^3 h^{-1})} = 1,31 \cdot 10^{-8} \cdot FA_{GEM_k} + (1 - 4 \cdot 10^{-8}). \quad (6.13)$$

Hierbei sind die Parameter FA_{GLE_k} der Fehleranteil von Kurzschlussfehlern eines Leistungsschalters und FA_{GEM_k} die Fehleranteile der Kurzschlussfehler des EMV-Filters.

6.3 Zusammenfassung: Anwendung und Auswertung der Methode

In den beiden vorangegangenen Unterkapiteln wurden anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Methode zwei Arten von Architekturen für die elektrische Energieversorgung in Kraftfahrzeugen, die klassische Architektur sowie die Architektur mit zwei Spannungsebenen und einem Gleichspannungswandler, im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit untersucht. Die Grundlage dieser abstrahierten, modellbasierten Zuverlässigkeitsbewertung bilden die in Kapitel 5 entwickelten Modelle für die in diesen Architekturen verbauten Komponenten. Ziel der Methode ist es, in frühen Entwicklungsphasen der automobilen Vorentwicklung Bewertungen der Zuverlässigkeit der beiden Arten von Ar-

chitekturen durchzuführen. Zu diesem Zweck werden die zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Schritte durchgeführt, welche an dieser Stelle noch einmal abschließend zusammengefasst werden sollen:

1. Definition der Architektur und Auswahl der Komponentenmodelle
2. Festlegung des Fahrprofils bzw. der Belastungsprofile
3. Iterative Berechnung der physikalischen Größen und Ausfallraten
4. Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Hauptereignisse der jeweiligen Komponentenfehlerbäume
5. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der Hauptereignisse der Systemfehlerbäume
6. Auswertung der berechneten Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der Hauptereignisse
7. Sensitivitätsanalyse des Einflusses der Veränderung einzelner Fehlerverteilungen und der Ausfallraten nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher auf die Hauptereignisse der zu untersuchenden Fehlerbäume

In den beiden vorangegangenen Unterkapiteln wurden die hier aufgelisteten Schritte zunächst am Beispiel der klassischen elektrischen Energieversorgung durchgeführt und daraufhin auch auf eine elektrische Energieversorgungsarchitektur mit zwei Spannungsebenen angewendet. Dabei konnte gezeigt werden, dass es in Architekturen mit einer zweiten Spannungsebene geringfügig seltener zu Ausfällen der elektrischen Energieversorgung kommt, sprich, dass diese Architektur eine geringfügig höhere Zuverlässigkeit aufweist (vgl. Abschnitt 6.2.3.)

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung primär von der Belastung der Komponenten der jeweiligen Teilsysteme abhängt, den Energiespeicher ausgenommen. Den größten Einfluss haben die Fehler des Generators und des Energiespeichers (Blei-Säure-Batterie).

In den gegenwärtig zum Einsatz kommenden Serienarchitekturen werden in der elektrischen Energieversorgung sowohl sicherheitsrelevante als auch nicht sicherheitsrelevante Verbraucher über gemeinsame Versorgungspfade gespeist. Diesbezüglich wird angenommen, dass sicherheitsrelevante Verbraucher die Rückwirkungsfreiheit mit der ASIL-Integrität der eigenen Versorgungsanfor-

derung erfüllen. Deshalb geht im Fehlerfall nur von nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern ein Risiko aus. Sowohl für klassische als auch für Architekturen mit zwei Spannungsebenen konnte gezeigt werden, dass die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung für sicherheitsrelevante Verbraucher wesentlich von den Ausfallraten nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher abhängt. So nimmt bei einer Zunahme der Ausfallraten nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher auch die Ausfallwahrscheinlichkeit der elektrischen Energieversorgung deutlich zu (vgl. Abschnitt 6.2.4).

Anhand der hier entwickelten modellbasierten Zuverlässigkeitsbewertung konnte zusätzlich auch die Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber der Veränderung einzelner Parameter untersucht werden. Hierzu wurde für die verschiedenen möglichen Fälle die Sensitivität der elektrischen Energieversorgung gegenüber Veränderungen in den Fehlerverteilungen der jeweiligen Komponenten untersucht (vgl. die Abschnitte 6.2.5 bis 6.2.7). Da die Grundwahrscheinlichkeit eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung bei einer Veränderung der Fehlerverteilungen in Summe gleich bleibt, konnte untersucht werden, welche Fehler in welchen Komponenten in welcher Weise und in welchem Ausmaß die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung beeinflussen. Diesbezüglich sind in Tabelle 6.2 die Steigungen der jeweiligen Regressionen sortiert gelistet. Aus der Reihenfolge der Steigungen

Architektur	Komponente	Fehler	Steigung
12V/48V	Batterie	Kurzschluss	1,05E-01
12V	Batterie	Kurzschluss	9,31E-02
12V	Generator Gleichrichtung	Kurzschluss	1,54E-03
12V/48V	12V-Verbraucher	Kurzschluss	9,47E-04
12V	12V-Verbraucher	Kurzschluss	8,40E-04
12V/48V	Generator Statorwicklung	Kurzschluss	7,13E-06
12V	Generator Statorwicklung	Kurzschluss	5,89E-06
12V/48V	Gleichspannungswandler Mosfet	Kurzschluss	7,10E-08
12V/48V	Gleichspannungswandler EMV-Filter	Kurzschluss	1,31E-08
12V/48V	Gleichspannungswandler LE-Filter	Kurzschluss	1,08E-08
12V/48V	Generator Gleichrichtung	Kurzschluss	5,10E-09

Tabelle 6.2: Steigungen der auf die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung normierten Regressionen zu den untersuchten Komponentenfehlern (absteigend nach Größe sortiert)

kann abgeleitet werden, dass der Kurzschlussfehler des 12V-Energiespeichers

in beiden Architekturen den größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung besitzt. Einen ebenfalls deutlichen Einfluss hat auch der Fehler „Kurzschluss der Generatorgleichrichtung“. Die Kurzschlussfehler der Leistungshalbleiter des Gleichspannungswandlers haben hingegen einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung.

Angesichts der in Abschnitt 6.2.3 ermittelten Wahrscheinlichkeiten werden die Unterschiede in der Zuverlässigkeit der jeweiligen Architekturen ersichtlich. Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall der elektrischen Energieversorgung auf der 12V-Spannungsebene nach 8000 Betriebsstunden beträgt im Falle der

- klassischen Architektur 0,91 Prozent und
- im Falle der Architektur mit zwei Spannungsebenen 0,82 Prozent.

Für eine abschließende Bewertung der berechneten Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung werden diese nachfolgend, umgerechnet auf eine Betriebsstunde, mit den Grenzwerten aus Tabelle 2.1 verglichen. In Abbildung 6.26 sind die Grenzwertbereiche aus der ISO 26262 und der IEC 61508 sowie die in der vorliegenden Arbeit berechneten Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung bezüglich beider Architekturen für die bekannten Fahrprofile (vgl. Tabelle 6.1) nach einer Betriebsstunde dargestellt. Die Ausfallrate von nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern wurde von 1000 FIT (V_{1000}) auf 1 FIT (V_1) reduziert. Dabei wurde deutlich, dass im Falle einer hohen Fehlerwahrscheinlichkeit nicht sicherheitsrelevanter Verbraucher (V_{1000}) keine der beiden Architekturen zur Versorgung hochautomatisierter Assistenzsysteme geeignet ist. Denn laut der in Tabelle 4.1 durchgeführten Ableitung von Sicherheitszielen müssen sicherheitsrelevante Assistenzsysteme mit der Integrität ASIL-D versorgt werden, wohingegen hier nur eine ASIL-B-Integrität erreicht werden kann.

Die Zuverlässigkeit beider Architekturen verbessert sich deutlich, wenn angenommen werden kann, dass jeder relevante Fehler eines nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchers und dessen Zuleitung isoliert⁶ werden kann. Werden entsprechende Komponenten in die elektrische Energieversorgung eingeführt, kann zumindest die Architektur mit zwei Spannungsebenen eine zuverlässige

⁶ Eine solche Fehlerisolation kann z. B. durch den Austausch von Schmelzsicherungen gegen Leistungshalbleiter realisiert werden.

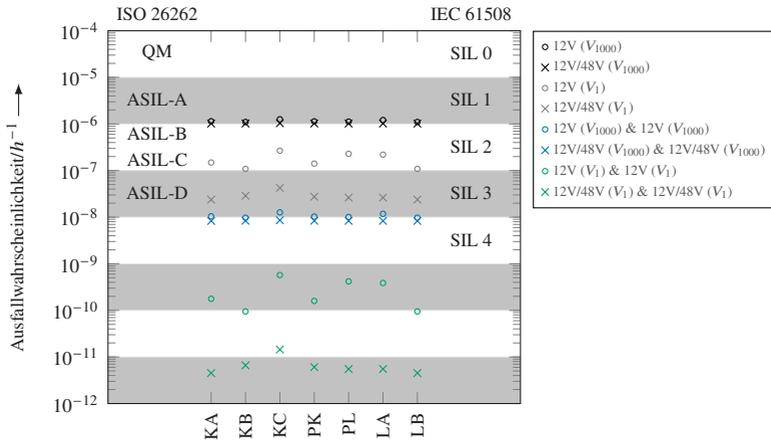


Abbildung 6.26: Vergleich der anhand der hier entwickelten Methode berechneten Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall der elektrischen Energieversorgung mit den Grenzwerten laut ISO 26262 und IEC 61508

Versorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher gewährleisten.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Zuverlässigkeit ist die Einführung von Redundanzen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Dies bedeutet, dass die sicherheitsrelevanten Verbraucher über zwei identische⁷, jedoch voneinander unabhängige elektrischen Energieversorgungssysteme mit Energie versorgt werden. Wie in Abbildung 6.26 deutlich zu erkennen ist, kann auf diese Weise bezüglich beider Architekturen eine erhebliche Verbesserung der Zuverlässigkeit erreicht werden.

Die Zuverlässigkeit kann noch weiter gesteigert werden, indem die beiden hier untersuchten Ansätze, also Fehlerisolation und Redundanz, miteinander kombiniert werden. Aus dieser Kombination ergeben sich sehr zuverlässige elektrische Energieversorgungssysteme.

⁷ Identisch bedeutet hierbei, dass es sich um identische Energiesysteme und in diesem Sinne um eine homogene Redundanz handelt. Um die Möglichkeit des Auftretens systematischer Fehler auszuschließen, wäre allerdings die Einführung inhomogener Redundanzen erforderlich, also die Verwendung von unterschiedlich konstruierten Energiesystemen (vgl. Abschnitt 2.3.2).

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die eine Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme auch im Rahmen der automobilen Vorentwicklung ermöglicht. Die bisher zur Verfügung stehenden Methoden waren zu diesem Zweck nur bedingt geeignet. Denn in dieser frühen Phase der Fahrzeugentwicklung sind (im Unterschied zur Serienentwicklung) nur unzureichende Entwicklungsdaten vorhanden. Das liegt zum einen daran, dass – der Natur der Vorentwicklung geschuldet – neue Komponenten nicht vollständig spezifiziert sind und dass auch bezüglich bereits ausgereifter Komponenten nicht immer vollständige empirische Daten vorhanden sind. Die hier vorgestellte Methode greift auf Daten aus Handbüchern sowie aus eigenen Untersuchungen des Autors [110], [108], [109] zurück, um die genannten Einschränkungen in der Datenlage zu kompensieren und es so auch im Rahmen der Vorentwicklung zu ermöglichen, die für die Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme erforderlichen Kenngrößen zu berechnen und für weitere Analysen zu nutzen. Zur Validierung der hier entwickelten Methode wurde diese beispielhaft auf das Gesamtsystem der automobilen elektrischen Energieversorgung hochautomatisierter Systeme angewendet.

In Kapitel 3 wurden zunächst die sich aus der eingangs beschriebenen Problematik ergebenden Zielfragestellungen für die Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Systeme in der automobilen Vorentwicklung hergeleitet. Diese lauten:

1. Welche Grundanforderungen bestehen aus rechtlicher und normativer Perspektive an die elektrische Energieversorgung sicherheitsrelevanter Verbraucher?
2. Kann die Zuverlässigkeit in der automobilen Vorentwicklung auf der Basis einer Kombination aus abstrakten Modellen zukünftiger Kom-

ponenten und Erfahrungswerten aus Felddaten und Studien bewertet werden?

3. Welche Faktoren beeinflussen die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung?

Anschließend wurden die wesentlichen Aspekte diskutiert und die Ergebnisse dieser Diskussion zusammengefasst. Die zentrale Erkenntnis lautet, dass die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems im Kontext der vorliegenden Arbeit, also der elektrischen Energieversorgung, maßgeblich davon abhängt, wie häufig die dieses System konstituierenden Komponenten fehlerhaft werden und dadurch einzelne sicherheitsrelevante Funktionen sowie die Zuverlässigkeit des Systems im Gesamten beeinträchtigen. Damit war es möglich, die Zielstellung für die hier zu entwickelnde Methode für die Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme im Rahmen der automobilen Vorentwicklung zu formulieren: Es musste ein Weg gefunden werden, um die Ausfallraten bzw. die daraus zu berechnenden Fehlerwahrscheinlichkeiten aller Komponenten des jeweils zu untersuchenden technischen Systems zu ermitteln.

Im Zuge der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass bezüglich der hier betrachteten Komponenten ein massives Datendefizit besteht. Ausfallraten der fraglichen Komponenten oder zumindest Rohdaten, aus denen sich diese ermitteln ließen, finden sich in der Literatur bzw. bei den Herstellern entweder gar nicht oder wenn, dann nur in unzureichender Menge und Qualität. Die primäre Ursache hierfür ist, dass die entsprechenden Daten meist erst gar nicht erhoben werden (oder wenn, dann nicht nach Maßgabe wissenschaftlicher Methoden und mit hinreichender Sorgfalt bezüglich solcher Aspekte wie Vollständigkeit und Vergleichbarkeit). Hinzu kommt, dass Daten, wenn sie vorhanden sind, nur selten vollständig publiziert werden. Vor diesem Hintergrund greift die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme auf zwei alternative Datenquellen zurück: zum einen auf Komponentenmodelle und zum anderen auf eigene Untersuchungen, in denen Felddaten erhoben wurden, auf deren Basis die erforderlichen Ausfallraten berechnet werden können. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode basiert also sowohl auf empirischen Daten als auch auf modellbasierten Berechnungen.

Wie oben erwähnt, wurde die hier entwickelte und vorgestellte Methode zur Validierung auf die automobilen elektrische Energieversorgung angewendet. Dieses System wird aufgrund des nachhaltigen Trends zur Realisierung immer

höherer Automatisierungsgrade in der Längs- und Querverführung von Kraftfahrzeugen immer komplizierter, da eine stetig zunehmende Anzahl von Assistenzsystemen und entsprechend erforderlichen sicherheitsrelevanten Funktionen mit elektrischer Energie versorgt werden müssen. In Kapitel 4 wurden daher die Funktionen der verschiedenen heute eingesetzten Assistenzsysteme sowie die sich daraus ergebenden spezifischen Anforderungen an die Versorgungsspannung und die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung hergeleitet und diskutiert.

Zusätzlich war es erforderlich, die für Seriensysteme notwendig einzuhaltenen Grenzwerte abzuleiten. Dies geschah im Rahmen der in Unterkapitel 4.6 durchgeführten Risiko- und Gefahrenanalyse.

Zur Durchführung einer reliablen Zuverlässigkeitsanalyse sind reale Belastungsdaten der einzelnen Komponenten erforderlich. Zur Generierung dieser Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher bei variierenden Umweltbedingungen und mit unterschiedlichen Fahrzeugen Fahrversuche auf drei verschiedenen Streckenarten (Kurz-, Lang- und Pendlerstrecke) durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse dieser Versuche findet sich in Unterkapitel 5.1. Die hier entwickelte Methode ermöglicht Zuverlässigkeitsbewertungen technischer Gesamtsysteme auf der Basis von Zuverlässigkeitsbewertungen der diese Systeme konstituierenden Komponenten. Für die Zuverlässigkeitsbewertung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten wesentlichen Komponenten der elektrischen Energieversorgung, nämlich der Blei-Säure-Batterie, dem Generator und dem Gleichspannungswandler, wurden zwei verschiedene Arten von Zuverlässigkeitsmodellen verwendet: Bezüglich der Blei-Säure-Batterie kam ein rein stochastisches, datengetriebenes Modell zum Einsatz. Die Analysen für die Zuverlässigkeitsbewertungen des Generators und des Gleichspannungswandlers wurden hingegen mithilfe physikalischer Modelle durchgeführt, die ihrerseits auf Informationen aus den Handbüchern FIDES [48], HDBK-217Plus [130] und SN29500 [151] basieren.

Das Modell der Blei-Säure-Batterie wurde auf der Basis eigener Auswertungen von Felddaten von 436.357 Blei-Säure-Batterien erstellt und in Unterkapitel 5.2 vorgestellt. Wie gezeigt werden konnte, ist eine parametrische Weibull-Verteilung die am besten geeignete mathematische Annäherung an die tatsächliche Verteilung der empirisch beobachteten Ausfälle von Blei-Säure-Batterien. Die mittels Partikelschwarmoptimierung gesuchten und gefundenen Parameter sind in Tabelle 5.4 gelistet.

Das Modell des Generators setzt sich aus dem physikalischen Modell des Generators als einer zentralen Komponente der elektrischen Energieversorgung und

dem Modell zur Durchführung der Zuverlässigkeitsbewertung zusammen. Das physikalische Modell des Generators besteht dabei aus den Gleichungen 5.16 bis 5.27 und findet sich zusammen mit Detailbeschreibungen der einzelnen Fehlerbilder des in dieser Arbeit modellierten Klauenpolgenerators in den Abschnitten 5.3.2 und 5.3.1. Das Zuverlässigkeitsmodell für den Generator besteht aus den Gleichungen 5.29 bis 5.39 und findet sich in Abschnitt 5.3.5. Der Vorteil dieser Auftrennung und der objektorientierten Realisierung mit Matlab liegt darin, dass dieses Vorgehen eine Modularisierung zulässt: Um verschiedene Komponenten zu analysieren, müssen nur die jeweiligen physikalischen Modelle variiert werden. Das Zuverlässigkeitsmodell hingegen ist allgemeingültig und kann somit für die Analyse verschiedener Komponenten beibehalten werden.

Für einen in Serie eingesetzten Gleichspannungswandler wurden in Unterkapitel 5.4 eine exemplarische Architektur und deren Modellbildung anhand physikalischer Grundgleichungen für leistungselektronische Komponenten vorgestellt und mittels eigens durchgeführter Messungen validiert. In Kapitel 6 wurde die hier entwickelte Methode schließlich auf ein elektrisches Energieversorgungssystem mit klassischer Architektur sowie auf ein System mit zwei Spannungsebenen und einem bidirektionalen Gleichspannungswandler mit vier gekoppelten Phasen angewendet. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte anhand eines Abgleichs mit den Ergebnissen für die Temperatur- und Verlustleistungsmessungen eines Gleichspannungswandlers aus der Serienproduktion (vgl. Unterkapitel 5.4).

Das Hauptergebnis der vorliegenden Arbeit lautet, dass es anhand der hier entwickelten Methode auch in der Vorentwicklung – also trotz einer deutlich schlechteren Datenlage – möglich ist, Zuverlässigkeitsbewertungen durchzuführen. Konkret konnten durch die Anwendung der Methode drei Dinge gezeigt werden:

1. Klassische elektrische Energieversorgungssysteme sind zur Versorgung von Verbrauchern hochautomatisierter Assistenzsysteme nicht geeignet.
2. Fehler in nicht sicherheitsrelevanten Verbrauchern müssen von der elektrischen Energieversorgung für sicherheitsrelevante Verbraucher isoliert werden.
3. Die maximal erreichbare Zuverlässigkeit einer elektrischen Energieversorgung mit voller Redundanz und ohne Fehlerisolation nicht sicher-

heitsrelevanter Verbraucher liegt laut der hier entwickelten Methode bei ASIL-D.

Gemessen an den in Unterkapitel 4.4 abgeleiteten Anforderungen und Sicherheitszielen kann also eine hinreichend zuverlässige Versorgung gewährleistet werden.

7.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme in der automobilen Vorentwicklung lässt eine breite und domänenunabhängige Anwendung zu. Aufgrund der hier durchgeführten Methodenentwicklung und parallelen Untersuchung in Bezug auf die automobilen elektrische Energieversorgung konnte eine wesentliche Teilkomponente der elektrischen Energieversorgung, nämlich die Vernetzung, nicht vollständig in die vorliegende Untersuchung einbezogen werden. Der Grund hierfür liegt in der Komplexität der Vernetzung, die von Fahrzeughersteller zu -hersteller variiert und entsprechend in jeder Fahrzeugarchitektur anders realisiert ist. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte modellbasierte Berechnungsbibliothek bietet jedoch die Möglichkeit einer einfachen Anbindung weiterer Bibliotheken. Auf diese Weise können auch jene Komponenten der Vernetzung (wie z. B. Leitungen, Splices, Verteilstellen und Hauptverteiler) mit in die Modellberechnungen aufgenommen werden, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden konnten. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass ein Modul für automobilspezifische Leistungsrelais bereits in das hier entwickelte Modell integriert ist.

Für weitere Untersuchungen ist also von Interesse, welchen Einfluss die verschiedenen Komponenten der Vernetzung bzw. dieses Teilsystem als Ganzes auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung hat. Zusätzlich kann für zukünftige Arbeiten über die Zuverlässigkeit der automobilen elektrischen Energieversorgung von Interesse sein, welche Fehler der Vernetzungskomponenten den Ausfall der elektrischen Energieversorgung für sicherheitsrelevante Verbraucher beeinflussen.

Weiteres Forschungspotential

Wie in der vorliegenden Untersuchung herausgearbeitet wurde, besteht eines der größten Probleme bei der Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung in der automobilen Vorentwicklung in der mangelnden Verfügbarkeit von Zuverlässigkeitskennzahlen zu den in der automobilen elektrischen Energieversorgung verwendeten Komponenten. In der Serienentwicklung werden als Datenquellen für die Ausfallraten dieser Komponenten häufig Standards wie die SN-29500 genutzt. Weder die dort behandelten Komponenten noch die daraus parametrisierten Modelle haben aber einen Bezug zu den hier untersuchten automobilspezifischen Komponenten. Zusätzlich werden einige Komponenten wie z. B. die Blei-Säure-Batterie in den aktuell in der Literatur zur Verfügung stehenden Handbüchern nicht bezüglich deren Zuverlässigkeit beschrieben. Durch die Einbeziehung von eigenen Daten aus Werkstattaufzeichnungen zum Austausch fehlerhafter Blei-Säure-Batterien wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwar versucht, zur Veröffentlichung von Ausfall- und Fehlerdaten beizutragen. Das Modell bildet aber offenkundig nicht alle Arten von Energiespeichern und sicher auch nicht alle Formen spezifischen Nutzungsverhaltens ab. Um ein umfassenderes Verständnis über das Zuverlässigkeitsverhalten der verschiedenen in der Praxis eingesetzten Energiespeicherarten zu gewinnen, sind also weiterführende Arbeiten auf der Basis anderer Datenquellen notwendig. Die Blei-Säure-Batterie z. B. wird in der Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Lithium-Ionen-Energiespeicher abgelöst. Das Zuverlässigkeitsverhalten dieser Energiespeicher ist im Feld noch nicht weitreichend untersucht. Stehen durch weitere Untersuchungen entsprechende Informationen zur Verfügung, führt dies in der Regel zu einem besseren Systemverständnis, was wiederum eine kosteneffiziente Systemoptimierung ermöglicht.

Zum aktuellen Zeitpunkt existiert bezüglich der in der automobilen elektrischen Energieversorgung verwendeten Komponenten kein allgemeingültiger Standard bzw. Datensatz mit Zuverlässigkeitskennzahlen aus Felddaten. Weiterführende Arbeiten könnten sich daher dem Aufbau eines zentralen Datenbanksystems widmen, in dem die konstruktionsbedingten Fehler und nutzungsbedingten Schäden aller Komponenten aller Hersteller dokumentiert werden und das auf dieser Grundlage unter Verwendung von Methoden wie der hier vorgestellten die automatisierte Berechnung von Zuverlässigkeitskennzahlen erlaubt. Würden zusätzlich auch physikalische Belastungsparameter aufge-

zeichnet, ließen sich auftretende Fehlerfälle präziser einordnen. In diesem Sinne wird empfohlen, einen einheitlichen Standard für die Zuverlässigkeitsbewertung automobiler Komponenten einzuführen, zumindest für Fahrzeuge mit hochautomatisierten Systemen. Mit den so gewonnenen Daten ließen sich neue Entwicklungen präziser spezifizieren und früher validieren. Auf diese Weise ließen sich Systeme zukünftig deutlich besser absichern.

A Anhang

A.1 Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke A3

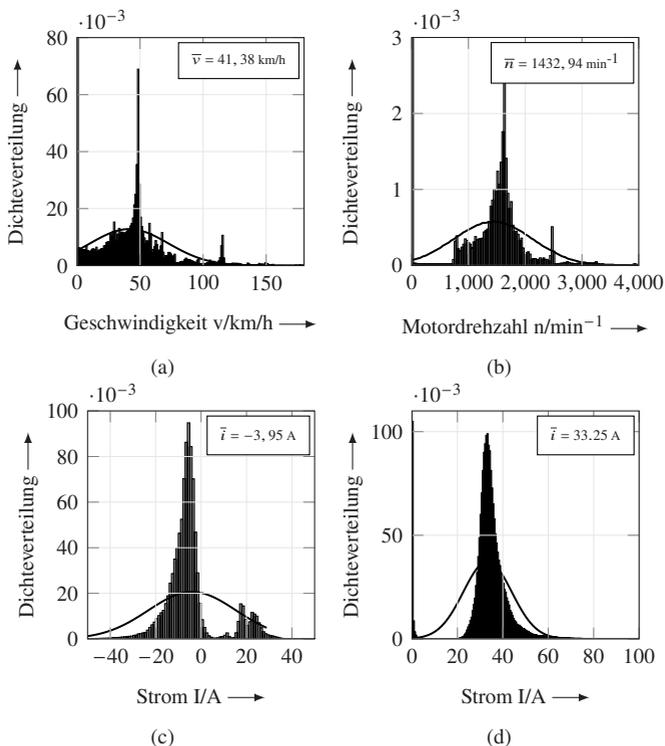


Abbildung A.1: AUDI A3 Gesamt Pendlerstrecke Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichteverteilung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

A.2 Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke A8

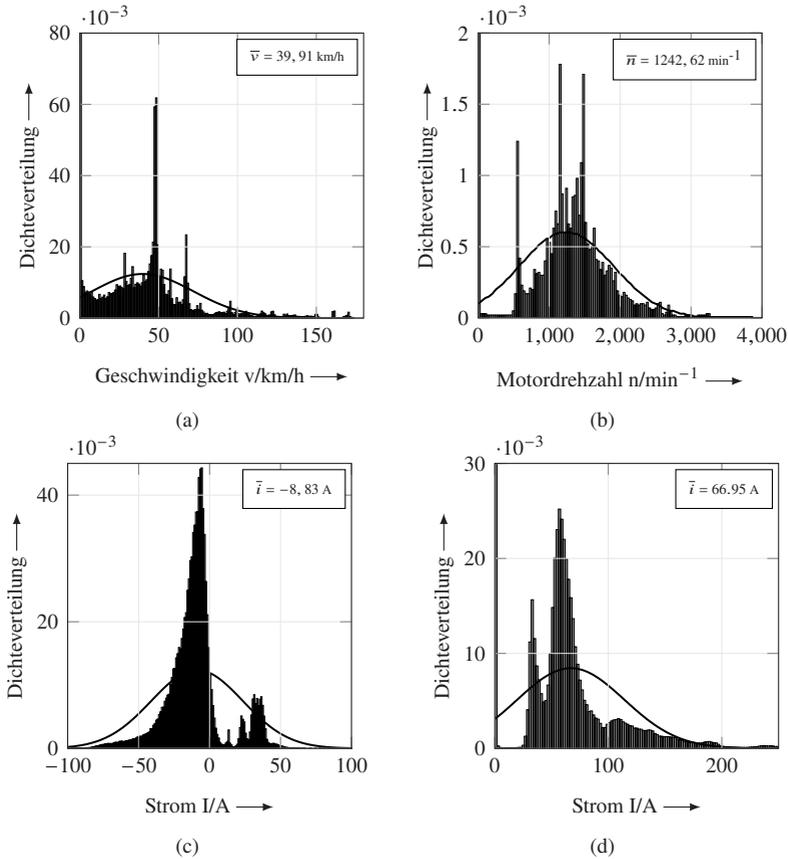


Abbildung A.2: Audi A8 Gesamt Pendlerstrecke Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichtevertelung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

A.3 Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke lang A3

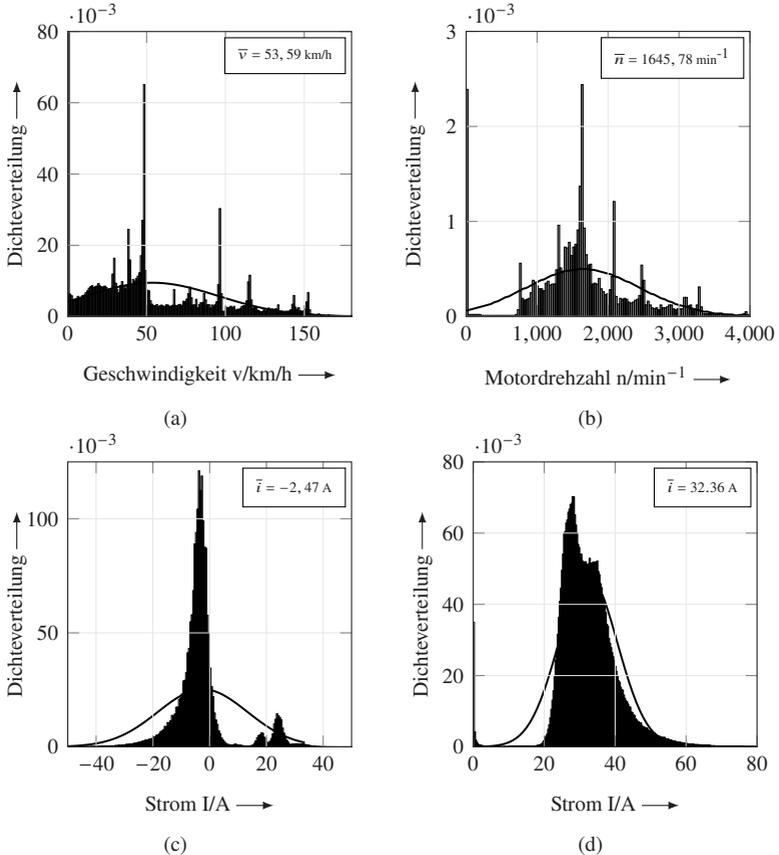


Abbildung A.3: Audi A3 Gesamt Pendlerstrecke lang Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichteverteilung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

A.4 Auswertung Fahrzyklus Pendlerstrecke lang A8

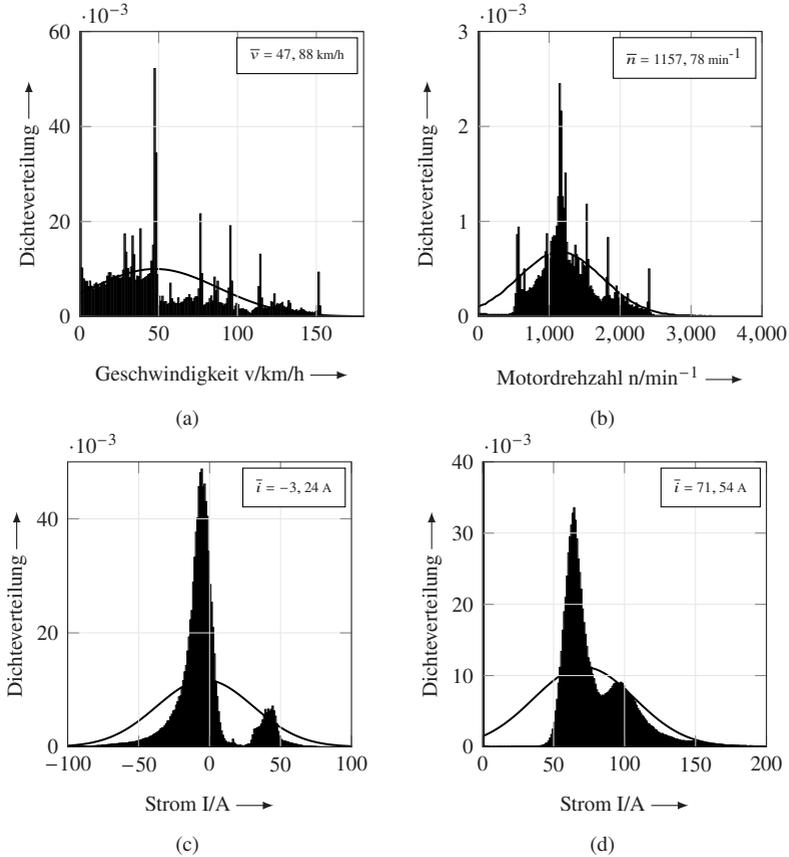


Abbildung A.4: Audi A8 Gesamt Pendlerstrecke lang Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichteverteilung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

A.5 Auswertung Fahrzyklus Langstrecke A3

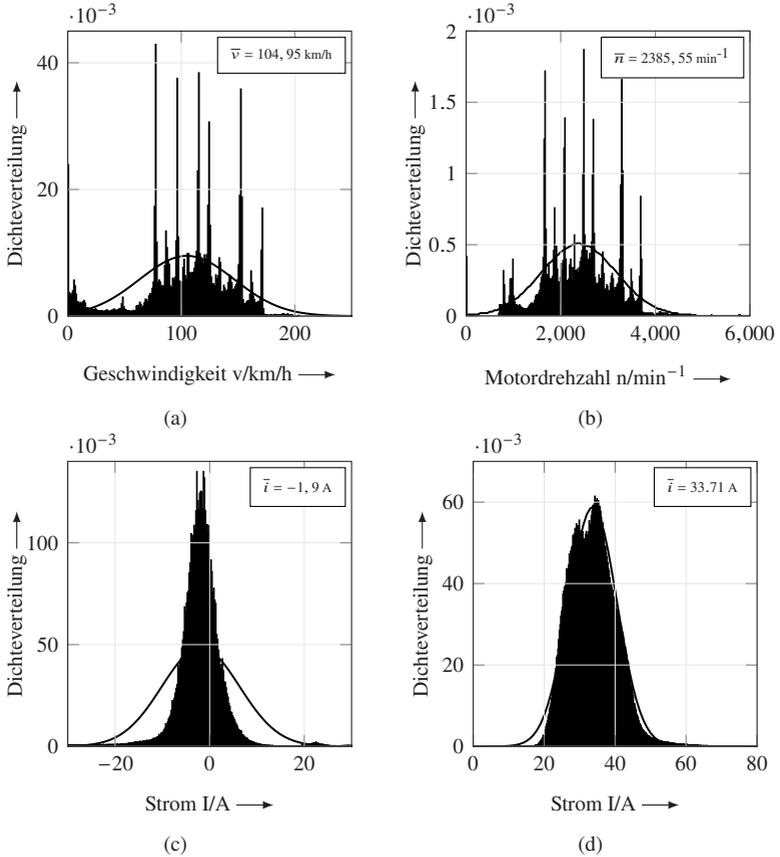


Abbildung A.5: Audi A3 Gesamt Langstrecke Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichteverteilung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

A.6 Auswertung Fahrzyklus Langstrecke A8

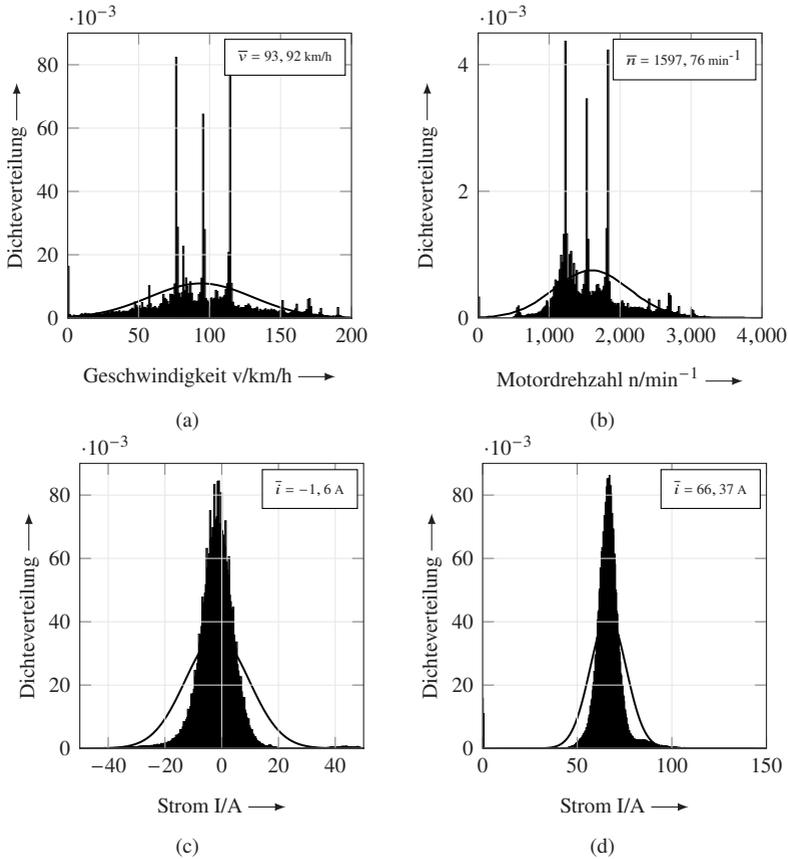


Abbildung A.6: Audi A8 Gesamt Langstrecke Geschwindigkeits- (a) und Motordrehzahlverlauf (c) während einer Messfahrt auf der Kurzstrecke. Die Dichteverteilung für die Geschwindigkeit in (b) und für die Motordrehzahl in (d).

Literaturverzeichnis

- [1] Abele, Marcus: *Modellierung und Bewertung hochzuverlässiger Energiebordnetz-Architekturen für sicherheitsrelevante Verbraucher in Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Kassel, 2008.
- [2] Abernethy, Robert B.: *The new Weibull handbook: Reliability & statistical analysis for predicting life, safety, survivability, risk, cost and warranty claims*. Gulf Pub. Co., North Palm Beach, Fla., Houston, 2005.
- [3] Albers, Joern und Koch, Ingo: *Reliability of Lead-Acid Batteries*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Seiten 299–306, Weissach, 2016.
- [4] Audi AG, BMW AG, Daimler Chrysler AG, Porsche AG und Volkswagen AG: *Globale Märkte: Abschlussbericht des AK Kundenkollektive*. VDA Bericht, Weissach, 2006.
- [5] Badedda, J., Huck, M., Sauer, D.U., Kabzinski, J. und Wirth, J.: *16 - Basics of lead-acid battery modelling and simulation*. In: Garcke, Jürgen, Karden, Eckhard, Moseley, Patrick T. und Rand, David A.J. (Herausgeber): *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*, Seiten 463–507, Amsterdam, 2017. Elsevier Ltd.
- [6] Bapp, Falco K., Dörr, Tobias, Sandmann, Timo, Schade, Florian und Becker, Juergen: *Towards Fail-Operational Systems on Controller Level Using Heterogeneous Multicore SoC Architectures and Hardware Support*. In: *The Safety of Controllers, Sensors, and Actuators*, Seiten 31–54, Detroit, USA, 2020. SAE World Congress Experience.
- [7] Barthlott, Jürgen, Horn, Matthias und Müller, Norbert: *14V powernets for the next generation microhybrid vehicles*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Seiten 309–331, Renningen, 2014.
- [8] Bechtold, Lori E.: *Industry consensus approach to physics of failure in reliability prediction*. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Seiten 1–4, San Jose, 2010.

- [9] Bengler, Klaus, Dietmayer, Klaus, Farber, Berthold, Maurer, Markus, Stiller, Christoph und Winner, Hermann: *Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 6(4):6–22, 2014.
- [10] Berger, Mario: *Test- und Prüfverfahren in der Elektronikfertigung: Vom Arbeitsprinzip bis Design-for-Test-Regeln*. VDE-Verlag, Berlin, 2012.
- [11] Berndt, D., Meissner, E. und Rusch, W.: *Aging effects in valve-regulated lead-acid batteries*. In: *Proceedings of Intelec 93: 15th International Telecommunications Energy Conference*, Band 2, Seiten 139–145, Paris, 1993.
- [12] Beuth Verlag: *IEC TR-62380 Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*. Berlin, 2004.
- [13] Beuth Verlag: *DIN EN 61025: Fehlzustandsbaumanalyse*. Berlin, 2007.
- [14] Beuth Verlag: *DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*, 2010.
- [15] Beuth Verlag: *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse: Methode, Organisation, Bewertungskatalog, DV-unterstützte FMEA-Erstellung, Kosten-Nutzen, Produkthaftung und FMEA*. Berlin, Wien und Zürich, 2012.
- [16] Beuth Verlag: *DIN EN 60812: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. Berlin, 2015.
- [17] Birolini, Alessandro: *Reliability Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [18] Birolini, Alessandro: *Reliability Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [19] BMW AG: *GS 95024-2 Elektrische und elektronische Komponenten in Kraftfahrzeugen: Elektrische Anforderungen und Prüfungen in 12-V-Energiebordnetzen*. Werksnorm, München, 2021.
- [20] Boglietti, Aldo, Cavagnino, Andrea und Staton, David: *Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models*. IEEE Transactions on Industry Applications, 44(4):1150–1159, 2008.
- [21] Boglietti, Aldo, Cavagnino, Andrea, Staton, David, Shanel, Martin, Mueller, Markus und Mejuto, Carlos: *Evolution and Modern Approaches*

- for *Thermal Analysis of Electrical Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3):871–882, 2009.
- [22] Bondavalli, A. und Simoncini, L.: *Failure classification with respect to detection*. In: *Proceedings. Second IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems*, Seiten 47–53, Cairo, Egypt, 1990.
- [23] Börcsök, Josef: *Comparison of PFD calculation*. HIMA Paul Hildebrandt GmbH und Co KG, Mannheim, 2005.
- [24] Börcsök, Josef und Holub, Peter: *Different approaches for probability of common cause failure on demand calculations for safety integrity systems*. In: *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Seiten 1052–1057, Doha, Qatar, 2008.
- [25] Börcsök, Josef und Krini, Ossmane: *Principle software reliability analysis with different failure rate models*. In: *XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, Seiten 1–6, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2009.
- [26] Boring, Ronald L.: *Fifty Years of THERP and Human Reliability Analysis*. In: *Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM11)*, Seiten 1–11, Helsinki, Finland, 2012.
- [27] Brisset, S., Hecquet, M. und Brochet, P.: *Thermal modelling of a car alternator with claw poles using 2D finite element software*. The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 20(1):205–215, 2001.
- [28] Büchner, Stefan: *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Dresden, 2008.
- [29] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Verordnung über die EG-Genehmigung für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge (EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung - EG-FGV)*, 2011. https://www.gesetze-im-internet.de/eg-fgv_2011/BJNR012600011.html, besucht: 4.12.2022.
- [30] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)*, 2019. https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/BJNR067910012.html, besucht: 4.12.2022.
- [31] Bundesrepublik Deutschland: *Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte: ProdHaftG*. Bundesgesetz, Berlin, 1989. <https://www.>

- gesetze-im-internet.de/prodhaftg/BJNR021980989.html, besucht: 4.12.2022.
- [32] Bundesrepublik Deutschland: *Bürgerliches Gesetzbuch: BGB*, 2002. <https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/>, besucht: 4.12.2022.
- [33] Bundesrepublik Deutschland: *Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt: ProdSG*. Berlin, 2021. https://www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2021/, besucht: 4.12.2022.
- [34] Buretta, John D.: *The State of the Takata Airbag Recalls, Report of the Independent Monitor*, 2017. https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/the_state_of_the_takata_airbag_recalls-report_of_the_independent_monitor_112217_v3_tag.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [35] Burgess, Webb L.: *Valve Regulated Lead Acid battery float service life estimation using a Kalman filter*. In: *7th International Conference on Lead-Acid Batteries*, Seiten 16–21, Varna, Bulgarien, 2009.
- [36] Chiniforoosh, S., Davoudi, A., Alaeinovin, P. und Jatskevich, J.: *Dynamic modelling and characterisation of vehicular power system considering alternator iron core and rectifier losses*. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2(2):58–67, 2012.
- [37] Cugnet, Mikael, Laruelle, Stéphane, Grugeon, Sylvie, Sahut, Bernard, Sabatier, Jocelyn, Tarascon, Jean Marie und Oustaloup, Alain: *A Mathematical Model for the Simulation of New and Aged Automotive Lead-Acid Batteries*. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(12):A974, 2009.
- [38] Culpin, B. und Rand, D.A.J.: *Failure modes of lead/acid batteries*. *Journal of Power Sources*, 36(4):415–438, 1991.
- [39] Department of Defense: *MIL-STD-1629A Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. Virginia, 1980.
- [40] Department of Defense: *MIL-HDBK-217F Reliability Prediction Of Electronic Equipment*. Virginia, 1991.
- [41] Eberlin, Stefan und Hock, Barbara: *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [42] Ehiagwina, Frederick, Adewunmi, Olugbenga, Seluwa, Emmanuel, Kehinde, Olufemi und Sidiq, Nafiu: *A Comparative Overview of Electronic*

- Devices Reliability Prediction Methods-Applications Trends and Challenges*. In: *Majlesi Journal of Telecommunication Devices*, Band 5, Seiten 129–137, 2016.
- [43] Europäischen Union: *Regelung Nr. 13 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) – Einheitliche Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen [2016/194]*.
- [44] Europäischen Union: *Regelung Nr. 13-H der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen [2015/2364]*.
- [45] Europäischen Union: *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, 2007.
- [46] Europäischen Union: *Regelung Nr. 79 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage*, 2008.
- [47] Europäischen Union: *Regelung Nr. 131 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Notbremsassistentensystems (AEBS)*, 2014.
- [48] FIDES Group: *FIDES Reliability Methodology for Electronic Systems*, 2009. https://www.fides-reliability.org/en/system/files/guides/UTE_FIDES_Guide_2009_-_Edition_A%20-%20September%202010_english_version.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [49] Fischer, Hans-Martin und Korthauer, Reiner: *48-Volt-Bordnetz: Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität*. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Frankfurt am Main, 2015.
- [50] Follmer, Robert: *Mobilität in Deutschland: Ergebnisbericht*. ifas - Institut für Angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Bonn, 2004.
- [51] FORD Motor Company: *FMEA Handbook*. Dearborn, Michigan, 2011.
- [52] Foucher, B., Boullié, J., Meslet, B. und Das, D.: *A review of reliability prediction methods for electronic devices*. *Microelectronics Reliability*, 42(8):1155–1162, 2002.

- [53] Franz, Ulrich, Lorenz, Bernd, Remfrey, James, Schöneburg, Rodolfo und Kramer, Florian: *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.
- [54] Freedman, David und Diaconis, Persi: *On the histogram as a density estimator: L 2 theory*. Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete, 57(4):453–476, 1981.
- [55] Garche, Jürgen, Rand, David A. J., Karden, Eckhard und Moseley, Patrick T. (Herausgeber): *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. Elsevier Ltd, 2017.
- [56] Gasser, Tom M.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe; Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.5409013.01*, Band 83 der Reihe *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen F, Fahrzeugtechnik*. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, Bremerhaven, 2012.
- [57] Gehring, Rainer: *Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug*. Dissertation, München, 2013.
- [58] George Popov: *Diversity as Tool for Increasing Reliability of Systems*. In: *International Scientific Conference Computer Science*, Oxford, 2009.
- [59] Gimeno, A., Friedrich, G. und El-kadri-benkara, K.: *Experimental and numerical evaluation of iron losses in a claw pole car generator*. In: *The XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Seiten 1–6, Rome, Italy, 2010.
- [60] Handschuh, Tobias: *Untersuchung des Betriebs- und Alterungsverhaltens von Blei-Säure-Akkumulatoren bei für Hybridantriebssysteme typischen Belastungen*. Dissertation, Ulm, 2007.
- [61] Heck, Philip: *Grundlagen für ein bordautonomes Handlungskonzept zur Unfallfolgenminderung im Querverkehr*. Dissertation, Braunschweig, 2015.
- [62] Held, Marcel und Fritz, Klaus: *Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models: FIDES and RIAC 217Plus*. In: *Microelectronics Reliability*, Band 49, Seiten 967–971, 2009.
- [63] Helmlé, Michael, Hauler, Florian, Wörz, Philip, Rühle, Armin und Faustén, Michael: *Transient system safety and architectural requirement for partly and highly automated driving functions*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Seiten 413–423, Renningen, 2014.

- [64] Hohmann, Marc: *Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge*. Dissertation, Ilmenau, 2009.
- [65] Imran, Muhammad, Hashim, Rathiah und Khalid, Noor Elaiza Abd: *An Overview of Particle Swarm Optimization Variants*. In: *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering*, Band 53, Seiten 491–496, 2013.
- [66] Irias, Nayara G. do N. und Helder de, Paula: *Practical application of the physics-of-failure approach: Software and new resources for reliability prediction of power electronics systems*. In: *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Seiten 1–6, Juiz de Fora, Brazil, 2017.
- [67] Isermann, R., Schwarz, R. und Stolzl, S.: *Fault-tolerant drive-by-wire systems*. *IEEE Control Systems*, 22(5):64–81, 2002.
- [68] ISO: *26262: Road vehicles - Functional safety*, 2012.
- [69] ISO: *15031: Road vehicles - Communication between vehicle and external equipment for emissions - related diagnostics*, 2015.
- [70] ISO: *16750: Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment*, 2018.
- [71] Ivankovic, Ruben, Cros, Jerome, Taghizadeh, Mehdi, Martins, Carlos und Viarouge, Philippe: *Power Electronic Solutions to Improve the Performance of Lundell Automotive Alternators*. In: *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, London, Großbritannien, 2012.
- [72] Jesudas, Sajeev, White, Kevin und Kunz, Holger: *Samsung Electronics veröffentlicht Ergebnisse der Galaxy Note7 Untersuchungen: Samsung Führungskräfte und unabhängige Experten erläutern die Ursachenermittlung sowie die weitere Vorgehensweise*, 2017. <https://news.samsung.com/de/samsung-electronics-veroeffentlicht-ergebnisse-der-galaxy-note7-untersuchungen>, besucht: 4.12.2022.
- [73] Jones, J. und Hayes, J.: *A comparison of electronic-reliability prediction models*. *IEEE Transactions on Reliability*, 48(2):127–134, 1999.
- [74] Jossen, Andreas: *Battery Test Systems - Die Bleibatterie*, 2000. <https://basytec.de/Literatur/Bleibatterie.pdf>, besucht: 4.12.2022.

- [75] Junglas, Marco: *Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme unter funktionalen, zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischen Aspekten*. Dissertation, Duisburg-Essen, 2012.
- [76] Junk, Alexander: *48 Volt Systeme mit Spannung erwartet*. In: *Auto Service Praxis*, Band 78, Seiten 24–27, 2017.
- [77] Kaehler, C. und Henneberger, G.: *Eddy-current computation in the claws of a synchronous claw-pole alternator in generator mode*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2):1201–1204, 2002.
- [78] Kaehler, C. und Henneberger, G.: *Transient 3-D FEM Computation of Eddy-Current Losses in the Rotor of a Claw-Pole Alternator*. In: *IEEE Transactions on Magnetics*, Band 40, Seiten 1362–1365, 2004.
- [79] Kassakian, J. G.: *The future of power electronics in advanced automotive electrical systems*. In: *27th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Seiten 7–14, Baveno, Italy, 1996.
- [80] Khan, I. A.: *DC-to-DC converters for electric and hybrid vehicles*. In: *IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation*, Seiten 113–122, Dearborn, USA, 1994.
- [81] Kharchenko, Vyacheslav A.: *Problems of reliability of electronic components*. *Modern Electronic Materials*, 1(3):88–92, 2015.
- [82] Khosroshahi, Alireza, Abapour, Mehdi und Sabahi, Mehran: *Reliability Evaluation of Conventional and Interleaved DC-DC Boost Converters*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(10):5821–5828, 2015.
- [83] Kim, Hyung Ho: *SW FMEA for ISO-26262 Software Development*. In: *21st Asia-Pacific Software Engineering Conference*, Seiten 19–22, Jeju, Korea (South), 2014.
- [84] Kohler, Tom P.: *Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen*. Dissertation, München, 2014.
- [85] Kohn, Andre, Schneider, Rolf, Vilela, Antonio, Dannebaum, Udo und Herkersdorf, Andreas: *Markov Chain-based Reliability Analysis for Automotive Fail-Operational Systems*. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 5(1):30–38, 2017.
- [86] Kohn, Andre, Schneider, Rolf, Vilela, Antonio, Roger, Andre und Dannebaum, Udo: *Architectural Concepts for Fail-Operational Automotive Systems*. In: *SAE World Congress and Exhibition*, Seiten 1–8, Detroit, USA, 2016.

- [87] Krausz, Barbara: *Methode zur Reifegradsteigerung mittels Fehlerkategorisierung von Diagnoseinformationen in der Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Stuttgart, 2018.
- [88] Krieger, Olaf: *Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugdiagnose mit individueller Prüfstrategie*. Dissertation, Braunschweig, 2011.
- [89] Kugelfischer AG, FAG: *Technische Grundlagen*, 2006. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/mh1_technical_principles_de_de.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [90] Kuhlitz, Dietrich: *Produktgeschichte im Überblick: Bosch Automotive*, 2005. https://www.automatikoelwechselfsystem.de/wp-content/uploads/2021/11/Sonderheft_2_automotive_de_01.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [91] Kwiecien, M., Schröder, P., Kuipers, M. und Sauer, D. U.: *4 - Current research topics for lead-acid batteries*. In: Garcke, Jürgen, Karden, Eckhard, Moseley, Patrick T. und Rand, David A.J. (Herausgeber): *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*, Seiten 133–146, Amsterdam, 2017. Elsevier Ltd.
- [92] Labitzke, Herbert: *Starter Motors and Generators*. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2010.
- [93] Langels, Harald: *Schuldrecht BT 4: Deliktsrecht Schadensersatzrecht*, 2017. http://al-online.de/images/pdf/08_Schuldrecht_BT4_8_Auflage_2017.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [94] Liu, Fei Tony, Ting, Kai Ming und Zhou, Zhi Hua: *Isolation Forest*. In: *8th IEEE International Conference on Data Mining*, Seiten 413–422, Pisa, Italy, 2008.
- [95] Liu, Hu Chen, Liu, Long und Liu, Nan: *Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review*. *Expert Systems with Applications*, 40(2):828–838, 2013.
- [96] Lotz, Patricia: *Die allgemein anerkannten Regeln der Technik*, 2015. <https://www.llp-law.de/files/e-paper/E-Paper-Allgemein-Anerkannte-Regeln-Der-Technik-19.08.2015.pdf>, besucht: 4.12.2022.
- [97] Loveridge, Melanie, Remy, Guillaume, Kourra, Nadia, Genieser, Ronny, Barai, Anup, Lain, Mike, Guo, Yue, Amor-Segan, Mark, Williams,

- Mark, Amietszajew, Tazdin, Ellis, Mark, Bhagat, Rohit und Greenwood, David: *Looking Deeper into the Galaxy (Note 7)*. In: *Batteries*, Band 4, Seiten 1–3, 2018.
- [98] Lutun, Jérémie: *Modélisation thermique des alternateurs automobiles*. Dissertation, Grenoble, 2012.
- [99] Macbain, John A. und Conover, Joseph: *Dual Voltage Electrical System Simulations*. In: *Future Transportation Technology Conference and Exposition*, Detroit, USA, 2000.
- [100] Maloberti, Olivier, Gimeno, Anthony, Ospina, Alejandro, Friedrich, Guy, El Kadri Benkara, Khadija und Charbonnier, Loic: *Thermal Modeling of a Claw-Pole Electrical Generator: Steady-State Computation and Identification of Free and Forced Convection Coefficients*. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(1):279–287, 2014.
- [101] März, Martin und Nance, Paul: *Thermal Modeling of Power-electronic Systems*, 2000. https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/Energy_Electronics/publications_patents_downloads/Publications/Therm_Modelling_2000_IISB.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [102] Matheus, Kirsten und Konigseder, Thomas: *Automotive Ethernet*. Cambridge University Press, Cambridge, 2. Auflage, 2017.
- [103] Maurer, Markus, Gerdes, J. Christian, Lenz, Barbara und Winner, Hermann: *Autonomes Fahren*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [104] McLeish, James G.: *Enhancing MIL-HDBK-217 reliability predictions with physics of failure methods*. In: *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Seiten 1–6, San Jose, USA, 2010.
- [105] Mercedes Benz AG: *MBN 10567: Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 12 V Bordnetz: Anforderungen und Prüfungen*. Werksnorm, 2018.
- [106] Meyer, Matthias, Meyna, Arno und Pauli, Bernhard: *Zuverlässigkeitsprognose für Kfz-Komponenten bei zeitnahen Garantiedaten*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 105(3):262–267, 2003.
- [107] Müller, Tobias Carsten: *Neuronale Modelle zur Offboard-Diagnostik in komplexen Fahrzeugsystemen*. Dissertation, Braunschweig, 2012.

- [108] Mürken, M. und Gratzfeld, P.: *Reliability Comparison of Bidirectional Automotive DC/DC Converters*. In: *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Seiten 1–7, Toronto, Canada, 2017.
- [109] Mürken, M., Kubel, D., Kurz, A., Thanheiser, A. und Gratzfeld, P.: *Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes*. In: *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Seiten 1–7, Nottingham, Großbritannien, 2018.
- [110] Mürken, M., Kubel, D., Thanheiser, A. und Gratzfeld, P.: *Analysis of automotive lead-acid batteries exchange rate on the base of field data acquisition*. In: *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Seiten 1–7, Nottingham, Großbritannien, 2018.
- [111] Naval Surface Warfare Center (NSWC): *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*, 2011. http://everyspec.com/USN/NSWC/download.php?spec=NSWC-10_RELIABILITY_HDBK_JAN2010.045818.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [112] Nicastrì, Paul und Huang, Henry: *42V PowerNet: Providing the Vehicle Electrical Power for the 21st Century*. In: *Future Transportation Technology Conference and Exposition*, Detroit, USA, 2000.
- [113] Nynke Verhaegh, Jos van der Burgt, Alma Tiggelman: *STALLION FMECA: Review of STALLION FMECA for large-scale, stationary, grid-connected, Lithium-ion battery energy storage systems*, 2015. https://batterystandards.info/sites/batterystandards/files/d8_4_stallion_handbook_on_li-ion_safety_assessment_final.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [114] O’Gorman, Tony, Stephens, Dennis, Conway, Brian und Bohn, Ted: *A rotor and stator method to increase the power available from an automotive alternator at idle speed: APEC 2008 ; Austin, TX, 24 - 25 Feb. 2008*. In: *Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Seiten 1991–1998, Austin, USA, 2008.
- [115] Osterman, Michael: *We still have a headache with Arrhenius*. *Electronics Cooling*, 7(1):53–54, 2001.

- [116] Ottmar Sirch, Joachim Fröschl und Harmut Pröbstle: *Die Herausforderung für die Elektrik/Elektronik in der Automobilindustrie durch die Einführung einer 48V Versorgungsspannung*. In: VDI Tagung Elektronik im Fahrzeug (ELIV), Baden-Baden, 2013.
- [117] P. Siewiorek, Daniel und Narasimhan, Priya: *Fault-Tolerant architectures for space and avionics applications*, 2005. https://www.cs.unc.edu/~anderson/teach/comp790/papers/Siewiorek_Fault_Tol.pdf, besucht: 4.12.2022.
- [118] Pandian, Guru Prasad, Das, Diganta, Li, Chuan, Zio, Enrico und Pecht, Michael: *A critique of reliability prediction techniques for avionics applications*. Chinese Journal of Aeronautics, 31(1):10–20, 2018.
- [119] Patrick, K. Ng: *VRLA battery failure mechanism in field applications*. In: *Proceedings of Power and Energy Systems in Converging Markets*, Seiten 529–535, Melbourne, Australia, 1997.
- [120] Pauli, Bernhard: *Eine neue Methode zur Bestimmung der kilometerabhängigen Lebensdauervertelung von Kfz-Komponenten*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 100(4):256–261, 1999.
- [121] Pauli, Bernhard und Meyna, Arno: *Ein praxisorientierter Ansatz zur Bestimmung von kumulierten und durchschnittlichen Ausfallraten*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 100(5):382–386, 1998.
- [122] Pauli, Bernhard und Meyna, Arno: *Reliability of Electronic Control Units in Motor Vehicles*. In: *SAE International Congress and Exposition*, Detroit, USA, 1998.
- [123] Pauli, Bernhard und Meyna, Arno: *Zuverlässigkeitsprognosen für Kfz-Komponenten bei unvollständigen Daten*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 102(12):1104–1107, 2000.
- [124] Petkov, R.: *Optimum design of a high-power, high-frequency transformer*. IEEE Transactions on Power Electronics, 11(1):33–42, 1996.
- [125] Pfeffer, Peter und Harrer, Manfred: *Lenkungsbandbuch*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.
- [126] Pfeufer, Jochen: *Der neue FMEA-Standard in der Automobilindustrie*, 2017. <https://de.industryarena.com/emagazine/04-2017/der-neue-fmea-standard-in-der-automobilindustrie.html>, besucht: 4.12.2022.

- [127] Puzakov, A. V.: *Fault diagnosis in automotive alternators based on the output voltage parameters*. In: *International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS)*, Seiten 1–5, Ufa, Russland, 2019.
- [128] Puzakov, A. V.: *Physical modeling of failures of the automotive alternator*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 643(1):12–19, 2019.
- [129] Puzakov, A. V.: *Development of the load cycle of the starter battery*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 971(5):52–64, 2020.
- [130] Quanterion Solutions Inc.: *RIAC-HDBK-217 Plus Reliability Prediction Methodology*, 2006.
- [131] Rasmussen, Martin, Standal, Martin Inge und Laumann, Karin: *Task complexity as a performance shaping factor: A review and recommendations in Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis (SPAR-H) adaption*. In: *Safety Science*, Band 76, Seiten 228–238, 2015.
- [132] Reifer, Donald J.: *Software Failure Modes and Effects Analysis*. IEEE Transactions on Reliability, R-28:247–249, 1979.
- [133] Reiter, Thomas: *Mean Time Between Failures (MTBF)*, 2015. <http://www.angewandte-statistik.com/mtbf.html>, besucht: 4.12.2022.
- [134] Richard, Daniel und Dubel, Yannick: *Valeo StARS Technology: A Competitive Solution for Hybridization*. In: *Power Conversion Conference*, Seiten 1601–1605, Nagoya, Japan, 2007.
- [135] Riera, A.: *Securisation du reseau de bord 12V des vehicules autonomes*. In: *21 Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement*, Reims, Frankreich, 2019.
- [136] Ross, Michael: *A Simple but Comprehensive Lead-Acid Battery Model for Hybrid System Simulation*. In: *Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems*, Montreal, Kanada, 2015.
- [137] Rudert, Steffen und Trumpfheller, Jens: *Der Produktentstehungsprozess Porsche*, 2015. <https://www.porscheengineering.com/filestore/download/peg/de/pemagazin-01-2015-artikel-01/default/8664198c-bdd1-11e5-8bd4-0019999cd470/Der-Produktentstehungsprozess-Grundlage-f%C3%BCr-den-Erfolg-eines-Produktes-Porsche-Engineering-Magazin-01-2015.pdf>, besucht: 4.12.2022.

- [138] Ruf, Florian: *Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen*. Dissertation, München, 2015.
- [139] Ruf, Florian, Winter, Michael, Michel, Hans Ulrich, Froeschl, Joachim und Herzog, Hans Georg: *Experimental Investigations on an Autonomous Load Shutdown Mechanism in Respect to Voltage Stability in Automotive Power Nets*. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seiten 1–4, Beijing, China, 2013.
- [140] Rychlinski, Mark J., Bainbridge, Kevin R. und Walters, David W.: *Balance of Electrical Power Requirements through Smart Electric Power Management*. In: *SAE World Congress and Exhibition*, Seiten 1–5, Detroit, USA, 2011.
- [141] Salloux, Kurt und McHardy, John: *Eliminating battery failure - two new leading indicators of battery health - a case study*. In: *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, Seiten 190–193, Rome, Italy, 2007.
- [142] Sarafianos, Dimitrios, Flack, Timothy J., Llano, Danilo X., McMahon, W. M. G. Richard A., Wen, Bo und Pickering, Stephen: *Efficiency improvement and power loss breakdown for a Lundell-alternator/active-rectifier system in automotive applications*. In: *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Seiten 2264–2279, Beijing, China, 2017.
- [143] Sauer, Dirk Uwe: *Optimierung des Einsatzes von Blei-Säure-Akkumulatoren in Photovoltaik-Hybrid-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung*. Dissertation, Ulm, 2003.
- [144] Schiffer, Julia, Sauer, Dirk Uwe, Bindner, Henrik, Cronin, Tom, Lund-sager, Per und Kaiser, Rudi: *Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems*. In: *Journal of Power Sources*, Seiten 66–78, Athens, Greece, 2007.
- [145] Schlummer, Marco Heinz: *Beitrag zur Entwicklung einer alternativen Vorgehensweise für eine Proven-in-Use-Argumentation in der Automobilindustrie*. Dissertation, Wuppertal, 2012.
- [146] Schmitz, David: *Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren*. Dissertation, Karlsruhe, 2014.
- [147] Schulte, S. und Hameyer, K.: *Multi-physics simulation of a synchronous claw-pole alternator for automotive applications*. In: *IEEE Internatio-*

- nal Conference on Electric Machines and Drives*, Seiten 896–901, San Antonio, USA, 2005.
- [148] Schwimmbeck, Stefan, Buchner, Quirin und Herzog, H. G.: *Evaluation of Short-Circuits in Automotive Power Nets with Different Wire Inductances*. In: *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Seiten 1–6, Nottingham, Großbritannien, 2018.
- [149] Sedlmaier-Fuchs, Anette, Wortberg, Michael, Lobmeyer, Stefan und Ring, Karl: *Energieverteilung neu gedacht: Mit 8 Tabellen*. *ATZelektronik*, 9(5):52–57, 2014.
- [150] Senol, Murat: *Drivetrain integrated Dc-Dc converters utilizing zero sequence currents*. Dissertation, Aachen, 2018.
- [151] Siemens, AG: *SN29500 Ausfallraten elektronischer Bauelemente*. CT TIM RS Corporate Regulation & Standardization, München und Erlangen, 2016.
- [152] Sippola, M. und Sepponen, R. E.: *Accurate prediction of high-frequency power-transformer losses and temperature rise*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5):835–847, 2002.
- [153] Society of Automotive Engineers: *Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA)*. Nummer J1739. SAE, 2009.
- [154] Stadler, M. und Pforr, J.: *Zero-Voltage Switched Multi-Phase Converter utilizing nonlinear and coupled Inductors*. In: *Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Seiten 1038–1042, Anaheim, USA, 2007.
- [155] Stefanov, Evgueniy N., Escoffier, Rene, Blondel, Gael und Rouleau, Blaise: *Self-heating analysis of power MOSFET module during burn-in test*. In: *IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, Seiten 368–371, San Diego, USA, 2011.
- [156] Takata Inc.: *Takata Inflator Rupture Root Cause Summary Report*, 2016. https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/takata-fraunhoferict-research_summary.pdf, besucht: 4.12.2022.

- [157] Tang, S. C., Keim, T. A. und Perreault, D. J.: *Thermal Modeling of Lundell Alternators*. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Seiten 25–36, Denver, USA, 2004.
- [158] Tang, Sai Chun, Otten, David M., Keim, Thomas A. und Perreault, David J.: *Design and Evaluation of a 42-V Automotive Alternator With Integrated Switched-Mode Rectifier*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4):983–992, 2010.
- [159] Theis, Irina: *Das Steer-by-Wire System im Kraftfahrzeug: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit*. Dissertation, München, 2002.
- [160] Thiel, Georg, Veldhues, Bernhard, Bick, Mirjam und Pötzsch, Klaus: *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen*, 2017. <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2018/Verkehrsunfaelle-2017/pressebroschuere-unfallentwicklung.pdf>, besucht: 4.12.2022.
- [161] TÜV Rheinland: *Investigation Battery Safety: Logistics and Assembly*, 2017. https://news.samsung.com/global/wp-content/themes/btr_newsroom/download.php?id=5LW17gBfitV1GDfIQZPAB3cIe2h9FIPFzKNa3EsW0Ao%3D, besucht: 4.12.2022.
- [162] Udo Di Fabio, Manfred Broy, Renata Jungo Brünger, Ulrich Eichhorn, Armin Grunwald, Dirk Heckmann, Eric Hilgendorf, Henning Kagermann, Anton Losinger, Matthias Lutz-Bachmann, Christoph Lütge, August Markl, Klaus Müller, Kay Nehm: *Automatisiertes und vernetztes Fahren: Bericht der Ethik-Kommission*, 2017. https://news.samsung.com/global/wp-content/themes/btr_newsroom/download.php?id=5LW17gBfitV1GDfIQZPAB3cIe2h9FIPFzKNa3EsW0Ao%3D, besucht: 4.12.2022.
- [163] Umweltbundesamt: *Bericht zu Altbatterien*, 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2021-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>, besucht: 4.12.2022.
- [164] Utz, S. und Pforr, J.: *Operation of multi-phase converters with coupled inductors at reduced numbers of phases*. In: *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Seiten 1–10, Birmingham, Großbritannien, 2011.

- [165] Utz, Sebastian und Pforr, Johannes: *Turn-on behavior of automotive multi-phase converters with coupled inductors*. In: *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, Seiten 1–8, Novi Sad, Serbien, 2012.
- [166] VDA: *320 Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug: 48V-Bordnetz Anforderungen und Prüfungen*. VDA-Bericht, 2014.
- [167] VDA: *Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. In: *VDA Magazin - Automatisierung*. VDA, Verband der Automobilindustrie, 2015.
- [168] VDA: *FMEA-Handbuch: Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse : Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung - Monitoring & Systemreaktion*. VDA, Verband der Automobilindustrie, Berlin, Germany, 1. ausgabe Auflage, 2019.
- [169] VDA: *Band 4 - Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft. Abschnitt 4: Vorgehensmodelle. Six Sigma, Design for Six Sigma (DFSS), Wirtschaftlicher Tolerierungsprozess*. VDA, Verband der Automobilindustrie, 2020.
- [170] VDI: *VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. VDI, Verband deutscher Ingenieure, 2004.
- [171] Vergossen, David: *Differenzierte Betrachtung und Bewertung von 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterien in PKW-Bordnetzen*. Dissertation, Aachen, 2018.
- [172] Volkswagen AG: *VW 80000 Elektrische und elektronische Komponenten in Kraftfahrzeugen bis 3,5 t: Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen*. Werksnorm, Wolfsburg, 2021.
- [173] Wagner, Markus: *Einfluss des thermischen Verhaltens ausgewählter Bordnetzkomponenten auf die Zuverlässigkeit sicherheitskritischer Systeme im Fahrzeug*. Masterthesis, Kassel, 2018.
- [174] Walter, J. und Doncker, R. W. de: *High-power galvanically isolated DC/DC converter topology for future automobiles*. In: *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist (PESC)*, Acapulco, Mexiko, 2003.
- [175] White, Kevin: *Samsung Recall Support Note7 Investigation: Root Cause Analysis*, 2017. https://news.samsung.com/global/wp-content/themes/btr_newsroom/download.php?id=E0RaV5Kg8MHmLtmcg%2BD%2BJXcIe2h9FIPFzKNa3EsW0Ao%3D, besucht: 4.12.2022.

- [176] White, Mark und Bernstein, Joseph B.: *Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation*, 2008. <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/40791/08-05.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, besucht: 4.12.2022.
- [177] Williard, Nicholas, He, Wei, Hendricks, Christopher und Pecht, Michael: *Lessons Learned from the 787 Dreamliner Issue on Lithium-Ion Battery Reliability*. *Energies*, 6(9):4682–4695, 2013.
- [178] Wilmsen, Miriam, Groschopf, Laura und Albers, Albert: *Establishing innovation: Relevant process steps for the automotive predevelopment process*. In: *R&D Management conference*, Paris, France, 2019.
- [179] Zhu, Wei guo, Zhang, Ke ren und Wang, Ya: *Numerical Computation of 3D Temperature Field in an Automobile Claw-Pole Generator*. In: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Seiten 1–4, Chendu, China, 2010.

Eigene Publikationen

- [E1] M. Mürken, D. Kübel, A. Thanheiser and P. Gratzfeld: *Analysis of automotive lead-acid batteries exchange rate on the base of field data acquisition*, 5th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) and International Transportation Electrification Conference (ITEC), Nottingham, 2018
- [E2] M. Mürken, D. Kübel, A. Kurz, A. Thanheiser and P. Gratzfeld: *Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes*, 5th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) and International Transportation Electrification Conference (ITEC), Nottingham, 2018
- [E3] M. Mürken and P. Gratzfeld: *Reliability Comparison of Bidirectional Automotive DC/DC Converters*, 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, 2017
- [E4] M. Hiermeier, M. Mürken, T. Hackner and J. Pforr: *Impact of the Automotive Energy Net Impedance on the Voltage-Stabilization Performance of a Floating Capacitor H-Bridge Converter*, 18th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'16 ECCE, Karlsruhe, 2016

- [E5] M. Hiermeier, J. Pforr, M. Mürken and T. Hackner: *Measurement technique to determine the impedance of automotive energy nets for stability analysis purpose based on a floating capacitor H-bridge converter*, Energy Conversion Congress and Exposition, Milwaukee, 2016
- [E6] M. Mürken, M. Simon, T. Hackner and J. Pforr: *Application of a floating H-Bridge converter to stabilize the automotive Energy Net*, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, 2015
- [E7] M. Mürken, M. Simon, C. Augustin and J. Pforr: *Comparison of multi-port converter topologies with bidirectional energy flow for automotive energy net applications*, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pages 336-343, Lappeenranta, 2014
- [E8] M. Mürken, M. Simon, C. Augustin and J. Pforr: *Voltage balancing controller for automotive lithium ion batteries using bidirectional zero-voltage-transition multi-port converter*, Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 16th European Conference on, Lappeenranta, 2014
- [E9] M. Simon, M. Mürken, C. Augustin and J. Pforr: *Multi-Port Converter with bidirectional energy flow for automotive energy net applications*, Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 16th European Conference on, Lappeenranta, 2014
- [E10] M. Mürken and J. Pforr: *Comparison of the power dissipation with modern semiconductor devices in zero voltage switching*, 4th Applied Research Conference (ARC), pages 171-174, Ingolstadt, 2014

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Eine vollständige Übersicht der Bände finden Sie im Verlagsshop

- Band 76** Kai-Lukas Bauer
Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren
ISBN 978-3-7315-0949-3
- Band 77** Thomas Schirle
Systementwurf eines elektromechanischen Fahrwerks für Megacitymobilität
ISBN 978-3-7315-0995-0
- Band 78** Dominik Dörr
Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates
ISBN 978-3-7315-0998-1
- Band 79** Dominik Robert Naake
Simulation of damage mechanisms in weave reinforced materials based on multiscale modeling
ISBN 978-3-7315-1005-5
- Band 80** Martin Hohberg
Experimental investigation and process simulation of the compression molding process of Sheet Molding Compound (SMC) with local reinforcements
ISBN 978-3-7315-1007-9
- Band 81** Benedikt Fengler
Manufacturing-constrained multi-objective optimization of local patch reinforcements for discontinuous fiber reinforced composite parts
ISBN 978-3-7315-1006-2
- Band 82** Johannes Masino
Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors
ISBN 978-3-7315-1004-8
- Band 83** **11. Kolloquium Mobilhydraulik**
10. September 2020, Karlsruhe
ISBN 978-3-7315-1036-9

- Band 84** Felix Weber
Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile
ISBN 978-3-7315-1037-6
- Band 85** 8. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 23. Februar 2021, Karlsruhe
ISBN 978-3-7315-1071-0
- Band 86** Sebastian Fünfgeld
Vorausschauende Regelung von Fahrzeugsystemen durch stochastische Vorhersage der Fahrzeugdynamik
ISBN 978-3-7315-1060-4
- Band 87** Isabelle Charlotte Ays
Development of a CO₂e quantification method and of solutions for reducing the greenhouse gas emissions of construction machines = Entwicklung einer CO₂e Quantifizierungsmethode und von Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Baumaschinen
ISBN 978-3-7315-1033-8
- Band 88** Alexander Bernath
Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures
ISBN 978-3-7315-1063-5
- Band 89** Nils Bulthaupt
Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge
ISBN 978-3-7315-1075-8
- Band 90** Lars Brinkschulte
Assistenzsysteme zur Reduktion des Schädigungsverhaltens von Komponenten einer mobilen Arbeitsmaschine
ISBN 978-3-7315-1089-5
- Band 91** Dominik Dörr
Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz
ISBN 978-3-7315-1090-1
- Band 92** Jürgen Römer
Steuerung und Regelung des Lenkradmoments durch Nutzung radselektiver Frontantriebe
ISBN 978-3-7315-1104-5

- Band 93** Christian Riese
Werkzeuge und Konzepte für die Untersuchung und Entwicklung zukünftiger Kfz-Bremssysteme
ISBN 978-3-7315-1125-0
- Band 94** Yaoqun Zhou
Dynamisches Bremsverhalten des Reifen-Fahrwerk-Systems
ISBN 978-3-7315-1156-4
- Band 95** Stefan Haug
Ganzheitliche Optimierung einer Axialkolbenpumpe durch bedarfsangepasste Entlastung tribologischer Kontakte
ISBN 978-3-7315-1150-2
- Band 96** Stefan Scheubner
Stochastic Range Estimation Algorithms for Electric Vehicles using Data-Driven Learning Models
ISBN 978-3-7315-1166-3
- Band 97** Yusheng Xiang
AI and IoT Meet Mobile Machines: Towards a Smart Working Site
ISBN 978-3-7315-1165-6
- Band 98** Nils Meyer
Mesoscale simulation of the mold filling process of Sheet Molding Compound
ISBN 978-3-7315-1173-1
- Band 99** Christian Timo Poppe
Process simulation of wet compression moulding for continuous fibre-reinforced polymers
ISBN 978-3-7315-1190-8
- Band 100** Torben Fischer
Modellprädiktive Regelung eines innovativen Thermomanagement-Systems für batterieelektrische Fahrzeuge
ISBN 978-3-7315-1199-1
- Band 101** Florian Wittemann
Fiber-dependent injection molding simulation of discontinuous reinforced polymers
ISBN 978-3-7315-1217-2
- Band 102** Sebastian Watzl
Experimentelle und numerische Analyse des Körperschallübertragungsverhaltens von Aggregatlagerelementen im akustisch relevanten Frequenzbereich
ISBN 978-3-7315-1226-4

- Band 103** Dominik Stretz
Vibroakustische Analyse eines elektrischen Radnabenmotors und Optimierung durch geeignete Steuerungsansätze
ISBN 978-3-7315-1245-5
- Band 104** Mohamed Elgharbawy
Measurable Safety of Automated Driving Functions in Commercial Motor Vehicles - Technological and Methodical Approaches
ISBN 978-3-7315-1254-7
- Band 105** Bernhard Schmiedel
Indirekte Schätzung des Fahrbahnneigungsgrads zur Detektion von gefährlichen Fahrzuständen
ISBN 978-3-7315-1258-5
- Band 106** 9. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 28. Februar 2023, Karlsruhe
ISBN 978-3-7315-1260-8
- Band 107** Patrick Riehm
Zur Wechselwirkung zwischen Fahrbahntextur und Laufstreifenmischung von Pkw-Reifen
ISBN 978-3-7315-1268-4
- Band 108** Markus Tesar
Deep Reinforcement Learning zur Steigerung von Energieeffizienz und Pünktlichkeit von Straßenbahnen
ISBN 978-3-7315-1277-6
- Band 109** Michael Mürken
Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung
ISBN 978-3-7315-1298-1

Mit der Einführung hoch automatisierter Assistenzsysteme in Personenkraftwagen nehmen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung deutlich zu. Durch die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode auf die automobilen elektrische Energieversorgung kann im Ergebnis gezeigt werden, dass sich – auf der Basis entsprechender Modellabstrahierungen und sofern eine hinreichende Datenlage gegeben ist – umfassende Zuverlässigkeitsbewertungen auch in der automobilen Vorentwicklung durchführen lassen. Konkret kann aus den hier angestellten Berechnungen abgeleitet werden, dass eine klassische elektrische Energieversorgung, die allein auf der 12V-Spannungsebene operiert, nicht dazu geeignet ist, hochautomatisierte elektrische Verbraucher mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zu versorgen. Daher ist, um sicherheitsrelevante Verbraucher angemessen zu versorgen, mindestens die Einführung von Fehlerisolationsmechanismen erforderlich.

