

Timo Rieker

**Modellierung der Zuverlässigkeit
technischer Systeme mit stochastischen
Netzverfahren**

D 93
ISBN 978-3-936100-86-X

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor- Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Timo Rieker
geboren in Waiblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Tag der mündlichen Prüfung: 26.07.2018

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2018

Meiner Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die fachliche und wissenschaftliche Betreuung während der Erstellung dieser Arbeit sowie das mir stets entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, Leiter des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der Technischen Universität Berlin und Direktor des Geschäftsfeldes Virtuelle Produktentstehung des Fraunhofer Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Bei allen aktiven und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die sehr angenehme und ereignisreiche Zeit bedanken. Die vielen fachlichen und außerfachlichen Gespräche hatten einen entscheidenden Einfluss bei der Erstellung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studierenden, die mit ihren Ergebnissen zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonders herzlicher Dank gebührt meinen Eltern. Ohne eure bis heute ununterbrochene Unterstützung, wäre ein Gelingen dieser Arbeit undenkbar gewesen.

Mein größter Dank gilt meiner Partnerin Sarah, die gerade während der Endphase der Arbeit auf viel gemeinsame Zeit verzichten musste und durch ihre motivierende und verständnisvolle Art maßgeblich zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat.

Schmidlen, im Juli 2018

Timo Rieker

Inhalt

Bezeichnungen und Formelzeichen	iv
Abkürzungen	vii
Abstract	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Ziele der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik und Forschung.....	5
2.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik.....	5
2.1.1 Begriffe und Definitionen	5
2.1.2 Mathematische Beschreibung	8
2.1.3 Qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsmethoden.....	13
2.2 Domänenübergreifender Entwicklungsprozess	14
2.2.1 Grundlagen mechatronischer Systeme.....	15
2.2.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	16
2.2.3 Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen	18
3 Dynamische Modellierungsmethoden in der Zuverlässigkeitstechnik	22
3.1 Einteilung von quantitativen Modellierungsmethoden.....	22
3.2 Boolesche Systemtheorie	23
3.3 Dynamisches Zuverlässigkeitsblockdiagramm.....	25
3.4 Dynamische Fehlerbäume.....	28
3.5 Bayes'sche Netze	31
3.6 Markov-Prozesse.....	33
3.7 Petrinetze.....	37
3.8 Vergleich der dynamischen Modellierungsmethoden	42
4 Anforderungen an die methodische Vorgehensweise.....	44
4.1 Allgemeine Anforderungen	45
4.1.1 Durchgängigkeit.....	45
4.1.2 Wiederholbarkeit.....	45
4.1.3 Übertragbarkeit	45
4.1.4 Einfachheit	46
4.1.5 Minimierung potentieller Fehlerquellen	46
4.2 Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses	46
4.2.1 Anwendung während des gesamten Entwicklungsprozesses	46
4.2.2 Unabhängigkeit vom Entwicklungsprozess.....	47
4.2.3 Möglichkeit zur domänenspezifischen Modellierung.....	47

4.2.4	Unterstützung bei der Konzeptauswahl durch flexible Modellierung	47
4.2.5	Zusammenführung der Domänen.....	48
4.3	Anforderungen infolge der Modellierungsmethode.....	48
4.3.1	Übersichtliche Darstellung.....	48
4.3.2	Benutzerfreundlichkeit.....	48
4.3.3	Vermeidung von Konflikten.....	49
4.4	Zuverlässigkeitsspezifische Anforderungen.....	49
4.4.1	Berücksichtigung von Lastkollektiven.....	49
4.4.2	Berücksichtigung von Betriebsstrategien.....	50
4.4.3	Berücksichtigung der Alterung.....	50
4.4.4	Berücksichtigung von Wechselwirkungen.....	50
4.4.5	Modellierung von dynamischen Strukturen.....	51
4.5	Zusammenfassung der Anforderungen.....	51
5	Methodische Vorgehensweise.....	52
5.1	Ausgangssituation.....	52
5.1.1	Lösungsfindung.....	52
5.1.2	Softwareunterstützung.....	54
5.1.3	Gesamtüberblick über die methodische Vorgehensweise.....	56
5.2	Funktionale Ebene.....	58
5.2.1	Funktionsanalyse.....	58
5.2.2	Funktionserfüllung durch die Komponenten.....	59
5.2.3	Schnittstelle zur Komponentenebene.....	60
5.3	Komponentenebene.....	60
5.3.1	Übergang zu Zuverlässigkeitsmodellen.....	61
5.3.2	Modellierung der Ausfallmechanismen.....	62
5.3.3	Modellierung der Wechselwirkungen.....	63
5.3.4	Modellierung des Ausfallverhaltens.....	64
5.3.5	Schnittstelle zur Betriebsebene.....	65
5.4	Betriebsebene.....	66
5.4.1	Modellierung Lastkollektive.....	67
5.4.2	Modellierung Betriebsstrategie.....	68
5.4.3	Schnittstelle zur Systemebene.....	71
5.5	Systemebene.....	72
5.5.1	Modellierung der Alterung.....	73
5.5.2	Verknüpfung zu einem Gesamtmodell.....	77
5.5.3	Schnittstelle zur Ebene „Zuverlässigkeitsmodell und -analyse“.....	78
5.6	Zuverlässigkeitsmodell und -analyse.....	79
5.6.1	Zuverlässigkeitsmodell.....	79
5.6.2	Zuverlässigkeitsanalyse.....	79

5.7	Zwischenfazit	81
6	Anwendungsbeispiel Hybridantriebsstrang.....	83
6.1	Anwendungsbeispiel - Systembeschreibung	83
6.2	Anwendungsbeispiel - Funktionale Ebene	84
6.2.1	Funktionsanalyse.....	84
6.2.2	Funktionserfüllung durch die Komponenten	84
6.2.3	Schnittstelle zur Komponentenebene.....	87
6.3	Anwendungsbeispiel - Komponentenebene.....	87
6.3.1	Übergang zu Zuverlässigkeitsmodellen.....	87
6.3.2	Modellierung der Ausfallmechanismen.....	88
6.3.3	Modellierung der Wechselwirkungen.....	88
6.3.4	Modellierung des Ausfallverhaltens	89
6.3.5	Schnittstelle zur Betriebsebene	89
6.4	Anwendungsbeispiel - Betriebsebene	90
6.4.1	Modellierung Lastkollektive	90
6.4.2	Modellierung Betriebsstrategie	91
6.4.3	Schnittstelle zur Systemebene.....	96
6.5	Anwendungsbeispiel - Systemebene.....	96
6.5.1	Modellierung der Alterung.....	96
6.5.2	Verknüpfung zu einem Gesamtmodell	97
6.5.3	Schnittstelle zur Ebene „Zuverlässigkeitsmodell und -analyse“	98
6.6	Anwendungsbeispiel - Zuverlässigkeitsmodell und -analyse.....	98
6.6.1	Zuverlässigkeitsmodell	98
6.6.2	Zuverlässigkeitsanalyse	98
7	Ausblick und Weiterentwicklungsansätze.....	102
7.1	Hierarchisierung.....	102
7.2	Automatisierte Modellerstellung	103
7.3	Visualisierung der Zuverlässigkeit	103
7.4	Verknüpfung zu Datenbanken und relevanten Informationen.....	104
8	Zusammenfassung	106
9	Literaturverzeichnis	108
10	Anhang.....	117

Bezeichnungen und Formelzeichen

A	Diagrammausgang, Ereignis, Menge der Kanten
A_D	Dauerverfügbarkeit
A_G	Flächeninhalt des Körpers G
AF	Kantenfunktion
AT	Kanteneigenschaft
B	Ereignis
B_i	Betriebszustand
B_q	Lebensdauer bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von q %
C	Ereignis
CC	Menge der Kostenvariablen
CF	Kostenfaktor
CV	Kostenvariable
D	Schaltverzögerung
E, E_i	Diagrammeingang, Kantenausdrucksfunktion
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t
F_i	Funktionen
FP	Schaltverfahren
G	Flächenkörper, Wächterfunktion
GV	Menge der globalen Variablen
I	Initialisierungsfunktion der Stellen
ICC	Initialisierungsfunktion der Kostenstelle
IGV	Initialisierungsfunktion der globalen Variablen
K, K_i	Komponente
L_i	Last
M	Übergangsmatrix
$MTTF$	Mean Time To Failure
N, N_i	Anzahl
P	Menge der Stellen
$P(A)$	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses A
$P(A B)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit
PC	Farbenfunktion

P_e	Erforderliche Leistung
P_{Grenz}	Grenzlast
$P_{LPA,i}$	überschüssige Leistung zur Ladung der Traktionsbatterie
QP	Warteschlangendisziplin
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt t
R_i	Zuverlässigkeit der Komponente
$R_i(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit der Komponente i zum Zeitpunkt t
RP	Menge der Referenzstellen
RPP	Zuordnung Referenzstelle
$R_s(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit des Systems zum Zeitpunkt t
RT	Menge der Referenztransitionen
$RTTR$	Zuordnung Referenztransitionen
S_1, S_2	redundante Komponente
SOC	Ladezustand der Batterie
T	charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung, Trigger-Event
TR	Menge der Transitionen
V	Menge der lokalen Variablen
W	Schaltgewicht
X_{Sys}	globale Variable für die Systemzuverlässigkeit
Z_i, Z_j, Z_k	Zustandsvariable
a	Beschleunigung
age	Alterung
a_i	Zustandsvariable, Kante
b	Formparameter der Weibullverteilung
b_i	Zustandsvariable
c_i	Zustandsvariable
c_{ij}	bedingte Wahrscheinlichkeit
dd_i	Defektdichte einer Softwarekomponente
$f(t)$	Ausfalldichte zum Zeitpunkt t
g^v, g^{v_i}	globale Variable
h	Längenmaß
i	Zählvariable

j	Zählvariable
k	Zählvariable
l	Längenmaß
n, k	Anzahl Komponenten
op_i	Nutzungsintensität einer Softwarekomponente
p, p_i	Stelle
$p_i(t)$	Zustandswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t
rp, rp_i	Referenzstelle
t	Zeit, Lebensdauermerkmal
t_0	ausfallfreie Zeit
$t_{Ausfall}$	Ausfallzeitpunkt
t_i, t_j, t_k	Zeitpunkt
tr, tr_i	Transition
v	Geschwindigkeit
v_{Grenz}	Grenzgeschwindigkeit
x, x_i	Schaltvariable
y	Schaltvariable
α	Modellfaktor
Δt	Zeitdifferenz
ε	Erneuerungsgrad
λ	Ausfallrate, Zustandsübergangsrage
$\lambda(t)$	Ausfallrate zum Zeitpunkt t
$\lambda_{Elektronik}$	Ausfallrate elektronische Komponenten
$\lambda_{i,Software}$	Ausfallrate Softwarekomponenten für Variante i
$\lambda_{Mechanik}$	Ausfallrate mechanische Komponenten
$\lambda_{Software}$	Ausfallrate Softwarekomponenten
λ_{System}	Ausfallrate System
λ_{Ziel}	Zielausfallrate
$\lambda_{zul,Software}$	zulässige Ausfallrate der Softwarekomponenten
μ	Reparaturrate
τ	Integrationsvariable
Π	Schaltpriorität
Σ	Menge aller Farben

Abkürzungen

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CCF	Common Cause Fehler
CPN	farbiges Petrinetz (engl.: Coloured Petri Net)
CPT	Conditional Probability Table
CSM	verbundenes Systemmodell (engl.: Conjoint System Model)
DFT	dynamischer Fehlerbaum (engl.: Dynamic Fault Tree)
DSM	Design Structure Matrix
DZBD	dynamisches Zuverlässigkeitsblockdiagramm
ECSPN	erweitertes farbiges stochastisches Petrinetz (engl.: Extended Coloured Stochastic Petri Net)
EM	Elektromotor
ESPN	erweitertes stochastisches Petrinetz (engl.: Extended Stochastic Petri Net)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (engl.: Failure Mode and Effects Analysis)
FTA	Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault Tree Analysis)
G	Getriebe
IMA	Institut für Maschinenelemente
K	Kupplung
LPA	Lastpunktanhebung
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PNML	Petri Net Markup Language
REALIST	Reliability, Availability, Logistics and Inventory Simulation Tool
SDEP	State Dependency Block
SMP	Semi-Markov-Prozess
SPN	stochastisches Petrinetz (engl. Stochastic Petri Net)
SOC	State of Charge
TB	Traktionsbatterie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VM	Verbrennungsmotor
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle
ZBD	Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Abstract

Reliability modelling of technical systems with stochastic net methods

Due to the use of mechatronic systems, which combine the aspects of mechanical engineering, electronics and computer engineering, the complexity of technical systems has increased. Because of financial aspects and for increasing the know-how of technical systems, it is very important to be able to calculate and understand the reliability of these systems. Common reliability methods are not capable of describing complex interrelations. That is where dynamic reliability methods take over. However, there is no sufficient consideration of these methods, because of the increased effort during modelling.

The aim of this thesis was to increase the motivation for using dynamic reliability methods by the development of a methodical procedure. In order to meet this objective, the modelling effort should be reduced and a structured and close to reality modelling should be reached. The methodical procedure should be used as a guideline for potential users.

At the beginning of the work the state of the art of reliability modelling in general and the aspects of mechatronic systems were considered. Subsequently, the most common dynamic reliability modelling methods were described and evaluated regarding their potential in terms of their suitability for modelling the reliability. It was shown, that the Extended Coloured Stochastic Petri Nets (ECSPN), especially the Conjoint System Model (CSM), are most suitable for reliability modelling of complex technical systems.

The main issue of this thesis was the development of the methodical procedure. This content is separated in three chapters.

Firstly the requirements for the methodical procedure were defined. The general requirements were emerged from the general development of the method. Additionally, requirements due to the development process of mechatronic systems, the modelling method and the reliability analysis were defined.

The structure of the developed methodical procedure consists of different levels including several work steps each. Specifically, they divide in a functional level, a component level, an operational level, a system level and a level for the reliability model and analysis.

On the functional level, the reliability nets based on the functions, which have to be

provided, are created. Firstly a functional analysis has to be done in order to determine the relevant functions. After that the components needed to fulfill the specific functions are determined and linked by a functional matrix.

On the component level, they are modified into reliability models. As a part of the component level the failure mechanisms, the interactions between different components and their failure behaviour are described. With these requirements the reliability models are constructed.

On the operational level, the time dependent loads on the components are determined. They are mainly influenced by the operating strategy and the load profiles, for which the approach of modelling is shown.

The complete model is merged on the system level. The time dependent loads, which are calculated on the operational level, have a significant influence on the reliability of the system. That is why the concept of age is introduced and explained by means of a simple technical system.

The final step of the methodical procedure is the analysis of the model on the level for the reliability model and analysis.

By means of the defined requirements the methodical procedure was reflected. Because of the use of different levels for the methodical procedure, a clear and understandable approach was achieved. The main challenges occurring during the modelling of complex technical systems have been managed. The modelling of operating strategies, time dependent load profiles, the concept of age and interactions between the components were shown.

As an application example for the methodical procedure, a parallel plug-in hybrid vehicle was chosen. Different driving cycles were implemented and their influence on reliability of the hybrid car drive system was investigated. Because of different speeds and accelerations of the vehicle during the driving cycles and the operating strategy the components are loaded differently. The results show the effects of these outer influences on reliability of the different components and the whole hybrid car drive system.

In a final chapter, potentials and concepts for further developments were shown.

The power of the modelling method can be increased by an automatic model creation and a hierarchization during modelling. Visualization of reliability and database integration could be content of further investigations.

1 Einleitung

Um sich in einem immer größer werdenden Konkurrenzkampf bei der Entwicklung von technischen Systemen zu behaupten, sind Unternehmen gezwungen, Produkte mit neuen Funktionen zu entwickeln. Kunden geben sich nicht mehr mit dem Stand der Technik zufrieden. Sie müssen durch immer neue Funktionsmöglichkeiten und Innovationen gewonnen werden. Um die steigenden Anforderungen an die Funktionalität zu erfüllen, kommen mechatronische Systeme zum Einsatz. Diese bieten ein sehr großes Potential bei der Erfüllung der Funktionsanforderungen, können aber auch zu großen Problemen bei der Beschreibung der Produktzuverlässigkeit führen, welche zum Beispiel beim Kauf eines Kraftfahrzeugs weiterhin das wichtigste Kriterium darstellt [1].

1.1 Problemstellung und Motivation

Moderne Systeme beinhalten immer häufiger mechatronische Systeme. Der Einsatz der verschiedenen Wissensdomänen Mechanik, Elektronik und Software resultiert in einer weitaus höheren Komplexität der Systeme. Um die Produktzuverlässigkeit sicherzustellen, ist es unabdinglich, diese komplexen Zusammenhänge beschreiben zu können. Bild 1.1 zeigt verschiedene Einflüsse, die durch den Einsatz von mechatronischen Systemen auf die Zuverlässigkeit wirken.

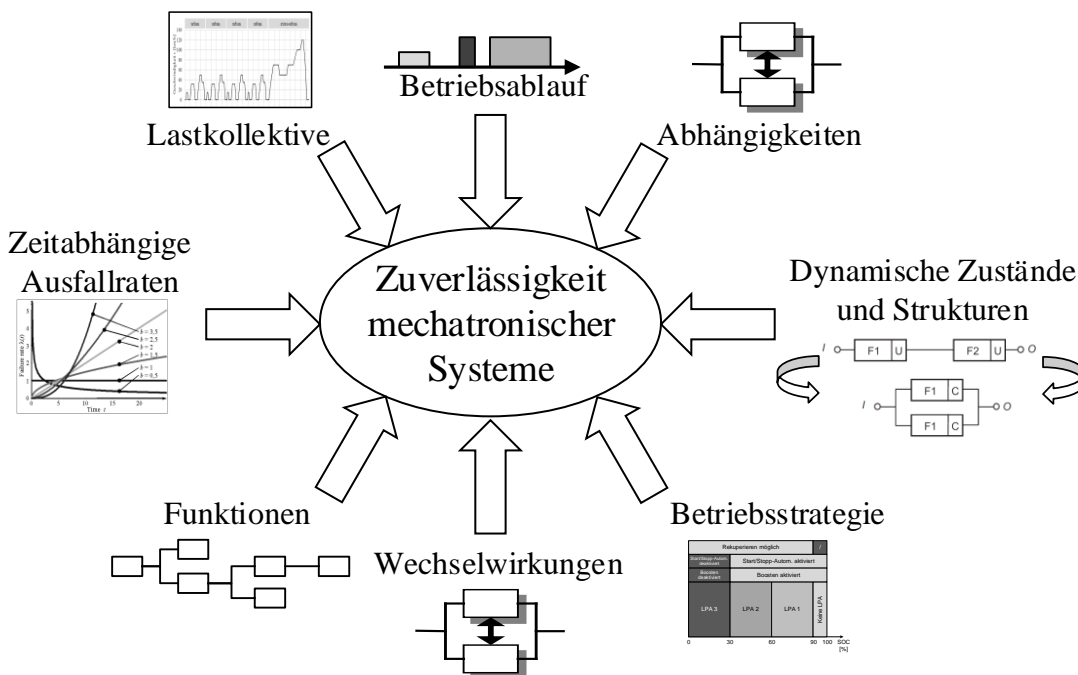


Bild 1.1: Einflüsse auf die Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme

Klassische Zuverlässigkeitsmethoden können Systeme, die abhängig von diesen Einflüssen zu jedem Zeitpunkt einen anderen Zustand einnehmen können, nicht beschreiben. An dieser Stelle kommen dynamische Modellierungsmethoden zum Einsatz. Mit Hilfe der dynamischen Modellierungsmethoden können nahezu alle Aspekte bei der Beschreibung der Zuverlässigkeit der komplexen Systeme berücksichtigt werden. Allerdings werden zur Verfügung stehende Methoden nur bedingt in der Praxis eingesetzt. Gründe dafür sind die oft aufwendige Modellierung, wodurch die Anwendbarkeit bisher nur erfahrenen Experten vorbehalten ist. Durch die kürzer werdenden Entwicklungszyklen ist es aber erforderlich, dass Modellierungs- und Simulationsmethoden zum Einsatz kommen. Für eine vollständige Absicherung durch eine vollständige Erprobung am realen Produkt bleibt meist nicht ausreichend Zeit.

Die Problemstellung liegt darin, dass auf der einen Seite ein Bedarf zum Einsatz von dynamischen Modellierungsmethoden im Zuverlässigkeitsabsicherungsprozess besteht, auf der anderen Seite aber meist keine durchgängige Methodik für die praktische Anwendung dieser Methoden vorhanden ist.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, durch die Entwicklung einer methodischen und durchgängigen Vorgehensweise zur Sicherstellung einer vollständigen Modellierung und Simulation der Zuverlässigkeit technischer Systeme, die im vorherigen Abschnitt beschriebene Lücke zu schließen. Dem möglichen Anwender soll ein Leitfaden an die Hand gegeben werden, mit dem es möglich ist den Aufwand für die Modellierung und Simulation bedeutsam zu verringern. Durch eine möglichst realitätsnahe Modellierung soll eine zusätzliche Motivation zur Anwendung erreicht werden.

Der Fokus liegt dabei auf mechatronischen Systemen, die je nach Belastung und Betriebsstrategie in unterschiedliche Betriebsmodi wechseln können. Diese dynamischen Systeme zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität aus. So kann durch geschicktes Eingreifen der Software durch eine Online-Betriebsstrategie eine höhere Lebensdauer der Systeme erreicht werden. Diese Systeme können nicht mehr als starre Systeme mit festgelegten Strukturen modelliert werden. Vielmehr können sie abhängig von unterschiedlichen Funktionsanforderungen ihre Systemstruktur verändern. Die Modellierungsaspekte können in äußere Einflüsse und innere Einflüsse aufgeteilt werden. Äußere Einflüsse sind z. B. Lastkollektive und Betriebsstrategien, innere Einflüsse Ausfallverhalten oder Alterungsverhalten der einzelnen Komponenten. Durch eine geschickte Modularisierung der verschiedenen Einflüsse auf die Zuverlässigkeit soll auf diese Weise eine strukturierte und nachvollziehbare Modellierung sichergestellt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der grundsätzliche Aufbau der Arbeit ist in Bild 1.2 schematisch dargestellt.

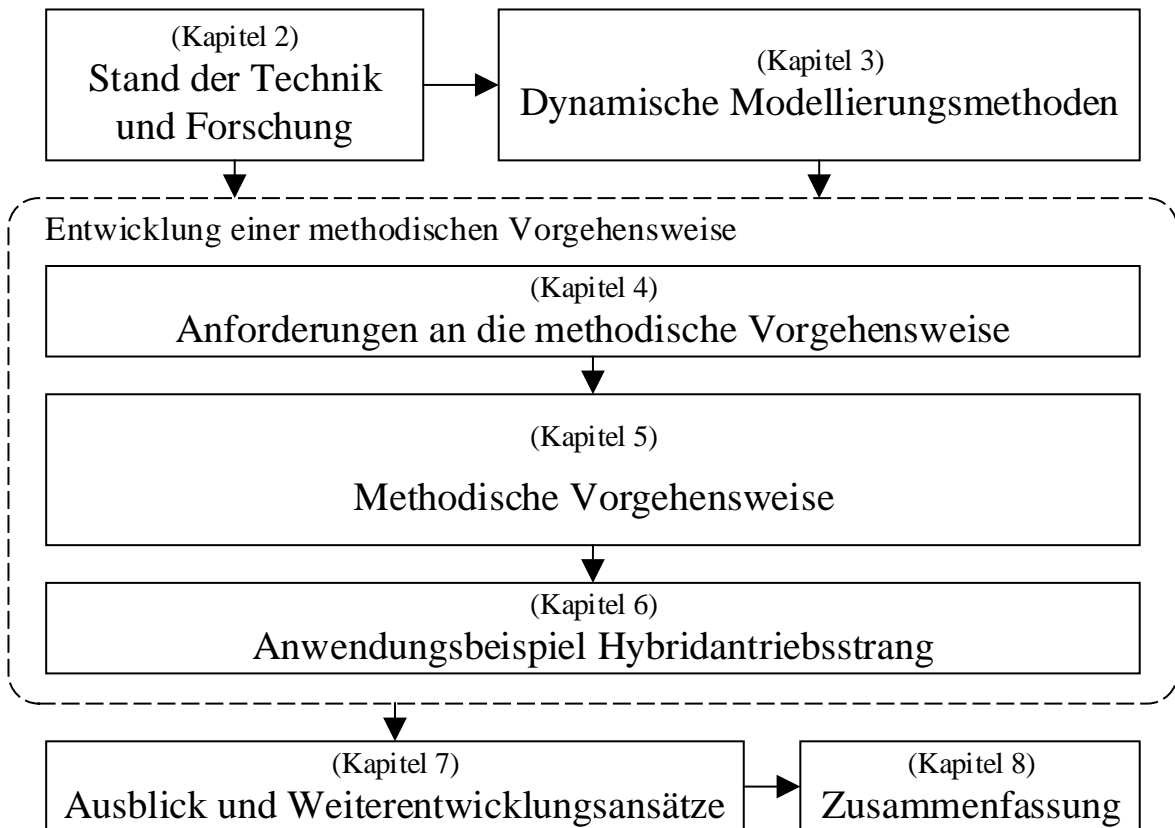


Bild 1.2: Aufbau der Arbeit

Im Kapitel **Stand der Technik und Forschung** werden die Grundlagen zum Verständnis der weiteren Inhalte der Arbeit beschrieben. Es werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik und der domänenübergreifende Entwicklungsprozess zur Darstellung der Aspekte der Zuverlässigkeit für mechatronische Systeme behandelt.

Das Kapitel **Dynamische Modellierungsmethoden in der Zuverlässigkeitstechnik** dient zur Einteilung und Beschreibung der bekannten Methoden. Durch eine detaillierte Beschreibung der Methoden soll ein Überblick über die aktuell verfügbaren Methoden geschaffen und die geeignetste Modellierungsmethode für die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise ausgewählt werden.

Die folgenden drei Kapitel bilden den Kern der Arbeit. Zunächst werden die **Anforderungen an die methodische Vorgehensweise** definiert. Dabei werden diese in verschiedene Aspekte unterteilt und jeweils die entsprechenden Anforderungen beschrieben. Die **Methodische Vorgehensweise** wird im anschließenden Kapitel vorgestellt. Für den Ablauf der methodischen Vorgehensweise werden Ebenen eingeführt, für die die jeweiligen durchzuführenden Schritte beschrieben werden. Die methodische Vorgehensweise findet im Kapitel **Anwendungsbeispiel Hybridantriebsstrang** an einem

Beispielsystem Anwendung. Die zuvor vorgestellten Arbeitsschritte werden anhand des Beispielsystems ausführlich dargestellt und anschließend berechnete Ergebnisse gezeigt.

Das Kapitel **Ausblick und Weiterentwicklungsansätze** dient als ausführliches Ausblickskapitel. Es werden Potentiale aufgezeigt, welche über das eigentliche Thema dieser Arbeit hinausgehen und die Effizienz bei der Modellierung weiter steigern sollen.

Die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit werden schließlich im Kapitel **Zusammenfassung** reflektiert.

2 Stand der Technik und Forschung

Für das Verständnis der weiteren Abschnitte der Arbeit wird in diesem Kapitel der zugrunde liegende Stand der Technik und Forschung behandelt. Da die Arbeit auf die Modellierung der Zuverlässigkeit abzielt, werden zunächst die Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik behandelt. In einem weiteren Abschnitt wird die Zuverlässigkeit im Kontext des Entwicklungsprozesses von mechatronischen Systemen betrachtet.

2.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik

Die für die Arbeit benötigten Begriffe und Definitionen werden im Folgenden ausführlich erläutert. Für die Beschreibung der Zuverlässigkeit sind grundlegende mathematische Zusammenhänge notwendig, da auf deren Basis ein Großteil der zur Verfügung stehenden quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden aufbaut.

2.1.1 Begriffe und Definitionen

Zuverlässigkeit

In der Norm DIN 40041 ist Zuverlässigkeit wie folgt definiert [2]:

„Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen.“

Im VDI-Handbuch Zuverlässigkeit ist der Begriff Zuverlässigkeit als ein zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft definiert [3]. Die Zuverlässigkeit eines technischen Systems ist zum einen stark abhängig von den Bedingungen, die von außen auf das System wirken, und zum anderen von den angeforderten und zu erfüllenden Funktionen. Die mathematische Beschreibung der Zuverlässigkeit wird im Anschluss an diesen Abschnitt erläutert.

Betriebsstrategie

Betriebsstrategien beschreiben prinzipiell, wie ein technisches System „betrieben“ wird. Nach [4] wählt die Betriebsstrategie nach einem übergeordneten Ziel die sinnvollste Betriebsmöglichkeit aus und steuert so das System. Prädiktive Betriebsstrategien führen bezüglich der Optimierungsgrößen zum besten Ergebnis, setzen aber voraus, dass alle Eingangsgrößen, wie z. B. Lastkollektive und Umgebungsbedingungen

bereits im Voraus bekannt sind. Das Ziel von prädiktiven Betriebsstrategien ist, die Kenntnis der zu erwartenden Belastungen für den optimalen Betrieb des technischen Systems auszunutzen. Häufiger zum Einsatz kommen heuristische Betriebsstrategien, die über Wenn-Dann-Abfragen der Eingangsparameter über die Auswahl des jeweiligen Betriebszustands entscheiden [5]. Dies geschieht meist über eine Regelung, die definierte Zustandsgrößen online überwachen und aufgrund dieser mit Änderungen im Betriebsverhalten reagieren kann. Diese Eingriffe durch die Regelung sind bei rein mechanischen Systemen nicht möglich. In den letzten Jahren haben sich viele Arbeiten mit der Ermittlung optimaler Betriebsstrategien beschäftigt [z.B. 6–9]. Den Chancen durch den Einsatz dieser Online-Betriebsstrategien steht eine Erhöhung des Aufwands bei der Beschreibung der Zuverlässigkeit dieser Systeme gegenüber.

Lastkollektiv

Ein Lastkollektiv beschreibt eine Funktion der relevanten Belastung über der Zeit bzw. dem entsprechenden Lebensdauerkriterium. Sie können aus gemessenen oder simulierten Daten generiert werden und sind ein entscheidender Faktor bei der Berechnung der Zuverlässigkeit [10]. Mit Hilfe von Klassierungsverfahren [11] können Lastkollektive für die Lebensdauerberechnung ausgewertet werden. Allerdings vernachlässigen diese die Frequenz der Belastungs-Zeit-Funktion und deren Abfolge. Ist dies nicht zulässig, z. B. durch den Einfluss von Alterungseffekten oder der Wechselwirkungen bei der Abfolge der Belastungen, kommen dynamische Modellierungsmethoden zum Einsatz. Lastkollektive bestimmen im Zusammenspiel mit der Betriebsstrategie den Betriebszustand eines betrachteten Systems zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt.

Betriebszustand

Derjenige Zustand, während dem ein System eine geforderte Funktion erfüllt, wird als Betriebszustand bezeichnet. Abhängig von der Betriebsstrategie können sich Betriebszustände sehr häufig während einer Nutzungsdauer eines technischen Systems ändern. Hierbei bestimmen die Funktionsanforderungen an die jeweiligen Betriebszustände die Höhe der Belastung der einzelnen Komponenten und damit auch den Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Systems.

Wechselwirkung

Wechselwirkungen spielen vor allem bei der Beschreibung der Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen eine wichtige Rolle. In [12] wird der Begriff Wechselwirkung wie folgt definiert:

„Unter einer Wechselwirkung wird eine gegenseitige Beeinflussung von zwei oder mehreren Komponenten verstanden. Diese Beeinflussung kann entweder positiv, neutral oder negativ sein.“

Es kann zwischen drei Arten der Wechselwirkungen unterschieden werden [12]:

- Direkte Wechselwirkung zwischen mindestens zwei beteiligten Komponenten
- Indirekte Wechselwirkung über „Zwischenmedien“, z. B. der Umgebung
- Einfluss der Umgebung auf eine Komponente

Modell

Bei einem Modell handelt es sich nach [3] um eine Abbildung eines Objektes oder Prozesses, mit dem Fokus auf relevante Merkmale und Zusammenhänge unter Berücksichtigung einer zugrunde liegenden Problemstellung. Die VDI-Richtlinie 2206 [13] stellt einen modellbasierten Systementwurf vor. Die Nachbildung der Realität soll durch eine Aufteilung der Modellierung in einzelne Teilaspekte vereinfacht und nachvollziehbar werden. Ausgehend von der gewünschten Genauigkeit werden auf verschiedenen Abstraktionsebenen Ersatzmodelle gebildet. Die Modelle können mit zunehmendem Abstraktionsgrad in topologische, physikalische, mathematische und numerische Modelle unterschieden werden [13].

Modellierung

Die Modellierung umfasst die Vorgehensweise unter Verwendung der notwendigen Werkzeuge und Methoden, um Modelle zu erzeugen. Dabei können folgende Werkzeuge zum Einsatz kommen:

- *Abgrenzung*: Festlegung von Systemgrenzen des zu beschreibenden Systems und Vernachlässigung der Komponenten außerhalb der gesetzten Grenzen oder Berücksichtigung durch Setzen entsprechender Randbedingungen.
- *Abstraktion*: Erstellung einer systemunabhängigen Darstellung.
- *Aggregation*: Verknüpfung einzelner Teilmodelle und deren Ergebnisse [14].
- *Dekomposition*: Zerlegung des zu beschreibenden Systems in kleinere Untersysteme um den Modellierungsaufwand zu verringern [15, 16].
- *Reduktion*: Vereinfachung des Modells durch Ignorieren von Teilsystemen oder Teilaspekten.

Methode

Eine Methode hat das Ziel, durch den Einsatz überwiegend nichttechnischer Disziplinen zu einem Erkenntnisgewinn zu führen [17]. Der Einsatz von Methoden führt in der Regel zu einer Arbeitserleichterung und -verbesserung und vor allem zu einem Zeit-

gewinn bei der Lösung von Problemstellungen. Einen Ansatz zur Modularisierung und Synthese von Methoden in der Zuverlässigkeitstechnik zeigt [18].

2.1.2 Mathematische Beschreibung

Ziel der mathematischen Beschreibung der Zuverlässigkeit ist, das Ausfallverhalten von technischen Systemen durch statistische Verfahren zu quantifizieren. Die Ausfallhäufigkeit wird durch die Ausfalldichte $f(t)$ beschrieben. Sie ergibt sich als Ableitung aus der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und quantifiziert die Ausfalldichte über der Zeit [11]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich aus Gleichung 2.1 als Integral über der Ausfalldichte:

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Für $t \rightarrow \infty$, gilt $F(t) = 1$. Das bedeutet, dass die Funktion der Ausfallwahrscheinlichkeit gegen eins konvergiert, was einem Ausfall aller betrachteten Einheiten entspricht.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. die Zuverlässigkeit $R(t)$ beschreibt die noch intakten Einheiten über der Zeit und ergibt sich aus dem Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.3)$$

Für die Beschreibung des Ausfallverhaltens technischer Systeme ist die Ausfallrate $\lambda(t)$ eine wichtige Größe. Sie setzt zu einem Zeitpunkt t die Anzahl der Ausfälle bzw. nicht intakten Einheiten ins Verhältnis zu den intakten Einheiten. Da die Dichtefunktion $f(t)$ die Anzahl der Ausfälle, und die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ die Anzahl der intakten Einheiten über die Zeit quantifiziert, ergibt sich für den zeitlichen Verlauf der Ausfallrate $\lambda(t)$ folgender Ausdruck:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Die Ausfallrate ist ein Maß für das Risiko einer Einheit im nächsten betrachteten Zeitintervall auszufallen. Über den zeitabhängigen Verlauf der Ausfallrate kann das Ausfallverhalten von Komponenten während des gesamten Lebenszyklus beschrieben

werden. Bild 2.1 zeigt die „Badewannenkurve“, deren charakteristischer Verlauf in drei Bereiche unterteilt werden kann.

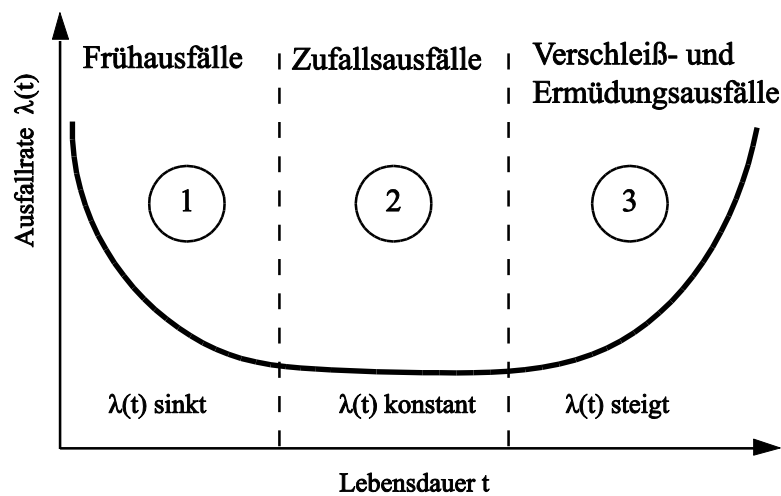


Bild 2.1: Die drei Bereiche der Badewannenkurve

Im Bereich 1 der Badewannenkurve nimmt die Ausfallrate kontinuierlich ab. Dieser Bereich ist charakteristisch für Frühausfälle mit einem zu Beginn sehr hohen Risiko eines Ausfalls. Gründe für dieses Ausfallverhalten sind zum Beispiel Fehler in der Fertigung und Montage oder auch Werkstoff- und Konstruktionsfehler. Eine massive Überbeanspruchung durch fehlerhafte oder missbräuchliche Nutzung der Komponenten führt ebenfalls zu diesem Ausfallverhalten [11]. Der Bereich 2 wird als der Bereich der Zufallsausfälle bezeichnet. In diesem Bereich bleibt die Ausfallrate konstant. Im Bereich 3 der Badewannenkurve steigt der Verlauf der Ausfallrate stark an. Dieses Verhalten ist kennzeichnend für Verschleiß- und Ermüdungsausfälle der Komponenten. Dauerbruch, Alterung oder Grübchen bei Zahnrädern sind typische Ausfälle für diesen Bereich.

Ist der genaue Verlauf der Zuverlässigkeitskennwerte von Interesse, dann kommen spezifische Lebensdauererwartungen zum Einsatz. Es gibt eine Vielzahl an Verteilungsfunktionen, die je nach Ausfallverhalten der zu beschreibenden Systeme zum Einsatz kommen. Die in der Zuverlässigkeitstheorie am häufigsten vorkommenden Verteilungen sind die Exponentialverteilung und die Weibullverteilung. Daher werden die Grundlagen dieser beiden Verteilungsfunktionen im Folgenden genauer beschrieben. Für die Beschreibung der weiteren Verteilung wird auf weiterführende Literatur verwiesen [11, 19–22].

Exponentialverteilung

Die Besonderheit der Exponentialverteilung ist die konstante Ausfallrate λ . Diese Annahme impliziert, dass die zu beschreibenden Komponenten keiner Alterung ausge-

setzt sind und ihr Ausfallverhalten nicht durch die Zeit vor dem Betrachtungszeitpunkt beeinflusst wird. Die Exponentialverteilung hängt nur von einem Parameter ab, der Ausfallrate λ . Bild 2.2 zeigt die Verläufe der Zuverlässigkeitskenngrößen der Exponentialverteilung für unterschiedliche Ausfallraten λ .

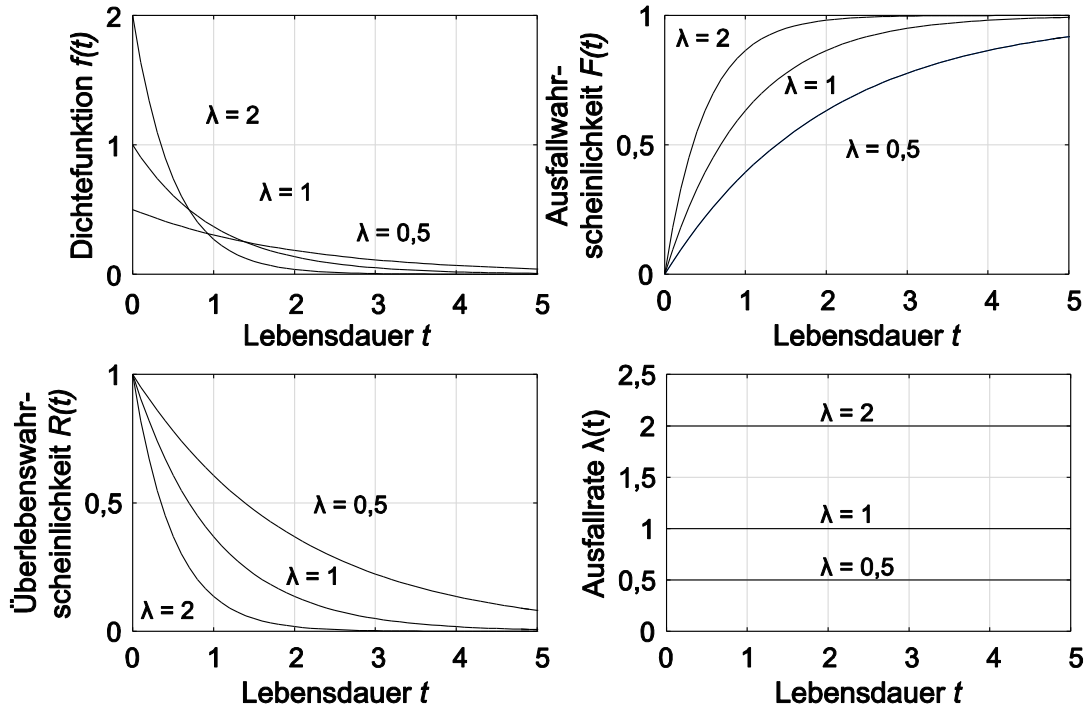


Bild 2.2: Zuverlässigkeitskenngrößen der Exponentialverteilung

Die Annahme einer konstanten Ausfallrate wird häufig bei der Beschreibung von elektronischen Bauteilen, wie Halbleitern oder Steuerungsgeräten, durch die Annahme von Zufallsausfällen angesetzt. Die Exponentialfunktion eignet sich daher zur Beschreibung des Bereichs 2 der Badewannenkurve aus Bild 2.1. Die Gleichungen zur Beschreibung der Zuverlässigkeitskenngrößen der Exponentialverteilung ergeben sich wie folgt.

Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\lambda t} & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Ausfalldichte:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \text{ für } t \geq 0 \quad (2.7)$$

Ausfallrate:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{konst.} \quad (2.8)$$

Weibullverteilung

Die Weibullverteilung wurde zur Beschreibung von Werkstoffermüdung erstmals vom schwedischen Forscher Waloddi Weibull angewendet [23]. Die Verteilung existiert in einer zwei- und einer dreiparametrischen Ausführung. Die zweiparametrische Weibullverteilung lässt sich durch den Formparameter b und die charakteristische Lebensdauer T beschreiben. Die Weibullverteilung ist bei der Auswertung von Lebensdauerdaten deshalb so beliebt, da sie in Abhängigkeit des Formparameters b alle drei Bereiche der Badewannenkurve abbilden kann. Bild 2.3 zeigt die Verläufe der Zuverlässigkeitskenngrößen für die Weibullverteilung für eine normierte charakteristische Lebensdauer $T = 1$.

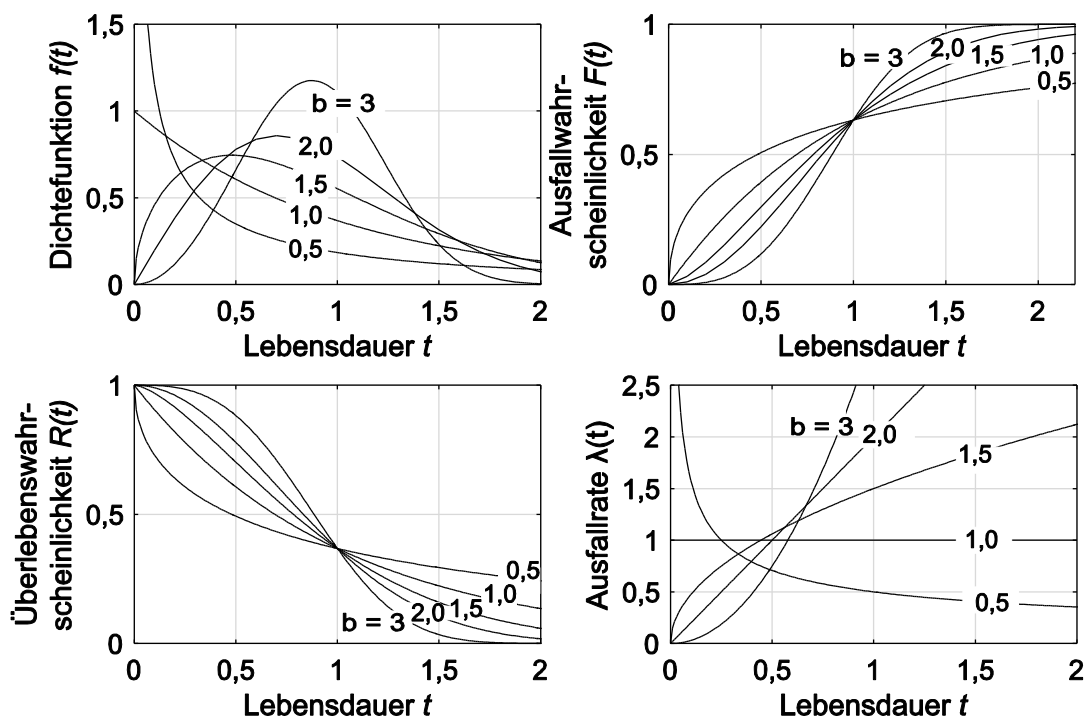


Bild 2.3: Zuverlässigkeitskenngrößen der Weibullverteilung

Der Verlauf der Ausfallrate zeigt die Flexibilität und die Anpassungsfähigkeit der Weibullverteilung an verschiedene Ausfallmechanismen durch Anpassung des Formparameters b . Für $b < 1$ sinkt die Ausfallrate der Weibullverteilung mit der Lebensdauer t und es können Frühausfälle gemäß Bereich 1 aus Bild 2.1 beschrieben werden. Für $b = 1$ ergibt sich eine konstante Ausfallrate entsprechend dem Bereich der Zufallsausfälle (Bereich 2). Für $b > 1$ steigt die Ausfallrate abhängig von der Größenordnung des Formparameters b unterschiedlich stark an, womit Verschleiß- und Ermüdungsausfälle

in Bereich 3 der Badewannenkurve beschrieben werden können. Die nachfolgenden Gleichungen zeigen die zugehörigen Gleichungen der Zuverlässigkeitskenngrößen.

Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Ausfalldichte:

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad \text{für } t \geq 0 \quad (2.11)$$

Ausfallrate:

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \quad (2.12)$$

Zum Zeitpunkt der charakteristischen Lebensdauer T , ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t = T) = 63,2 \%$. Für $b = 1$ entspricht die Weibullverteilung der Exponentialverteilung. Besteht eine ausfallfreie Zeit t_0 , kann die zweiparametrische Weibullverteilung durch den zusätzlichen Parameter t_0 und die Substitutionen $t \rightarrow t - t_0$, und $T \rightarrow T - t_0$ in die dreiparametrische Weibullverteilung transformiert werden.

Monte-Carlo-Simulation

Das aus der Stochastik stammende Verfahren der Monte-Carlo-Simulation basiert auf dem Prinzip der häufig durchgeführten Zufallsexperimente [24, 25]. Sie kommt dann zum Einsatz, wenn komplexe stochastische oder deterministische Problemstellungen analytisch nicht mehr lösbar sind. Ein immer größer werdendes Einsatzfeld fällt der Monte-Carlo-Simulation bei der digitalen Erprobung zu. Zu teure, aufwendige oder nicht nachstellbare Szenarien werden immer häufiger durch Simulationen ersetzt. Anwendungen der Monte-Carlo-Simulation finden sich z.B. in [26–28].

Das Grundprinzip soll an einem einfachen Beispiel, der Berechnung des Flächeninhalts A_G eines beliebigen Flächenkörpers G erläutert werden [29]. G hat dabei eine willkürliche Gestalt und liegt innerhalb eines Rechtecks mit den bekannten Kantenlängen l und h . Bild 2.4 veranschaulicht das Beispiel.

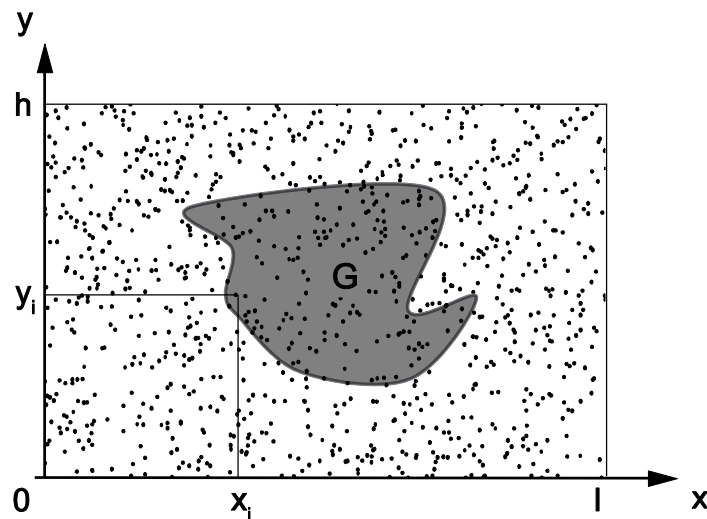


Bild 2.4: Berechnung des Flächeninhalts des Flächenkörpers G mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation

Ist N' nun die Anzahl der Punkte, die sich innerhalb der Fläche befinden und N die Gesamtzahl aller Punkte innerhalb des Rechtecks mit den Kantenlängen l und h , lässt sich der Flächeninhalt A_G des Körpers G folgendermaßen annähern:

$$A_G = \frac{N'}{N} \cdot l \cdot h \quad (2.13)$$

Die Güte der Annäherung steigt mit der Anzahl an Replikationen der Simulation, also hier mit der Anzahl N . Die Gleichung 2.13 ist auch nur dann korrekt, wenn die Zufallspunkte gleich über das gesamte Rechteck verteilt sind.

2.1.3 Qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsmethoden

Zuverlässigkeitsmethoden entlang des Produktlebenszyklus können in qualitative und quantitative Ansätze unterschieden werden. Eine strikte Trennung in qualitative und quantitative Methoden ist allerdings nicht immer möglich, da die Grenzen zwischen diesen häufig verschwimmen. Zur Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit können neben konstruktiven entwicklungsbegleitenden Methoden analytische Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz kommen. Die Aufteilung in quantitative und qualitative Zuverlässigkeitsmethoden und die jeweils dazugehörenden gängigsten Methoden zeigt Bild 2.5.

Anhand der bekanntesten und am häufigsten eingesetzten Zuverlässigkeitsmethode, der FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), lassen sich die Vor- und Nachteile der qualitativen Methoden beschreiben [30]. Die FMEA hat den Vorteil, dass diese sehr früh im Entwicklungsprozess eingesetzt werden kann, da die Systemstruktur noch nicht festgelegt sein muss. Die Ermittlung der möglichen Ausfallarten, -folgen und -ursachen kann flexibel für wechselnde Systeme, Teilsysteme oder Bauteile durchge-

führt werden. Die FMEA eignet sich daher gut zum Vergleich verschiedener Konzepte. Demgegenüber stehen nachteilig der subjektive Charakter der Methode durch eine personenabhängige Bewertung und die gegebenenfalls geforderten quantitativen Kennzahlen. Allerdings bestehen bereits Ansätze zur Quantifizierung der FMEA [31].

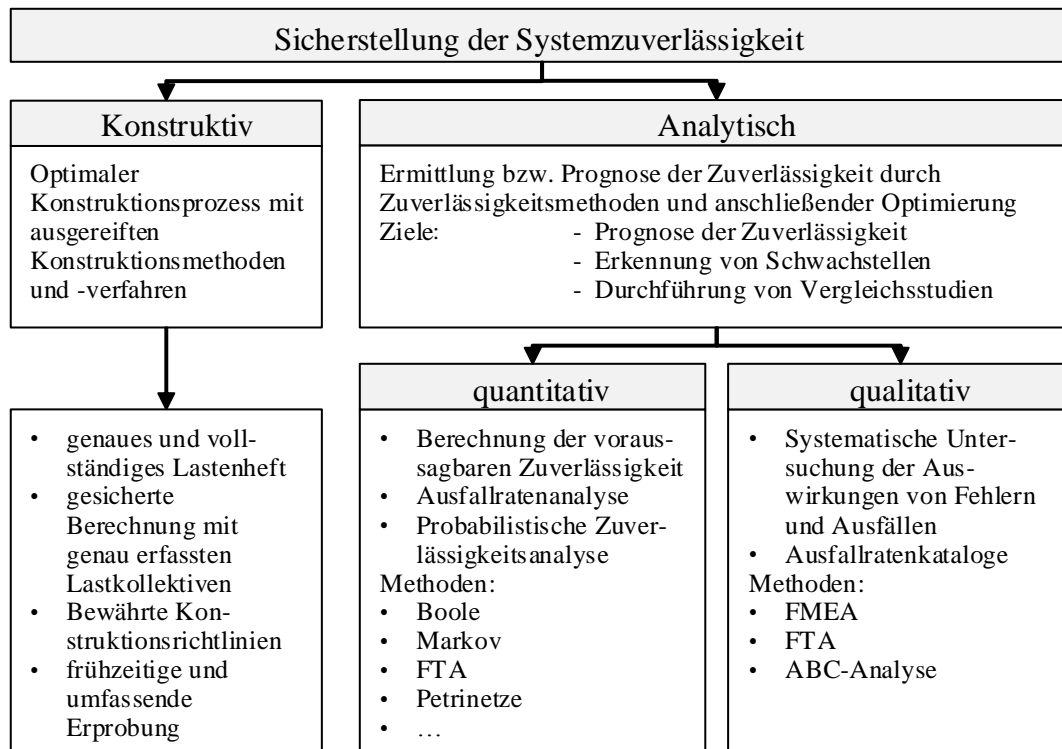


Bild 2.5: Übersicht Methoden zur Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit

Quantitative Zuverlässigkeitsmethoden nutzen Verfahren aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die im vorherigen Abschnitt bereits in Ausschnitten gezeigt wurden. Das Ergebnis dieser Analysen sind feste quantitative Zuverlässigkeitswerte, die als Indikatoren und Vergleichswerte für geforderte Vorgaben herangezogen werden können. Voraussetzung dafür ist allerdings das Vorhandensein von Daten in hinreichendem Stichprobenumfang. Eine Übersicht anhand einer Orientierungsmatrix, die Methoden einzelnen Phasen eines Zuverlässigkeits-Regelkreises zuordnet, liefert [32]. Der vorgestellte Zuverlässigkeits-Regelkreis setzt sich dabei aus Konzeption, Entwicklung, Produktion und Nutzung zusammen.

2.2 Domänenübergreifender Entwicklungsprozess

Bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen ergeben sich besondere Herausforderungen durch die Verknüpfung der verschiedenen Wissensdomänen Mechanik, Elektronik und Software. Der domänenübergreifende Entwicklungsprozess wird im Folgenden mit besonderem Augenmerk auf die zuverlässigkeitstechnischen Herausforderungen vorgestellt.

2.2.1 Grundlagen mechatronischer Systeme

Der Begriff Mechatronik setzt sich dem Wortstamm nach zusammen aus den Begriffen Mechanik und Elektronik und wurde vom Japaner Ko Kikuchi, Präsident der YASKAWA Electric Cooperation 1969 zum erstmals verwendet. Er wird wie folgt definiert [33]:

„[Mechatronics is]... the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“

Eine allgemeingültige und akzeptierte Definition des Begriffs Mechatronik gibt es laut der VDI-Richtlinie 2206 bis heute nicht [13]. In [34] wird Mechatronik als ein interdisziplinäres Zusammenspiel aus mechanischen Systemen, elektronischen Systemen und der Informationstechnik definiert. Bild 2.6 zeigt den Begriff Mechatronik im Kontext der drei Teildisziplinen Mechanik, Elektronik und Software.

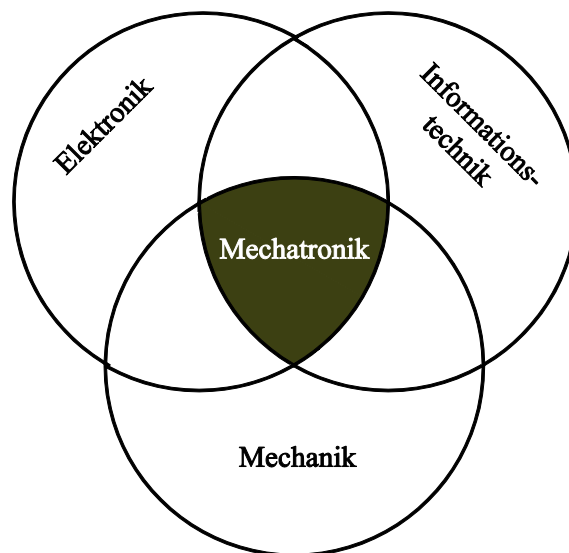


Bild 2.6: Mechatronik: Integration der verschiedenen Domänen

Durch das Zusammenspiel der drei Domänen ergeben sich weitere Felder, aus denen sich über die letzten Jahre eigenständige Ingenieursdisziplinen entwickelt haben, wie zum Beispiel die Numerik oder Kybernetik. Nur durch ein optimales Zusammenspiel aller Teildisziplinen lassen sich komplexe Funktionen durch mechatronische Systeme realisieren.

Die Grundstruktur mechatronischer Systeme sieht dabei prinzipiell immer ähnlich aus. Sie besteht aus einer mechanischen Struktur, dem Grundsystem z. B. einem Gehäuse, dass die Teilsysteme miteinander verbindet. Die wesentlichen Teilsysteme sind Sensoren, Aktoren und die Informationsverarbeitung. Sensoren sind dafür verantwortlich ausgewählte physikalische Größen zu erfassen, die sogenannten Zustandsgrößen. Die relevanten Informationen werden über eine Messwertverarbeitung an die Informati-

onsverarbeitung weitergegeben. Dabei handelt es sich üblicherweise um einen Mikrorechner. Über einen spezifischen Regler werden mit Hilfe der Eingangsgrößen und den vorgegebenen Sollwerten die notwendigen Maßnahmen zur Beeinflussung der Zustandsgrößen des Grundsystems bestimmt.

Ein typisches Beispiel für ein mechatronisches System ist der Airbag [35]. Über einen Sensor, der die Verzögerung des Fahrzeugs misst, wird ein Signal an den Mikrorechner weitergegeben. Dieser prüft, ob sich das Fahrzeug in einer Unfallsituation befindet und löst gegebenenfalls den Gasgenerator aus (Aktor), der den Airbag aufbläst. Ein weiteres Beispiel ist der elektronische Zündstartschalter, der den klassischen Zündschalter ersetzt [36].

2.2.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Um den Herausforderungen bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen gerecht zu werden, wurde eine VDI-Richtlinie veröffentlicht, die das interdisziplinäre Zusammenwirken der einzelnen Domänen ganzheitlich betrachtet. Die Richtlinie VDI 2206, „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [13], ergibt sich unter anderem aus einer Zusammenführung der domänenspezifischen Entwurfsmethoden, die in den Richtlinien VDI 2221 und VDI 2422 beschrieben sind. Die Richtlinie VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ fokussiert sich auf eine gestaltungsorientierte Sichtweise mit dem Schwerpunkt auf die Domäne Mechanik bzw. Maschinenbau.

In sieben Schritten wird das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme vom Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung bis zum Ausarbeiten beschrieben [37]. Die Richtlinie VDI 2422 „Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik“ liefert hingegen Ansätze bei der Entwicklung softwaretechnischer Systeme durch eine parallele, aber getrennte Entwicklung durch Unterteilung in die Bereiche Software, Schaltung und elektromechanischen Entwurf [38]. Diese Ansätze werden in der VDI 2206 zu einer domänenübergreifenden Betrachtungsweise zusammengeführt [13].

Der Kern der Entwicklungsmethodik besteht aus dem V-Modell als Makrozyklus, auf den sich das Vorgehen neben dem Problemlösungszyklus als Mikrozyklus und den Prozessbausteinen für wiederkehrende Arbeitsschritte stützt. In Bild 2.7 ist das V-Modell mit seinen einzelnen zu durchlaufenden Schritten dargestellt.

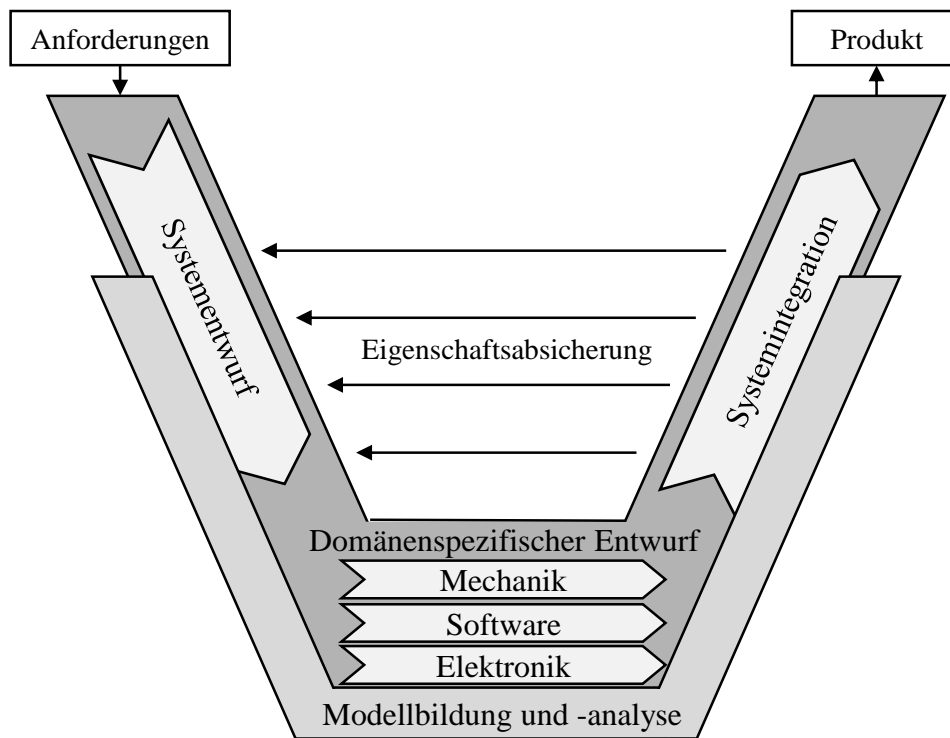


Bild 2.7: V-Modell als Makrozyklus [13]

Anforderungen

Als Ausgangspunkt steht ein konkreter Entwicklungsauftrag, aus dem die Anforderungen an das zu entwickelnde System abgeleitet werden. In diesem Schritt werden auch die Zuverlässigkeitsziele definiert, die als Maßstab für die spätere Produktbewertung zugrunde gelegt werden. Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Anforderungsliste.

Systementwurf

Ausgehend von den festgelegten Anforderungen wird im Systementwurf die abgeleitete Gesamtfunktion in Teilfunktionen unterteilt und die physikalischen und logischen Wirkungsweisen beschrieben. Die prinzipiellen Lösungsvarianten werden konkretisiert und nach Bewertung und Auswahl ein domänenübergreifendes Lösungskonzept festgelegt.

Domänenspezifischer Entwurf

Nachdem festgelegt wurde welche Funktionen die einzelnen Domänen übernehmen, wird eine weitere Konkretisierung, getrennt in den einzelnen Domänen auf Basis bewährter domänenspezifischer Entwicklungsmethodiken durchgeführt.

Modellbildung und -analyse

Begleitet wird das Vorgehen abhängig von der Komplexität des zu entwickelnden Systems durch eine Modellbildung und -analyse. Beispielhafte Modelle sind z. B. CAD-

Modelle oder auch Funktionsblockdiagramme. Hierzu ist die Modellbildung und Analyse ein eigenständiger Prozess mit einzelnen Schritten von der Planung und Klärung der Modellierungsaufgabe bis hin zur Verifikation und Validierung des erstellten Modells.

Systemintegration

Die Ergebnisse der vorangegangenen Schritte werden in das Gesamtsystem integriert, während Inkompatibilitäten erkannt und Unverträglichkeiten eliminiert werden.

Ergebnisabsicherung

Während der Systemintegration wird ein ständiger Abgleich ausgewählter Parameter des Lösungskonzepts mit den zuvor festgelegten Zuverlässigkeitszielen durchgeführt. Der Abgleich wird durch die Erprobung der Systeme oder bei einem Mangel an Erprobungsressourcen durch Simulation durchgeführt. Die tatsächlichen und gewollten Systemeigenschaften sollten vor der Freigabe des Systems übereinstimmen.

Produkt

Das Ergebnis eines Makrozyklus ist das Produkt. Da ein komplexes Produkt in der Regel nicht durch einmaliges Durchlaufen des Makrozyklus entwickelt werden kann, wird eine höhere Produktreife durch mehrmaliges Durchlaufen erreicht.

2.2.3 Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen

Bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen werden zunächst die einzelnen Domänen und die darin bekannten Analysen genauer betrachtet. Eine ganzheitliche Betrachtung und die durch die Interaktion der einzelnen Domänen auftretenden Probleme werden im Anschluss behandelt.

Mechanik

Die Analyse und Bewertung der Zuverlässigkeit von mechanischen Systemen wird in mehrere Schritte unterteilt [11, 32]. Zunächst werden die Systemelemente des zu untersuchenden Systems mit Hilfe eines Funktionsblockdiagramms bestimmt. Die zuverlässigkeitskritischen Bauteile können mit Hilfe qualitativer Methoden wie z. B. der FMEA identifiziert werden. Zur genaueren Untersuchung der kritischen Bauteile folgt dann nachgelagert eine quantitative Analyse der Zuverlässigkeit. Das Ausfallverhalten der Komponenten kann über bekannte Rechenvorschriften für spezifische Komponenten (z. B. Tragfähigkeitsberechnung für Zahnräder nach DIN 3990), oder über Tests bestimmt werden. Stehen keine Informationen zur Verfügung muss auf Vorwissen oder im zu vermeidenden Fall gewissenhaft abgeschätzt werden. Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems kann durch Verbinden der einzelnen Komponenten über ein Zu-

verlässigkeitsblockdiagramm und Anwenden der Booleschen Systemtheorie berechnet werden. Sind die Ausfallmechanismen der beteiligten Komponenten bekannt, kann die Zuverlässigkeit mit Hilfe von vorhandenen Berechnungsmodellen bestimmt werden.

Elektronik

Bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit von elektronischen Bauteilen kommen sehr häufig Ausfallratenkataloge zum Einsatz. Den elektronischen Bauteilen wird dadurch eine konstante Ausfallrate zugeordnet, was dem mittleren Teil der Badewannenkurve, den Zufallsausfällen entspricht. Da beim Einsatz von elektronischen Bauteilen häufig standardisierte Bauteile, wie z. B. Widerstände oder Kondensatoren, verwendet werden, können die Ausfallraten direkt aus Katalogen abgelesen werden. Über Korrekturfaktoren können die ermittelten Ausfallraten auf die jeweiligen Nutzungsbedingungen skaliert werden. Die bekanntesten Ausfallratenkataloge sind z. B. das Military Handbook 217 [39], die Siemens Norm SN 29500 [40] oder der Standard IEC-TR-62380 [41]. Diese Standards sind allerdings zu hinterfragen, da diese häufig nur grobe Abschätzungen beinhalten, die der Realität nicht entsprechen. Dies zeigt ein Physics-of-Failure Ansatz bei der Zuverlässigkeitsanalyse eines Leistungsmoduls [42, 43]. Bei genauerer Betrachtung des Leistungsmoduls fällt auf, dass für den Aufbau der Leistungselektronik mehrere Werkstoffschichten zum Einsatz kommen. Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten kommt es so zu einem thermischen Mismatch, was letztendlich zu einer Rissbildung im Lot führen kann. Dieser rein mechanische Ausfall kann aber nicht durch eine konstante Ausfallrate beschrieben werden, da es sich um einen Ermüdungsausfall handelt. In diesem Fall wurde das Ausfallverhalten mit einer Weibullverteilung ($b > 1$) modelliert.

Software

Software beinhaltet im Gegensatz zu mechanischen und elektronischen Bauteilen von Beginn an Fehler. Diese sind auf menschliche Fehler bei der Programmierung zurückzuführen und lassen sich nicht vermeiden. Problematisch ist dabei, dass diese Fehler durch Testen der Software nicht vollständig entdeckt werden können, da nicht jedes Anwendungsszenario für eine Software nachgestellt werden kann. Dazu kommt, dass bei der Analyse der Zuverlässigkeit nicht auf Ausfalldaten von Vorgängern zurückgegriffen werden kann. Softwareversagen tritt dann auf, wenn eine unerprobte Anwendungskonstellation eintritt oder ein Programmierfehler existiert, der bei dieser Anwendungskonstellation zu einem Versagen der Software führt [44]. Zur Abschätzung der Zuverlässigkeit existieren viele Modelle [45, 46], unter denen das Jelinski-Moranda-Modell [47] oder das Musa-Okumoto-Modell [48] zu den wichtigsten gehören.

Ganzheitliche Zuverlässigkeitsbewertung von mechatronischen Systemen

Zur ganzheitlichen Zuverlässigkeitsbewertung von mechatronischen Systemumfängen wurde eine durchgängige Methode für frühe Phasen des Entwicklungsprozesses entwickelt. Das Ziel dieser Methode ist, das zuverlässigkeitstechnisch beste Konzept zu identifizieren und einen Entwicklungsspielraum zu quantifizieren [49, 50]. Das modifizierte Vorgehen ist in Bild 2.8 dargestellt [51].

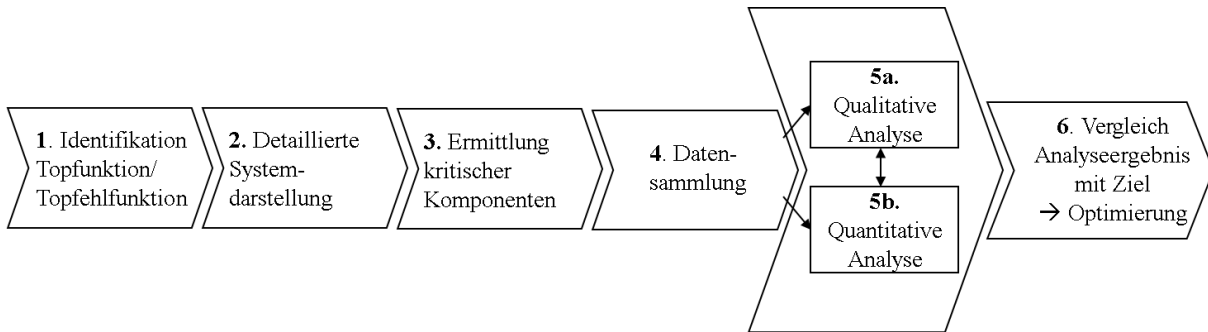


Bild 2.8: Vorgehen zur Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen [51]

Die Methode teilt sich in sechs Schritte auf und lässt sich direkt in das V-Modell eingliedern. Im ersten Schritt werden die Topfunktionen und Topfehlfunktionen identifiziert. Die Topfunktionen werden noch nicht spezifiziert auf die einzelnen Domänen verteilt, da noch keine Annahmen über die Konkretisierung getroffen wurden. Die Topfehlfunktionen ergeben sich im einfachsten Fall durch Negierung der Topfunktionen. Zusätzlich können die Topfehlfunktionen in verschiedene Beanstandungsklassen eingeteilt werden, welchen Zielzuverlässigkeiten bzw. Zielwerte für das Nichtauftreten zugeordnet werden. Während der detaillierten Systemdarstellung werden über definierte Anwendungsfälle (engl.: Use Cases) die Funktionszusammenhänge detailliert beschrieben. Ergebnis ist ein erstes physikalisches Modell. Im dritten Schritt, der Ermittlung der kritischen Komponenten, werden den Komponenten Kritikalitätsklassen zugewiesen. Dies kann mit bekannten Methoden, wie z. B. der ABC-Analyse [11] geschehen. Für die quantitative Zuverlässigkeitsanalyse sind Informationen über die Lebensdauerdaten der Komponenten nötig. Dies geschieht im vierten Schritt, der Datensammlung. Aufgrund der unterschiedlichen Ausfallmechanismen der Domänen Mechanik, Elektronik und Software, unterscheidet sich das Vorgehen bei der Datensammlung, wie bereits zuvor beschrieben wurde. Die gesammelten Daten sind die Grundlage für die anschließende Analyse. Da die Softwarezuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen selten bekannt ist, wird im fünften Schritt, der sich aus einer qualitativen und quantitativen Analyse zusammensetzt, der Ansatz eines relativen Vergleichs gewählt [52]. Dazu wird die Zuverlässigkeit des Systems mit dem festgelegten Zuverlässig-

sigkeitsziel aus dem ersten Schritt verglichen. Die Ausfallrate des Systems bestimmt sich zu

$$\lambda_{\text{System}} = \lambda_{\text{Mechanik}} + \lambda_{\text{Elektronik}} + \lambda_{\text{Software}} \quad (2.14)$$

mit

$$\lambda_{\text{System}} \leq \lambda_{\text{Ziel}} \quad (2.15)$$

ergibt sich

$$\lambda_{\text{Software}} \leq \lambda_{\text{Ziel}} - \lambda_{\text{Mechanik}} - \lambda_{\text{Elektronik}} = \lambda_{\text{zul,Software}} \quad (2.16)$$

Falls keine Informationen über die Ausfallraten der Software vorhanden sind, kann die Ausfallrate, bei der das Zuverlässigkeitsziel gerade noch erreicht wird, bestimmt werden. Je höher die berechnete Ausfallrate für die Software ist, desto mehr Entwicklungsspielraum bleibt für die zu entwickelnde Software. Sind bereits genauere Kenntnisse vorhanden, kann die Zuverlässigkeit der Software mit Hilfe des Ansatzes der implizierten Softwarezuverlässigkeit noch genauer berechnet werden [51]:

$$\lambda_{i,\text{Software}} = \alpha \cdot dd_i \cdot op_i \quad (2.17)$$

Darin beschreibt die Defektdichte dd_i das Verhältnis der Anzahl der Fehler und der Anzahl der Codezeilen [53]. Der Faktor op_i (operation profile) berücksichtigt den Umstand, dass Softwarekomponenten nicht dauerhaft an der Funktionsausführung beteiligt sind und daher die Nutzungszeit berücksichtigt werden muss. Der Faktor op_i kann daher Werte zwischen 0 (Software wird nicht genutzt) und 1 (Dauerhafte Nutzung der Software) annehmen. Der Modellfaktor α wird eingeführt, um den Zusammenhang zwischen den berechenbaren Einflussgrößen und der Ausfallrate der Softwarekomponenten herzustellen.

In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Berechnungsschritt mit gesetzten Zielen verglichen. Wurden die Ziele nicht erreicht, müssen Optimierungen an den Komponenten der einzelnen Domänen durchgeführt werden. Ist der berechnete Zuverlässigkeitswert viel kleiner als das gesteckte Ziel, können Optimierungen hinsichtlich unzuverlässigeren Komponenten, aber dafür kostengünstigeren Varianten durchgeführt werden.

3 Dynamische Modellierungsmethoden in der Zuverlässigkeitstechnik

Zuverlässigkeitsmodelle bzw. Modellierungsmethoden sind laut Definition nach [54] mathematische Formulierungen der Zusammenhänge und Verknüpfungen des Zuverlässigkeitsverhaltens eines Systems mit dem seiner Bestandteile. Die Zuverlässigkeitsanalyse dient zur Erlangung von Aussagen über Kenngrößen der Zuverlässigkeit, sowie der Verhaltenseigenschaften des zu untersuchenden Systems. In diesem Kapitel werden bekannte Modellierungsmethoden vorgestellt und bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Der Fokus liegt auf den dynamischen Modellierungsmethoden, die aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die vorhandenen Modellierungsmethoden durch den Einsatz von komplexen technischen Systemen größere Potentiale aufweisen. Die Beschreibung beschränkt sich auf die bekanntesten und am weitesten verbreiteten Modellierungsmethoden.

3.1 Einteilung von quantitativen Modellierungsmethoden

Eine Übersicht der Methoden zur Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit wurde bereits in Bild 2.5 gezeigt. Hier wurden die Methoden in konstruktive und analytische Methoden und die analytischen wiederum in qualitative und quantitative Methoden eingeteilt. Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Modellierungsmethoden sind den quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden zugeordnet. Diese können gemäß Bild 3.1 weitergehend in statische und dynamische Modellierungsmethoden unterschieden werden.

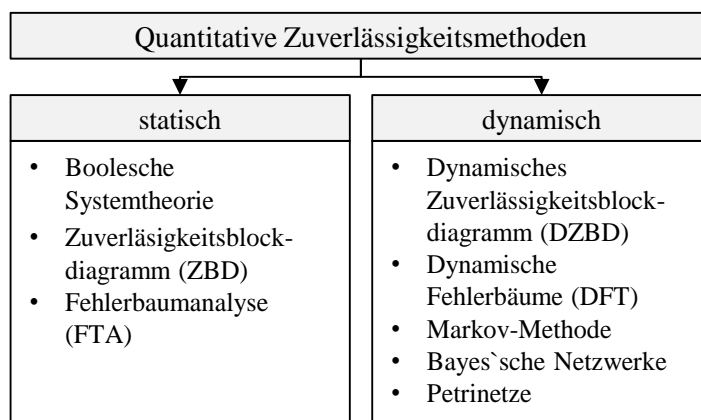


Bild 3.1: Einteilung quantitativer Zuverlässigkeitsmethoden

Die Einteilung ergibt sich aus den Voraussetzungen für eine mögliche Nutzung der jeweiligen Modellierungsmethode. Statische Modellierungsmethoden können die Zu-

verlässigkeit von Systemen beschreiben, die nur einen festen Zustand einnehmen können oder deren Zustände auf einen repräsentativen Zustand vereinfacht werden können. Die Struktur des jeweiligen Systems ist starr vorgegeben. Die Belastungen sind durch Lastkollektive klar definiert oder können durch bekannte Klassierungsverfahren auf eindimensionale Belastungen zurückgeführt werden. Bekannte Modellierungsmethoden sind die Fehlerbaumanalyse (FTA) und das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD). Werden weiterführende Aspekte, wie z. B. die Reparierbarkeit von Systemen, dynamische Zustände oder lastabhängige Ausfallraten für die Modellierung notwendig, können diese von statischen Modellierungsmethoden nicht mehr abgebildet werden. An dieser Stelle setzen die dynamischen Modellierungsmethoden an. Als Vertreter dieser Zuverlässigkeitsmethoden werden im Folgenden die dynamischen Fehlerbäume (DFT), das dynamische Zuverlässigkeitsblockdiagramm (DZBD), die Markov-Methode, die Bayes'schen Netzverfahren und die Petrinetze genauer beschrieben. Da die Boolesche Systemtheorie als Grundlage für die weiterführenden dynamischen Modellierungsmethoden benötigt wird, erfolgt ebenfalls eine detaillierte Beschreibung dieser statischen Zuverlässigkeitsmethode.

3.2 Boolesche Systemtheorie

Die Boolesche Systemtheorie bzw. die Boolesche Algebra kommt aufgrund ihrer vereinfachten Annahmen häufig in der Definitions- und Entwicklungsphase technischer Produkte zum Einsatz [55]. Sie geht auf die erstmals von George Boole veröffentlichten Arbeiten zurück [56]. Als die einfachste Methode zur Beschreibung der Funktionsfähigkeit eines Systems unter Berücksichtigung der Systemkomponenten, kann sie nur dann angewendet werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind [11, 57]:

- Das zu beschreibende System und die dazugehörigen Systemkomponenten sind „nicht reparierbar“. Fällt eine Komponente aus, verharrt diese im Zustand „ausgefallen“.
- Die Systemkomponenten bzw. das System befindet sich entweder im Zustand „intakt“ oder im Zustand „ausgefallen“.
- Die Systemkomponenten sind voneinander „unabhängig“. Das bedeutet, dass das Ausfallverhalten der einzelnen Systemkomponenten nicht gegenseitig beeinflusst werden kann.

Die Boolesche Systemtheorie hat das Ziel, durch Verknüpfung von einzelnen Komponenten zu einer logischen Gesamtstruktur, das Gesamtsystem zu beschreiben. Die Verknüpfungen werden durch logische Operatoren erreicht. Der Übergang zu einer graphischen Verknüpfung geschieht über gewöhnliche Zuverlässigkeitsblockdiagramme, welche als Grundlage für die dynamischen Zuverlässigkeitsblockdiagramme im Abschnitt 3.3 beschrieben werden. Bei der mathematischen Verknüpfung der ein-

zelenen Elemente wird vorausgesetzt, dass den Elementen gemäß der Forderung eines eindeutigen Zustands, der Wert 0 oder 1 zugeordnet wird. Gängige Praxis ist dabei, die Assoziation des Zustands „ausgefallen“ mit dem Wert 0 und des Zustands „intakt“ mit dem Wert 1 herzustellen. Die zu verknüpfenden Komponenten und das System werden weiterhin als Schaltvariable (x , y) vereinfacht. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der Grundverknüpfungen der Booleschen Modellbildung [11]:

Tabelle 3.1: Übersicht der Grundverknüpfungen der Booleschen Modellbildung

Name	andere Bezeichnung	Boolesche Gleichung	Operator
Negation	NICHT NOT	$y = \bar{x}$	\bar{x}
Disjunktion	ODER	$y = x_1 \vee x_2$	\vee
	OR	$= x_1 + x_2$	$+$
Konjunktion		$y = x_1 \wedge x_2$	\wedge
	UND	$= x_1 \cdot x_2$	\cdot
	AND	$= x_1 x_2$ $= x_1 \& x_2$	$\&$

Die Variable y steht bei den betrachteten Verknüpfungsfunktionen für den Zustand des Systems. Bei der Negation besitzt die Variable y den Wert 0, wenn die Variable x den Wert 1 hat und entsprechend den Wert 1, wenn Variable x den Wert 0 besitzt. Die Disjunktion bzw. ODER-Verknüpfung kommt für Parallelsysteme zum Einsatz. Ein Parallelsystem hat die Eigenschaft, dass das System intakt ist, wenn dies auch für mindestens einer seiner Komponenten gilt. Mit Hilfe der Disjunktion können unter anderem redundante Systeme beschrieben werden.

Bei Zuverlässigkeitsbetrachtungen findet nun ein Übergang von der diskreten Betrachtungsweise („null“ oder „eins“) zu kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsfunktionen statt. Für die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ für ein System mit mehreren Komponenten ergibt sich bei einem Parallelsystem unter Berücksichtigung der Booleschen Algebra der Ausdruck in Gleichung 3.1 [58].

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (3.1)$$

In der Realität treten häufig Seriensysteme auf. Diese können mit Hilfe der Konjunktion bzw. der UND-Verknüpfung beschrieben werden. Die Voraussetzung für eine Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems ist ein intakter Zustand jeder einzelnen Systemkomponente. Die Gesamtzuverlässigkeit ergibt sich demnach durch Multiplikation der einzelnen Komponentenzuverlässigkeiten gemäß Gleichung 3.2.

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.2)$$

Die Systemzuverlässigkeit kann bei einem Seriensystem nur so gut sein, wie seine schwächste Komponente [59]. Eine praxisnahe Anwendung der Booleschen Systemtheorie an einem Seriensystem zeigt [60].

Den Vorteilen bei der einfachen und intuitiven Beschreibung der Systeme durch die logischen Verknüpfungen stehen Einschränkungen bezüglich des Einsatzes bei Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Komponenten entgegen. Weiterhin kann die Annahme eines eindeutigen Zustands einer Komponente („intakt“/„ausgefallen“) nicht immer getroffen werden.

3.3 Dynamisches Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Bevor die Möglichkeiten bei der Modellierung mit dynamischen Zuverlässigkeitsblockdiagrammen aufgezeigt werden, soll zunächst das gewöhnliche Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) als Grundlage beschrieben werden. Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm ist nach [55] definiert als eine logische und graphische Darstellung eines Systems, wie die Erfolgszustände seiner Systemkomponenten und deren logische Verknüpfung den Erfolgszustand des Systems beeinflussen. Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm dient als graphische Darstellung der im Abschnitt zuvor beschriebenen Booleschen Systemtheorie. Dabei wird jede Komponente durch einen graphischen Block dargestellt. Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm kann zur qualitativen Analyse für die Systemübersicht oder zum Aufzeigen von kritischen Pfaden verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert aber die Möglichkeit zur quantitativen Analyse.

Das Prinzip des Zuverlässigkeitsblockdiagramms beruht auf der logischen Verknüpfung von einzelnen Komponenten bzw. Blöcken je nach Struktur des Gesamtsystems. Für die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems ist entscheidend, dass ein Pfad zwischen Diagrammeingang und -ausgang besteht, der Erfolgspfad.

Im Folgenden werden die Verknüpfungen zu den gängigsten Strukturen vorgestellt.

Parallelstruktur

Bedingung für die Funktionsfähigkeit des Systems bei einer Parallelstruktur ist die Funktionsfähigkeit mindestens einer Komponente. Parallelstrukturen werden zum Beispiel für die Beschreibung von Redundanzen eingesetzt. Die mathematische Beschreibung der Zuverlässigkeit zeigt Gleichung 3.1. Bild 3.2 zeigt eine Parallelstruktur und die Möglichkeit den Diagrammeingang (E) mit dem -ausgang (A) über mehrere Pfade zu verbinden.

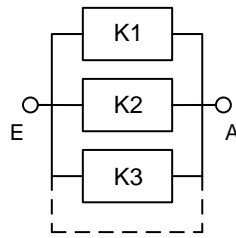


Bild 3.2: Parallelstruktur

Serienstruktur

Die Verbindung zwischen Ein- und Ausgang ist bei einer Serienstruktur nur über einen Pfad möglich. Dieser Pfad setzt voraus, dass alle Systemkomponenten intakt sind. Ein Ausfall einer Komponente hat den Ausfall des Gesamtsystems zur Folge. Die mathematische Beschreibung der Zuverlässigkeit zeigt Gleichung 3.2. Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm einer Serienstruktur zeigt Bild 3.3.

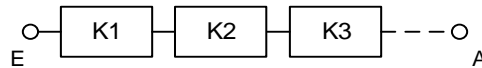


Bild 3.3: Serienstruktur

Gemischte Serien- und Parallelstruktur

Für die Beschreibung von komplexeren Systemen kommen gemischte Strukturen zum Einsatz. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn einzelne Komponenten redundant ausgeführt werden. Bild 3.4 zeigt eine gemischte Struktur.

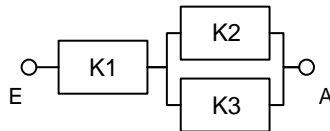


Bild 3.4: Gemischte Serien- und Parallelstruktur

Bei der Berechnung der Systemzuverlässigkeit kann die Systemstruktur vereinfacht als ein Seriensystem aus zwei Komponenten betrachtet werden, wobei eine der beiden Komponenten redundant, also durch eine Parallelstruktur, bestehend aus den Komponenten K_2 und K_3 , ausgeführt ist. Die Gesamtzuverlässigkeit ergibt sich in diesem Fall wie folgt:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot (1 - (1 - R_2(t)) \cdot (1 - R_3(t))) \quad (3.3)$$

„n aus k“-Struktur

Für Systeme, bei denen für die Sicherstellung der Gesamtfunktion eine bestimmte Anzahl an Komponenten, die zueinander parallel geschaltet sind, funktionsfähig sein müssen, kommen sogenannte „n aus k“-Systeme zum Einsatz. Bild 3.5 zeigt als Beispiel für ein System eine „2 aus 3“-Struktur.

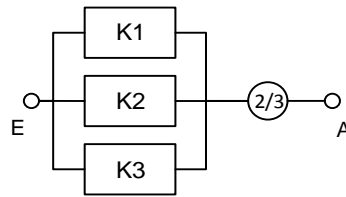


Bild 3.5: „2 aus 3“-Struktur

Das System ist genau dann in einem funktionsfähigen Zustand, wenn zwei der drei Komponenten intakt sind. Dabei ist es nicht von Bedeutung, welche beiden Komponenten funktionsfähig sind. Für die Beschreibung dieses Systems kommt die Methode der minimalen Erfolgspfade zum Einsatz. Mit Hilfe der Booleschen Systemtheorie lässt sich das System wie folgt beschreiben:

$$y = x_{K1}x_{K2} \vee x_{K1}x_{K3} \vee x_{K2}x_{K3} \quad (3.4)$$

Für die wahrscheinlichkeitsbasierte Betrachtung der Zuverlässigkeit ergibt sich folgender algebraischer Ausdruck:

$$R_S(t) = 1 - \frac{(1 - R_{K1}(t)R_{K2}(t)) \cdot (1 - R_{K1}(t)R_{K3}(t)) \cdot (1 - R_{K2}(t)R_{K3}(t))}{(1 - R_{K1}(t)R_{K2}(t)) \cdot (1 - R_{K1}(t)R_{K3}(t)) \cdot (1 - R_{K2}(t)R_{K3}(t))} \quad (3.5)$$

Für die quantitative Analyse der verschiedenen Strukturen finden Techniken, wie z. B. boolesche Wahrheitstabellen, die Reduktion in einfachere Zuverlässigkeitsblocktabellen oder Karnaugh-Pläne Anwendung.

Können die Bedingungen der „Nicht-Reparierbarkeit“, der ausschließlichen Betrachtungsweise „intakt“/„ausgefallen“ und der Unabhängigkeit der Systemkomponenten nicht erfüllt werden, können die gewöhnlichen Zuverlässigkeitsblockdiagramme nicht mehr eingesetzt werden. Um diese Einschränkungen zu umgehen, wurden dynamische Zuverlässigkeitsblockdiagramme (DRBD) entwickelt. Die wesentliche Erweiterung ist dabei der Einsatz von Blöcken, die mit sich selbst oder externen Elementen interagieren [55]. Eine verallgemeinerte Darstellungsweise für die erweiterten Blöcke der dynamischen Zuverlässigkeitsblockdiagramme existiert bisher nicht. In [55] werden graphische Symbole zur Darstellung von dynamischen Zuverlässigkeitsblockdiagrammen vorgeschlagen.

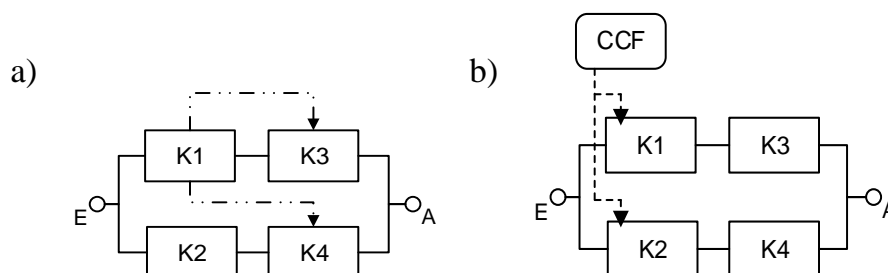


Bild 3.6: Dynamische Interaktion zwischen a) ZBD-Blöcken und b) einem CCF und den ZBD-Blöcken

Bild 3.6a) zeigt die vorgeschlagene Darstellung für eine dynamische Interaktion zwischen Blöcken des Zuverlässigkeitsblockdiagramms. In diesem Beispiel ist die funktionale Abhängigkeit der Komponenten $K3$ und $K4$ von Komponente $K1$ dargestellt. Bild 3.6b) zeigt die Auswirkung eines Common Cause Fehlers (CCF), einer gemeinsamen Ausfallursache, auf die jeweiligen Komponenten $K1$ und $K2$.

In der Literatur werden viele weitere Möglichkeiten zur Darstellung von dynamischen Interaktionen vorgeschlagen. [61] führt zur dynamischen Beschreibung der einzelnen Komponenten endliche Zustandsautomaten ein. Damit können die Komponenten die Zustände „aktiv“, „passiv“ und „Standby“ einnehmen. Darüber hinaus werden Verbindungselemente eingeführt, die Wechselwirkungen zwischen Komponenten, wie z. B. Lastteilung oder Redundanz beschreiben. Die vorgeschlagene Methodik wird anhand eines Mehrprozessorsystems angewendet [62]. Eine alternative Semantik wird in [63] vorgeschlagen, worin ein Zustandsblock (SDEP-State Dependency Block) als neues Element eingeführt wird. Eine beispielhafte Anwendung findet sich in [64].

Zur Auswertung der dynamischen Zuverlässigkeitsblockdiagramme sind die mathematischen Zusammenhänge der Booleschen Systemtheorie nicht mehr geeignet. Hierzu kommen Markov-Prozesse oder auch Petrinetzansätze zum Einsatz. Diese Methoden werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels behandelt.

3.4 Dynamische Fehlerbäume

Die Fehlerbaumanalyse (FTA, engl.: Fault Tree Analysis) wurde in den frühen 60er Jahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie im Auftrag der U-S. Air Force entwickelt [65]. Mit Hilfe der klassischen Fehlerbaumanalyse werden logische Verknüpfungen von internen und externen Ursachen auf Basis der Booleschen Systemtheorie ermittelt, die zu einem meist unerwünschten Ereignis führen [66]. Bei diesem unerwünschten Ereignis, in der Regel ein Systemausfall, spricht man von einem TOP-Event. Die Fehlerbaumanalyse oder auch Fehlerzustandsbaumanalyse [67] ist ein deduktives Verfahren (TOP-DOWN-Verfahren), das ausgehend von diesem TOP-Event Ursachen auf den nächst tieferen Systemebenen identifiziert und logisch mit dem übergeordneten Ereignis verknüpft. Der Detaillierungsgrad, mit dem der Fehlerbaum ausgeführt wird, ist dabei nicht festgelegt. So kann ein Systemausfall über die verschiedenen Ebenen der Ausfälle der Teilsysteme über die Baugruppen bis auf die Bauteilebene heruntergebrochen werden.

Ziele der klassischen Fehlerbaumanalyse sind [67]:

- Systematisches Aufzeigen von Ausfallursachen und deren Kombinationen, die ein unerwünschtes Ereignis, das Hauptereignis zur Folge haben
- Identifikation von kritischen Pfaden in der Baumstruktur, die am wahrscheinlichsten zu einem unerwünschten Ereignis führen

- Vergleich von Systemkonzepten über die Bewertung mittels Fehlerbäumen
- Erstellung einer übersichtlichen Darstellung über die Ausfallmechanismen und deren Zusammenhänge zur Erhöhung des Systemverständnisses
- Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen

Zur Verknüpfung der einzelnen Elemente zu einem Fehlerbaum werden graphische Bildzeichen genutzt. In der Literatur kommen verschiedene Bildzeichen zum Einsatz, die prinzipiell ähnlich aufgebaut sind. Bild 3.7 zeigt die Standardbildzeichen nach [66].

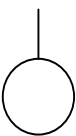
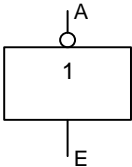
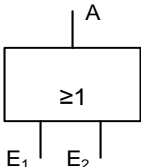
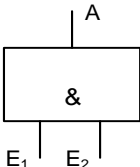
Standeringang	NICHT-Verknüpfung Negation	ODER-Verknüpfung Disjunktion	UND-Verknüpfung Konjunktion
			

Bild 3.7: Übersicht über die Standardbildzeichen eines Fehlerbaums [66]

Für einen Fehlerbaum gilt im Vergleich zu einem Funktionsbaum bzw. im Vergleich zur binären Betrachtungsweise der Booleschen Modellbildung (vgl. Abschnitt 3.2) folgende binäre Beschreibung der Ein- bzw. Ausgänge [66]:

„0“ „falsch“ „funktionsfähig“
 „1“ „wahr“ „ausgefallen“

Die Schaltelemente eines Funktionsbaums schalten je nach Verknüpfungslogik bei Fehlern bzw. ausgefallenen Elementen. Der Funktionsbaum lässt sich daher auch direkt durch Umkehrung der binären Beschreibung in einen Funktionsbaum überführen. Ein Fehlerbaum wird durch diesen Gedankengang mit der Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit, der Funktionsbaum mit der Beschreibung der Systemzuverlässigkeit assoziiert. Bild 3.8 zeigt einen beispielhaften Fehlerbaum.

Anhand dieses Beispiels soll das prinzipielle Vorgehen zusammenfassend erklärt werden. Zu Beginn wird das TOP-Event definiert, das in diesem Fall den Ausfall des Systems darstellt. Ausgehend von diesem Systemausfall wird untersucht, welche Ereignisse bzw. Fehler zu diesem TOP-Event führen können. Hier tritt dieser bei Auftreten eines von drei Systemfehlern auf. Daher sind diese drei Systemfehler über eine ODER-Verknüpfung bzw. Disjunktion verbunden. Der Systemfehler 1 lässt sich im gezeigten Beispiel nicht weiter untergliedern. Die Systemfehler 2 und 3 können bis auf die Komponentenebene heruntergebrochen werden, wobei Systemfehler 2 aus einer ODER-Verknüpfung von zwei Komponentenfehlern besteht. Systemfehler 3 tritt auf,

wenn sowohl der Komponentenfehler 3 als auch der Komponentenfehler 4 auftritt (UND-Verknüpfung, Konjunktion).

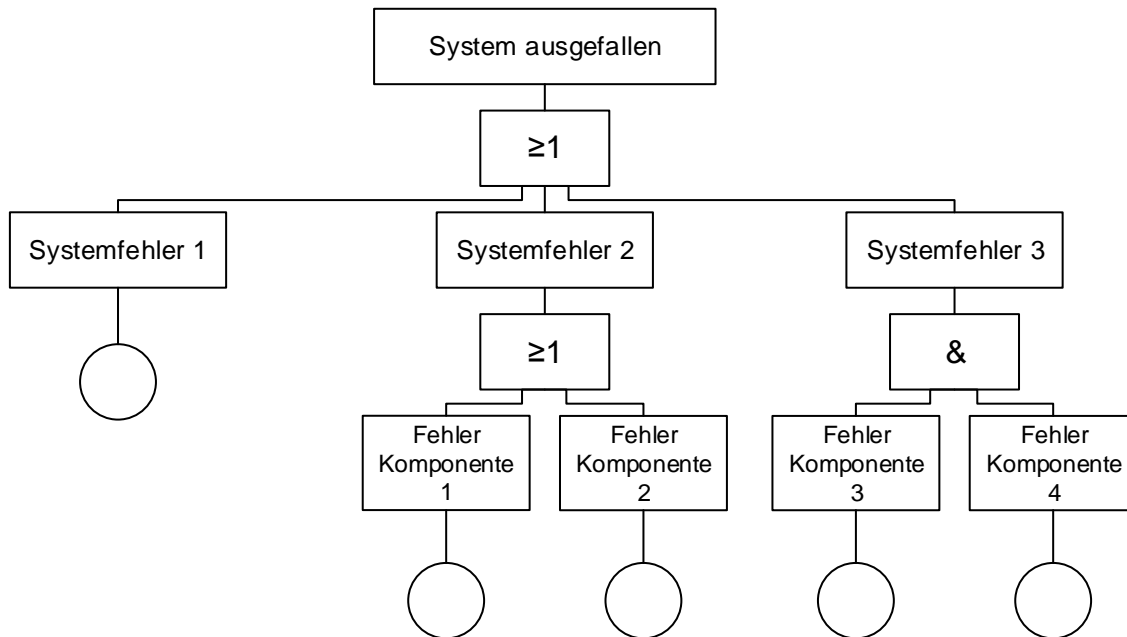


Bild 3.8: Beispielhafter Fehlerbaum

Der Fehlerbaum kann ähnlich wie das Zuverlässigkeitsblockdiagramm qualitativ oder quantitativ analysiert werden. Eine qualitative Analyse dient zur Erkennung aller möglichen Fehler und deren Ursachen, die zu einem definierten TOP-Event führen. Bei der quantitativen Analyse werden den Fehlerbaumkomponenten auf der untersten Ebene Auftretenswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers entspricht der Ausfallwahrscheinlichkeit. Ist die Ausfallwahrscheinlichkeit aller Einzelkomponenten bekannt, kann mit Hilfe des bereits vorgestellten Booleschen Modells und der Struktur des Fehlerbaums eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des definierten TOP-Events getroffen werden. Das Vorgehen bei der Auswertung eines Fehlerbaums zeigt [68].

Mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse kann das Ausfallverhalten eines Systems sehr intuitiv beschrieben werden. Einschränkungen gelten bei der klassischen Fehlerbaumanalyse, wie auch schon beim gewöhnlichen Zuverlässigkeitsblockdiagramm bei der Forderung der Zweiwertigkeit der einzelnen Blöcke. Weiterhin müssen die Ausfälle unabhängig sein, was zur Folge hat, dass die Reihenfolge der Ausfälle keine Rolle spielen darf. Um diese Einschränkungen zu umgehen, wurden dynamische Fehlerbäume entwickelt.

Für die dynamische Fehlerbaumanalyse wurden zusätzliche Verknüpfungen definiert, um die angesprochenen Einschränkungen aufzuheben [69–71]. Bild 3.9 zeigt beispielhaft zusätzliche Verknüpfungen für dynamische Fehlerbäume.

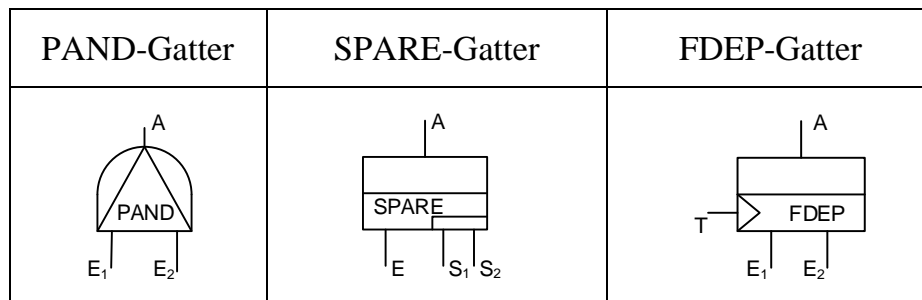


Bild 3.9: Verknüpfungen für dynamische Fehlerbäume

Das PAND-Gatter („priority AND“) schaltet, wenn die Ereignisse E_1 und E_2 beide den Wert 1 haben und zusätzlich das Ereignis E_1 vor dem Ereignis E_2 eintritt. Mit dieser Operation besteht nun die Möglichkeit zeitliche Abfolgen zu modellieren. Das SPARE-Gatter dient zur Modellierung von Redundanzen. Beim Auftreten des Ereignisses E , z. B. dem Ausfall einer Komponente, wird diese durch eine redundante Komponente (S_1/S_2) ersetzt. Das FDEP-Gatter („functional dependency“) kann für funktionale Abhängigkeiten verwendet werden. In obigem Beispiel werden durch ein „Trigger“-Event (T) die Ereignisse E_1 und E_2 ausgelöst. Dabei kann das „Trigger“-Event ein Ausgang eines anderen Gatters sein oder auch ein vom restlichen Fehlerbaum unabhängiges Ereignis.

Zur Analyse von dynamischen Fehlerbäumen werden diese über eine Modularisierung in statische und dynamische Module aufgeteilt [69]. Die statischen Module können über die bekannten Auswerteverfahren der klassischen Fehlerbäume berechnet werden. Die dynamischen Module lassen sich u.a. über Markov-Prozesse oder den Übergang zu Petrinetzen berechnen. Einen Überblick über verschiedene Lösungsansätze zeigt [72].

3.5 Bayes'sche Netze

Die prinzipiellen Ansätze der Fehlerbäume und der Zuverlässigkeitsblockdiagramme und zusätzlich der FMEA werden in den Bayes'schen Netzen vereint. Mit Hilfe von Bayes'schen Netzen können technische Systeme durch gerichtete azyklische Graphen beschrieben werden [73]. Ein Bayes'sches Netzwerk besteht aus einer bestimmten Anzahl an Variablen, den sogenannten Knotenpunkten, die über gerichtete Kanten miteinander verbunden werden. Bei den Knotenpunkten wird zwischen Elternknoten und Kindknoten unterschieden. Den gerichteten Kanten liegen bedingte Wahrscheinlichkeiten zugrunde, die die Verknüpfungen zwischen den Eltern- und den Kindknoten herstellen.

Die quantitative Analyse der Bayes'schen Netze erfolgt mit Hilfe des Satzes von Bayes bzw. dem Bayestheorem zur Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten. Für die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses A unter der Voraussetzung, dass das Ereignis B bereits eingetreten ist, gilt [74, 75]:

$$P(A_k|B) = \frac{P(A_k)P(B|A_k)}{\sum_{i=1}^n P(A_i)P(B|A_i)} \quad (3.6)$$

Im Folgenden soll anhand eines einfachen Beispiels die prinzipielle Vorgehensweise der Modellierungsmethode erklärt werden. Bild 3.10 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Bayes'schen Netzes [76].

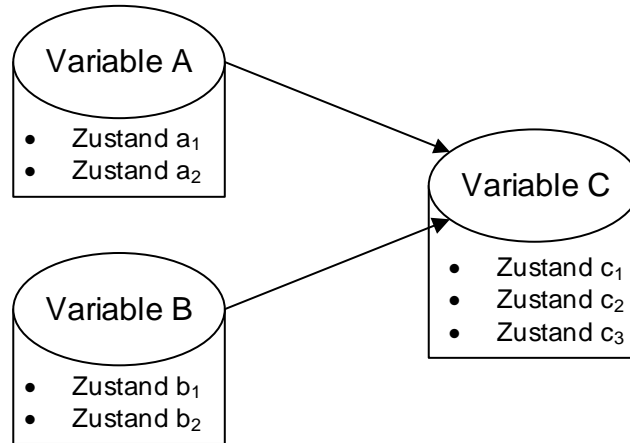


Bild 3.10: Aufbau eines Bayes'schen Netzes

Das Modell besteht aus zwei Elternknoten und den jeweiligen Variablen A und B . Diese Variable können sich in unterschiedlichen Zuständen a_i und b_i befinden. Je nach Aufbau des zu beschreibenden Systems führen die Zustände in den Elternknoten zu verschiedenen Zuständen c_i im Kindknoten mit der Variable C . Die Zusammenhänge zwischen den Zuständen der beteiligten Knoten ergeben sich aus den bedingten Wahrscheinlichkeiten. Diese können über eine CPT-Tabelle (Conditional Probability Table) beschrieben werden. Tabelle 3.2 zeigt die bedingten Wahrscheinlichkeiten für das Bayes'sche Netz aus Bild 3.10.

Tabelle 3.2: Tabelle der bedingten Wahrscheinlichkeiten der Zustände für Variable C

Variable A		a_1		a_2	
Variable B		b_1	b_2	b_1	b_2
$A \wedge B$		$a_1 b_1$	$a_1 b_2$	$a_2 b_1$	$a_2 b_2$
Variable C	c_1	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}
	c_2	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{24}
	c_3	c_{31}	c_{32}	c_{33}	c_{34}

Die Tabelle gibt die bedingten Wahrscheinlichkeiten c_{ij} für das Auftreten der Zustände c_i der Variable C an. Die bedingte Wahrscheinlichkeit c_{12} gibt zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit für den Zustand c_1 an, der aufgrund des Auftretens des Zustands $a_1 b_2$ zu erwarten ist (bspw. Zustand a_1 = intakt, b_2 = defekt). Die Wahrscheinlichkeit für das

Auftreten eines Zustands c_i der Variable C ergibt sich dann aus der logischen Verknüpfung der bedingten Wahrscheinlichkeiten c_{ij} . Hierbei bestehen die bekannten Verknüpfungsmöglichkeiten, die bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellt wurden. Der Vorteil der Bayes'schen Netze und der Beschreibung über die CPT-Tabellen ist die Möglichkeit der Beschreibung von Mehrzustandssystemen. Weiterhin kann der Einfluss eines Zustands auf mehrere weitere Zustände beschrieben werden, was z. B. bei Common Cause Fehlern der Fall ist. Nachteilig ist der steigende Aufwand bei zunehmender Anzahl an Zuständen und Knoten, wie sich bereits an der oben gezeigten Tabelle für drei Knoten mit insgesamt fünf Zuständen erkennen lässt.

Zuverlässigkeitsbetrachtungen lassen sich mit den Bayes'schen Netzen über die Verknüpfung mit Fehlerbäumen durchführen [77]. Das unerwünschte Ereignis, z. B. „System ausgefallen“, wird dementsprechend durch einen Zustand c_i modelliert, dessen Auftretenswahrscheinlichkeit gemäß der oben beschriebenen Vorgehensweise der Ausfallwahrscheinlichkeit entspricht.

Dynamische Bayes'sche Netze [78, 79] werden mit Hilfe von sogenannten Zeitscheiben aufgebaut, die jeweils aus einem gewöhnlichen Bayes'schen Netz bestehen. Diese repräsentieren diskrete Zeitpunkte im Simulationsablauf. Für dynamische Bayes'sche Netze werden neue Knotenarten eingeführt: Temporäre Knoten, welche nur in einer Zeitscheibe Auswirkungen haben, dynamische Knoten, deren Zustände sich je nach Zeitscheibe verändern können und statische Knoten, die keiner Zeitscheibe zugeordnet sind, jedoch auf diese einen Einfluss haben können. Die Änderungen über die Zeit werden über Übergangs-CPTs modelliert. Diese werden mit den Kanten zwischen den dynamischen Knoten der jeweiligen Zeitscheiben verknüpft. Ansätze zur Lösung von dynamischen Bayes'schen Netzen zeigt [80].

3.6 Markov-Prozesse

Markov-Prozesse, auch Markov-Methode genannt, sind den zustandsorientierten Modellierungsmethoden zugeordnet [81]. Das bedeutet, dass das zu modellierende System durch die möglichen Zustände und die Übergänge zwischen diesen, beschrieben wird. Markov-Prozesse gehören weiterhin zu den stochastischen Prozessen, wobei diese abhängig nach der Charakteristik ihres Parameter- und Zustandsraums eingeteilt werden können. Je nach Menge der Zeitpunkte (diskreter/kontinuierlicher Parameterraum) und der möglichen Zustände des Systems (diskreter/kontinuierlicher Zustandsraum), können die stochastischen Prozesse unterschieden werden. Die höchste Relevanz für die Beschreibung von technischen Systemen haben dabei die stochastischen Prozesse mit kontinuierlichem Parameterraum und diskretem Zustandsraum [22].

Im Allgemeinen werden stochastische Prozesse als Markov-Prozesse bezeichnet, wenn sie die Markov-Bedingungen erfüllen. Diese setzen sich aus der Markovschen Zustandsbedingung und der Markovschen Zeitbedingung zusammen.

Die Markovsche Zustandsbedingung setzt voraus, dass ein Zustand Z_i nur von dem davorliegenden Zustand Z_j abhängig ist und die vor dem Zustand Z_j aufgetretenen Zustände Z_k keinen Einfluss auf diesen haben ($k < j < i$). Die Markovsche Zeitbedingung („Gedächtnislosigkeit“) erfordert, dass der Zustand Z_i zu einem Zeitpunkt t_i nur vom davorliegenden Zeitpunkt t_{i-1} abhängt und nicht von den davorliegenden Zeitpunkten $t_{i-1} - \Delta t$. Diese Eigenschaft wird auch als Homogenität bezeichnet. Bei einem homogenen Markov-Prozess hängt im Gegensatz zum inhomogenen Markov-Prozess die Übergangswahrscheinlichkeit nur von der Differenz Δt der zwei Zeitpunkte ab [22].

Bei der graphischen Darstellung von Markov-Modellen kommen Knoten und Kanten zum Einsatz [82]. Knoten repräsentieren die jeweiligen Zustände des Systems bzw. der Komponenten. Kanten beschreiben die möglichen Zustandsübergänge. Bild 3.11 zeigt den Zustandsübergangsgraphen für ein Markov-Modell mit zwei Zuständen.

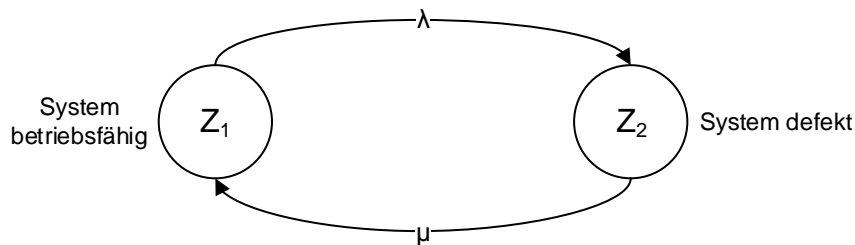


Bild 3.11: Markov-Modell mit zwei Zuständen

Das Modell besteht aus den zwei Zuständen Z_1 und Z_2 , die durch die Kreise dargestellt sind. Z_1 beschreibt in diesem Beispiel das System in einem betriebsfähigen Zustand, Z_2 in einem defekten Zustand. Die Zustandsknoten sind über gerichtete Kanten miteinander verbunden. Diesen Kanten werden die Zustandsübergangsraten λ und μ zugewiesen, wobei λ als Ausfallrate und μ als Reparaturrate des Systems betrachtet werden kann. Ziel der Markov-Methode ist es, die Zustandswahrscheinlichkeiten über einen Markov-Prozess zu bestimmen. Der Markov-Prozess gliedert sich dabei in die folgenden vier Schritte. Diesen vier Schritten wird eine detaillierte Systembeschreibung vorausgesetzt [113].

Schritt 1: Erstellen des Zustandsübergangsgraphen

Wie Bild 3.11 zeigt, dient der Zustandsübergangsgraph zur graphischen Darstellung des Prozesses und unterstützt die Erstellung der Übergangsmatrix.

Schritt 2: Erstellen der Übergangsmatrix und der sich daraus abgeleiteten Differentialgleichungen

Auf Basis des Zustandsübergangsgraphen werden die möglichen Zustandsübergänge über eine Übergangsmatrix mathematisch beschrieben. Aus der Übergangsmatrix kann ein entsprechendes Differentialgleichungssystem abgeleitet werden.

Schritt 3: Lösen des Differentialgleichungssystems

Das Differentialgleichungssystem kann mit Hilfe des Setzens von Anfangsbedingungen gelöst werden. Für die Lösung des Gleichungssystems kommen je nach Komplexität z. B. die Laplace-Transformation oder eine Gauß-Elimination zum Einsatz.

Schritt 4: Ermitteln der Zuverlässigkeitskennwerte

Die Zuverlässigkeitskennwerte ergeben sich schließlich durch Auswerten der Auftretenswahrscheinlichkeiten der entsprechenden Zustände.

Die Übergangsmatrix M für das Beispiel in Bild 3.11 ergibt sich durch zeilenweise Bilanzierung der entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten zu

$$M = \begin{pmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Die entsprechenden Differentialgleichungen zur Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten $p_i(t)$ ergeben sich mit

$$\frac{d}{dt} p_i(t) = M \cdot p_i(t) \text{ bzw. } \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} p_1(t) \\ \frac{d}{dt} p_2(t) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

zu

$$\frac{d}{dt} p_1(t) = (-\lambda) \cdot p_1(t) + \mu \cdot p_2(t) \text{ und} \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} p_2(t) = \lambda \cdot p_1(t) - \mu \cdot p_2(t)$$

Mit der Annahme, dass sich das System zu Beginn im intakten Zustand Z_1 befindet, folgen die Anfangsbedingungen $p_1(0) = 1$ und $p_2(0) = 0$. Weiterhin befindet sich das System entweder im Zustand Z_1 oder im Zustand Z_2 , was zur Normierungsbedingung $p_1(t) + p_2(t) = 1$ führt. Zusammen mit der Prämisse, dass die Übergänge zwischen den Zuständen exponentialverteilt sind, ergibt sich die Zustandswahrscheinlichkeit $p_1(t)$ zu

$$p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.10)$$

und $p_2(t)$ entsprechend zu

$$p_2(t) = 1 - p_1(t) \quad (3.11)$$

Für die Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen werden die Zustandswahrscheinlichkeiten entsprechend analysiert. So kann z. B. die Dauerverfügbarkeit A_D des Sys-

tems, was der Zustandswahrscheinlichkeit $p_1(t)$ beim Übergang von $t \rightarrow \infty$ entspricht, wie folgt bestimmt werden:

$$A_D = \lim_{t \rightarrow \infty} p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.12)$$

Weitere Berechnungen mit der Markov-Methode anhand von Beispielsystemen finden sich in [113].

Besteht die Forderung nach einer beliebigen Verteilung für die Verweildauer in einem Zustand und soll diese zusätzlich nicht nur vom aktuellen Zustand sondern auch vom Nachfolgezustand abhängen, kommen Semi-Markov-Prozesse (SMP) zum Einsatz. Da Semi-Markov-Prozesse nur zu bestimmten Zeitpunkten, den Übergangszeitpunkten, die Markovbedingungen erfüllen, sind diese eine Verallgemeinerung der gewöhnlichen Markov-Ketten. Sie sind demzufolge Semi-Markov-Prozesse mit eingebetteten Markov-Ketten. Für den Semi-Markov-Prozess ist daher, zusätzlich zu den bekannten Größen, die Beschreibung der Verweilzeit in den jeweiligen Zuständen über eine Verteilungsfunktion notwendig. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von einem Zustand in einen anderen nach der Verweilzeit an. Eine Möglichkeit zur Berechnung der Semi-Markov-Prozesse steht durch eine zweistufige analytische Technik zur Verfügung [83, 84]. Dabei werden zunächst die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten aller Zustände der eingebetteten Markov-Kette berechnet und anschließend die mittlere Verweilzeit aller Zustände [83, 84]. Die Vorgehensweise gliedert sich in die folgenden Schritte:

Schritt 1: Erstellen des Zustandsübergangsgraphen

Schritt 2: Zweistufiges analytisches Verfahren

1. Stufe:

- Aufstellen der Übergangsmatrix des Semi-Markov-Prozesses
- Aufstellen der Einschnitt-Übergangsmatrix der eingebetteten Markov-Kette
- Berechnung der stationären Übergangswahrscheinlichkeiten der eingebetteten Markov-Kette

2. Stufe:

- Berechnung der mittleren Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des Semi-Markov-Prozesses

Schritt 3: Ermitteln der Zuverlässigkeitskennwerte

Die genaue Vorgehensweise mit einem Berechnungsbeispiel zeigt [113].

3.7 Petrinetze

Petrinetze wurden von Carl Adam Petri für Anwendungen in der Informatik entwickelt und 1962 in seiner Dissertation „Kommunikation mit Automaten“ veröffentlicht [85]. Seither wurden Petrinetze kontinuierlich weiterentwickelt und für neue Einsatzgebiete optimiert. Der Einsatzbereich erstreckt sich z.B. über Anwendungen für Computersysteme, Kommunikationsnetze und Produktions- und Fertigungssysteme [86]. In den letzten Jahren wurden Petrinetze aufgrund der steigenden Komplexität von technischen Systemen immer häufiger in der Zuverlässigkeitstechnik angewendet [87]. Eine Übersicht der wichtigsten weiterentwickelten Petrinetze der letzten Jahre findet sich in [88]. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte methodische Vorgehensweise wird anhand der stochastischen Petrinetze, speziell der erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (ECSPN) vorgestellt. Bild 3.12 zeigt die Weiterentwicklung der stochastischen Petrinetze und die Einflüsse von den bereits vorgestellten Modellierungsmethoden auf diese Weiterentwicklungen nach [86]. Warteschlangenmodelle sollen in dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden.

Im Folgenden wird auf die Grundlagen der stochastischen Petrinetze eingegangen.

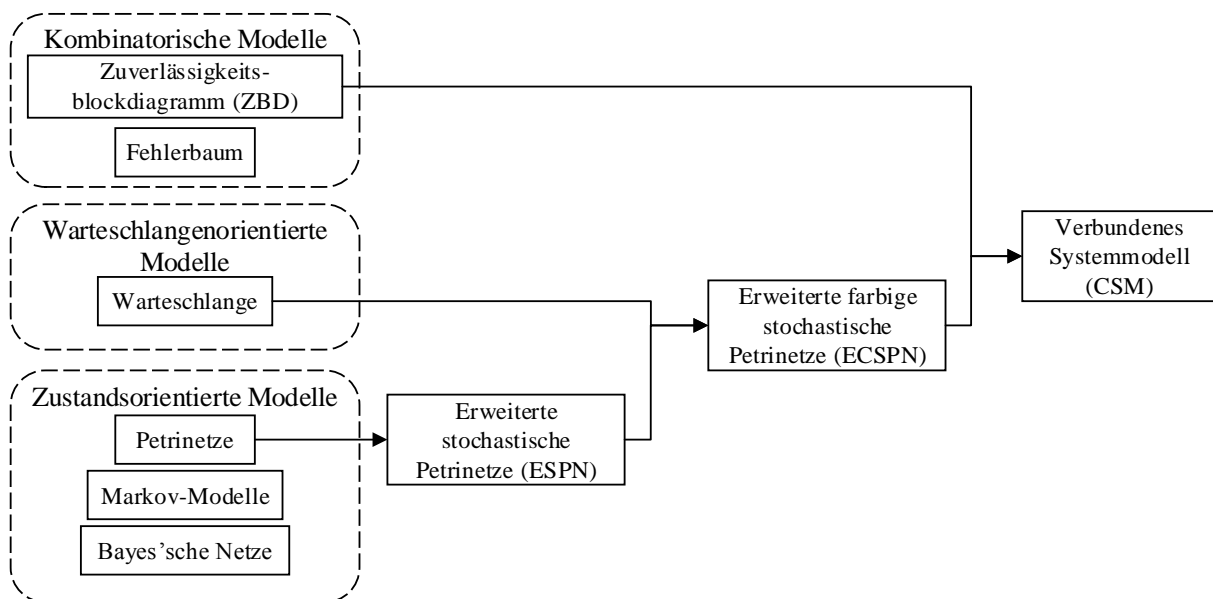


Bild 3.12: Hierarchie der Modellierungsmethoden

Petrinetze sind bipartit gerichtete Graphen, die aus Knoten und Kanten bestehen. Bipartit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Verbindungen nur in eine Richtung zugelassen sind. Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Knoten, welche als Stellen und Transitionen bezeichnet werden. Stellen sind passive Elemente, welche lokale Zustände beschreiben, Transitionen sind aktive Elemente, welche die Übergänge zwischen den Stellen beschreiben [89]. Transitionen können schalten, wenn alle Eingangsbedingungen erfüllt sind. Die Knoten sind über gerichtete Kanten miteinander verbunden. Für die graphische Darstellung werden die Stellen durch Kreise, die Transitionen

durch Rechtecke und die gerichteten Kanten durch Pfeile dargestellt. In der Literatur kann es an dieser Stelle zu Abweichungen in der symbolischen Darstellung kommen. Stellen, Transitionen und Kanten gehören zu den statischen Elementen der Petrinetze. Die Dynamik der Petrinetze entsteht durch die Marken, die als schwarze Punkte dargestellt werden. Diese befinden sich in den Stellen und können durch Transitionen gelöscht und in weiteren Stellen erzeugt werden. Bild 3.13 zeigt das Beispiel eines Petrinetzes vor und nach einem Schaltvorgang.

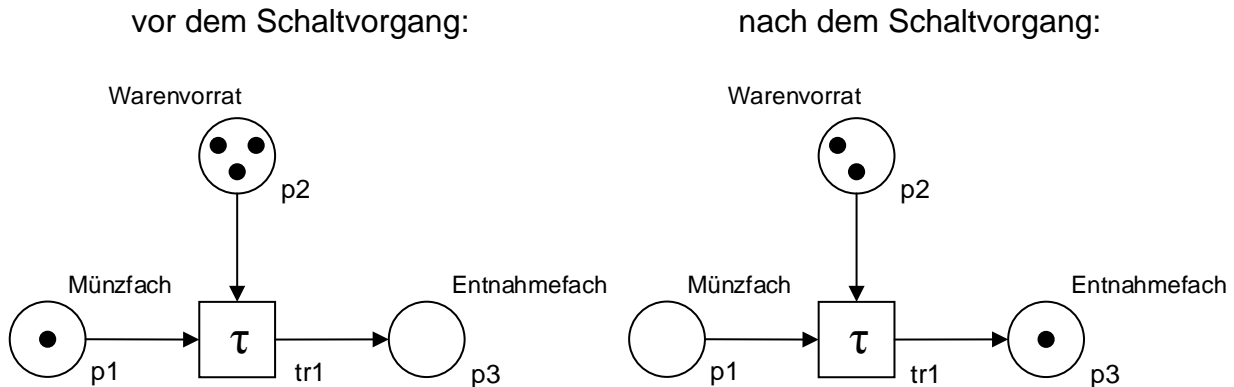


Bild 3.13: Schaltvorgang eines Petrinetzes

Das obige Modell zeigt die Modellierung eines Vorgangs in einem Verkaufsautomaten. Bei Einwurf einer Münze in das Münzfach (Marke in Stelle $p1$) und Vorhandensein der entsprechenden Ware (Marken in Stelle $p2$) sind die Eingangsbedingungen der Transition $tr1$ erfüllt und die Ware wird im Entnahmefach (Stelle $p3$) ausgegeben. Fehlt eine Marke in den Stellen $p1$ oder $p2$, ist die Aktivierungsbedingung der Transition $tr1$ nicht erfüllt und diese kann nicht schalten und somit keine Ware ausgegeben werden.

Die **stochastischen Petrinetze (SPN, engl. Stochastic Petri Nets)** ergeben sich durch die Erweiterung der einfachen Petrinetze um schaltverzögerte Transitionen. Dabei können den Transitionen exponentialverteilte Schaltverzögerungen zwischen der Aktivierung und Schaltung der Transitionen zugewiesen werden. Durch den Übergang der exponentialverteilten Schaltverzögerung zur Beschreibung der Schaltverzögerung über beliebige Verteilungsfunktionen entstehen die **erweiterten stochastischen Petrinetze (ESPN, engl.: Extended Stochastic Petri Nets)**. Für die Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstechnik hat diese Art der Petrinetze besondere Vorteile, da z. B. mechanische Systeme häufig ein weibullverteiltes Ausfallverhalten aufweisen.

Die farbigen Petrinetze (CPN, engl.: Coloured Petri Nets) sind eine Klasse von Petrinetzen, bei denen die Marken komplexe Informationen beinhalten können [90]. Bei diesen Informationen spricht man auch von Farben der Marken, da diese nun unterscheidbar sind. Durch diese Erweiterung ist es möglich, mit unterscheidbaren Marken und z. B. durch neue Aktivierungsbedingungen für die Transitionen abhängig von der

jeweiligen Farbe der Marke, ein Netz sehr kompakt zu gestalten. Die **erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (ECSPN)**, engl.: Extended Coloured Stochastic Petri Nets) vereinen die Eigenschaften aus den erweiterten stochastischen Petrinetzen und den farbigen Petrinetzen [86]. Die wesentlichen Erweiterungen zur Klasse der farbigen Petrinetze sind nachfolgend dargestellt [91]:

- Nutzung von beliebigen Verteilungsfunktionen für die Transitionen
- Konzept der Alterung
- Erneuerungsgrad
- Warteschlangenstellen
- Nutzung von Kostenvariablen
- Referenzstellen und -transitionen
- Variablenkalkulation
- Einsatz von Zufallsvariablen auf Kanten
- Unscharfe Parameter

Mathematisch wird ein ECSPN nach [86, 90, 91] wie folgt als n -Tupel definiert:

$$ECSPN = (\Sigma, V, GV, CC, P, PC, QP, TR, G, D, FP, \Pi, W, A, AT, E, AF, I, IGV, ICC, CV, CF, RP, RPP, RT, RTTR) \quad (3.13)$$

mit:

- $\Sigma = \{\sigma_i\}$, $i = 1(1)N_\Sigma$, einer Menge der N_Σ Farben σ , die den Typ „bool“, „int“, „real“, „string“ und „product“ besitzen können,
- $V = \{v_i\}$, $i = 1(1)N_V$, einer Menge der N_V lokalen Variablen v_i ,
- $GV = \{gv_i\}$, $i = 1(1)N_{GV}$, einer Menge der N_{GV} globalen Variablen gv_i ,
- $CC = \{cc_i\}$, $i = 1(1)N_{CC}$, einer Menge der N_{CC} Kostenvariablen cc_i , in denen zeitabhängige, stückzahlabhängige und fixe Kosten zusammengeführt werden können,
- $P = \{p_i\}$, $i = 1(1)N_P$, einer Menge N_P einer endlichen Menge von Stellen p_i , die mit Marken belegt sein können,
- PC , $PC: P \rightarrow \Sigma$, einer Farbenfunktion, die den Stellen eine bestimmte Farbe zuordnet, welche Element der deklarierten Farbenmenge Σ ist,
- QP , $QP: P \rightarrow \{\text{"Normal"}, \text{"FIFO"}, \text{"FIFO with Priority"}\}$, einer Funktion, die einer Stelle eine von drei Warteschlangendisziplinen zuordnet,

- $TR = \{tr_i\}$, $i = 1(1)N_{TR}$, einer endlichen Menge N_{TR} von Transitionen, die entweder unmittelbar oder zeitbehaftet sind,
- G , einer Funktion, die den Transitionen eine von TR definierte boolesche Wächterfunktion zuweist,
- D , $D: TR \rightarrow \{T_D, F_D(t)\}$, einer Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen eine Schaltverzögerung d_i zuweist; dies kann ein deterministischer (konstanter) Wert T_D oder eine Verteilungsfunktion $F_D(t)$ mit den entsprechenden Parametern sein,
- FP , $FP: TR \rightarrow \{\text{"Enabling Memory"}, \text{"Age Memory"}, \text{"Age Influence"}\}$, einer Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen ein Schaltverfahren zuweist,
- Π , $\Pi: TR \rightarrow \mathbb{N}_0$, einer Funktion, die den Transitionen eine Schaltpriorität zuweist,
- W , $W: TR \rightarrow \mathbb{N}$, einer Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen ein Gewicht zur Bestimmung der Schaltwahrscheinlichkeit zuweist,
- $A = \{a_i\}$, $i = 1(1)N_A$, einer endlichen Menge N_A von Kanten a_i , mit $A = (P \times TR) \cup (TR \times P)$, d. h. eine Kante verbindet entweder eine Stelle mit einer Transition (Pre-Kante) oder eine Transition mit einer Stelle (Post-Kante),
- AT , $AT: A \rightarrow \{\text{"Normalkante"}, \text{"Lesekante"}, \text{"Verbotskante"}\}$, einer Funktion, die den Kanten eine Kanteneigenschaft zuweist,
- E , einer Funktion, die den Kanten eine Kantenausdrucksfunktion zuweist mit $E \in [A \rightarrow \mathbb{N}]$, d. h. jede Kante hat ein ganzzahliges Attribut größer Null,
- AF , $AF: A \rightarrow \{\text{"AgeEnter=v"}, \text{"Priority=v"}, \text{"Set(gv=x)}\}$ mit $x \in \mathbb{N}_0$, einer Funktion, die den Kanten eine Kantenfunktion zuweist,
- I , einer Initialisierungsfunktion von P mit $I \in [P \rightarrow \mathbb{N}_0]$, d. h. jede Stelle hat ein ganzzahliges Attribut, welche die Zahl der Marken für die Anfangsmarkierung des Petrinetzes bezeichnet,
- IGV , $IGV: GV \rightarrow \mathbb{N}_0$, einer Initialisierungsfunktion der globalen Variablen,
- ICC , $ICC: CC \rightarrow \mathbb{R}$, einer Initialisierungsfunktion der Kostenvariablen,
- CV , einer Funktion, die den Stellen und Transitionen eine Kostenvariable zuweist,
- CF , einer Funktion, die den Stellen und Transitionen einen Kostenfaktor zuweist,

- $RP = \{rp_i\}$, $i = 1(1)N_{RP}$, einer endliche Menge von Referenzstellen rp_i ,
- $RPP: RP \rightarrow P$, einer Funktion, die einer Referenzstelle eine bestimmte Stelle zuordnet,
- $RT = \{rt_i\}$, $i = 1(1)N_{RT}$, einer endliche Menge von Referenztransitionen rt_i ,
- $RTTR: RT \rightarrow TR$, einer Funktion, die einer Referenztransition eine bestimmte Transition zuordnet.

Nach [86] erfolgt die Modellierung der Petrinetze über

- Deklarationen mit den Variablen Σ , GV und CC ,
- eine symbolische Darstellung von den Stellen P , Referenzstellen RP , Transitionen TR , Referenztransitionen RT und Kanten A sowie deren Eigenschaften QP und AT mit Hilfe von Netzgraphen,
- Netzbeschriftungen mit PC , I , QP , CV und CF für die Stellen P , RPP für die Referenzstellen RP , mit G , D , FP , W , II , CV und CF für die Transitionen TR , $RTTR$ für die Referenzstellen RT und mit E und AF für die Kanten A .

Bild 3.14 zeigt anhand eines Modells einer reparierbaren Komponente die Elemente der ECSPN. Das Verbundene Systemmodell (CSM, engl.: Conjoint System Model) resultiert schließlich aus der Verknüpfung der ECSPN mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm [92].

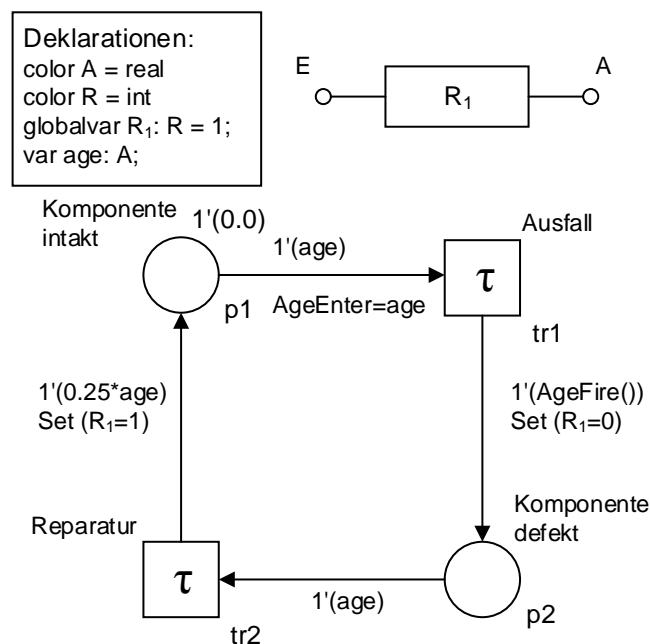


Bild 3.14: Verbundene Modellierung einer reparierbaren Komponente

Das Modell besteht aus zwei Stellen ($p1$ und $p2$), die die beiden Zustände der Komponenten repräsentieren. Im Initialzustand befindet sich die Komponente in einem intakten Zustand, was durch die Zahl 1 (entspricht einer Marke) rechts über der Stelle $p1$ symbolisiert wird. Nach einer stochastisch verteilten Ausfallzeit, welche in der Transition $tr1$ hinterlegt ist, schaltet diese Transition und die Komponente geht in den defekten Zustand über (Stelle $p2$). Nach der Reparaturzeit, welche ebenfalls einer in der Transition $tr2$ definierten Verteilungsfunktion folgen kann, erreicht die Komponente schließlich wieder den Ausgangszustand in Stelle $p1$. Im gezeigten Modell wird darüber hinaus die Alterung der Komponente berücksichtigt. Mit der Kantenfunktion „ $AgeEnter = a$ “ wird eine Voralterung der Komponente berücksichtigt. Die Alterung nach dem Ausfall wird durch den Befehl „ $AgeFire()$ “ im Modell weitergegeben. Nach der Reparatur wird schließlich ein Erneuerungsgrad ε berücksichtigt. In diesem Beispiel beträgt die Alterung nach der Reparatur nur noch 25 % der vorherigen Alterung. Weiterhin zeigt Bild 3.14 die Deklarationen oben links, sowie die Verknüpfung mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm oben rechts. Die Verknüpfung mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm geschieht über die globale Variable R_1 , deren Wert durch die Funktionen in den jeweiligen Ausgangskanten verändert wird und den jeweiligen Zustand der Komponente repräsentiert.

Durch die verbundene Modellierung können auf diese Weise komplexe Systeme mit mehreren Komponenten übersichtlich modelliert werden. Die Auswertung der modellierten Petrinetze geschieht über eine nachgelagerte Monte-Carlo-Simulation.

3.8 Vergleich der dynamischen Modellierungsmethoden

Im folgenden Abschnitt erfolgt ein Vergleich der dynamischen Modellierungsmethoden. Anhand von ausgewählten relevanten Modellierungsanforderungen wird bewertet, inwiefern die jeweilige Methode die Anforderungen erfüllen kann. Dabei wird das Bewertungsschema an vorangegangene Arbeiten und Bewertungskriterien angelehnt [86, 87, 91]. Der Fokus liegt allerdings auf den Modellierungsanforderungen, die explizit die Zuverlässigkeit betreffen.

Erweitert wurde das Bewertungsschema um die dynamischen Modellierungsmethoden und um Aspekte der Zuverlässigkeitsmodellierung für mechatronische Systeme.

Tabelle 3.3: Erfüllung der Modellierungsanforderungen durch die Modellierungsmethoden

Modellierungsanforderung	Modellierungsmethode					
	DZBD	DFTA	Bayes'sche Netze	Markov-Prozesse	ESCPN	CSM
Zuverlässigkeitsstruktur	+	-	-	0	-	+
System- und Komponentenzustände	-	0	+	+	+	+
Konstante Ausfallraten	-	-	+	+	+	+
Zeitabhängige Ausfallraten	-	-	-	+	+	+
Dynamisch veränderliches Ausfallverhalten	-	-	-	-	+	+
Dynamische Strukturen	0	-	-	-	+	+
Alterung	-	-	-	-	+	+
Ausfallabhängigkeiten	0	0	0	0	+	+
Zustandsabhängige Betriebsmodi	-	-	0	0	+	+
Berücksichtigung von Lastkollektiven	-	-	-	-	+	+
Modellierung von Betriebsstrategien	-	-	-	-	+	+
Wechselwirkungen	0	0	-	+	+	+
Komponentenabhängigkeiten	0	0	-	+	+	+

-: nicht/mit hohem Aufwand modellierbar

0: eingeschränkt modellierbar

+: direkt modellierbar

Tabelle 3.3 zeigt, dass sich Petrinetze, speziell die verbundene Modellierung (CSM), sehr gut für die Modellierung der Zuverlässigkeit von komplexen technischen Systemen eignen.

4 Anforderungen an die methodische Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die methodische Vorgehensweise formuliert. Bei der Formulierung der Anforderungen ist darauf zu achten, dass sie Leistungsmerkmale fachlicher oder technischer Art darstellen, die die zu entwickelnde Anwendung bzw. Methode aufweisen soll [93]. Dabei wurde, wie in Bild 4.1 gezeigt, in vier Anforderungsarten unterschieden. Die Ermittlung der Anforderungen geschieht in Anlehnung an das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung in [17] im übertragenen Sinne auf die methodische Vorgehensweise.

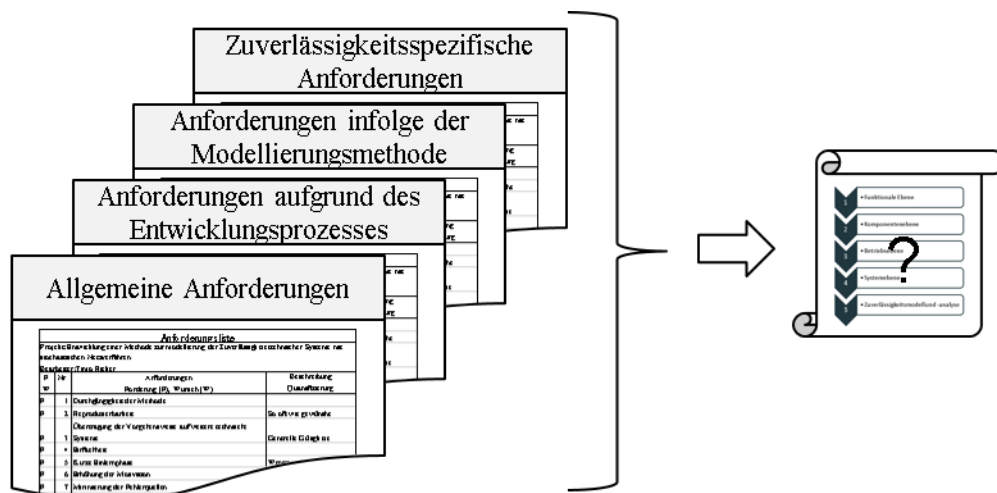


Bild 4.1: Anforderungen an die methodische Vorgehensweise

Die allgemeinen Anforderungen zielen auf die grundlegenden Voraussetzungen der Anwendbarkeit einer Methode und können auf jede beliebige auch fachlich differenzierte Methode übertragen werden. Das Ergebnis der folgenden Abschnitte ist je eine spezifische Anforderungsliste für die methodische Vorgehensweise. Die Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses, der in Abschnitt 2.2.2 beschrieben wurde, umfassen die Anforderungen durch die domänenspezifischen Problemstellungen entlang dieses Prozesses. Durch die Nutzung der erweiterten farbigen stochastischen Petrietze ergeben sich weitere Anforderungen infolge der Modellierungsmethode. Voraussetzung einer realitätsnahen Modellierung der Zuverlässigkeit ist die umfassende und möglichst vollständige Berücksichtigung aller Einflüsse auf die Zuverlässigkeit. Diese Anforderungen werden in den zuverlässigkeitsspezifischen Anforderungen formuliert.

4.1 Allgemeine Anforderungen

Zunächst werden die allgemeinen Anforderungen formuliert. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Anforderungen sind von einer speziellen Problemstellung gelöst und können davon unabhängig ausgearbeitet werden. Die allgemeinen Anforderungen können daher für die Entwicklung einer Methode generell zugrunde gelegt werden.

4.1.1 Durchgängigkeit

Die Forderung nach einer Durchgängigkeit der methodischen Vorgehensweise impliziert einen Prozess, der zu jedem Zeitpunkt vollkommen transparent und nachvollziehbar ist. Die Nachvollziehbarkeit soll besonders für nicht an der Anwendung der Methode beteiligte Dritte gegeben sein. Der Anwender soll durch die Durchgängigkeit der Methode zu jedem Zeitpunkt den Prozess hinsichtlich aktueller, bereits getätigter und anstehender Schritte überschauen können. Durch die Erreichung einer Durchgängigkeit wird der Erfolg bei der Anwendung der Methode beherrschbar.

4.1.2 Wiederholbarkeit

Die Wiederholbarkeit oder auch Reproduzierbarkeit hat das Ziel, die Abweichung bei erneuter Durchführung der Methode an einem beliebigen technischen System zu minimieren und im Optimalfall zu eliminieren. Abweichungen zwischen den Modellierungsergebnissen können durch bestehende Freiheitsgrade in der Modellierung auftreten. Dies gilt sowohl für Ergebnisse von Modellen, die durch einen Anwender erstellt wurden, vielmehr aber für die von verschiedenen Anwendern erstellten Modelle für eine identische Problemstellung. Der Einfluss der subjektiven Entscheidungen während des Modellierungsprozesses wirkt sich daher negativ auf die Wiederholbarkeit aus. Idealerweise führt die Anwendung der Methode zeit- und personenunabhängig immer zum gleichen Ergebnis.

4.1.3 Übertragbarkeit

Durch eine allgemeine Formulierung der Vorgehensweise soll eine Übertragbarkeit der Methode sichergestellt werden. Übertragbarkeit bedeutet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Anwendbarkeit der methodischen Vorgehensweise unabhängig vom Aufbau, Struktur und Komplexität der zu modellierenden Systeme. Für ähnliche Systeme soll durch einfachen Austausch von Komponenten in Form von Parameteranpassungen eine schnelle Übertragung möglich sein. Die Übertragbarkeit darf nicht auf Systeme einer Branche, z. B. Automobilbau beschränkt sein und muss für weitere technische Systeme gegeben sein. Durch diese Anforderung soll eine eingeschränkte Anwendbarkeit der Vorgehensweise vermieden werden.

4.1.4 Einfachheit

Der Einsatz von Methoden ist immer damit verbunden, in welchem Verhältnis die eingesetzten Ressourcen, wie z. B. Zeit, Arbeitskräfte oder auch finanzielle Aspekte im Verhältnis zu den daraus entstehenden Erträgen stehen. Erträge sind hier zum Beispiel ein gestiegenes Wissen über das modellierte System hinsichtlich Zuverlässigkeitsaspekten oder auch finanzielle Erträge durch eine bessere Zuverlässigkeitsabsicherung in der Entwicklung. Daher ist eine der wichtigsten Voraussetzungen, die Anwendbarkeit der Methode durch eine möglichst einfache Ausführung. Einfachheit bedeutet in diesem Zusammenhang eine intuitive Bedienung und Vorgehensweise während der Methode und die Möglichkeit einer möglichst kurzen Einlernphase, für die mit der Methode nicht vertrauten Anwender. Der gegenwärtige Zustand, nach dem die Anwendbarkeit bisher erfahrenen Experten vorbehalten ist, soll damit relativiert werden.

4.1.5 Minimierung potentieller Fehlerquellen

Für die Sicherstellung einer realitätsnahen Modellierung ist es notwendig, potentielle Fehlerquellen entlang des Modellierungsprozesses zu identifizieren und deren Anzahl zu minimieren. Fehler aufgrund des Modellierungsprozesses sind zu vermeiden. Vielmehr soll ein Rahmen geschaffen werden, in dem durch gewissenhaften Einsatz der Methode durch die Anwender Fehler nahezu komplett ausgeschlossen werden können. Eine vollständige Fehlerfreiheit kann durch den Unsicherheitsfaktor Mensch nicht gewährleistet werden. In kritischen Entscheidungsphasen darf sich der Anwender bei seinen Ausführungen nicht unsicher sein, ob seine getroffenen Annahmen korrekt sind. Sind Ergebnisse unplausibel oder realitätsfern, müssen die potentiellen Fehler in der Modellierung leicht erkennbar und somit schnell korrigierbar sein.

4.2 Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses

Die Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses ergeben sich aus den Besonderheiten bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen (vgl. Abschnitt 2.2) und den daraus resultierenden Einschränkungen bei der Modellierung. Durch diese Anforderungen soll die Methode aber nicht soweit spezifiziert werden, dass diese nicht mehr für einfachere Problemstellungen, wie z. B. die Modellierung von rein mechanischen Systemen geeignet ist.

4.2.1 Anwendung während des gesamten Entwicklungsprozesses

Der Einsatz der Methode soll während des gesamten Entwicklungsprozesses möglich sein. Neben der Berechnung von gewünschten Zuverlässigkeitskennwerten soll die Methode auch unterstützend bei verschiedenen Entscheidungsprozessen wirken. Neben der Konzeptauswahl (vgl. Abschnitt 4.2.4) kann die Auswahl einer gegebenenfalls

notwendigen Betriebsstrategie unterstützt werden. Erprobungsumfänge, die aus monetären, zeitlichen oder Kapazitätsgründen nicht durchgeführt werden können sind durch die Anwendung der Methode und den damit verbundenen Ergebnissen zu ersetzen. Informationen und neue Erkenntnisse, die im Laufe des Entwicklungsprozesses entstehen und zunehmen, müssen einfach und ohne großen Aufwand in die Modellierung integriert werden können.

4.2.2 Unabhängigkeit vom Entwicklungsprozess

In Abschnitt 2.2 wurde das gängige Vorgehen bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen vorgestellt. Die methodische Vorgehensweise soll an diesen Entwicklungsprozess angelehnt, aber nicht davon abhängig sein. Dies zielt darauf ab, dass die Methode unabhängig vom gewählten Entwicklungsprozess anwendbar bleibt. Die vorgegebenen Schritte bei der Modellierung sollen ein Vorschlag sein, aber nicht unter allen Umständen bindend. Diese Anforderung steht aber nicht im Widerspruch zur Anforderung der Minimierung potentieller Fehlerquellen. Da jedes technische System unterschiedlich aufgebaut ist und somit unterschiedliche Modellierungsaspekte berücksichtigt werden müssen, ist die Forderung nach einer gewissen „Modellierungsfreiheit“ notwendig.

4.2.3 Möglichkeit zur domänenspezifischen Modellierung

Ist ein mechatronisches System Gegenstand der Untersuchungen, ist die Forderung nach einer domänenspezifischen Modellierung unabdingbar. Da die Domänen Mechanik, Elektronik und Software in ihrem Verhalten grundsätzlich verschieden sind, bedarf es bei deren Modellierung eine große Anpassungsfähigkeit. Durch die getrennte Modellierung in den einzelnen Domänen können die jeweiligen Zuverlässigkeitskennwerte ermittelt und bewertet werden. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn Wechselwirkungen vernachlässigt werden können, was bei mechatronischen Systemen sehr selten der Fall ist. Kernpunkt dieser Anforderung ist die Anwendbarkeit der methodischen Vorgehensweise unabhängig vom Konzept des zu untersuchenden Systems.

4.2.4 Unterstützung bei der Konzeptauswahl durch flexible Modellierung

Durch den Einsatz der Methode sollen bereits bei der Konzeptauswahl Entscheidungshilfen geschaffen werden. Die Modellierung muss daher unabhängig von vollständigen Informationen über Anzahl an Komponenten, Systemstruktur oder einzelnen Zuverlässigkeitskenngrößen umsetzbar sein. Varianten, die zur Auswahl stehen, müssen auf Basis eines Grundmodells schnell und flexibel anpassbar sein. Da durch den Entwicklungsprozess bedingt noch kein domänenspezifischer Entwurf vorliegt, ist die Mög-

lichkeit einer Verwendung von Ersatzmodellen für die einzelnen Domänen erforderlich. Durch diese Anforderung soll das Augenmerk so früh wie möglich auf Zuverlässigkeitsaspekte gelegt werden.

4.2.5 Zusammenführung der Domänen

Für eine gesamtheitliche Modellierung ist es erforderlich, die Informationen aus der domänenspezifischen Modellierung zusammenzuführen und die darin enthaltenen Informationen miteinander zu verknüpfen. Dies umfasst zunächst einmal eine Modularisierung der einzelnen Modellierungsaspekte. Die einzelnen Module müssen ohne Informationsverlust und ohne großen Modellierungsaufwand verbunden werden können. Bei der Verknüpfung der einzelnen Module muss die Übersichtlichkeit des Gesamtmodells erhalten bleiben. Die Verknüpfung der einzelnen Module muss nachvollziehbar und reversibel in die einzelnen Modelle rückführbar sein. Das bedeutet, dass die Teilmodelle weiterhin getrennt auswertbar sein müssen und auch ein Austausch eines kompletten Moduls, z. B. Modell der Elektronik, problemlos vollzogen werden kann.

4.3 Anforderungen infolge der Modellierungsmethode

Durch den Einsatz der erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze ergeben sich Anforderungen, die der Wahl der Modellierungsmethode geschuldet sind. Die Anforderungen aus Kapitel 3 gelten natürlich auch uneingeschränkt für die methodische Vorgehensweise, werden aber nicht erneut aufgeführt. Die Anforderungen infolge der vorhandenen Modellierungsmethode geben sich u.a. aus [91].

4.3.1 Übersichtliche Darstellung

Die graphische Ausgabe während der Anwendung der Methode sollte überschaubar und übersichtlich gestaltet werden. Der Vorteil durch eine graphische Ausgabe der verwendeten Methode wird häufig durch eine unübersichtliche Darstellung relativiert. Dies gilt nicht nur für die Netzstruktur an sich, sondern sollte auch für alle notwendigen Eingangsparameter in die Simulation gelten. Durch die graphische Darstellung des Systems und deren Module, wie z. B. der Betriebsstrategie, soll ein erster Eindruck der Zusammenhänge des Gesamtmodells für Anwender, die das Modell nicht erstellt haben, entstehen. Weiterhin ist eine übersichtliche Darstellung des Gesamtmodells für Zwecke der Dokumentation oder aus Gründen der Ergebniskommunikation unbedingt erforderlich.

4.3.2 Benutzerfreundlichkeit

Eine Grundvoraussetzung für die Nutzung der methodischen Vorgehensweise und der damit verbundenen Modellierungsmethode ist die Benutzerfreundlichkeit. Die Akzep-

tanz einer Methode wird durch die Benutzerfreundlichkeit maßgeblich gesteigert. Daher sollte auch das Werkzeug, das bei der Durchführung der Methode zum Einsatz kommt eine geringe Einarbeitungszeit aufweisen, einfach und intuitiv bedienbar sein. Vertieftes Wissen in Programmier-Techniken sollte keine Voraussetzung für die Anwendung sein. Ein Black-Box-Charakter, bei dem nur Informationen über die Eingangsparameter und die ausgegebenen Ergebnisse vorhanden sind, ist für das bessere Verständnis des Modellierungsprozesses dagegen zu vermeiden.

4.3.3 Vermeidung von Konflikten

Bei der Modellierung von Petrinetzen kann es durchaus vorkommen, dass es zu sogenannten Konflikten zwischen mindestens zwei Schaltungsvorgängen kommen kann. Das bedeutet, dass zu einer bestimmten Zeit t zwei oder mehr Transition aktiviert sind und schalten wollen. Kommt es zu diesem Konflikt, ist der Algorithmus so konzipiert, dass der Zufall über die Schaltung entscheidet. Da dies der Realität nicht entspricht, sollten diese Konflikte z. B. durch eine geeignete Gewichtung oder Priorisierung verhindert werden.

4.4 Zuverlässigkeitsspezifische Anforderungen

Bei der Modellierung der Zuverlässigkeit insbesondere mechatronischer Systeme gibt es einige Besonderheiten zu beachten. Durch die höhere Komplexität und die Möglichkeiten, die der Einsatz mechatronischer Systeme mit sich bringt, ergeben sich weitere zuverlässigkeitsspezifische Anforderungen ohne die eine realitätsnahe Modellierung nicht möglich wäre.

4.4.1 Berücksichtigung von Lastkollektiven

Bei der Berücksichtigung von Lastkollektiven existieren statistische Zählverfahren, wie z. B. das Klassengrenzenüberschreitungsverfahren oder die Rainflow-Zählung, die es ermöglichen, einen Last-Zeit-Schrieb in Informationen über die Höhe und die Häufigkeit einer Belastung umzuwandeln [94]. Bei der dynamischen Modellierung kann es aber auch wichtig sein, die Abfolge der Belastungen zu kennen. Die Modellierungsmethode muss daher mit dem zeitlichen Verlauf der relevanten Belastung rechnen können und diesen Verlauf direkt einlesen können. Lastkollektive, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Berechnung der Zuverlässigkeit haben, müssen schnell ausgetauscht oder angepasst werden können. Da die resultierende Belastung auf das System in der Regel nicht nur von einem Parameter abhängt, darf keine Begrenzung der einzulesenden Parameter bestehen.

4.4.2 Berücksichtigung von Betriebsstrategien

Die Anforderung der Berücksichtigung der Betriebsstrategien steht in enger Verknüpfung mit der vorangegangenen Anforderung, der Berücksichtigung der Lastkollektive. Die Modellierungsmethode muss durch geeignete Auswahl von Modellierungselementen in der Lage sein, die zugrunde gelegte Betriebsstrategie nachbilden zu können. Darüber hinaus muss eine direkte Schnittstelle zu den eingelesenen Lastkollektiven bestehen, da diese direkt voneinander abhängen. Die Modellierungsmethode muss dazu geeignet sein, verschiedene Betriebsstrategien zu vergleichen und daraus eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl der optimalen Betriebsstrategie für ein gegebenes Szenario auszuwählen. Die Möglichkeit der Implementierung von heuristischen und prädiktiven Betriebsstrategien muss ebenso gegeben sein wie dynamische Anpassungen des Systems aufgrund der Betriebsstrategie und der gesetzten Indikatoren.

4.4.3 Berücksichtigung der Alterung

Alterungseffekte haben einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit technischer Systeme und müssen berücksichtigt werden. Es kann zwischen verschiedenen Alterungseffekten unterschieden werden. Die Alterung einer Komponente muss dahingehend berücksichtigt werden, dass der aktuelle Alterungszustand dieser Komponente Einfluss auf sein weiteres Ausfallverhalten hat. Dies gilt für zeitabhängige Ausfallverhalten. Wird eine Komponente von einem passiven Zustand aktiviert, darf die bis dahin erreichte Alterung nicht unberücksichtigt bleiben. Aufgrund des aktuellen Alterungszustands einzelner Komponenten, trifft die Betriebsstrategie Entscheidungen über das weitere Betriebsverhalten und beeinflusst dadurch maßgeblich die Restlebensdauer und die damit verbundene Zuverlässigkeit des Systems. Die Alterung kann darüber hinaus Einfluss auf andere Komponenten haben (vgl. Berücksichtigung von Wechselwirkungen).

4.4.4 Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen ist deshalb erforderlich, da diese auch maßgeblichen Einfluss auf die Berechnung der Zuverlässigkeit haben können. Wechselwirkungen können aufgrund von Alterungseffekten auftreten, bei denen gealterte Komponenten die gewünschten Funktionen nicht mehr bereitstellen können oder sogar ausfallen. Die Folge ist, dass aufgrund des Systemkonzepts als Redundanz ausgeführte Komponenten, die Funktion übernehmen können. Es wird hierbei zwischen kalter, warmer und heißer Redundanz unterschieden, deren Konzepte sich in der Höhe der Vorbelastung der als Redundanz ausgeführten Komponente unterscheiden. Zustandswechsel von Komponenten aufgrund von Zuständen anderer Komponenten müssen modelliert werden können.

4.4.5 Modellierung von dynamischen Strukturen

Im Gegensatz zu klassischen mechanischen Systemen, bei denen eine starre Struktur vorgegeben ist, können mechatronische Systeme aufgrund ihres Systemaufbaus dynamische Strukturen ausbilden. Diese Änderungen in der Systemstruktur muss in der Modellierung berücksichtigt werden. Komponenten sind nicht mehr nur an einer Funktion beteiligt, sondern wechseln je nach Funktionsanforderungen ihren Betriebszustand. Die wechselnden Belastungen und die damit verbundenen zustandsabhängigen Ausfallraten müssen daher modellierbar sein.

4.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Die in diesem Kapitel erarbeiteten Anforderungen sind für den besseren Überblick in Tabelle 4.1 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Übersicht der Anforderungen

Allgemeine Anforderungen
Durchgängigkeit
Wiederholbarkeit
Übertragbarkeit
Einfachheit
Minimierung potentieller Fehlerquellen
Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses
Anwendung während des gesamten Entwicklungsprozesses
Unabhängigkeit vom Entwicklungsprozess
Möglichkeit zur domänenspezifischen Modellierung
Unterstützung bei der Konzeptauswahl durch flexible Modellierung
Zusammenführung der Domänen
Anforderungen infolge der Modellierungsmethode
Übersichtliche Darstellung
Benutzerfreundlichkeit
Vermeidung von Konflikten
Zuverlässigkeitsspezifische Anforderungen
Berücksichtigung von Lastkollektiven
Berücksichtigung von Betriebsstrategien
Berücksichtigung der Alterung
Berücksichtigung von Wechselwirkungen
Modellierung von dynamischen Strukturen

5 Methodische Vorgehensweise

Auf Basis der beschriebenen Anforderungen wird nachfolgend eine methodische Vorgehensweise zur Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme vorgestellt. Zu Beginn dieses Kapitels wird die methodische Vorgehensweise allgemein eingeführt und die Überlegungen, die aufgrund der Anforderungen aus dem vorangegangenen Kapitel zur endgültigen Struktur führten, erläutert. Anschließend wird der Aufbau der methodischen Vorgehensweise Schritt für Schritt dargestellt und anhand eines verallgemeinerten Beispiels erklärt.

5.1 Ausgangssituation

Bevor die eigentliche methodische Vorgehensweise beschrieben wird, soll die Ausgangssituation erläutert werden. Es werden Überlegungen, die zur Lösungsfindung beitragen, ausgeführt. Darüber hinaus wird die zur Verfügung stehende softwareseitige Unterstützung für die Modellierung der Petrinetze vorgestellt. Anschließend wird die entwickelte methodische Vorgehensweise in einem Gesamtüberblick dargestellt.

5.1.1 Lösungsfindung

Die Vorgehensweise bei der Lösungsfindung hängt maßgeblich von den Anforderungen an die Methode ab. Zunächst stellt sich die Frage, wie der Ablauf und der Aufbau der Methode aussehen sollen. Unter Berücksichtigung der zuvor definierten Anforderungen ist das Ziel der Methode, die Zuverlässigkeit des betrachteten Systems zu bestimmen. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Belastung und der Belastbarkeit. Über die Stress-Strength-Interference können dann Aussagen über die Zuverlässigkeit getroffen werden [11]. Da sich die Belastung aus einem Zusammenspiel zwischen äußerer Last bzw. den Lastkollektiven, der Betriebsstrategie und der Systemstruktur ergibt, kann die Zuverlässigkeit nicht direkt bestimmt werden. Die Belastung auf die jeweiligen Komponenten und auf das System ergibt sich aus den komplexen Zusammenhängen aus diesen Einflussgrößen.

Eine Trennung der Modellierung in die jeweiligen Teilaspekte ist daher sinnvoll. Für jeden Teilaspekt können Modellierungsschritte angesetzt werden, die nacheinander sequentiell abgearbeitet werden. Allerdings verliert bei einer unidirektionalen Abfolge der Arbeitsschritte die methodische Vorgehensweise an Transparenz und die ganzheitliche Übersicht über den Prozess ist nicht mehr gegeben. Daher wurde für den strukturellen Aufbau der Methode ein Ebenenansatz gewählt. Dabei wurden die Ebenen so definiert, dass diese in sich einen geschlossenen Teilaspekt der Modellierung umfassen

und vom Vorgehen unabhängig von den weiteren Ebenen bearbeitet werden können. Die notwendigen Informationen werden über definierte Schnittstellen unter den Ebenen ausgetauscht. Allerdings darf eine nachträgliche Bearbeitung einer Ebene nicht dazu führen, dass alle übrigen Ebenen mit den dazugehörigen Arbeitsschritten überarbeitet werden müssen.

Die grundsätzliche Anordnung bzw. die Definition der Ebenen ergibt sich aus einer funktionsbasierten Beschreibung des Systems über eine funktionale Ebene. Bei bekannten Zuverlässigkeitsmethoden, wie z. B. der FMEA wird das betrachtete System vom „Groben“, dem Gesamtsystem, ins „Feine“, den Bauteilen beschrieben [95]. Die Zuverlässigkeitsanalyse lässt sich in folgende Schritte einteilen [11]:

- Systemanalyse
- Bestimmung der Systemelementzuverlässigkeit
- Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Diese Vorgehensweise ist aus mehreren Gründen für die hier vorgestellte Methode nicht praktikabel. Zum einen soll die Möglichkeit gegeben sein, diese Methode bereits in frühen Entwicklungsphasen anzuwenden. In dieser Phase ist die Systemstruktur meist nicht bekannt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zudem kann sich die Systemstruktur aufgrund des Einsatzes von mechatronischen Systemen abhängig von den Funktionsanforderungen ändern. Das Vorgehen kann aber dennoch für bereits entwickelte Systeme angewendet werden. Bei der Bestimmung der Belastungen spielen Lastkollektive und Betriebsstrategien eine immer größer werdende Rolle. Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen wird bei der Vorgehensweise eine Ebene eingeführt, die ausschließlich für die Modellierung dieser Aspekte konzipiert ist.

Die Auswirkungen der Einflüsse aus Funktionsanforderungen, Lastkollektiven und Betriebsstrategie auf das technische System werden in einer Komponentenebene und einer Systemebene modelliert. Alle Informationen werden schließlich in einer Ebene für das gesamtheitliche Zuverlässigkeitsmodell und der damit verbundenen Analyse gebündelt. Aus den vorangegangenen Überlegungen ergeben sich die folgenden fünf Modellierungsebenen:

- Funktionale Ebene
- Komponentenebene
- Betriebsebene
- Systemebene
- Zuverlässigkeitsmodell und -analyse

Die Verknüpfung dieser Ebenen zur Gesamtmethode wird in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

5.1.2 Softwareunterstützung

Die Modellierung und Analyse während der Anwendung der methodischen Vorgehensweise wird durch das am Institut für Maschinenelemente (IMA) entwickelte Softwarepaket REALIST (Reliability, Availability, Logistics and Inventory Simulation Tool) unterstützt [96]. Das Softwarepaket ging aus den ursprünglich entwickelten Softwaretools PetriEdit und PetriSim hervor und wurde über die letzten Jahre ständig weiterentwickelt [86]. Bild 5.1 zeigt das Prinzip des Modellierungs- und Simulationspakets REALIST.



Bild 5.1: Modellierungs- und Simulationspaket REALIST

Das Simulationspaket setzt sich aus einem Editor mit graphischer Benutzeroberfläche und einem Simulationsprogramm zusammen. Beide Programme wurden objektorientiert in C++ zur Nutzung für Microsoft Windows programmiert. Der Ablauf bei der Modellierung und Simulation mit dem Softwarepaket lässt sich gemäß Bild 5.1 in den graphischen Aufbau der Petrinetze im REALIST-Editor und der nachgelagerten Monte-Carlo-Simulation mit Hilfe der REALIST-Simulation aufteilen.

REALIST-Editor

Bild 5.2 zeigt die graphische Benutzeroberfläche des REALIST-Editors.

Die gewünschten vordefinierten Objekte können gemäß der Konventionen für Petrinetze einfach per Mausklick aus der Menüleiste auf der Arbeitsoberfläche miteinander verbunden werden. Die zur Verfügung stehenden Objekte sind Stellen, Kanten, Transitionen und die dazugehörigen Referenzstellen und -transitionen. Fehlerhafte Modellierungen, wie unzulässige Verbindungen (z. B. Kante von Stelle zu Stelle), werden durch Anzeigen einer entsprechenden Meldung bereits hier verhindert. Die Eigenschaften der Objekte können direkt durch Anklicken über ein Kontextmenü bearbeitet werden. So können für Stellen z. B. die Anfangsmarkierungen gesetzt, für Kanten verschiedene Kantenausdrücke und -funktionen definiert und für die Transitionen Schaltregeln und Schaltverzögerungen festgelegt werden.

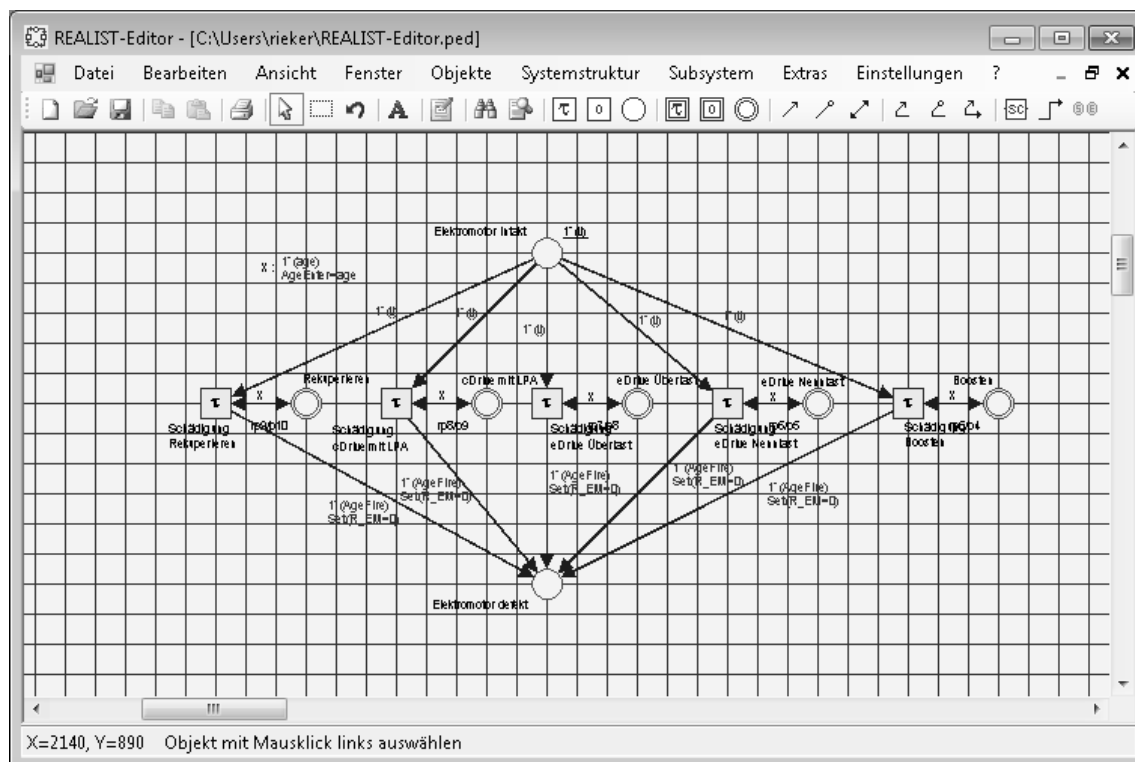


Bild 5.2: Benutzeroberfläche REALIST-Editor

Für Zuverlässigkeitsanalysen wird im Editor ebenfalls die Systemstruktur durch Verbindung von relevanten Systemkomponenten über Strukturkanten aufgebaut.

Durch den Einsatz von Subsystemen wird eine Hierarchisierung der Modellierung erreicht. Das Modell kann in sinnvolle Teilsysteme aufgeteilt werden, wobei eine gute Übersichtlichkeit erreicht wird. Die Subsysteme können individuell exportiert werden und an einer anderen Stelle im Modell bzw. in weiteren Modellierungsprojekten importiert werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit vorgefertigte Module für wiederkehrende Modellierungsaspekte zu definieren, was die Reproduzierbarkeit bei der Modellierung deutlich erhöht.

In den Deklarationen werden die für die ECSPN notwendigen Farben und die lokalen und globalen Variablen definiert. Für die nachgelagerte Simulation werden die gewünschten Auswertungsparameter gewählt. Als Schnittstelle zur Monte-Carlo-Simulation im Simulationsprogramm REALIST-Simulation dient der Export des Modells im PNML-Dateiformat. Das PNML-Dateiformat (Petri Net Markup Language) wurde als einheitliches Dateiformat für den Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Simulationstools eingeführt [97].

REALIST-Simulation

Das zuvor im REALIST-Editor erstellte Modell, mit den definierten auszuwertenden Variablen, wird im Simulationsprogramm mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation berechnet. Das Simulationsprogramm REALIST-Simulation kann unabhängig vom

REALIST-Editor arbeiten und benötigt für die Auswertung lediglich eine PNML-Datei. Daher wurde das Simulationsprogramm unabhängig vom REALIST-Editor programmiert [98]. Die benötigten Pseudozufallszahlen für die Monte-Carlo-Simulation werden dabei mit dem „Mersenne Twister“ generiert [99]. Bild 5.3 zeigt die Oberfläche des REALIST Simulationsprogramms.

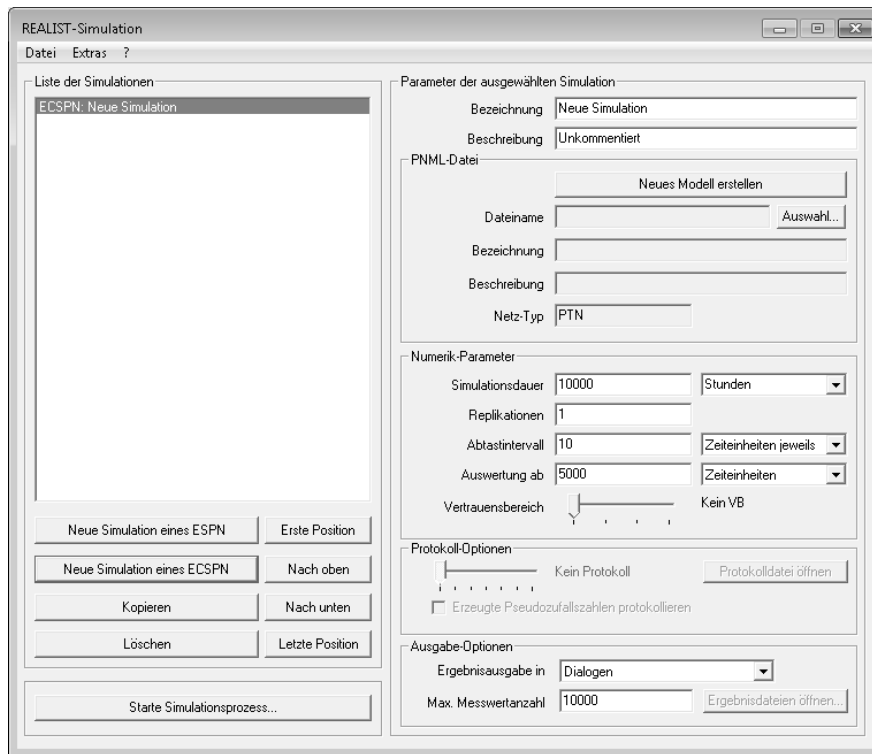


Bild 5.3: Benutzeroberfläche REALIST-Simulation

Das Programm besteht aus einer Projektverwaltung auf der linken Seite und einer Simulationsbeschreibung auf der rechten Seite. In der Projektverwaltung können die zuvor erstellten Modelle verwaltet und nacheinander abgearbeitet werden. So können schnell und einfach Parametervariationen innerhalb eines Modells bei gleich bleibenden Simulationsbedingungen durchgeführt werden. In den Simulationsbeschreibungen werden alle Simulationsparameter, wie die Simulationsdauer, Replikationen, Abtastintervalle, Auswertzeitraum und der Vertrauensbereich definiert. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in einer graphischen Form oder zur weiteren Analyse mit geeigneter Auswertesoftware in Textdateien im ASCII-Format. Auf die spezifischen Simulationsparameter wird in Abschnitt 5.6.2 eingegangen.

5.1.3 Gesamtüberblick über die methodische Vorgehensweise

Bild 5.4 zeigt als Gesamtüberblick die Verknüpfung der zuvor eingeführten Ebenen. Die Ebenen sind hierarchisch untereinander angeordnet und werden von oben nach unten durchschritten. Das Prinzipbild

soll den grundsätzlichen Aufbau der methodischen Vorgehensweise und die wesentlichen Bausteine in den einzelnen Ebenen aufzeigen. Neben den jeweiligen Ebenen werden die Ergebnisse nach deren Verlassen dargestellt. Diese Ergebnisse werden durch mehrere Arbeitsschritte in den jeweiligen Ebenen erreicht. Diese Arbeitsschritte sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht im gezeigten Prinzipbild dargestellt, werden aber in den folgenden Abschnitten ausführlich vorgestellt. Die erreichten Ergebnisse, die durch die ausgehenden Pfeile aus einer Ebene dargestellt sind, sind gleichzeitig Eingangsgrößen für die gemäß des vorgegebenen Ablaufs tiefer gelegene Ebene. So sind z. B. die zeitabhängigen Belastungen der Komponenten als Ergebnis der Betriebsebene eine notwendige Eingangsgröße zur Erstellung der Systemmodelle in der Systemebene.

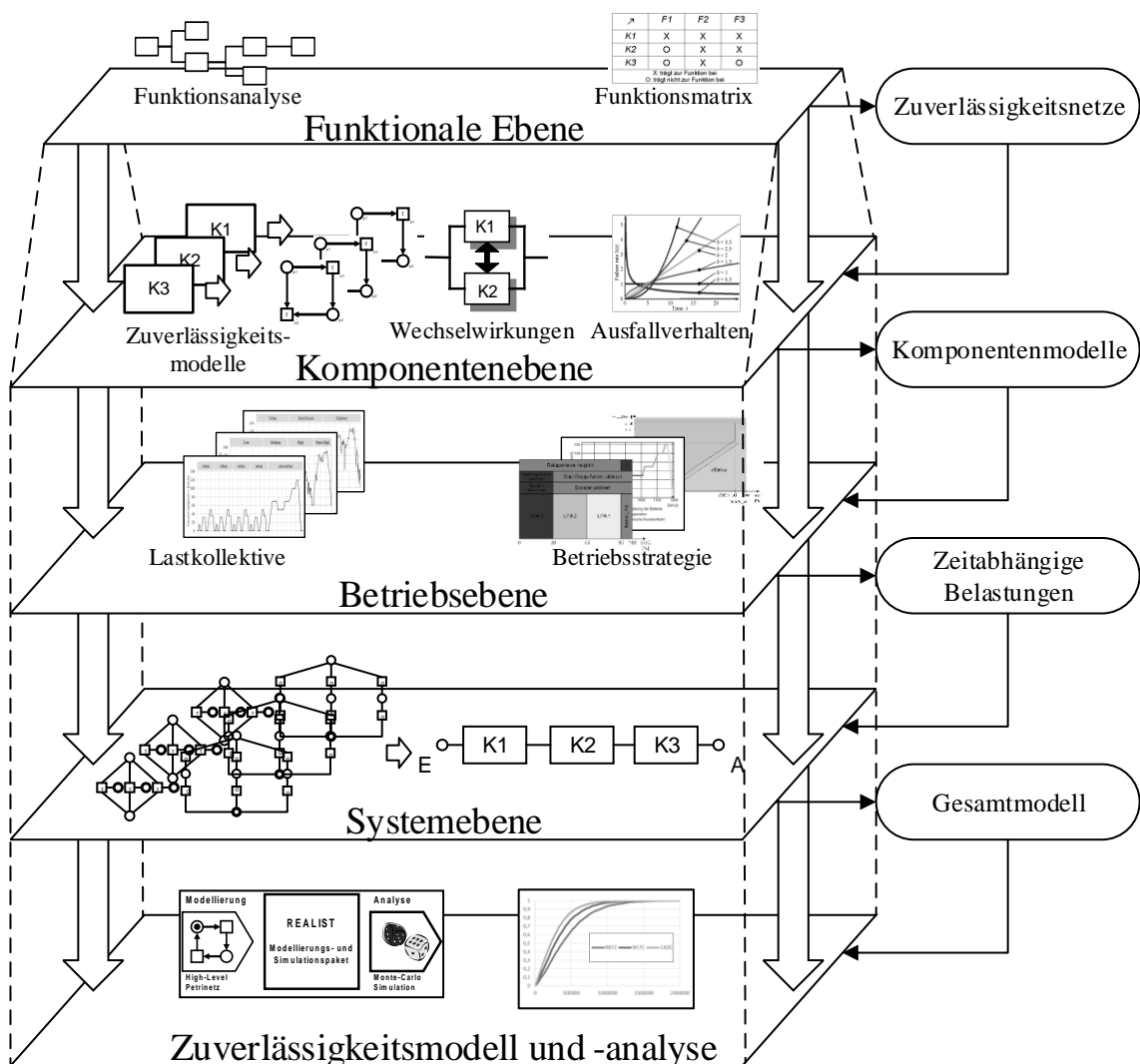


Bild 5.4: Gesamtüberblick über die methodische Vorgehensweise

Auf der **Funktionalen Ebene** werden in Abhängigkeit der Funktionsanforderungen und der beteiligten Komponenten Zuverlässigkeitsnetze als Vorentwurf für die späteren Petrinetze der einzelnen Komponenten erstellt. Die Komponentenmodelle als er-

weiterte farbige stochastische Petrinetze werden auf der **Komponentenebene** erstellt. Ziel der darunterliegenden **Betriebsebene** ist es, die zeitabhängigen Belastungen aufgrund von einwirkenden Lastkollektiven und gewählter Betriebsstrategie zu ermitteln. Auf Basis dieser Belastungen werden auf der **Systemebene** die einzelnen Komponenten zu einem Gesamtmodell verknüpft. Auf der Ebene **Zuverlässigkeitsmodell und -analyse** werden die übergeordneten Informationen schließlich gebündelt und die relevanten Zuverlässigkeitskenngrößen ausgewertet. Die detaillierte Vorgehensweise in den einzelnen Arbeitsschritten der jeweiligen Ebenen wird in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

5.2 Funktionale Ebene

Die funktionale Ebene kann in drei Schritte aufgeteilt werden, die in Bild 5.5 dargestellt sind. Im Folgenden werden diese detailliert dargestellt und das Ergebnis jedes Schrittes aufgezeigt.

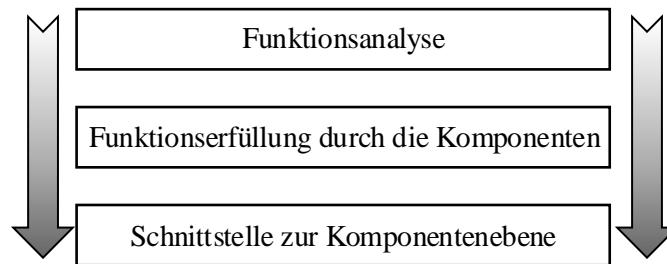


Bild 5.5: Schritte der Funktionsebene

5.2.1 Funktionsanalyse

Der erste Schritt bei der Modellierung ist die Ermittlung der relevanten Funktionen. Diese können direkt aus den Lastenheften abgeleitet werden, wenn es sich bei dem zu modellierenden System um eine Neuentwicklung handelt. Bei der Ermittlung der Funktionen eines bestehenden Systems können diese falls vorhanden direkt aus der FMEA übernommen werden. Ist diese nicht vorhanden, muss noch eine Funktionsanalyse entsprechend der Vorgehensweise bei der Durchführung einer FMEA [100, 101] vorgelagert werden. Bei komplexen Systemen ergibt sich bereits hier eine große Anzahl an Funktionen. Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad der Modellierung, können Funktionen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit priorisiert werden. Denkbar wären Priorisierungen nach Sicherheitsrelevanz, Kundenanforderungen oder Komfortaspekten. Die Anzahl der relevanten Funktionen kann anschließend durch Auswahl einer absoluten Menge, z. B. Auswahl der Top-Ten oder nach einem gewählten Prozentsatz, z. B. Auswahl der ersten 50 %, reduziert werden.

Als relevante Funktionen werden im Folgenden drei Funktionen berücksichtigt, die für die nachfolgende Beschreibung vereinfacht als $F1$, $F2$ und $F3$ bezeichnet werden.

5.2.2 Funktionserfüllung durch die Komponenten

Die ermittelten Funktionen der Funktionsanalyse werden nun mit den vorhandenen Komponenten verknüpft. Es werden drei Komponenten angenommen, nachfolgend mit $K1$, $K2$ und $K3$ bezeichnet. Für jede Funktion wird geprüft, ob eine Komponente an der Funktionserfüllung beteiligt ist. Das Ergebnis einer derartigen Untersuchung kann in einer Funktionsmatrix erfasst werden. Bild 5.6 zeigt die ermittelte Funktionsmatrix.

\nearrow	Funktion $F1$	Funktion $F2$	Funktion $F3$
Komponente $K1$	X	X	X
Komponente $K2$	O	X	X
Komponente $K3$	O	X	O
X: trägt zur Funktion bei O: trägt nicht zur Funktion bei			

Bild 5.6: Funktionsmatrix

Aus der Funktionsmatrix lässt sich die grundsätzliche Beteiligung einer Komponente an einer Funktionserfüllung ablesen. Die Struktur, wie die Komponenten während einer Funktionsanforderung zur Erfüllung dieser beitragen, geht aus der Funktionsmatrix nicht hervor. Für jede Funktion wird daher die genaue Struktur analysiert. Es kann dabei grundsätzlich, abgeleitet von der Booleschen Systemtheorie zwischen Serien-, Parallel, gemischten, und “ n aus k “ - Systemen unterschieden werden. Aus der Funktionsmatrix in Bild 5.6 könnten sich exemplarisch die Blockschaubilder in Bild 5.7 ergeben.

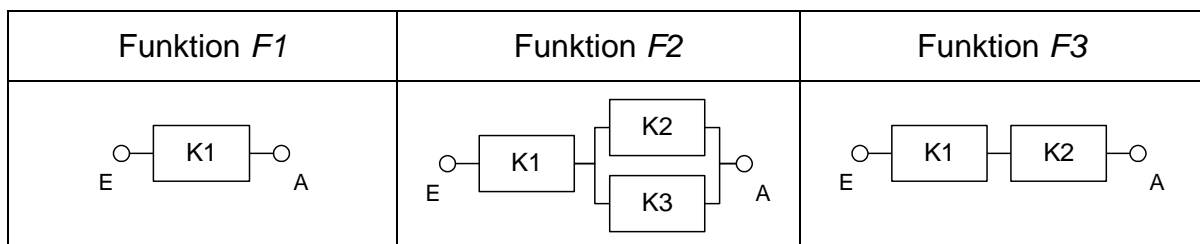


Bild 5.7: Blockschaubilder der Funktionen

Die Funktion ist dann erfüllt, wenn ein Pfad zwischen Eingang E und Ausgang A besteht. Der Einfluss auf die einzelnen Komponenten durch die Bereitstellung von mehreren Funktionen wird im nächsten Schritt gezeigt. Eine Funktion kann darüber hinaus durch mehrere unterschiedliche Systemstrukturen bereitgestellt werden. Für eine Funktionserfüllung können verschiedene Systemstrukturen und damit verschiedene Betriebszustände der Komponenten auftreten.

5.2.3 Schnittstelle zur Komponentenebene

Werden die verschiedenen Zustandsübergänge einer Komponente aufgrund einer Funktionsanforderung (vgl. Funktionen $F1-F3$, Bild 5.7) betrachtet, ergeben sich folgende vereinfacht dargestellte Zuverlässigkeitsnetze.

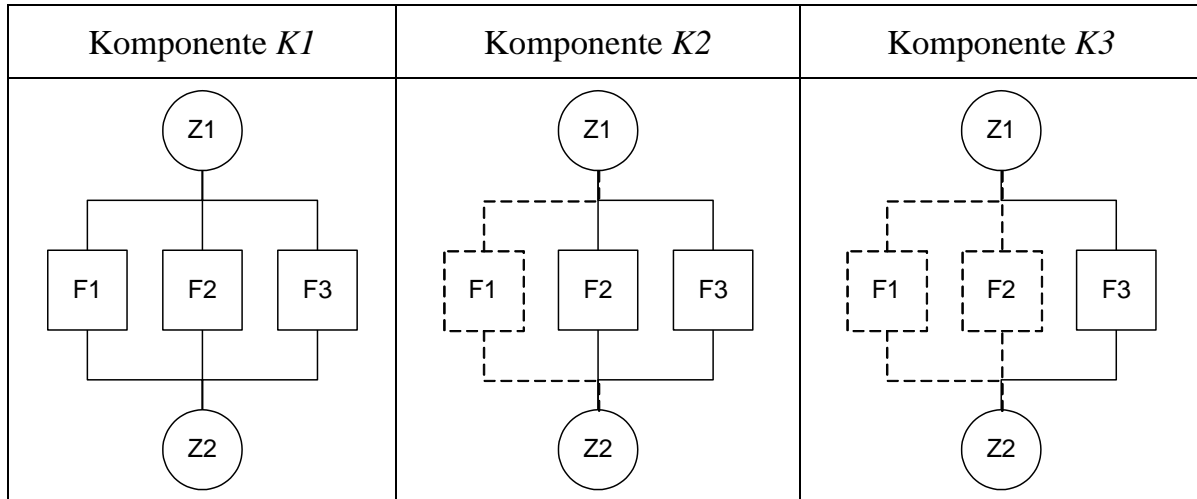


Bild 5.8: Zuverlässigkeitsnetze der Komponenten

Die Zuverlässigkeitsnetze bestehen jeweils aus den Zuständen $Z1$ und $Z2$ und den möglichen Übergängen durch Bereitstellung der Funktionen $F1-F3$. Dabei können beliebige Zustände für $Z1$ und $Z2$ angenommen werden. Die gängigste Annahme ist, dass der Zustand $Z1$ die Komponente in einem funktionsfähigen Zustand repräsentiert und dementsprechend $Z2$ die Komponente in einem ausgefallenen Zustand. Weitere denkbare Zustände sind z. B. passive Zustände oder Komponenten in einem degradierten Zustand. Aus Bild 5.8 ergibt sich, dass Komponente $K1$ an allen drei Funktionen beteiligt ist. Daraus folgt, dass drei mögliche Pfade für eine Zustandsänderung der Komponente $K1$ von Zustand $Z1$ zu Zustand $Z2$ existieren. Für Komponente $K2$ existieren folglich zwei und für Komponente $K3$ ein möglicher Pfad. Diese in Bild 5.8 gezeigten Zuverlässigkeitsnetze bilden die Schnittstelle zur Komponentenebene, in der die genaue Modellierung der Zustandsübergänge und deren Umsetzung in die Petrinetze beschrieben werden.

5.3 Komponentenebene

In der Komponentenebene werden ausgehend von den Zuverlässigkeitsnetzen die rein als Prinzipbilder dienen, Zuverlässigkeitsmodelle der Komponenten erstellt. Die Einflüsse der Ausfallmechanismen, der Wechselwirkungen und des Ausfallverhaltens werden nacheinander betrachtet und in das Modell integriert. Bild 5.9 zeigt die Abfolge der Schritte in der Komponentenebene.

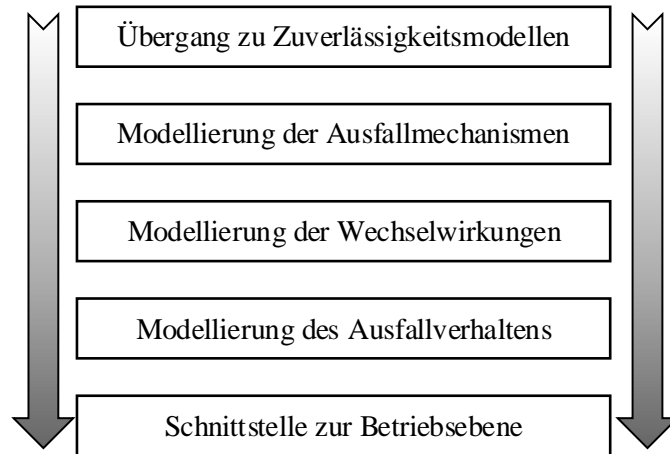


Bild 5.9: Schritte der Komponentenebene

5.3.1 Übergang zu Zuverlässigkeitsmodellen

Die erste Aktivität im REALIST-Editor findet nach den prinzipiellen Überlegungen in der Funktionsebene in diesem Schritt statt. Für jede Komponente wird ein Basismodell als Ausgangspunkt für das detaillierte Zuverlässigkeitsmodell erstellt.

Es werden zunächst die ermittelten Zustände als Stellen und die möglichen Zustandsübergänge als Transitionen modelliert. Die Transitionen repräsentieren die möglichen Zustandsübergänge aufgrund der Funktionsanforderung und den daraus resultierenden Betriebszuständen. Die Ermittlung der zeitlichen Abfolge der Betriebszustände folgt in Abschnitt 5.4. Bild 5.10 zeigt das Basismodell für *K1*.

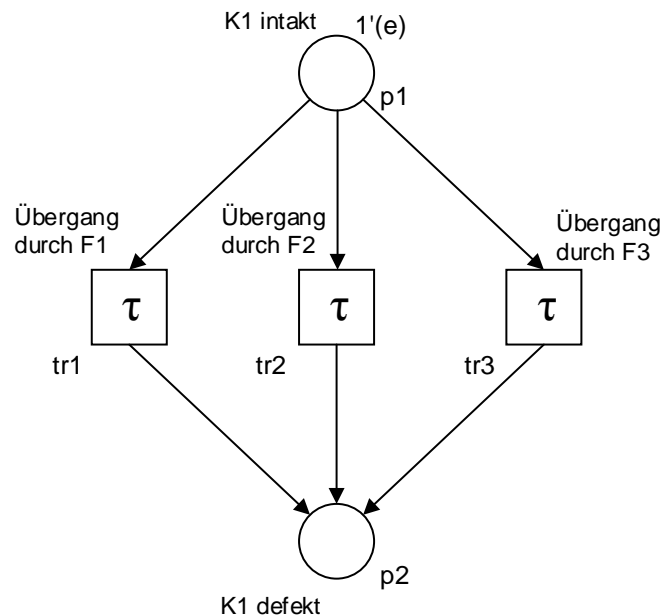


Bild 5.10: Basismodell für die Komponente *K1*

Der Anfangszustand dieses Modells beschreibt die Komponente *K1* in einem intakten Zustand. Dies ist gekennzeichnet durch den Initialisierungsausdruck $1'(e)$ neben der Stelle *p1*. Das Basismodell beschreibt die Möglichkeit eines Übergangs der Kompo-

nente $K1$ vom Zustand intakt ($p1$) in den Zustand defekt ($p2$) über drei Transitionen ($tr1-tr3$). Eine Information, welche Funktion zu welchem Zeitpunkt abgerufen wird, ist in diesem Modell noch nicht vorhanden, was einer gleichzeitigen Bereitstellung aller Funktionen entsprechen würde. Während der Bereitstellung einer Funktion kann eine Komponente ausfallen. Der Ausfall kann je nach Anwendungsfall durch unterschiedliche Mechanismen hervorgerufen werden. Im nächsten Schritt müssen dazu die Funktionen genauer betrachtet werden und die dadurch auftretenden Ausfallmechanismen bestimmt werden.

5.3.2 Modellierung der Ausfallmechanismen

Befindet sich die Komponente in einem belasteten Zustand, bei dem sie zu einer Funktion beiträgt, kann sie ausfallen. Im einfachsten Fall sind die Belastung und die Belastbarkeit bekannt und die Ausfallzeit kann direkt bestimmt werden. Folgt das Ausfallverhalten der Komponente mehreren Ausfallmechanismen müssen die Transitionen aus Bild 5.10 in die verschiedenen Ausfallmechanismen bzw. Ausfallarten unterteilt werden. Der Ausfall von Zahnrädern in einem Getriebe durch Grübchenbildung oder durch Zahnbruch sind Beispiele für verschiedene Ausfallmechanismen einer Komponente. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob diese Ausfallmechanismen unabhängig voneinander sind oder sich gegenseitig beeinflussen. Die Annahme gilt hier, dass die Ausfallmechanismen unabhängig voneinander sind. Das Basismodell wird also um die Beschreibung der Ausfallmechanismen erweitert. Für das Modell gilt die Annahme, dass für $F1$ ein Ausfallmechanismus, für $F2$ drei Ausfallmechanismen und für $F3$ zwei Ausfallmechanismen existieren.

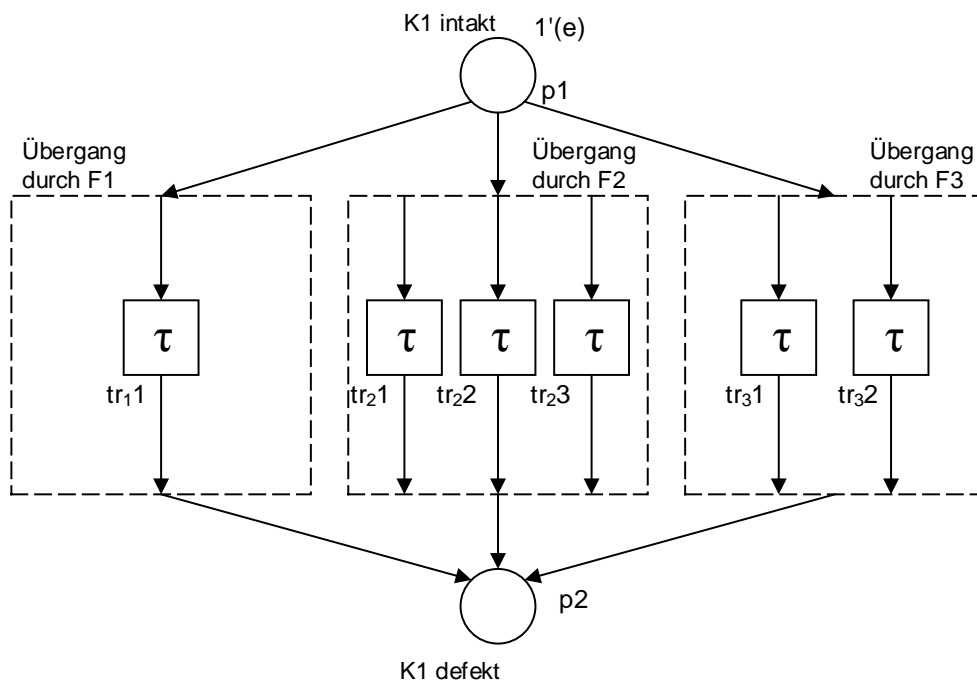


Bild 5.11: Erweiterung des Modells um Ausfallmechanismen

Das um die Ausfallmechanismen erweiterte Modell zeigt, dass die Komponente $K1$ abhängig von der Funktionsanforderung mehreren Ausfallmechanismen ausgesetzt ist. Bei Bereitstellung der Funktion $F1$ existiert ein Ausfallmechanismus (tr_{11}), für Funktion $F2$ drei (tr_{21} - tr_{23}) und für Funktion $F3$ zwei Ausfallmechanismen (tr_{31} , tr_{32}). Die Unabhängigkeit der Ausfallmechanismen ist durch die Verwendung von jeweils einer Transition realisiert. Diese Trennung bei der Modellierung ermöglicht eine separate Auswertung von Zuverlässigkeitskennwerten bezogen auf die zu betrachtende Ausfallmechanismen, wie z. B. die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems aufgrund eines Ausfallmechanismus.

5.3.3 Modellierung der Wechselwirkungen

Zunächst werden die Wechselwirkungen identifiziert und die für die Modellierung relevanten Wechselwirkungen ausgewählt. Dazu kann mit Hilfe von Expertenwissen eine Design Structure Matrix (DSM) erstellt werden, bei der sowohl der Einfluss einer Komponente auf andere Komponenten, als auch der Einfluss der anderen Komponenten auf die Komponente selbst bewertet wird [102]. Daraus ergeben sich eine Aktivsumme als Maßzahl für den Einfluss durch die Komponente und eine Passivsumme als eine Maßzahl für den Einfluss auf die Komponente. Durch Auftragen dieser Maßzahlen in einem Direct System Grid können die Wechselwirkungen bewertet und priorisiert werden.

Nachfolgend wird die Modellierung einer vorhandenen Wechselwirkung zwischen Komponente $K1$ und $K2$ beschrieben. Durch einen Verschleiß an Komponente $K2$ kommt es zu einer höheren Belastung an Komponente $K1$, wie es zum Beispiel bei redundant ausgelegten Bremsen durch Nutzung von zwei unabhängigen Bremskreisläufen der Fall ist. Eine Wechselwirkung mit der Umgebung wäre zum Beispiel eine höhere thermische Belastung aufgrund steigender Umgebungstemperatur. Bild 5.12 zeigt die Umsetzung im Modell.

Komponente $K1$ und $K2$ sind im Ausgangszustand intakt (Initialisierungsausdruck $1^{\backslash}(e)$ in $p1$ und $p4$). Die Komponente $K2$ ist in diesem Zustand einer Normalbelastung ausgesetzt. Auf der linken Seite des Netzes ist der Verschleißvorgang an Komponente $K2$ modelliert. Durch die Transition $tr4$ wird der Übergang der Komponente $K2$ in einen degradierten verschlissenen Zustand beschrieben. Tritt dieser Zustand ein, wird durch die Referenzstelle $rp1$ die unmittelbare Transition $tr3$ aktiviert und der Zustand der Komponente $K1$ geht von einem intakten Zustand mit Standardbelastung ($p1$) in einen intakten Zustand mit erhöhter Belastung ($p3$) über. Die erhöhte Belastung wird über die Transition $tr3$ beschrieben, durch die die Komponente $K1$ in den defekten Zustand ($p2$) übergehen kann. Diese prinzipielle Vorgehensweise der Modellierung kann auf jede zu berücksichtigende Wechselwirkung angewendet werden.

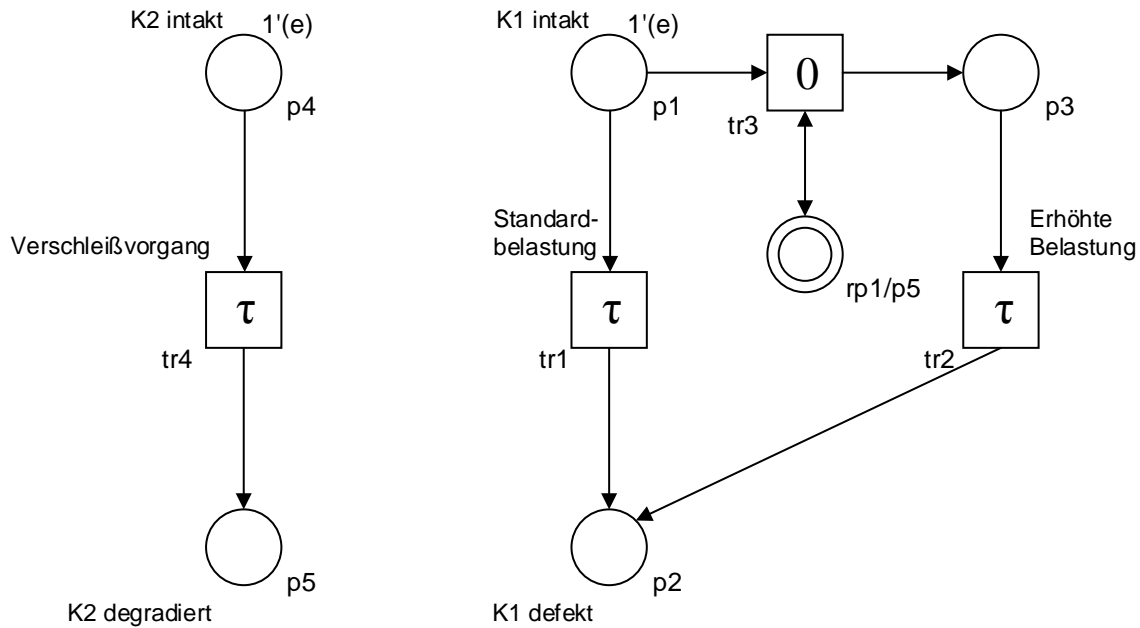


Bild 5.12: Modellierung von Wechselwirkungen

5.3.4 Modellierung des Ausfallverhaltens

Die Zustandsübergänge in den bisherigen Modellen wurden mit zeitbehafteten und unmittelbaren Transitionen modelliert. Die mathematischen Verteilungen, die hinter diesen Transitionen stehen, wurden bisher vernachlässigt. Diese Parametrisierung der Transitionen folgt nun im Schritt der Bestimmung des Ausfallverhaltens. Folgende relevanten Einstellungen werden für die Transitionen vorgenommen.

Schaltgewicht

Bei einem Schaltkonflikt zwischen zwei oder mehreren Transitionen kann durch Angabe eines Schaltgewichts die Entscheidung, welche Transition schaltet beeinflusst werden. Wird bei einem Konflikt zweier Transitionen der einen Transition das Schaltgewicht 1 und der anderen das Schaltgewicht 2 zugewiesen, schaltet die Transition mit dem Schaltgewicht 1 in einem Drittel und die Transition mit Schaltgewicht 2 in zwei Dritteln der auftretenden Schaltkonflikte.

Schaltpriorität

Die Schaltpriorität dient ähnlich dem Schaltgewicht der Lösung eines Schaltkonflikts. Durch Angabe einer Schaltpriorität wird die Transition mit einer höheren Schaltpriorität bei der Schaltung bevorzugt. Bei gleicher Schaltpriorität entscheidet das Schaltgewicht über die Schaltung. Zu beachten ist, dass bei der Modellierung Schaltkonflikte möglichst zu vermeiden sind, um den Einfluss der Monte Carlo Simulation so gering wie möglich zu halten.

Schaltregel

Die Schaltregeln „*Enabling Memory*“, „*Age Memory*“ und „*Age Influence*“ (vgl. [86]) werden erst bei der Modellierung der Alterung relevant. Hat die Alterung keinen Einfluss auf die Modellierung oder wird diese aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt, kann die Voreinstellung „*Enabling Memory*“ übernommen werden.

Wächterausdruck

Eine zusätzliche Eingangsbedingung für die Aktivierung einer Transition kann durch einen Wächterausdruck definiert werden. So kann im Modell aus Bild 5.12 die Lesekante und die zugehörige Referenzstelle $rp1$ durch einen Wächterausdruck $[gv(K2) = 1]$ ersetzt werden. Dazu muss eine globale Variable $gv(K2)$ definiert werden, die für den Verschleiß von Komponente $K2$ steht und bei Schaltung von Transition $tr4$ zu 1 gesetzt wird. Durch den Einsatz eines Wächterausdrucks kann das Modell um gleichwirkende Petrinetzobjekte reduziert werden.

Schaltverzögerung

Bei der Definition der Schaltverzögerung stehen verschiedene Ausfallverteilungen zur Verfügung. Sind die Ausfallmechanismen aus Abschnitt 5.3.2 bekannt, können bei der Definition der Schaltverzögerung die passenden Ausfallverteilungen ausgewählt werden. Die gängigsten Verteilungen sind dabei die Weibullverteilung oder die Exponentialverteilung. Darüber hinaus können deterministische Schaltverzögerungen oder Schaltverzögerungen, die der Lognormal-, Normal-, Gleich- oder Erlangverteilung folgen, definiert werden.

5.3.5 Schnittstelle zur Betriebsebene

Das Ergebnis der Komponentenebene sind die Zuverlässigkeitsmodelle der beteiligten Komponenten mit den dazugehörigen ermittelten Parametern des Ausfallverhaltens und den Wechselwirkungen zwischen den Komponenten. Das Ausfallverhalten wird dabei für jeden Betriebszustand, den die Komponenten aufgrund der Funktionsanforderungen einnehmen können, bestimmt. Bild 5.13 zeigt die Erweiterung des Basismodells um die in der Komponentenebene ermittelten Modellaspekte beim Übergang in die Betriebsebene. Für die Übersichtlichkeit sind die detaillierten Ausfallmechanismen aus Bild 5.11 hier nicht dargestellt.

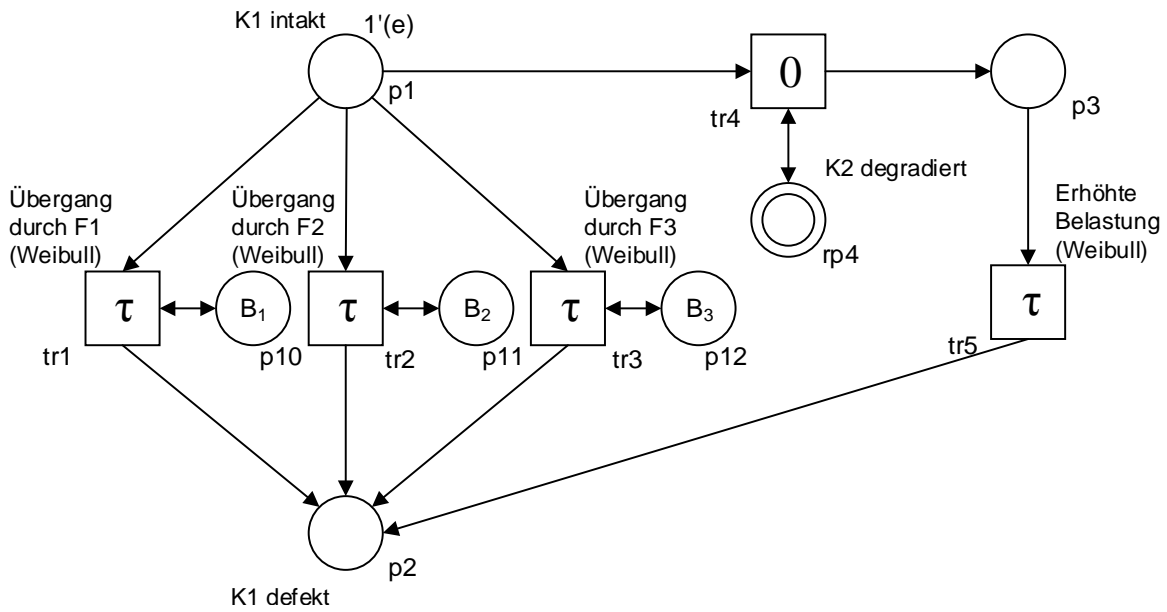


Bild 5.13: Zuverlässigkeitsmodell der Komponente K1

Das Zuverlässigkeitsmodell beinhaltet nun Informationen über das Ausfallverhalten, hier das weibullverteilte Ausfallverhalten in den Transitionen tr_1 - tr_3 . Die Wechselwirkung, die durch den degradierten Zustand der Komponente K2 in einer erhöhten Belastung von K1 resultiert, ist im rechten Teil dargestellt. Entscheidend für die Zuverlässigkeitskenngrößen dieses Modells sind die Häufigkeit und der Zeitanteil der jeweiligen Betriebszustände. Diese Eingangsparameter, dargestellt durch Stellen p_{10} - p_{12} fehlen dem Modell zu diesem Zeitpunkt. Zur Ermittlung dieser Eingangsparameter ist eine vollständige Modellierung aller Einflussgrößen notwendig, was Gegenstand der nächsten Ebene, der Betriebsebene, ist.

5.4 Betriebsebene

Für die weitere Modellierung und Berechnung der Zuverlässigkeit muss der Zeitverlauf der Markenbesetzungen in den Stellen p_{10} - p_{12} (Bild 5.13), die die Betriebszustände beschreiben, ermittelt werden. Bild 5.14 zeigt einen möglichen qualitativen Verlauf der Betriebszustände $B_i(t)$ von Komponente K1. Voraussetzung ist, dass immer nur ein Betriebszustand aktiviert ist.

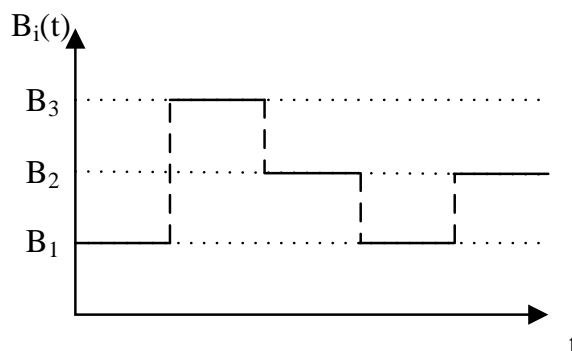


Bild 5.14: Betriebszustandsverlauf Komponente K1

Der Zustandsverlauf wird durch die Belastung, die sich aus den Lastkollektiven ergibt, und der Betriebsstrategie beeinflusst. Diese beiden Modellierungsaspekte sind daher der Kernpunkt der Betriebsebene. Bild 5.15 zeigt die einzelnen Schritte der Betriebsebene.

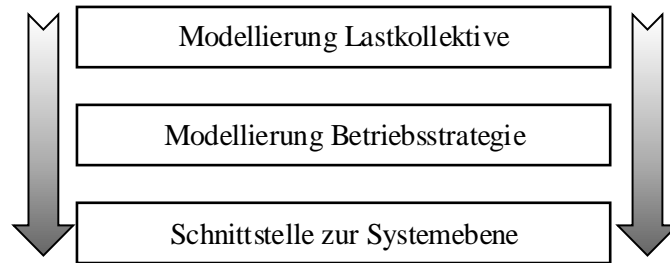


Bild 5.15: Schritte der Betriebsebene

5.4.1 Modellierung Lastkollektive

Die relevanten Lastkollektive können als zeitabhängige Variable in das Modell eingelesen werden. Im einfachsten Fall ist die Belastung bzw. ein zu modellierender Betriebszustand über die Zeit konstant. Dann entfällt dieser Schritt. Als Lastkollektiv können alle zeitabhängigen Variablen, wie z. B. Geschwindigkeit oder Beschleunigung eines Systems eingelesen werden. Dies gilt auch für Umgebungsvariablen, wie z. B. Temperatur oder Druck. Ist der zeitliche Verlauf der Betriebszustände bereits bekannt, kann dieser auch direkt eingelesen und das Zuverlässigkeitsmodell aus Bild 5.13 direkt ausgewertet werden. Für die Modellierung der Lastkollektive wurde eine neue Kantenfunktion „*Next(var)*“ programmiert, deren Einbindung in das Modell Bild 5.16 zeigt.

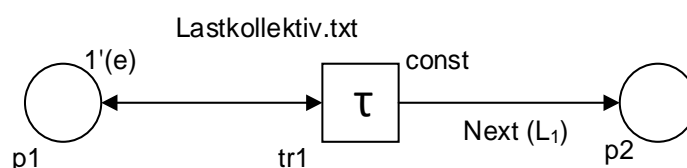


Bild 5.16: Modul Lastkollektiv einlesen

Folgende Eingangsparameter müssen für eine fehlerfreie Funktion des Einlesemoduls definiert werden.

- Definition einer globalen Variable gv_i
- Definition einer deterministischen Schaltverzögerung als Einleseintervall
- Textdatei mit Zeitverlauf der einzulesenden Variablen

Die Transition $tr1$ ist aufgrund der Lesekante zur Stelle $p1$ und deren Initialmarkierung $1'(e)$ permanent aktiviert. Die Transition schaltet dadurch in einem durch die determi-

nistische Schaltverzögerung festgelegten Intervall. In dieser Transition wird auch die Textdatei mit dem einzulesenden Lastkollektiv verknüpft. Durch den Kantenausdruck „ $Next(L_1)$ “ wird nach jedem Schaltvorgang die definierte globale Variable L_1 mit dem aktuellen Wert aus der Textdatei überschrieben. Die Information über das Lastkollektiv ist durch die Definition als globale Variable unabhängig von den einzelnen Netzmodulen im gesamten Modell verfügbar. Das Einlesemodul kann beliebig oft verwendet werden, was die gleichzeitige Erfassung mehrerer Lastkollektive ermöglicht.

5.4.2 Modellierung Betriebsstrategie

Die Betriebsstrategie hat die Aufgabe abhängig von gegenwärtigen Eingangsgrößen und Umgebungsvariablen den zu wählenden Betriebsmodus einzustellen. Das zu modellierende System wird demnach aufgrund der Betriebsstrategie in den ausgewählten Zustand überführt. Bild 5.17 zeigt das Prinzip der Betriebsstrategie als Black-Box.

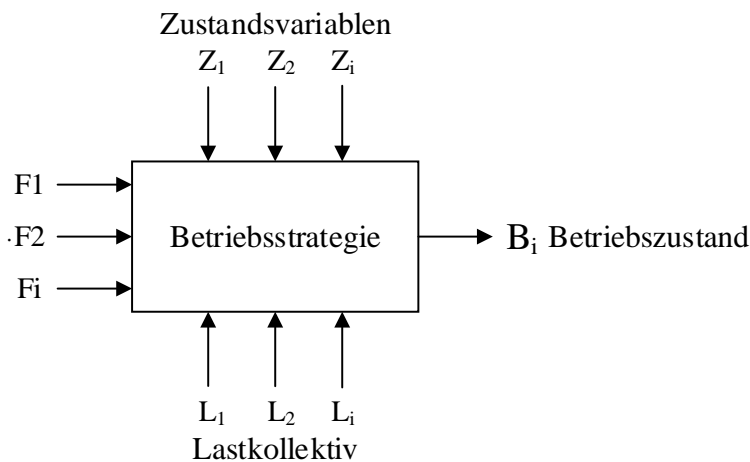


Bild 5.17: Betriebsstrategie als „Black Box“

Die hier gezeigte Betriebsstrategie wählt abhängig von den Funktionsanforderungen F_i , den Zustandsvariablen Z_i und der aktuellen Last aus den relevanten Lastkollektiven L_i den Betriebszustand B_i . Zustandsvariablen können durch aktuelle Zustände oder Kenngrößen einzelner Komponenten, wie z. B. die aktuelle Komponententalterung beschrieben werden. Die Entwicklung einer Betriebsstrategie selbst ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern vielmehr die Umsetzung von gegebenen Betriebsstrategien in die vorgegebene Modellierungsmethode.

Die Modellierung einer Betriebsstrategie wird am Beispiel der Komponente KI beschrieben. Die Betriebsstrategie entscheidet, aufgrund der Funktionsanforderungen $F1-F3$, der Zustandsvariable Z_1 , die den Alterungszustand von Komponente KI beschreibt und der aktuellen Last L_1 aus einem eingelesenen Lastkollektiv, über die Wahl des Betriebszustandes B_i . Dabei ist es durchaus denkbar, dass bei unterschiedlichen Funktionsanforderungen und Eingangsparameter der gleiche Betriebszustand B_i durch

die Betriebsstrategie ausgewählt wird. Im Folgenden wird die Umsetzung einer Betriebsstrategie zunächst formal und anschließend anhand der Modellierung beschrieben. Bild 5.18 zeigt für die Funktionsanforderung $F1$ eine mögliche Betriebsstrategie in Abhängigkeit der Last L_1 aus eingelesenem Lastkollektiv und der Zustandsgröße Z_1 .

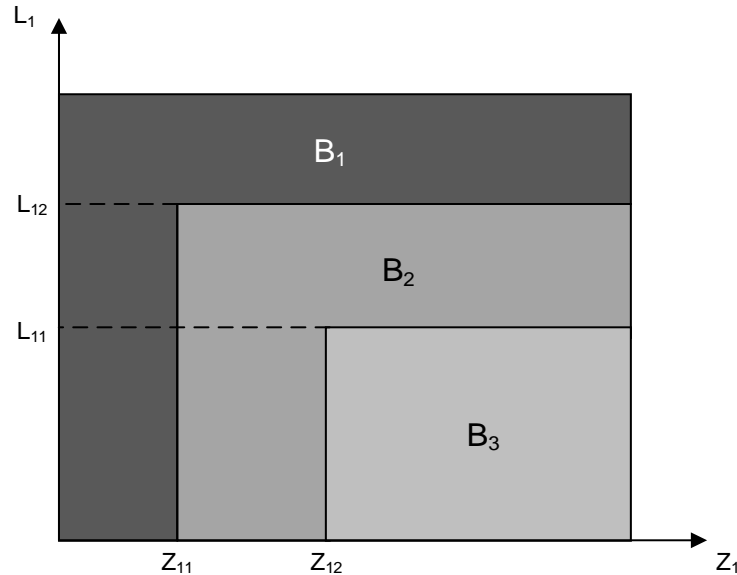


Bild 5.18: Betriebsstrategie für die Funktionsanforderung $F1$

In diesem zweidimensionalen Kennfeld ergeben sich drei Flächen, in denen der jeweilige Betriebszustand eingestellt wird. Diese Kennfelder sind in den Dimensionen beliebig erweiterbar, was allerdings einen erhöhten Modellierungsaufwand in sich birgt. Das Kennfeld wird anschließend in eine mathematische Beschreibung überführt. Tabelle 5.1 zeigt die mathematische Beschreibung der Bedingungen für die Wahl des jeweiligen Betriebszustands.

Tabelle 5.1: Bedingungen für die Wahl des Betriebszustands B_i

Betriebszustand	Bedingungen
B_1	$Z_1 \leq Z_{11} \vee L_1 \geq L_{12}$
B_2	$(Z_{11} < Z_1 \leq Z_{12} \wedge L_1 < L_{12}) \vee (L_{11} \leq L_1 < L_{12} \wedge Z_1 > Z_{11})$
B_3	$Z_1 > Z_{12} \wedge L_1 < L_{11}$

Die Bedingungen für die Wahl des jeweiligen Betriebszustands werden im nächsten Schritt für jede Funktionsanforderung formuliert. Aus der Liste der Betriebszustände und den jeweiligen Bedingungen kann die Betriebsstrategie in einem Petrinetz modelliert werden. Es empfiehlt sich dabei nacheinander die Funktionsanforderung und die dazugehörigen Betriebszustände mit den formulierten Bedingungen abzuarbeiten. Die

Betriebsstrategie ist ein in sich geschlossenes Netz, in dem ein Zustand über eine Marke ausgewählt wird. Dadurch wird der Annahme Rechnung getragen, dass nur ein Betriebszustand zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiviert sein darf. Ausgehend von einer Initialisierungsstelle wird aufgrund der formulierten Bedingungen entschieden, welcher Betriebszustand gewählt wird. Damit die Schaltlogik auch beim Verlassen eines Zustands funktioniert, müssen neben den Eingangsbedingungen für einen Betriebszustand auch Ausgangsbedingungen formuliert werden. Fehlen diese Ausgangsbedingungen verharret das System in dem Zustand, in den es zu Beginn eingetreten ist. Die Ausgangsbedingungen können als Negation der Eingangsbedingungen formuliert werden. Bild 5.19 zeigt den Ausschnitt des Modells der Betriebsstrategie für die Funktionsanforderung *F1*.

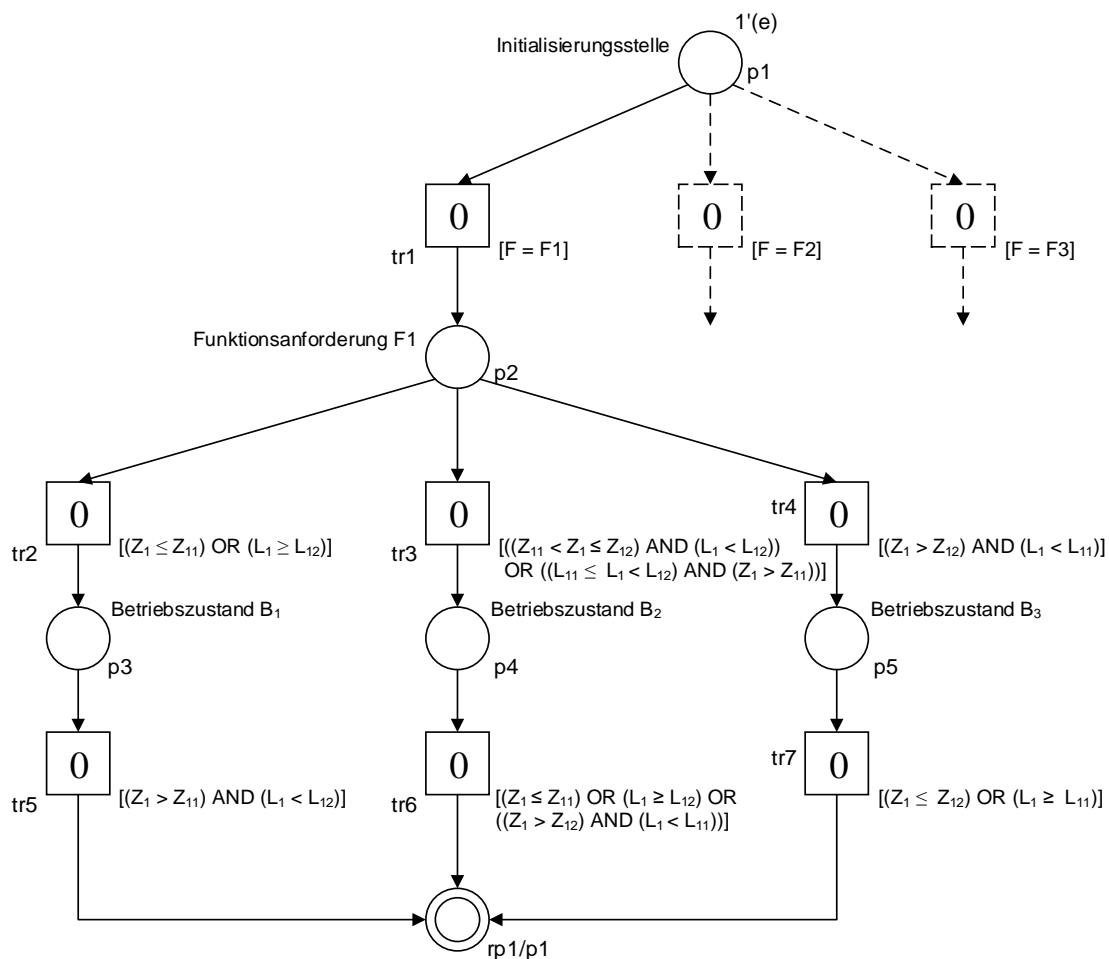


Bild 5.19: Modell der Betriebsstrategie

Zu Beginn liegt eine Marke in der Initialisierungsstelle $p1$. Die erste Entscheidung der Betriebsstrategie ist die Wahl des Teilstrangs aufgrund der Funktionsanforderung ($F1$ - $F3$). Für die Übersichtlichkeit ist hier nur der Zweig für die Funktionsanforderung $F1$ dargestellt. Die Funktionszweige für die Funktionsanforderungen $F2$ und $F3$ sind durch die gestrichelt dargestellten Transitionen angedeutet. Je nach Anzahl der Be-

triebszustände wird das Modell äquivalent zum Modell des gezeigten Teilstrangs aufgebaut.

Kommt es zu einer Funktionsanforderung FI , schaltet die unmittelbare Transition $tr1$ aufgrund der erfüllten Wächterbedingung, in der die Bedingung gemäß Tabelle 5.1 definiert ist. Ausgehend von der nun besetzten Stelle $p2$ wird der über die Betriebsstrategie für die Funktionsanforderung FI (vgl. Tabelle 5.1) bestimmte Betriebszustand eingestellt. Dazu werden die globalen Variablen Z_i und L_i ausgelesen und mit den jeweiligen Wächterbedingungen verglichen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Wächterbedingungen den durch die Zustandsgrößen aufgespannten Parameterraum vollständig abdecken. Ist eine Wächterbedingung erfüllt, schaltet die zugehörige unmittelbare Transition ($tr2$ - $tr4$) in den jeweiligen Betriebszustand der durch die Stellen $p3$ - $p5$ modelliert wird. Die Marke bleibt bis zu dem Zeitpunkt in der jeweiligen Stelle, zu dem die Ausgangsbedingung der zugehörigen Transition ($tr5$ - $tr7$) erfüllt ist. Die Marke wird dann durch Nutzung einer Referenzstelle $rp1$ in die Initialisierungsstelle $p1$ zurückgelegt, womit sich das System wieder in der Ausgangssituation befindet und die Wahl des Betriebszustands von neuem beginnt.

Durch die Wahl von unmittelbaren Transitionen kommt es zu keinen Verzögerungen bei deren Schaltung. Das bedeutet, dass die reale Aufenthaltsdauer einer Marke in den Stellen $p1$ und $p2$ gleich null ist. Diese Stellen sind notwendig, um die Entscheidungsprozesse bei der Wahl des Betriebszustands zu modellieren. Durch Auswertungen der Stellen, die die Betriebszustände beschreiben, kann der Verlauf der Betriebszustände über der Zeit ermittelt werden. Bei komplexer werdenden Wächterbedingungen können zusätzliche Zweige im Netz modelliert werden. Eine „OR“-Verknüpfung kann äquivalent durch zwei Pfade mit jeweils einer Transition modelliert werden, die dann wieder auf die gleiche Stelle zeigen. Hierbei muss zwischen einer komplexeren mathematischen Beschreibung in den Wächterbedingungen und einem größer werdenden Modell durch zusätzliche Kanten und Transitionen abgewogen werden.

5.4.3 Schnittstelle zur Systemebene

Beim Verlassen der Betriebsebene steht die Information über die zeitabhängige Belastung der Komponenten zur Verfügung. Diese ergibt sich aus der modellierten Betriebsstrategie und den eingelesenen Lastkollektiven. Abhängig vom bestimmten Ausfallverhalten aus der Komponentenebene ergibt sich die Höhe der Belastung. Bild 5.20 zeigt das Zusammenspiel der Einflüsse auf die zeitabhängige Belastung und den damit verbundenen Einfluss auf das Zuverlässigkeitsmodell der Komponente $K1$. Die Wechselwirkungen sind in diesem Bild aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

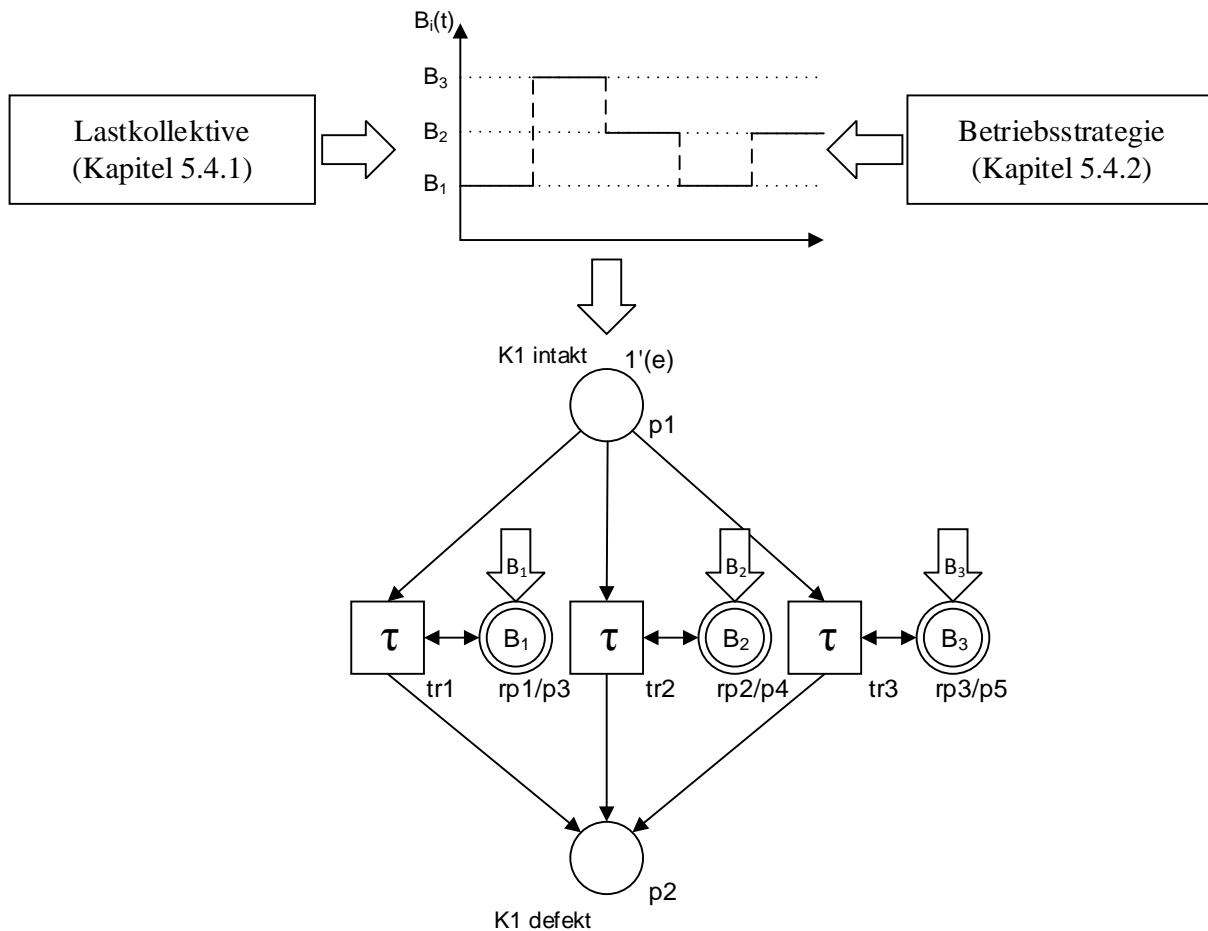


Bild 5.20: Zuverlässigkeitsmodell der Komponente K1 mit zeitabhängigen Betriebszuständen

Der zeitabhängige Verlauf der Betriebszustände lässt sich durch Auswertung der Stellen p_3 - p_5 im Modell in Bild 5.19 auslesen. Dieser Verlauf wird nun mit Hilfe von Referenzstellen auf das Zuverlässigkeitsmodell der Komponente K1 übertragen. Bild 5.20 zeigt die Übertragung des Verlaufs der Betriebszustände auf das Zuverlässigkeitsmodell mit Hilfe der Referenzstellen $rp1$ - $rp3$. Diese Vorgehensweise wird äquivalent für alle Betriebszustände und dementsprechend für alle zu berücksichtigenden Komponenten durchgeführt. Beim Übergang in die Systemebene stehen so die Zuverlässigkeitsmodelle der beteiligten Komponenten mit den zeitabhängigen Betriebszuständen und dem daraus folgenden Ausfallverhalten zur Verfügung.

5.5 Systemebene

Ziel der Systemebene ist es, die erstellten Modelle und die dazugehörigen Informationen aus Funktions-, Komponenten- und Betriebsebene zu bündeln und zu einem Gesamtmodell zu verknüpfen. Die Modellierung der Alterung ist aus Gründen des Modellierungsablaufes der Systemebene zugeordnet. Die Alterung ist grundsätzlich ein Modellierungsaspekt, der die einzelnen Komponenten betrifft und könnte daher auch der

Komponentenebene zugeordnet werden. Da für die vollständige Modellierung der Alterung die Informationen aus der Betriebsebene benötigt werden, wird dieser Schritt in der Systemebene bearbeitet. Neben der Modellierung der Alterung ist die Verknüpfung zum Gesamtmodell der Kernpunkt in der Systemebene. Bild 5.21 zeigt die einzelnen Schritte der Systemebene.

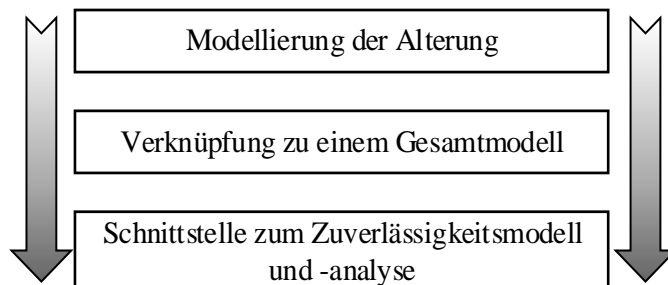


Bild 5.21: Schritte der Systemebene

5.5.1 Modellierung der Alterung

Aus der vorangegangenen Betriebsebene geht unter anderem der zeitliche Verlauf der Betriebszustände der einzelnen Komponenten hervor. Die wechselnden Betriebszustände haben unterschiedliche Belastungen und Ausfallverhalten der Komponenten zur Folge. Für eine realitätsnahe Modellierung ist daher die Berücksichtigung der Alterung notwendig. Wird die Alterung nicht berücksichtigt, folgt daraus die Annahme, dass die Komponenten bei jedem Zustandswechsel als neuwertig betrachtet werden.

Anhand eines Beispiels soll dieser Unterschied verdeutlicht werden [103]. Angenommen wird ein Parallelsystem aus zwei Komponenten, bei dem eine Komponente als warme Redundanz fungiert. Die Funktionalität des Systems wird demnach ausschließlich durch Komponente 1 sichergestellt. Die zweite Komponente (Reserve) trägt nicht zur Funktion bei, ist aber vorbelastet. Vorteil beim Einsatz einer warmen Redundanz ist die schnelle Funktionsübernahme der Reserve im Falle eines Ausfalls von Komponente 1. Demgegenüber steht ein möglicher Ausfall und die Alterung der Reserve im vorbelasteten Zustand. Ziel dieses Beispiels ist es, den Einfluss der Alterung auf die Systemzuverlässigkeit zu zeigen. Bild 5.22 zeigt das Modell des Systems.

Im Ausgangszustand sind Komponente 1 und die Reserve intakt, was durch die jeweilige Initialisierungsmarkierung in den Stellen $p1$ bzw. $p3$ realisiert ist. Der obere Teil des Modells repräsentiert das Ausfallverhalten der Komponente 1, hier durch eine Weibullverteilung modelliert. Sobald Komponente 1 ausfällt und in den defekten Zustand ($p2$) übergeht, schaltet die unmittelbare Transition $tr2$ und die Reserve wird durch den Übergang in die Stelle $p4$ aktiviert. Die Vorbelastung der Reserve im passiven Zustand wird durch die Transition $tr3$ modelliert. Die Alterung der Reserve durch die Vorbelastung wird durch den Kantenausdruck „ $AgeExit(tr3)$ “ auf den Zustand der aktivierten Reserve übertragen. Über den Ausdruck „ $AgeEnter = age$ “ wird diese Vor-

alterung bei der Simulation der Schaltzeit für die Transition $tr4$ berücksichtigt. Der Transition $tr4$ wird die Schaltregel „Age Influence“ zugewiesen, da die Voralterung bei Aktivierung dieser Transition berücksichtigt werden soll. Da es sich bei diesem System um ein Parallelsystem handelt, ist die Bedingung für einen intakten Zustand des Systems ($p6$), dass sich mindestens eine der beiden Komponenten in einem funktionsfähigen Zustand befindet. Das System geht daher in den defekten Zustand ($p7$) über, wenn beide Komponenten ausgefallen sind. Dies ist der Fall wenn die Eingangsbedingungen für die unmittelbare Transition $tr5$ erfüllt sind, das heißt im Falle dieses Beispiels die Stellen $p2$ und $p5$ mit einer Marke besetzt sind.

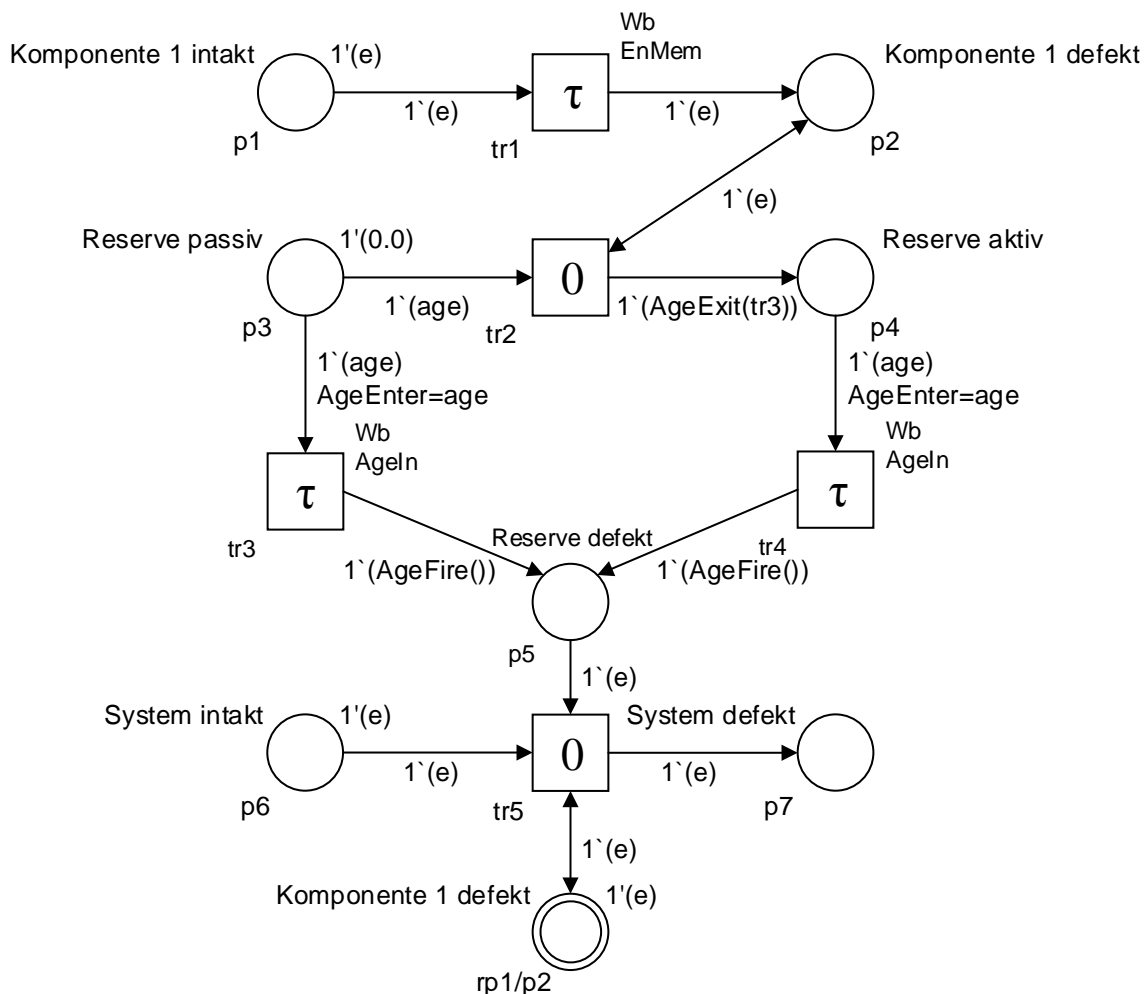


Bild 5.22: Modellierung eines Parallelsystems mit warmer Redundanz

Für das Modell wurden Simulationen mit den Parametern aus Tabelle 5.2 durchgeführt. Zunächst wurde das Modell ohne die Einflüsse der Alterung simuliert. Alle Kanausdrücke werden durch den einfachen Ausdruck $1'(e)$ ersetzt. Die Schaltregel der Transitionen $tr3$ und $tr4$ werden auf „Enabling Memory“ gesetzt. Durch diese Änderungen im Modell gilt die Annahme, dass für die Reserve nach Aktivierung keine Voralterung berücksichtigt wird und diese dadurch „wie neu“ modelliert wird.

Tabelle 5.2: Parameter der Simulation

Ausfallverhalten	Parameter
Komponente 1	weibullverteilt: $b_{tr1} = 2$; $T_{tr1} = 1128,4$ h
Reserve passiv	weibullverteilt: $b_{tr3} = 2$; $T_{tr3} = 2256,8$ h
Reserve aktiv	weibullverteilt: $b_{tr4} = 2$; $T_{tr4} = 1128,4$ h
Weitere Parameter	Werte
Replikationen	10.000
Simulationszeit	10.000 h

Die Zuverlässigkeit des Systems lässt sich bei der Simulation durch Auswerten der Markenbesetzung in Stelle $p6$ ermitteln. Äquivalent dazu kann auch die Markenbesetzung der Stelle $p7$ ausgewertet werden, welche der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems entspricht. Bild 5.23 zeigt den Verlauf der Systemzuverlässigkeit für das System mit bzw. ohne Berücksichtigung der Alterung.

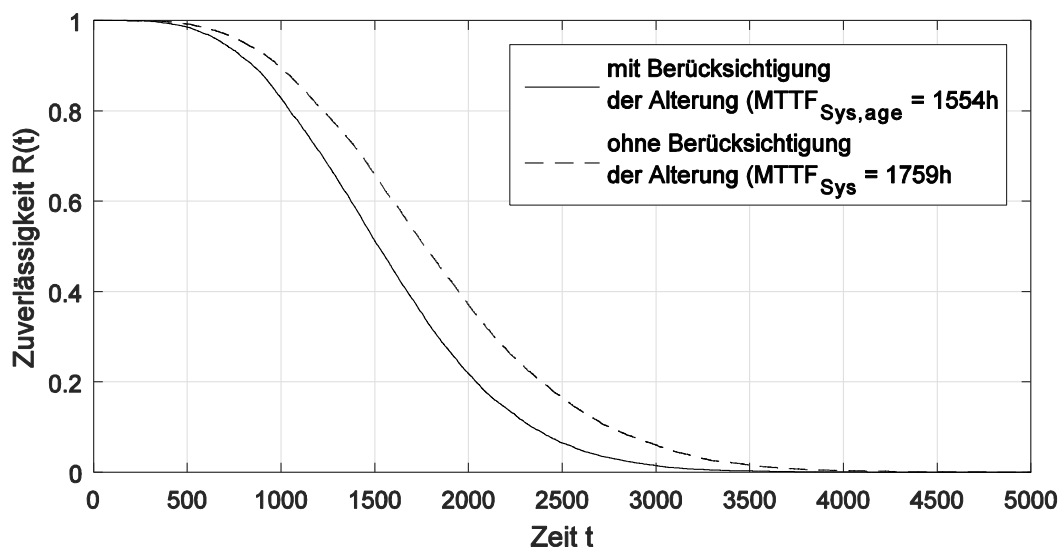


Bild 5.23: Zuverlässigkeit eines Parallelsystems mit warmer Reserve

Das Schaubild zeigt einen signifikanten Unterschied im Verlauf der Zuverlässigkeit der jeweiligen Modellierungsansätze. Ohne Berücksichtigung der Alterung wird eine deutlich höhere Lebensdauer erreicht. Die mittlere Ausfallzeit ist dabei um ca. 13 % höher als die mittlere Ausfallzeit unter Berücksichtigung der Alterung. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Nichtberücksichtigung der Alterung zu deutlich abweichenden Ergebnissen führt.

Umsetzung der Alterung im Modell

Die Modellierung der Alterung kann über eine lokale Variable oder über eine globale Variable umgesetzt werden. Die Modellierung als globale Variable hat den Vorteil, dass diese getrennt ausgewertet und damit der Verlauf visualisiert werden kann. Darüber hinaus ist eine globale Variable an jedem Ort des Modells verfügbar. Für jede zu modellierende Komponente wird eine Alterungsvariable definiert. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Alterungsentwicklung sind die Aufenthaltsdauer in einem die Alterung beeinflussenden Zustand und die Eingangsalterung in diesen Zustand. Die Aufenthaltsdauer ist bereits durch den zeitlichen Verlauf der Betriebszustände aus der Betriebsebene festgelegt. Dem Modell müssen daher Informationen über den gegenwärtigen Alterungszustand beim Eingang und Verlassen eines Zustands zur Verfügung gestellt werden. Anhand des Zuverlässigkeitsmodells und der Betriebsstrategie für Komponente KI in Bild 5.24 wird die Umsetzung der Alterung im Modell beschrieben.

Die Modifikationen im Modell sind fett markiert. Beim Eintritt der Marke in den zugehörigen Teilstrang der Betriebsstrategie im oberen Modell wird die globale Variable AGE_{KI} gleich der lokalen Variablen e gesetzt. Im Modell der Betriebsstrategie haben diese beiden Variablen den gleichen Wert. Für die Transitionen $tr8$ - $tr10$, die das Ausfallverhalten in den jeweiligen Betriebszuständen beschreiben, wird die Schaltregel „AgeInfluence“ ausgewählt. Zur Berechnung der bedingten Schaltzeiten benötigen diese die Information über das Eingangsalter. Dieses wird über die Kantenfunktion $AgeEnter = AGE_{KI}$ realisiert, welche die aktuelle Alterung an die jeweilige Transition übergibt.

Während der Aufenthaltsdauer in den Betriebszuständen kommt es zu einem Zuwachs der Alterung. Die erreichte Alterung beim Verlassen des jeweiligen Zustands wird über den Befehl „AgeExit(tr_x)“ im Kantenausdruck der Ausgangskante übergeben. Die das Ereignis des Verlassens auslösende unmittelbare Transition im Modell der Betriebsstrategie bestimmt dabei den zu verlassenden Betriebszustand und damit die zugehörige Transition für den Alterungszuwachs. Die erreichte Alterung wird so zunächst an die lokale Variable e und schließlich über den zu Beginn beschriebenen Befehl wieder an die globale Variable AGE_{KI} übergeben („Set($AGE_{KI} = e$)“). Durch die Modellierung der Alterung als globale Variable eröffnen sich Möglichkeiten diese in Entscheidungsprozesse der Betriebsstrategie einzubinden.

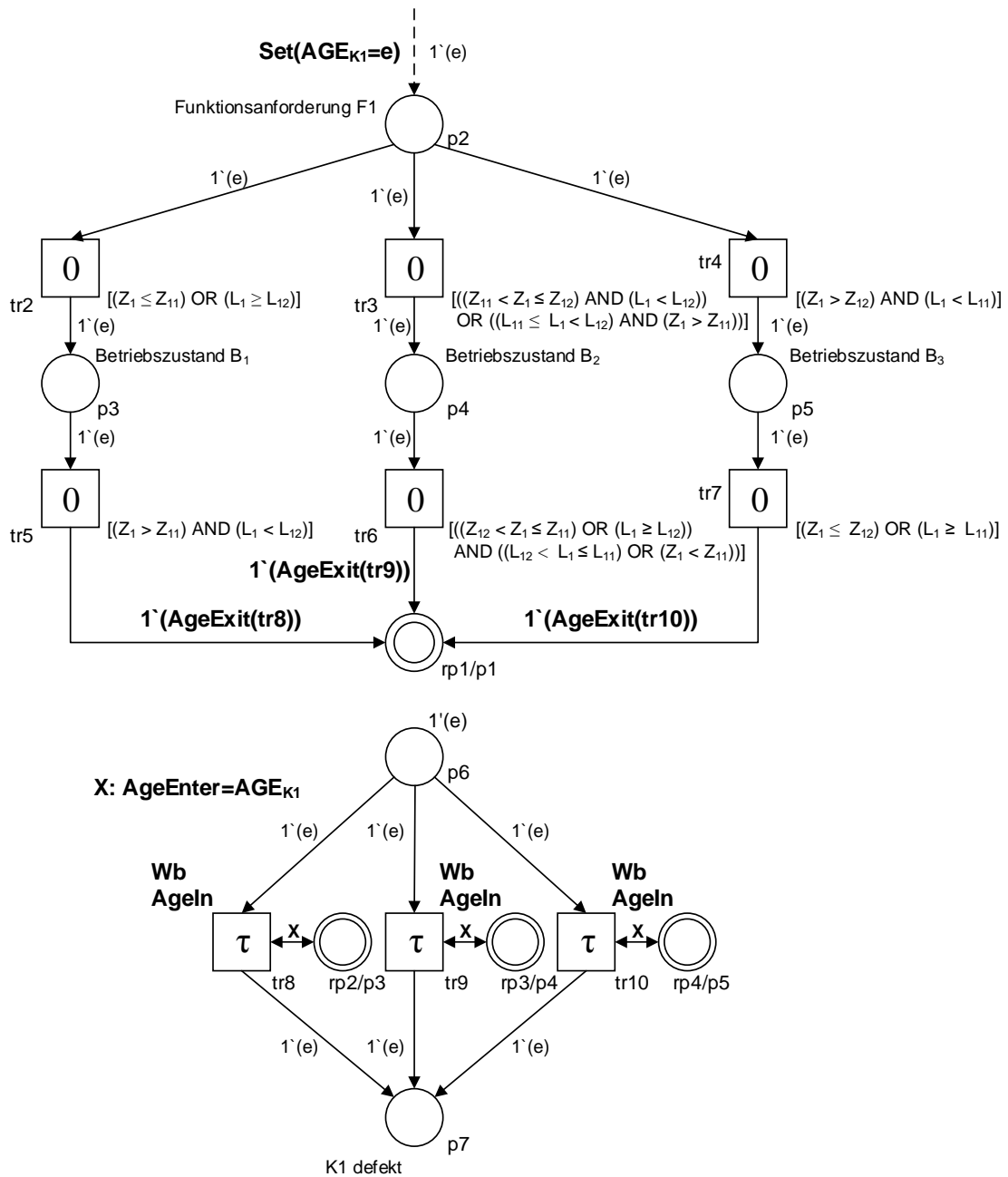


Bild 5.24: Umsetzung der Alterung

5.5.2 Verknüpfung zu einem Gesamtmodell

Die modellierten Komponenten werden in diesem Schritt zu einem Gesamtmodell verbunden. Die bisher vorgestellten Schritte werden komponentenweise durchgeführt, was zu den einzelnen Modellen für die Komponenten führt. Diese werden schließlich über ein Blockschaltbild durch die verbundene Modellierung (CSM) miteinander verknüpft.

Für eine bessere Übersichtlichkeit des Gesamtmodells werden dazu Subsysteme für die einzelnen Komponenten genutzt. Bild 5.25 zeigt das Prinzip der Verknüpfung zu einem Gesamtmodell.

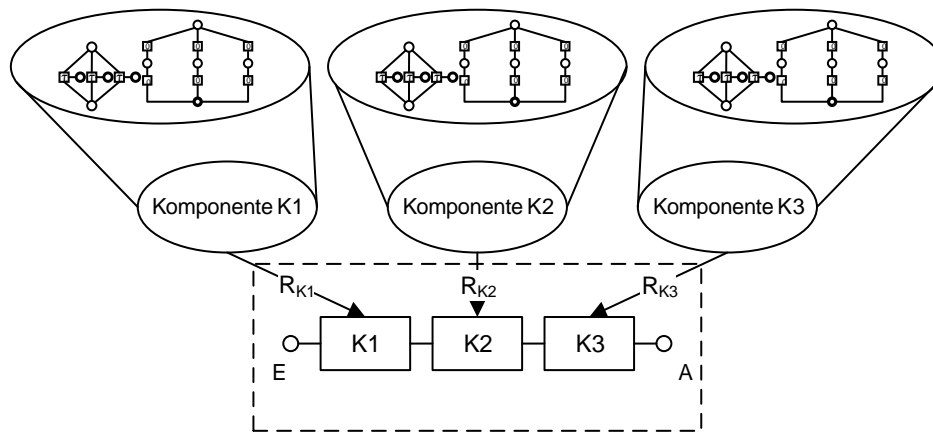


Bild 5.25: Verknüpfung zu einem Gesamtmodell

Die Schnittstellen zwischen den Subsystemen, die die jeweiligen Zuverlässigkeitsmodelle und die Modellierung der Betriebszustände beinhalten, und dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm auf der Systemebene, sind die Zuverlässigkeitswerte der einzelnen Komponenten. Diese werden als globale Variable definiert und werden vom zugeordneten Block der Systemstruktur eingelesen. Die Zuverlässigkeit des Systems wird letztendlich über die logisch verknüpften Komponenten und deren Komponentenzuverlässigkeit berechnet. Zu jedem Auswerteschritt wird abhängig von den Zuständen der Komponenten, die entweder intakt ($R_{Ki} = 1$) oder defekt ($R_{Ki} = 0$) sind und der modellierten Systemstruktur überprüft, ob das System intakt ist. Eine vordefinierte globale Variable X_{Sys} wird dementsprechend zu 0 oder zu 1 gesetzt. Die Komponenten können abhängig von deren Verknüpfung zur Systemstruktur beliebig miteinander verbunden werden.

5.5.3 Schnittstelle zur Ebene „Zuverlässigkeitsmodell und -analyse“

Als Ergebnis der Systemebene entsteht ein Gesamtmodell, das aus den folgenden Teilmodellen besteht.

- Komponentenmodelle
- Modellierung Lastkollektive
- Modellierung Betriebsstrategie
- Zuverlässigkeitsblockdiagramm der verbundenen Modellierung

Die Modularisierung in Subsysteme ermöglicht eine flexible und unabhängige Anpassung der einzelnen Teilmodelle an geänderte Randbedingungen. Es können weitere Komponenten hinzugefügt oder entfernt werden ohne das gesamte Modell von Grund auf neu aufbauen zu müssen.

Der Übergang zu einem Zuverlässigkeitsmodell des Gesamtsystems entsteht im nächsten Schritt durch die Definition der auszuwertenden Zustandsgrößen.

5.6 Zuverlässigkeitsmodell und -analyse

Auf der untersten Ebene der methodischen Vorgehensweise steht schließlich das Zuverlässigkeitsmodell des Gesamtsystems. Die vor Beginn der Modellierung festgelegten gewünschten Ergebnisse werden als auszuwertende Parameter definiert und anschließend in der eigentlichen Simulation während der Zuverlässigkeitsanalyse berechnet.

5.6.1 Zuverlässigkeitsmodell

Durch die Verbindung zu einem Zuverlässigkeitsblockdiagramm der einzelnen Komponenten und der Definition der auszuwertenden Zuverlässigkeitskenngrößen ist das Zuverlässigkeitsmodell definiert. Die auszuwertenden Zuverlässigkeitskenngrößen können auf unterschiedlichen Wegen ausgewählt werden. Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems, sofern über die verbundene Modellierung definiert, ergibt sich durch Auswertung der globalen Variablen X_{Sys} . Die Zuverlässigkeit der Komponenten kann durch Auswertung der Markenbesetzung der entsprechenden Stelle ermittelt werden. So ergibt sich die Zuverlässigkeit der Komponente $K1$ durch Auswertung der Markenbesetzung der Stelle $p1$ (vgl. Bild 5.10). Die Alternative dazu ist die Auswertung der globalen Variablen R_{KI} (vgl. Bild 5.25). Die Schnittstelle zur anschließenden Zuverlässigkeitsanalyse bildet der Export des im REALIST-Editor erstellten Gesamtmodells als PNML-Datei.

5.6.2 Zuverlässigkeitsanalyse

Die Zuverlässigkeitsanalyse beginnt mit der Simulation des im REALIST-Editor erstellten Modells durch Auswertung der exportierten PNML-Datei im Simulationsprogramm REALIST-Simulation. Im Simulationsprogramm werden nun abhängig vom Simulationsziel die Numerik-Parameter definiert. Mit der **Simulationsdauer** wird definiert, wie lange die Schaltvorgänge im modellierten Petrinetz simuliert werden. Die Simulationsdauer ist dimensionslos und kann daher als beliebige Größe interpretiert werden. Als Ausgabeeinheit können jedoch voreingestellte Einheiten, wie z. B. Stunden, Tage oder Lastwechsel definiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die bei der vorangegangenen Modellierung festgelegten Parameter für die Schaltverzögerungen die gleiche Dimension haben. Mit der Anzahl der **Replikationen** wird festgelegt, wie oft die Simulation über die festgelegte Simulationsdauer wiederholt wird. Eine Simulation mit einer geringen Anzahl an Replikationen kann dazu genutzt werden die prinzipielle Funktionalität der Schaltvorgänge im Netz zu überprüfen, z. B. für die Vi-

sualisierung der Schaltvorgänge. Eine Erhöhung der Anzahl an Replikationen bringt eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse, steht allerdings in einem direkten Konflikt mit der gleichzeitigen Verlängerung der Simulationszeit. Das **Abtastintervall** gibt an, in welchen Zeitabständen eine Auswertung der gewählten Zuverlässigkeitskenngrößen durchgeführt wird. Dieses kann erhöht werden, wenn der detaillierte Verlauf der Zuverlässigkeitsgrößen nicht von Interesse ist. Dadurch kann Simulationszeit eingespart werden. Der gleiche Effekt kann durch die Wahl des Zeitpunktes, ab dem das zu berechnende Netz ausgewertet werden soll („**Auswertung ab**“) erreicht werden.

Je nach Wahl der Protokoll-Optionen kann das Modell im nächsten Schritt hinsichtlich des Schaltablaufs oder der auszuwertenden Zuverlässigkeitskenngrößen analysiert werden.

Visualisierung der Schaltvorgänge

Durch das REALIST-Simulationsprogramm ergeben sich mehrere Möglichkeiten die in den vorangegangenen Schritten erstellten Modelle zu analysieren. Es können zum einen die grundsätzliche Struktur der Modelle und deren Schaltabläufe, zum anderen die auszuwertenden Zuverlässigkeitsgrößen analysiert werden. Um zunächst sicherzustellen, dass die Schaltabläufe korrekt modelliert wurden, können diese nach Fertigstellung der Simulation in den erstellten Netzen direkt visualisiert werden. Bild 5.26 zeigt exemplarisch drei Zeitpunkte für die Visualisierung der Schaltabläufe für Komponente *K1*.

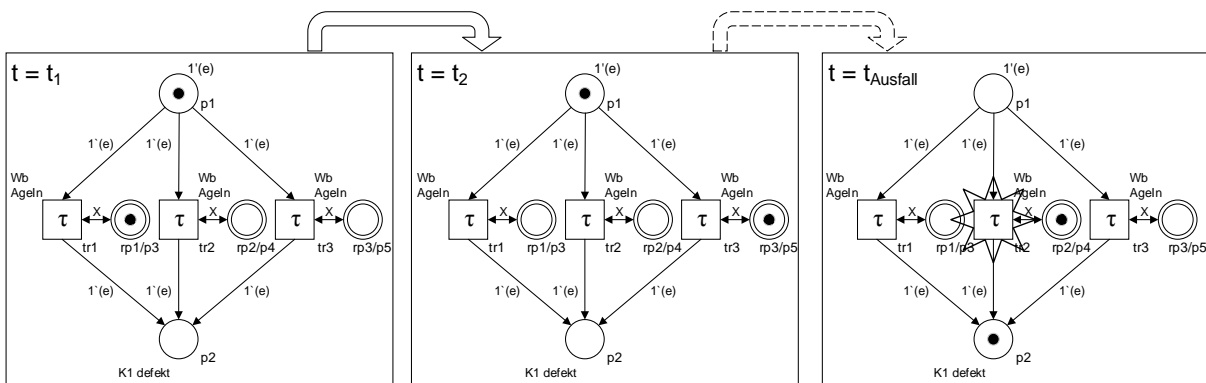


Bild 5.26: Visualisierung Schaltabläufe

Durch die Visualisierung der Schaltabläufe werden zum einen die Markenbesetzungen der Stellen, zum anderen die Schaltvorgänge der Transitionen sichtbar. Die Visualisierungszeitpunkte werden durch die Schaltzeitpunkte der Transitionen im Netz definiert. In diesem Fall werden diese durch die Änderungen der Betriebszustände (Markierungen in den Stellen p_3 - p_5) und die dadurch aktivierten Transitionen tr_1 - tr_3 definiert. Zum Zeitpunkt $t = t_{\text{Ausfall}}$ wird die Transition hervorgehoben, die für die Zustandsänderung, d. h. für den Ausfall von Komponente *K1*, verantwortlich ist.

Die Überprüfung der Schaltlogik kann der eigentlichen Zuverlässigkeitsanalyse vorge-

lagert werden. Durch eine Simulation mit geringen Replikationen und anschließender Visualisierung kann die Schaltlogik überprüft und ein unnötiger Zeitverlust durch zeitintensive fehlerhafte Simulationen vermieden werden.

Auswertung der Zuverlässigkeitskenngrößen

Ist das Modell durch die Visualisierung der Schaltabläufe validiert, kann dieses erneut mit erhöhter Replikationszahl simuliert werden. Nach der erneuten Simulation können die statistischen Kenngrößen einer Stelle oder der Verlauf einer globalen Variablen ausgewertet werden. Die Ergebnisse werden als Grafiken oder zur weiteren Auswertung mit statistischen Auswerteprogrammen als ASCII-Dateien ausgegeben. Bei der Auswertung der Stellen spielt die Markenbesetzung die entscheidende Rolle. Dabei kann die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Marke in einer Stelle befindet, die den intakten Zustand einer Komponente oder eines Systems beschreibt, als Zuverlässigkeit interpretiert werden. Die Zuverlässigkeit kann direkt aus dem Zeitverlauf der Markenbesetzung einer Stelle ausgelesen werden. Charakteristische Zuverlässigkeitskenngrößen, wie z. B. B_q - oder $MTTF$ -Werte müssen nachgelagert aus den ASCII-Dateien bestimmt werden. Für Auswertungsbeispiele wird an dieser Stelle auf das Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 verwiesen. Neben den Stellen können auch die globalen Variablen ausgewertet werden. Hierbei wird der aktuelle Wert zum jeweiligen Rechenschritt gemäß dem zuvor definierten Abtastintervall direkt ausgegeben. Hierbei erfolgt die Ausgabe ebenfalls wahlweise über eine Grafik und eine ASCII-Datei.

5.7 Zwischenfazit

In den Abschnitten 5.2-5.6 wird eine methodische Vorgehensweise zur Modellierung von technischen Systemen vorgestellt und detailliert beschrieben. Anhand der Anforderungen aus Kapitel 4 wird nun die methodische Vorgehensweise reflektiert.

Eine Durchgängigkeit wird durch den Ebenenansatz mit klar strukturierten Arbeitsschritten erreicht. In jeder Ebene sind die zu tätigen Arbeitsschritte deutlich formuliert, was zu einer hohen Wiederhol- und Reproduzierbarkeit und einer Minimierung von potentiellen Fehlerquellen führt. Die Vorgehensweise ist ohne tiefgehendes Vorwissen einfach anwendbar und durch ihre systemunabhängige Formulierung auf weitere Problemstellungen übertragbar.

Durch die unterteilte Modellierung in den Ebenen kann die Methodik zu jeder Zeit und unabhängig vom Entwicklungsprozess angewendet werden, da möglicherweise fehlende Informationen leicht ergänzt werden können. Die Modelle können für verschiedene Varianten schnell angepasst werden und eine domänenspezifische Modellierung in verschiedenen Subsystemen ist realisierbar, wobei die Informationen über globale Variable zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden können.

Die intuitive Bedienung des Softwarepakets REALIST sorgt für eine hohe Benutzer-

freundlichkeit und eine übersichtliche Darstellung der einzelnen Modelle. Durch die getrennte Modellierung der Zuverlässigkeitsmodelle, der Betriebsstrategie und der Lastkollektive können keine Schaltkonflikte, die es aufgrund der Modellierungsmethode zu vermeiden gilt, entstehen.

Die speziellen Anforderungen, die bei der Modellierung der Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen auftreten, werden durch den Einsatz von verschiedenen Grundstrukturen der Modelle erfüllt. Insbesondere Alterungseinflüsse und Wechselwirkungen, die sich auf die Zuverlässigkeit auswirken, können modelliert werden.

Das Potential der vorgestellten methodischen Vorgehensweise wird im nachfolgenden Kapitel anhand eines Anwendungsbeispiels noch einmal vertieft.

6 Anwendungsbeispiel Hybridantriebsstrang

Die methodische Vorgehensweise wird in diesem Kapitel anhand eines fiktiven Beispielsystems angewendet. Bei dem ausgewählten System handelt es sich um den Antriebsstrang eines Parallel-PlugIn-Hybridfahrzeugs. Das im Folgenden gezeigte Modell basiert auf der Modellierung eines Hybridantriebsstrangs zur Untersuchung des Auftretens von komfort- und sicherheitsrelevanten Ereignissen [104]. Dieses Modell wurde in [105] zur Untersuchung der Zuverlässigkeit erweitert und in [103] um einfache Betriebsstrategien und Lastkollektive modifiziert.

Die Erweiterungen des nun vorgestellten Modells liegen im Wesentlichen in der Implementierung von verschiedenen Fahrzyklen, der Umsetzung einer ausführlichen Betriebsstrategie, der Ergänzung von weiteren Betriebszuständen mit unterschiedlichen Schädigungsverhalten und der Modellierung des Einflusses des Batterieladezustands zur Erzeugung von realistischen Anteilen der Betriebszustände [114].

6.1 Anwendungsbeispiel - Systembeschreibung

Das ausgewählte System ist ein Parallel-PlugIn-Hybridfahrzeug. Parallele Hybride verfolgen im Gegensatz zu seriellen Hybriden das Konzept, dass Verbrennungs- und Elektromotor mit den Rädern mechanisch verbunden sind [106]. Durch die Anordnung der Antriebsmaschinen sind ein reiner verbrennungs- und elektromotorischer Antrieb sowie eine Kombination aus beiden Antrieben möglich. Das Hybridfahrzeug ist zusätzlich als Plug-In-Hybrid ausgeführt. Das bedeutet, dass es sich um ein Vollhybridfahrzeug handelt, wobei die Batterie zusätzlich durch Verbindung mit dem Stromnetz geladen werden kann. Vollhybrid bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Hybridfahrzeug die Möglichkeit besitzt rein elektrisch zu fahren [107].

Bild 6.1 zeigt das Antriebskonzept des Parallel-PlugIn-Hybriden für das nachfolgende Anwendungsbeispiel. Der elektrische Antrieb ist in diesem Fall auf der Getriebeeintragsseite platziert und kann über die Kupplung mechanisch vom Verbrennungsmotor getrennt oder zugeschaltet werden.

Das Ziel bei der Anwendung der methodischen Vorgehensweise anhand des beschriebenen Beispielsystems ist, die Bestimmung des Einflusses von verschiedenen Fahrzyklen auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems und seiner Komponenten. Als relevante Fahrzyklen werden der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) [108], der Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle (WLTC) [109] und der Common Artemis Driving Cycle (CADC) [110] betrachtet. In den nächsten Abschnitten wird die methodische Vorgehensweise Schritt für Schritt gemäß Kapitel 5 angewendet.

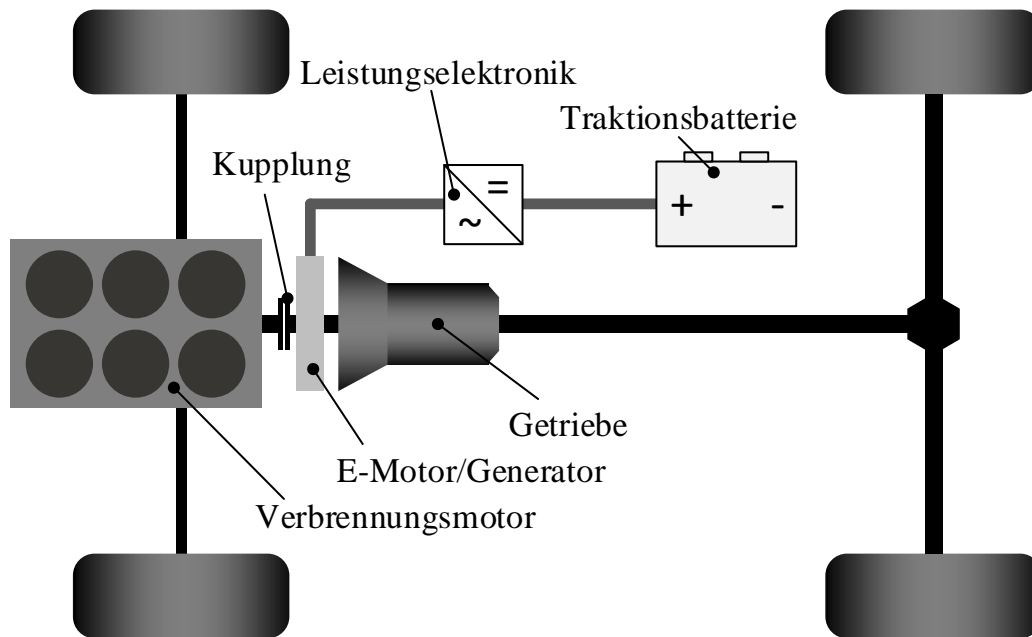


Bild 6.1: Antriebskonzept des Parallel-PlugIn-Hybriden

6.2 Anwendungsbeispiel - Funktionale Ebene

Die funktionale Ebene beinhaltet die drei Schritte der Funktionsanalyse, der Funktionserfüllung durch die Komponenten und die Schnittstelle zur Komponentenebene (vgl. Abschnitt 5.2). Als die relevanten Komponenten werden für die methodische Vorgehensweise beispielhaft der Verbrennungsmotor, die Kupplung, der Elektromotor (E-Motor), die Traktionsbatterie und das Getriebe ausgewählt.

6.2.1 Funktionsanalyse

Als relevante Funktionen, die vom betrachteten System bereitzustellen sind, wurden die Folgenden identifiziert:

- elektrisches Fahren (eDrive)
- verbrennungsmotorisches Fahren (cDrive)
- Boosten
- Rekuperieren
- Fahrzeugstillstand

Die oben genannten Funktionen, in der Folge Betriebsmodi genannt, die charakteristisch für Hybridfahrzeuge sind, werden im nächsten Arbeitsschritt genauer beschrieben.

6.2.2 Funktionserfüllung durch die Komponenten

Die genaue Funktionsweise der ausgewählten Betriebsmodi wird anhand des Beitrags zur Funktion durch die jeweiligen Komponenten im Folgenden beschrieben.

eDrive

Im Zustand des elektrischen Fahrens ist der Verbrennungsmotor abgeschaltet und die Kupplung geöffnet. Die Antriebsenergie wird durch die Traktionsbatterie bereitgestellt, in der Leistungselektronik gewandelt und vom E-Motor in Drehzahl und Drehmoment umgewandelt. Das Getriebe gibt die generierte Leistung über das Achsgetriebe an die Räder ab. Dieser Betriebszustand ist aus der Sicht des Kraftstoffverbrauchs zu bevorzugen. Demgegenüber stehen eine höhere Belastung der Traktionsbatterie und des E-Motors. Zur Vereinfachung des Modells wurden die sich ändernden Wirkungsgrade des Elektromotors über der Last nicht berücksichtigt.

cDrive

Der Betriebsmodus cDrive kommt dann zum Einsatz, wenn die Leistungsanforderungen nicht allein durch den Betriebsmodus eDrive erfüllt werden können. Es kann dabei zwischen einem Zustand mit Lastpunktanhebung (LPA) und einem Zustand ohne Lastpunktanhebung unterschieden werden. Beim Zustand ohne LPA wird die Antriebsenergie allein durch den Verbrennungsmotor bereitgestellt. Bei einem Zustand mit LPA wird ein Teil der Antriebsleistung durch den Verbrennungsmotor dazu genutzt die Traktionsbatterie zu laden. Dazu wechselt der E-Motor in einen generatorischen Betrieb und wandelt die überschüssige mechanische Antriebsenergie in elektrische Energie um. Im Modell wurden drei Stufen für die Lastpunktanhebung in Abhängigkeit des Ladezustands der Batterie definiert.

Boosten

Beim Boosten unterstützt der E-Motor den Verbrennungsmotor durch Kopplung deren Leistungen. Dieser Betriebsmodus dient zur Erfüllung hoher Leistungsanforderungen, z. B. hohe Beschleunigung bei einem KickDown. Boosten kann ebenfalls zum Einsatz kommen, um ungünstige Lastpunkte des Verbrennungsmotors zu vermeiden, bei denen dieser schlechte Wirkungsgrade oder Drehmomentschwächen aufweist. Weiterhin kann der Betriebsmodus Boosten zur Überwindung von Anfahrchwächen des Verbrennungsmotors angefordert werden. Boosten kann aber nur dann aktiviert werden, wenn es der Batterieladezustand zulässt.

Rekuperieren

Das regenerative Bremsen bzw. Rekuperieren, dient zur Rückgewinnung der vorhandenen Bewegungsenergie des Fahrzeugs bei dessen Verzögerung. Der E-Motor wird ähnlich zum Betriebsmodus cDrive als Generator betrieben und lädt die Traktionsbatterie durch Umwandlung der kinetischen Energie in elektrische Energie. Rekuperieren ist aber nur dann möglich, wenn der aktuelle Ladezustand der Traktionsbatterie unter einem oberen Grenzwert liegt und keine Gefahr besteht diese zu überladen. Ist dies

nicht der Fall, ist der Betriebsmodus Rekuperieren deaktiviert und es wird auf das konventionelle Bremsen zurückgegriffen.

Fahrzeugstillstand

Im Fahrzeugstillstand gilt grundsätzlich, dass die Kupplung geöffnet ist und der E-Motor, die Traktionsbatterie und das Getriebe unbelastet sind. Die Belastung der Traktionsbatterie durch verschiedene Konstantverbraucher, wie z. B. Klimaanlage oder Radio, soll in diesem Fall vernachlässigt werden. Der Verbrennungsmotor kann abhängig vom Ladezustand der Traktionsbatterie abgeschaltet werden. Ist der Ladezustand hinreichend groß, ist die Start/Stop-Automatik aktiv und der Verbrennungsmotor kann während des Fahrzeugstillstands abgeschaltet werden. Ist dies nicht der Fall, bleibt der Verbrennungsmotor eingeschaltet.

Aufstellen der Funktionsmatrix

Nachdem die durch das System bereitzustellenden Betriebsmodi und die dazu beitragenden Komponenten identifiziert wurden, werden diese Informationen in die Funktionsmatrix übertragen. Bild 6.2 zeigt die Funktionsmatrix.

↗	eDrive	cDrive		Boosten	Rekuperieren	Fahrzeugstillstand
		mit LPA	ohne LPA			
Verbrennungsmotor	O	X	X	X	O	X
Kupplung	O	X	X	X	O	O
E-Motor	X	X	O	X	X	O
Traktionsbatterie	X	X	O	X	X	O
Getriebe	X	X	X	X	X	O
X: trägt zur Funktion bei O: trägt nicht zur Funktion bei						

Bild 6.2: Funktionsmatrix des Hybridantriebsstrangs

Eine genauere Beschreibung zu den einzelnen Einträgen der Funktionsmatrix befindet sich im Anhang 10.1. Für die Bereitstellung einer Funktion bzw. eines Betriebsmodus, sind immer alle beteiligten Komponenten erforderlich. Aus diesem Grund ist für die jeweiligen Funktionen eine Serienstruktur anzunehmen. Mit Hilfe der Funktionsmatrix können im nächsten Schritt die Zuverlässigkeitsnetze erstellt werden.

6.2.3 Schnittstelle zur Komponentenebene

Die Erstellung des Zuverlässigkeitsnetzes wird nachfolgend am Beispiel des E-Motors beschrieben. Aus der zuvor erstellten Funktionsmatrix lässt sich erkennen, dass der E-Motor während vier der fünf Betriebsmodi belastet ist. Daher besteht die Möglichkeit, dass der E-Motor, während das System eine dieser vier Betriebsmodi bereitstellt, ausfällt. Bild 6.3 zeigt das Zuverlässigkeitsnetz für den E-Motor.

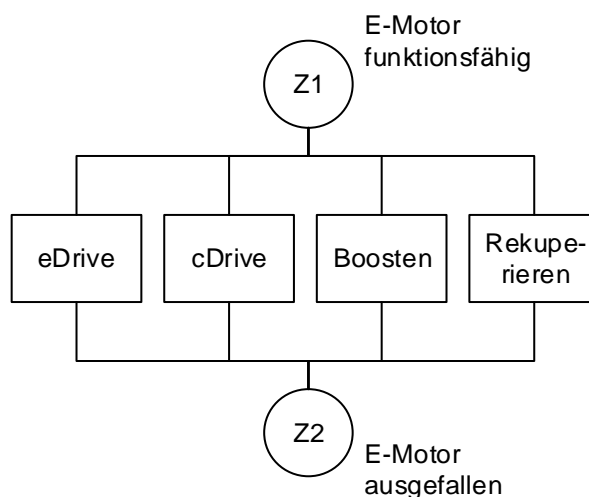


Bild 6.3: Zuverlässigkeitsnetz des E-Motors

Die Zuverlässigkeitsnetze der übrigen vier Komponenten werden auf die gleiche Weise erstellt.

Mit der Erstellung der Zuverlässigkeitsnetze sind die erforderlichen Arbeitsschritte der funktionalen Ebene durchlaufen und es kann zur Komponentenebene übergangen werden.

6.3 Anwendungsbeispiel - Komponentenebene

Auf der Komponentenebene werden auf Basis der Zuverlässigkeitsnetze die Zuverlässigkeitsmodelle als Petrinetze unter Berücksichtigung der Ausfallmechanismen, der Wechselwirkungen und des Ausfallverhaltens erstellt (vgl. Abschnitt 5.3).

6.3.1 Übergang zu Zuverlässigkeitsmodellen

Die Zuverlässigkeitsmodelle werden im REALIST-Editor erstellt. Die nachfolgend gezeigten Modelle sind direkt der Benutzeroberfläche des REALIST-Editors entnommen. Das Basismodell für den E-Motor wird durch Zuordnung der jeweiligen Funktionen bzw. Betriebsmodi, zu den möglichen Zustandsübergängen als Transitionen erstellt. Den Komponenten werden jeweils die Zustände „funktionsfähig“ und „ausgefallen“ zugeordnet. Bild 6.4 zeigt das Basismodell für den E-Motor.

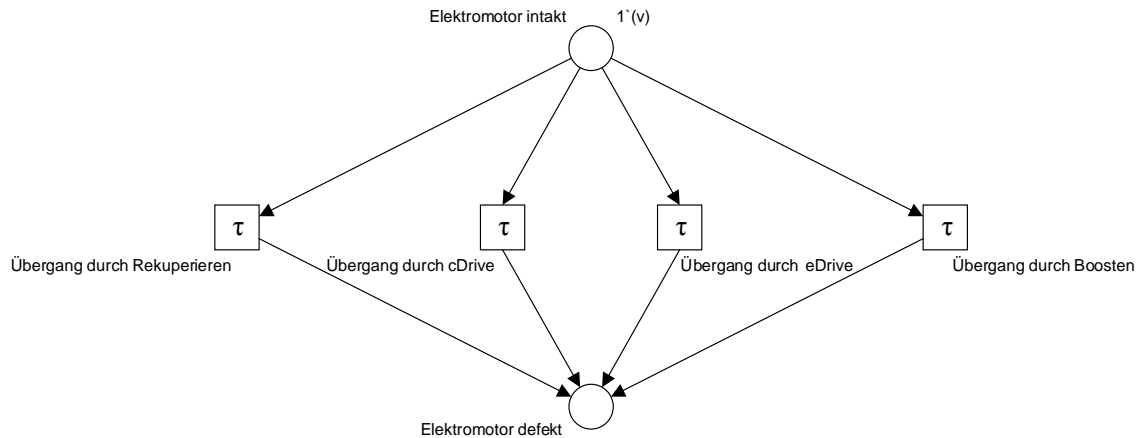


Bild 6.4: Basismodell für den E-Motor

6.3.2 Modellierung der Ausfallmechanismen

Das Basismodell zeigt, dass die Komponente E-Motor während vier Betriebsmodi ausfallen kann. Existieren während eines Betriebsmodus mehr als ein Ausfallmechanismus, wird die jeweilige Transition für den Übergang um weitere mögliche Übergänge erweitert.

Zur Übersichtlichkeit des Anwendungsbeispiels wird angenommen, dass jedem Betriebsmodus nur ein Ausfallmechanismus zugrunde liegt. Allerdings wird der Betriebsmodus eDrive in zwei weitere Betriebsmodi unterteilt. Dies entspricht der Modellierung von zwei oder mehreren Ausfallmechanismen, während der Aktivierung eines Betriebsmodus. Der Betriebsmodus eDrive wird in den Betriebsmodus „eDrive im Nennlastbereich“ und in den Betriebsmodus „eDrive im Überlastbereich“ aufgeteilt. Der E-Motor wird im Überlastbereich höher belastet, woraus sich unterschiedliche Ausfallparameter äquivalent zu unterschiedlichen Ausfallmechanismen ergeben. Die zusätzlich modellierte Transition ist in Bild 6.5 im Zuverlässigkeitsmodell des E-Motors dargestellt.

6.3.3 Modellierung der Wechselwirkungen

Für die Modellierung der Zuverlässigkeit des Hybridantriebsstrangs wird angenommen, dass sich die Komponenten gegenseitig nicht beeinflussen. Wie das Zuverlässigkeitsblockdiagramm auf der Systemebene zeigen wird, sind die Komponenten in einer Serienschaltung miteinander verknüpft, wobei der Ausfall einer Komponente zum Ausfall des Gesamtsystems führt. Das Vorgehen bei Vorhandensein von Wechselwirkungen wird an einem weiteren Beispielsystem in [102] gezeigt.

6.3.4 Modellierung des Ausfallverhaltens

Im nun folgenden Schritt erfolgt die Parametrisierung der Transitionen des Basismodells in Bild 6.4. Die Parameter Schaltgewicht und Schaltpriorität spielen in diesem Fall im Modell keine Rolle, da die Transitionen zu keiner Zeit in Konkurrenz um den Schaltvorgang stehen. Als Schaltregel für den Einfluss der Alterung auf das Ausfallverhalten wird „*Age Influence*“ gewählt. Die Modellierung der Alterung wird auf der Systemebene genauer beschrieben. Ein Wächterausdruck als Aktivierungsbedingung für die Transitionen entfällt in diesem Beispiel. Die Aktivierungsbedingungen für die jeweiligen Transitionen der Betriebsmodi werden im nächsten Schritt, der Schnittstelle zur Betriebsebene beschrieben.

Die Schaltverzögerungen werden für jeden Betriebsmodus und für jede Komponente bestimmt. Hier kann idealerweise auf Testergebnisse zurückgegriffen werden. Für das hier gezeigte Beispiel standen keine realen zustandsabhängigen Ausfalldaten zur Verfügung.

Da das Ziel dieses Kapitels ist, die prinzipielle Anwendbarkeit der methodischen Vorgehensweise aufzuzeigen, wurde bei den Ausfallparametern auf fiktive Ausfalldaten zurückgegriffen [114]. Bei den Komponenten Kupplung und Traktionsbatterie wird das Ausfallverhalten neben der zustandsabhängigen Alterung zusätzlich durch zyklusabhängige Parameter beeinflusst. Für die Traktionsbatterie wurde eine Grenze an Ladezyklen definiert, ab der diese einer Weibullverteilung folgend ausfallen kann und darüber hinaus ein Ausfallverhalten für die kalendarische Alterung definiert, deren zugehörige Transition immer aktiviert ist. Für die Kupplung wurde neben der Schädigung bei einer geschlossenen Kupplung die Schädigung aufgrund der Anzahl der Kupplungsbetätigungen definiert. Die verwendeten Ausfallparameter für die Zuverlässigkeitsmodelle der einzelnen Komponenten befinden sich im Anhang 10.2.

6.3.5 Schnittstelle zur Betriebsebene

Mit Hilfe der Informationen der vorangegangenen Schritte können die Zuverlässigkeitsmodelle der Komponenten erstellt werden, welche die Schnittstelle zur Betriebsebene repräsentieren. Die zeitlichen Verläufe der einzelnen Betriebsmodi, die im Zuverlässigkeitsmodell durch die Referenzstellen modelliert sind, werden auf der Betriebsebene modelliert. Da die Kenntnis der Betriebszustände für die Modellierung der Alterung der Komponenten vorausgesetzt ist, werden die notwendigen Kantenfunktionen anschließend auf der Systemebene implementiert. Bild 6.5 zeigt das Zuverlässigkeitsmodell für den E-Motor.

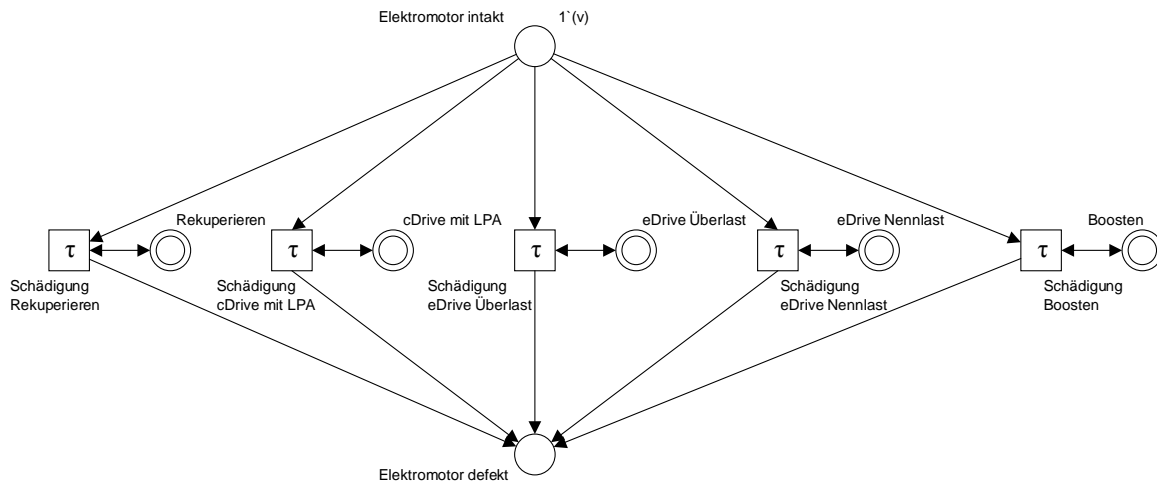


Bild 6.5: Zuverlässigkeitsmodell des E-Motors

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit der Komponenten wird nun der Zeitverlauf der Markenbesetzungen der Stellen, die die Betriebsmodi repräsentieren, benötigt. Diese Stellen sind über Referenzstellen mit dem Zuverlässigkeitsmodell des E-Motors verbunden. Die Ermittlung dieses Zeitverlaufs ist Inhalt der nächsten Ebene, der Betriebsebene.

6.4 Anwendungsbeispiel - Betriebsebene

Das Ziel der Betriebsebene ist es, die zeitabhängigen Aktivierungszustände der Betriebsmodi zu bestimmen (vgl. Abschnitt 5.4). Diese werden durch die Lastkollektive und die gewählte Betriebsstrategie bestimmt, welche in den nachfolgenden Schritten modelliert werden.

6.4.1 Modellierung Lastkollektive

Für das Anwendungsbeispiel werden die drei Fahrzyklen NEFZ, WLTC und CADC gegenübergestellt. Für den WLTC wird nach [109] die Klasse 3 für Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit größer als 120 km/h zugrunde gelegt. Für den CADC ist der Zyklus für Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit über 130 km/h maßgeblich [110]. Anhang 10.3 zeigt die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe und einen Vergleich der drei Fahrzyklen. Aus den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen ergibt sich zusammen mit den spezifischen Fahrzeugdaten der Zeitverlauf der erforderlichen Leistung des Hybridfahrzeugs [114]. Der Zeitverlauf dieser drei Eingangsgrößen wird über das vorgestellte Modul (vgl. Abschnitt 5.4.1) eingelesen und jeweils in einer globalen Variablen gespeichert.

Die drei Fahrzyklen unterscheiden sich im Wesentlichen in der zurückzulegenden Distanz, in den dynamischen Fahrwerten und in der Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeit. Während der NEFZ durch viele Anteile mit konstanter Beschleunigung

und Geschwindigkeit charakterisiert ist, steigen die dynamischen Fahranteile über den WLTC zum CADC. Der CADC besitzt somit auch die höchste Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeit.

6.4.2 Modellierung Betriebsstrategie

Für die Modellierung des Hybridantriebsstrangs wird eine heuristische Betriebsstrategie verwendet. Das Prinzip einer heuristischen Betriebsstrategie ist, über Wenn-Dann-Abfragen, den jeweiligen Betriebsmodus auszuwählen. Die Eingangsgrößen für die heuristische Betriebsstrategie sind neben der Fahrzeuggeschwindigkeit und der erforderlichen Leistung der aktuelle Ladezustand der Traktionsbatterie (*SOC*, engl.: State of Charge). In Bild 6.6 sind abhängig vom aktuellen Ladezustand der Batterie die Aktivierungszustände für das Rekuperieren, die Start/Stop-Automatik, das Boosten und die Lastpunktanhebung dargestellt. Die Grenzen ergeben sich zum Beispiel durch Vermeidung eines Ladungsverbrauchs durch das Boosten unterhalb einer gewissen Grenze oder durch Vermeidung von Überladung der Traktionsbatterie beim Rekuperieren oberhalb eines Grenzwertes. Die Lastpunktanhebung im cDrive wurde in drei Bereiche mit einer unterschiedlich starken Ladung je nach Ladezustand der Traktionsbatterie unterteilt.

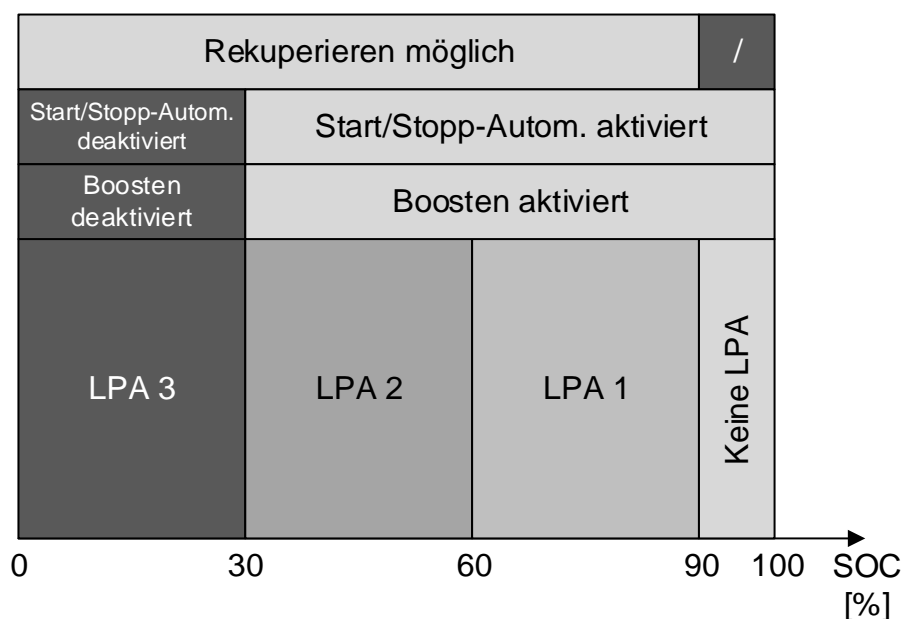


Bild 6.6: Betriebsstrategie - Aktivierungszustände

Die Betriebsstrategie sieht weiterhin vor, den Betriebsmodus so oft es geht in den Betriebsmodus eDrive zu schalten. Der Betriebsmodus eDrive ist allerdings nur in bestimmten Grenzen verfügbar, wobei diese von der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs und vom aktuellen Ladezustand der Traktionsbatterie abhängen. So schaltet sich der Verbrennungsmotor dann ein, wenn das Fahrzeug die Grenzggeschwindigkeit von 120 km/h überschritten oder die Ladegrenze von 30 % unterschritten hat. Bild 6.7

zeigt den Betriebsmodus in Abhängigkeit vom Ladezustand der Traktionsbatterie und der Fahrzeuggeschwindigkeit. Um ein permanentes Hin- und Herschalten zu verhindern, wurde ein Hysteresebereich zwischen den beiden Betriebsmodi vorgesehen.

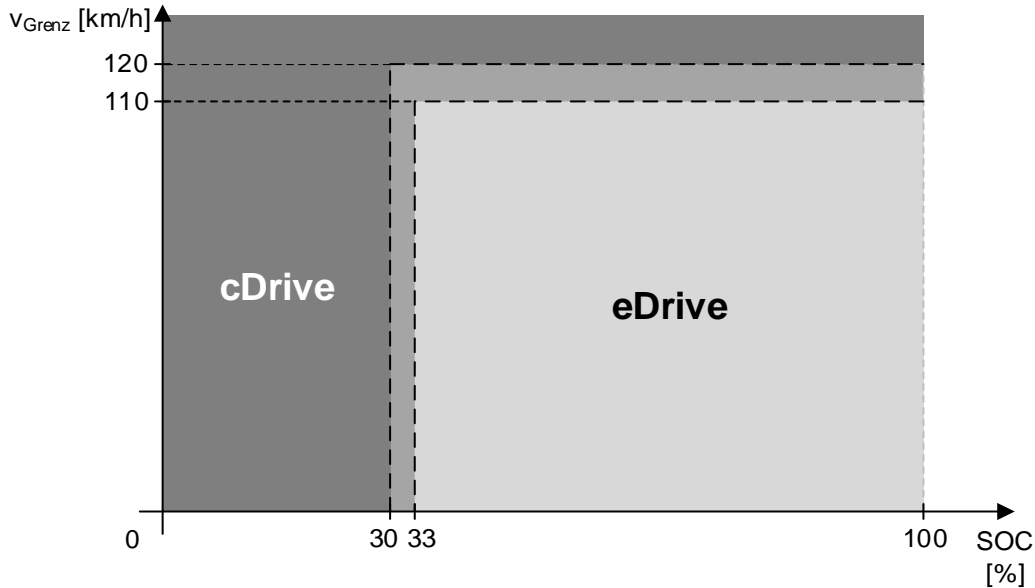


Bild 6.7: Betriebsmodus in Abhängigkeit vom Ladezustand der Traktionsbatterie und der Fahrzeuggeschwindigkeit

Da der aktuelle Ladezustand (SOC) der Traktionsbatterie einen großen Einfluss auf die Wahl der Betriebsmodi hat, ist es notwendig, diesen möglichst realitätsnah zu modellieren. Der aktuelle Ladezustand wird dabei zu jedem Zeitschritt neu berechnet. Die Traktionsbatterie wird in den Betriebsmodi eDrive und Boosten entladen und in den Betriebsmodi Rekuperieren und cDrive mit Lastpunktanhebung geladen. Da das Hybridfahrzeug als Plug-In-Hybrid ausgeführt ist, wird zusätzlich ein externer Ladezyklus modelliert. An dieser Stelle wird vorausgesetzt, dass der aktuelle SOC der Traktionsbatterie aufgrund des gegenwärtigen Betriebsmodus bekannt ist. Die ausführlichen Modelle für die Modellierung des Ladezustands der Traktionsbatterie sind in [114] beschrieben.

Weiterhin wird für die E-Maschine angenommen, dass diese für maximal 10 s im Überlastbereich betrieben werden kann. Dieser Überlastschutz wird ebenfalls in einem separaten Netz modelliert [114].

Für die Betriebsstrategie sind damit alle Eingangsparameter definiert und das Netz für die zu wählenden Betriebsmodi kann aufgebaut werden. Dazu werden zunächst die möglichen Fahrzustände aufgrund der Lastkollektive bestimmt und anschließend die Einflüsse aufgrund der Eingangsparameter auf die Wahl des Betriebszustands ermittelt. Die möglichen Fahrzustände des Fahrzeugs sind „aktives Bremsen“, „Fahrzeugstillstand“, „Verzögern des Fahrzeugs“, „Konstantfahrt“ und „Beschleunigung“.

Tabelle 6.1 zeigt für den jeweiligen Fahrzustand abhängig von den Eingangsbedingungen die Wahl des jeweiligen Betriebsmodus.

Tabelle 6.1: Betriebsstrategie für die Wahl des Betriebsmodus

	Eingangsparameter					zu wählender Betriebsmodus	
	erforderliche Leistung P_e	Beschleunigung a [m/s]	Geschwindigkeit v [km/h]	Ladezustand SOC [%]	aktueller Betriebsmodus		
aktives Bremsen	< 0	< 0	< 5			mechanisches Bremsen	
				≥ 90			
			≥ 5			Rekuperieren	
				< 90			
Fahrzeugstillstand	≥ 0	$= 0$	$= 0$	≥ 30		Fahrzeugstillstand, V-Motor aus	
		$= 0$	$= 0$	< 30		Fahrzeugstillstand, V-Motor ein	
Verzögern des Fahrzeugs	≥ 0	< 0	$110 < v < 120$			eDrive	
			≤ 110			eDrive	
			≥ 120			cDrive	
			$110 < v < 120$		cDrive	cDrive	
Konstantfahrt	≥ 0	$= 0$	$110 < v < 120$	≥ 30		eDrive	
			$0 < v \leq 110$			eDrive	
				< 30		cDrive	
			≥ 120			cDrive	
			$110 < v < 120$		cDrive	cDrive	
Beschleunigung		> 0		< 30		cDrive	
	≤ 38		≥ 120				
	$\leq 25,4$		$110 < v < 120$		cDrive		
	$\leq 25,4$ (Überlastschutz aktiv)		≤ 110	$110 < v < 120$	< 30		eDrive
	$\leq 50,8$ (Überlastschutz inaktiv)		≤ 110				
	> 38		$110 < v < 120$			eDrive	
	$> 25,4$ (Überlastschutz aktiv)			≥ 30		cDrive	Boosten
	$> 50,8$ (Überlastschutz inaktiv)				eDrive		
						eDrive	

Bei Aktivierung des Betriebsmodus cDrive wird unterhalb einer Grenzlasterleistung von $P_e \leq P_{Grenz} = 9\text{kW}$ die Traktionsbatterie durch Lastpunktanhebung geladen. Die Lastpunktanhebung ist dabei in drei Stufen gemäß Bild 6.6 unterteilt:

- LPA 1 $0 \% \leq SOC < 30 \%$ $P_{LPA,1} = 25\text{kW}$
- LPA 2 $30 \% \leq SOC < 60 \%$ $P_{LPA,2} = 15\text{kW}$
- LPA 3 $60 \% \leq SOC < 90 \%$ $P_{LPA,3} = 5\text{kW}$

Die überschüssige Leistung $P_{LPA,i}$ wird für die Ladung der Traktionsbatterie verwendet.

Ist der eDrive-Modus aktiviert, wird zusätzlich überprüft ob der E-Motor im Überlastbereich betrieben werden kann. Trifft dies zu, wird in den Betriebsmodus „eDrive im Überlastbereich“ geschaltet. Ist der Überlastschutz aktiv, wird der Betriebsmodus eDrive im Nennlastbereich gewählt.

Mit Hilfe der Tabelle 6.1 wird die Betriebsstrategie in ein Petrinetz überführt. Das Netz beinhaltet eine Marke, die aufgrund der beschriebenen Bedingungen den jeweiligen Betriebsmodus auswählt. Bild 6.8 zeigt eine Übersicht über das Petrinetz der Betriebsstrategie.

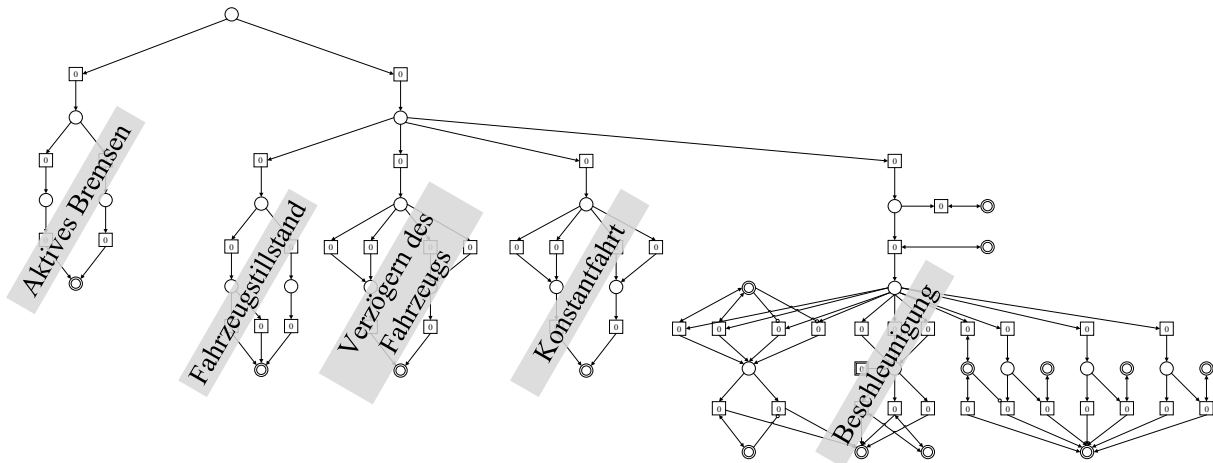


Bild 6.8: Petrinetz der Betriebsstrategie

Das Modell besteht ausgehend von einer Initialisierungsstelle aus fünf Teilsträngen mit jeweils einem Unternetz gemäß den fünf Fahrzuständen aus Tabelle 6.1. Die Wahl des Betriebsmodus wird abhängig von den Eingangsbedingungen durch Schaltung der unmittelbaren Transitionen beeinflusst. Durch Wächterbedingungen in den unmittelbaren Transitionen werden die globalen Variablen für die aktuelle erforderliche Leistung P_e , die Beschleunigung a , die Geschwindigkeit v und den Ladezustand SOC ausgelesen und bei einer erfüllten Bedingung die entsprechende Stelle für den dazugehörigen Betriebsmodus mit einer Marke besetzt. Dabei kann nur eine Transition zu einem Zeitpunkt schalten bzw. nur eine Stelle mit einer Marke besetzt werden. Damit die

Marke die Stelle wieder verlassen kann, werden entsprechende Wächterbedingungen für die Ausgangstransitionen definiert, die die Marke über Referenzstellen wieder in die Initialisierungsstelle schalten. Von dort beginnt der Zyklus erneut.

Bild 6.9 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Modells der Betriebsstrategie aus Bild 6.8 für den Fahrzustand „aktives Bremsen“. Dieser befindet sich ganz links im Modell der Betriebsstrategie.

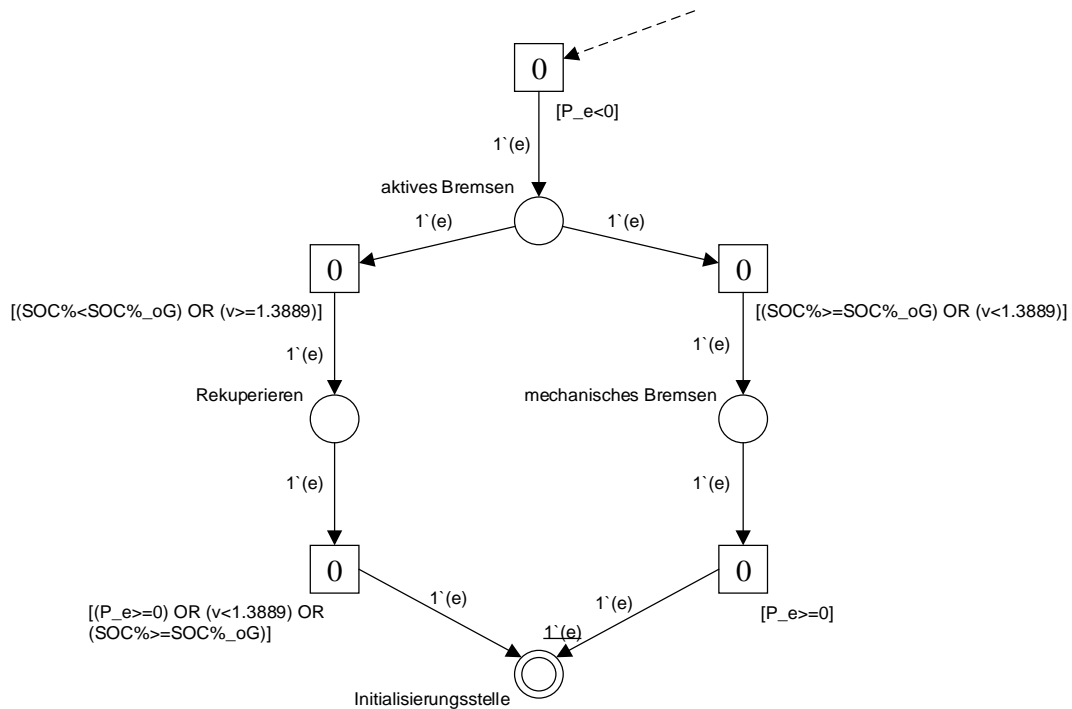


Bild 6.9: Petrinetz des Teilstrangs „aktives Bremsen“

Dieser Teilstrang wird laut Betriebsstrategie bei einer erforderlichen Leistung $P_e < 0$ aktiviert. Dies ist durch die Wächterbedingung der oberen Transition realisiert. Für die Wahl des Betriebsmodus sind die Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Ladezustand SOC maßgeblich. Der Betriebsmodus Rekuperieren wird bei einer Geschwindigkeit $v \geq 5$ km/h ($\approx 1,3889$ m/s) oder einem Ladezustand $SOC < 90$ % gewählt. Im Falle von $v < 5$ km/h oder $SOC \geq 90$ % wird mechanisch gebremst. Verlassen wird der Betriebsmodus Rekuperieren, wenn eine der drei Eingangsbedingungen nicht mehr erfüllt ist. Dies gilt bei $P_e \geq 0$, $v < 5$ km/h oder $SOC \geq 90$ %. Zum Verlassen des Betriebsmodus mechanisches Bremsen genügt die Bedingung $P_e \geq 0$.

Die Modellierung der übrigen vier Teilstränge wird äquivalent mit Hilfe der Eingangsbedingungen durchgeführt. Der zeitliche Anteil der einzelnen Betriebsmodi lässt sich jetzt durch Auswertung der Markenbesetzung der entsprechenden Stellen bestimmen.

6.4.3 Schnittstelle zur Systemebene

Die Stellen, die für die relevanten Betriebsmodi im vorangegangenen Schritt modelliert wurden, können nun mit dem Zuverlässigkeitsmodell aus Bild 6.5 über Referenzstellen verknüpft werden. Dabei kann es notwendig sein, die Stellen, die einem Betriebsmodus zugeordnet sind, über einen Zwischenschritt zu einer Stelle zusammenzufassen. Alternativ dazu ist es auch möglich mehrere Referenzstellen für einen Betriebsmodus zu verwenden. Für die nachfolgende Modellierung der Alterung ist es aber von Vorteil, je eine Referenzstelle für einen Betriebsmodus zu nutzen. Damit sind die Zuverlässigkeitsmodelle nach Verlassen der Betriebsebene bis auf die Modellierung der Alterung vollständig.

6.5 Anwendungsbeispiel - Systemebene

Auf der Systemebene wird zur Vervollständigung des Modelles die Modellierung der Alterung der Komponenten durchgeführt und die Komponenten über ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm zu einem Gesamtsystem verbunden (vgl. Abschnitt 5.5). Das Ergebnis der Systemebene ist ein vollständiges Modell des Gesamtsystems.

6.5.1 Modellierung der Alterung

Zum Verständnis der Modellierung der Alterung wird diese getrennt für die einzelnen Komponenten durchgeführt. Maßgeblich für den Verlauf der Alterung sind die schädigenden Betriebsmodi für die einzelnen Komponenten. Die maßgeblichen Einflussgrößen auf den aktuellen Alterungszustand sind die Voralterung beim Eintreten in einen Zustand und die erreichte Alterung nach Verlassen dieses Zustands. Anhand des Modells für den E-Motor wird die Modellierung der Alterung gezeigt. Für die Abfolge der Betriebsmodi wurde an dieser Stelle ein vereinfachtes Netz modelliert. Bild 6.10 zeigt die Modellierung der Alterung des E-Motors.

Die Eingangsgrößen, d. h. die Aufenthaltsdauern in den jeweiligen Stellen, ergeben sich durch Auswertung der Modelle der Betriebsstrategie und werden durch deterministische Schaltverzögerungen modelliert. Die Alterung wird in diesem Beispiel als lokale Variable modelliert. Im oberen Netz wird die aktuelle Alterung jeweils durch den Kantenausdruck „ $AgeExit(tr_i)$ “ nach Verlassen der schädigenden Zustände weitergegeben. Für den Elektromotor sind es gemäß dem Zuverlässigkeitsmodell im unteren Netz fünf Zustände. Die aktuell erreichte Alterung wird beim Eintreten in einen schädigenden Zustand durch den Kantenbefehl „ $AgeEnter = age$ “ aus den jeweiligen Referenzstellen, die die Verknüpfung zum oberen Teilnetz herstellen, als Eingangsalterung in die verknüpfte Transition eingelesen.

Beim Ausfall des Elektromotors kann die erreichte Alterung durch den Kantenausdruck „ $AgeFire$ “ ausgegeben werden. Da die Komponenten abhängig vom Betriebs-

modus unterschiedliche Belastungszustände aufweisen, wird die Modellierung der Alterung für die übrigen Komponenten gemäß dieser Vorgehensweise getrennt durchgeführt.

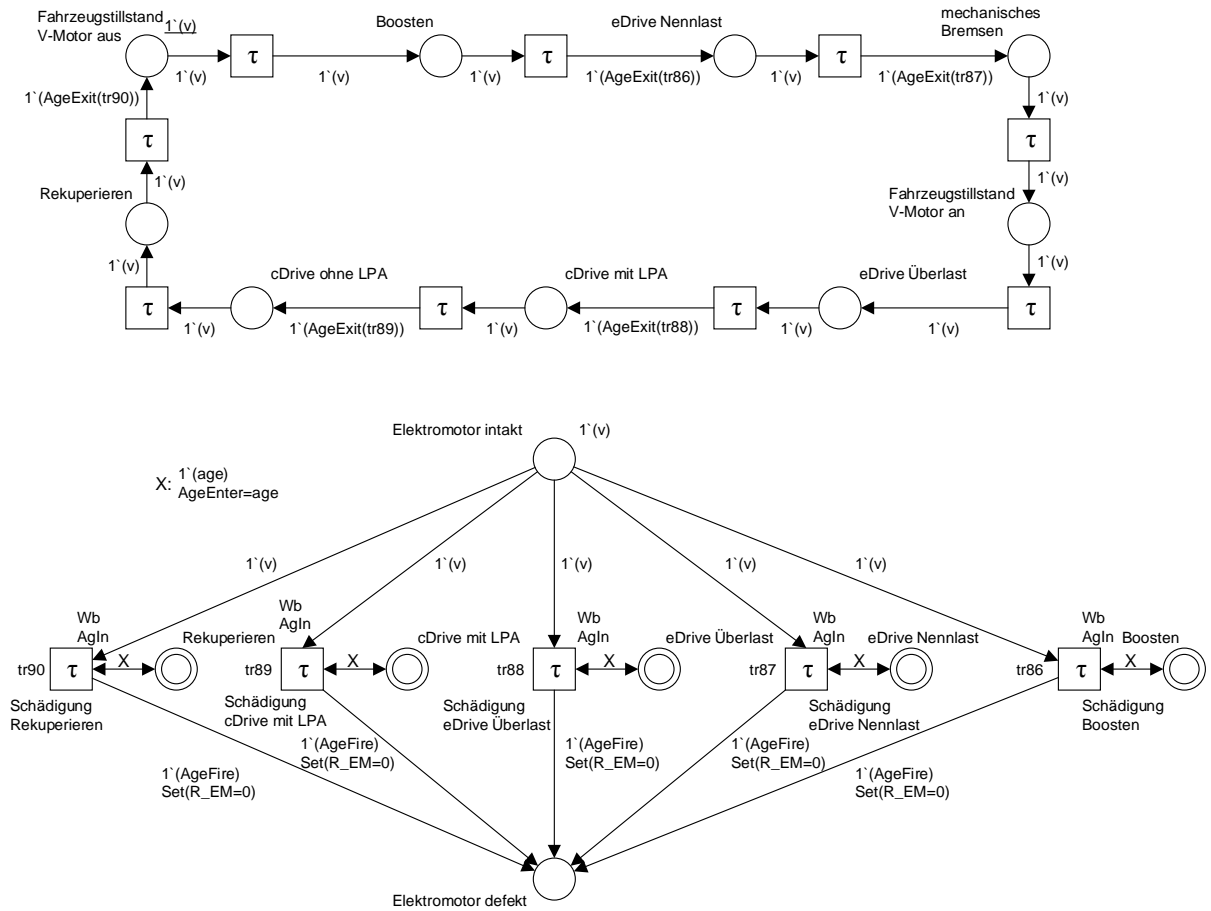


Bild 6.10: Modellierung Alterung Elektromotor

6.5.2 Verknüpfung zu einem Gesamtmodell

Die Komponenten werden über ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm zu einem Gesamtmodell verknüpft. Für das Beispiel des Hybridantriebsstrangs wird ein Seriensystem vorausgesetzt, da ein Ausfall einer Komponente zum Ausfall des Gesamtsystems führen würde. Bild 6.11 zeigt das Zuverlässigkeitsblockdiagramm des Hybridantriebsstrangs.

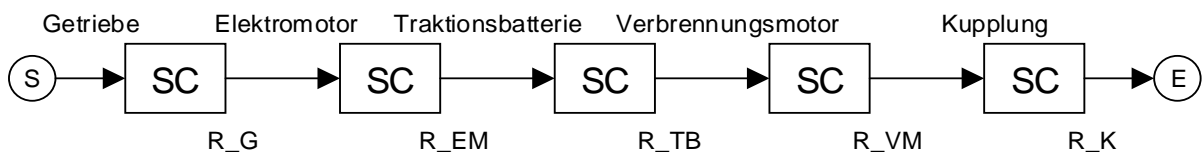


Bild 6.11: Verknüpfung zum Gesamtmodell

Die einzelnen Blöcke werden über die Zuverlässigkeitskennwerte R_i , die als globale Variable definiert werden, mit den Zuverlässigkeitsmodellen für die Komponenten

verknüpft. Für den Elektromotor wird z. B. die globale Variable R_{EM} definiert. Diese wird bei Ausfall des E-Motors durch die Kantenfunktion „ $Set(R_{EM} = 0)$ “ zu Null gesetzt, wie das Zuverlässigkeitsmodell in Bild 6.10 zeigt.

6.5.3 Schnittstelle zur Ebene „Zuverlässigkeitsmodell und -analyse“

Beim Verlassen der Systemebene steht ein Gesamtmodell des Hybridantriebsstrangs mit allen Einflussgrößen zur Verfügung. Damit ist die eigentliche Modellierung abgeschlossen.

6.6 Anwendungsbeispiel - Zuverlässigkeitsmodell und -analyse

Im letzten Schritt der methodischen Vorgehensweise werden die auszuwertenden Zuverlässigkeitskenngrößen definiert und das Modell im Simulationsprogramm REALIST-Simulation berechnet (vgl. Abschnitt 5.6).

6.6.1 Zuverlässigkeitsmodell

Bevor das Modell aus dem REALIST-Editor exportiert werden kann, werden die auszuwertenden Zuverlässigkeitskenngrößen definiert. Grundsätzlich können alle Stellen, Transitionen und globalen Variablen ausgewertet werden. Für die Stellen können die zeitabhängigen Markenbesetzungen ermittelt werden, für die Transitionen die Anzahl der Schaltvorgänge oder die Anzahl der Aktivierungen und für die globalen Variablen die Werte für das auszuwertende Zeitintervall. Für das Beispielmmodell können exemplarisch der Verlauf der Aktivierungszustände der Betriebsmodi über der Zeit ausgewertet werden. Da es das Ziel dieser Modellierung ist, den Einfluss der drei Fahrzyklen auf die Zuverlässigkeit der Komponenten und des Gesamtsystems zu untersuchen, werden im Folgenden die Ergebnisse der globalen Variablen, R_G , R_{EM} , R_{TB} , R_{VM} , R_K , die jeweils als Zuverlässigkeit der Komponenten definiert wurden, und die Systemvariable X_{Sys} , als Zuverlässigkeit für das Gesamtsystem, berechnet.

Der Export des Modells als Schnittstelle zwischen REALIST-Editor und REALIST-Simulation erfolgt über eine PNML-Datei.

6.6.2 Zuverlässigkeitsanalyse

Zur Berechnung der Zuverlässigkeitskennwerte wird die Simulation in zwei Teile aufgeteilt. Dabei werden zunächst die Zeitanteile der jeweiligen Betriebsmodi aufgrund der Betriebsstrategie berechnet. Diese Zeitanteile sind die Eingangsgrößen für die Zuverlässigkeitsberechnung mit den Modellen gemäß Bild 6.10. Prinzipiell ist auch denkbar, das Modell in einem Schritt zu berechnen. Dies führt aber zu unkalkulierbar hohen Simulationsdauern aufgrund der hohen Schaltereignisse je Berechnungsschritt

und hat darüber hinaus keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. [114]). Tabelle 6.2 zeigt die Numerik-Parameter der Simulationen.

Tabelle 6.2: Numerik-Parameter der Simulationen

	Auswertung Zeitanteile Betriebsmodi (10 Zyklen)			Zuverlässigkeits- analyse
	NEFZ	WLTC	CADC	
Simulationsdauer	11.800s	18.000s	31.430s	100.000h
Abtastintervall	1	1	1	1
Replikationen	2500	2500	2500	3000

Für die Visualisierung der Schaltvorgänge zur grundsätzlichen Überprüfung der Schaltvorgänge genügt die Simulation der Modelle mit wenigen Replikationen (5-10). Nachdem die Modelle in den vorherigen Schritten aufgebaut wurden und die Parameter definiert wurden kann die Simulation gestartet werden.

Auswertung der Zuverlässigkeitskenngrößen

Tabelle 6.3 zeigt die über die Simulation ermittelten Ergebnisse der Zeitanteile der jeweiligen Betriebsmodi und die Anzahl der Kupplungsbetätigungen und Ladezyklen.

Tabelle 6.3: Anteil Betriebsmodi, Kupplungsbetätigungen und Ladezyklen

	NEFZ	WLTC	CADC
Fahrzeugstillstand	23,73 %	12,56 %	9,64 %
• V-Motor ein	0 %	0 %	0 %
• V-Motor aus	23,73 %	12,56 %	9,64 %
aktives Bremsen	15,08 %	27,89 %	28,57 %
• mechanisches Bremsen	1,10 %	0,89 %	1,72 %
• Rekuperieren	13,98 %	27,00 %	26,85 %
eDrive (gesamt)	57,54 %	50,38 %	44,76 %
• eDrive Überlast	1,96 %	4,9 %	9,09 %
• eDrive Nennlast	55,58 %	45,48 %	35,67 %
cDrive (gesamt)	2,89 %	7,82 %	14,74 %
• cDrive mit LPA	2,78 %	6,94 %	10,76 %
• cDrive ohne LPA	0,11 %	0,88 %	3,98 %
Boosten	0,76 %	1,35 %	2,29 %
Kupplungsbetätigungen	6,7 1/h	12,18 1/h	59,01 1/h
Ladezyklen (gesamt)	0,52 1/h	0,74 1/h	0,84 1/h
• externes Laden	0,49 1/h	0,72 1/h	0,82 1/h
• durch Rekuperieren & LPA	0,02 1/h	0,02 1/h	0,02 1/h

Die Ergebnisse spiegeln die steigende Dynamik des WLTC und des CADC gegenüber dem NEFZ wieder. Während der Anteil des Betriebsmodus Fahrzeugstillstand deutlich sinkt, steigt der Anteil des Betriebsmodus Rekuperieren. Die steigenden erforderlichen Leistungen resultieren in einem erhöhten Anteil des Betriebsmodus eDrive im Überlastbereich. Wohingegen der gesamte Anteil des Betriebsmodus eDrive durch die höheren Geschwindigkeiten sinkt. Der sinkende Anteil im Betriebsmodus eDrive verlagert sich überwiegend zum steigenden Anteil im Betriebsmodus cDrive. Die höhere Dynamik im WLTC und CADC haben weiterhin eine höhere Anzahl an Kupplungsbetätigungen und Ladezyklen zur Folge.

Ausgehend von den Ergebnissen aus Tabelle 6.3 ergeben sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten und des Systems in Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Fahrzyklus. Bild 6.12 zeigt die Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Komponenten und für das System für den Fahrzyklus NEFZ (WLTC und CADC im Anhang 10.4). Es ist zu beachten, dass für eine bessere Vergleichbarkeit der zeitliche Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeiten über die Durchschnittsgeschwindigkeit der jeweiligen Fahrzyklen auf die entsprechende Laufstrecke transformiert wurde.

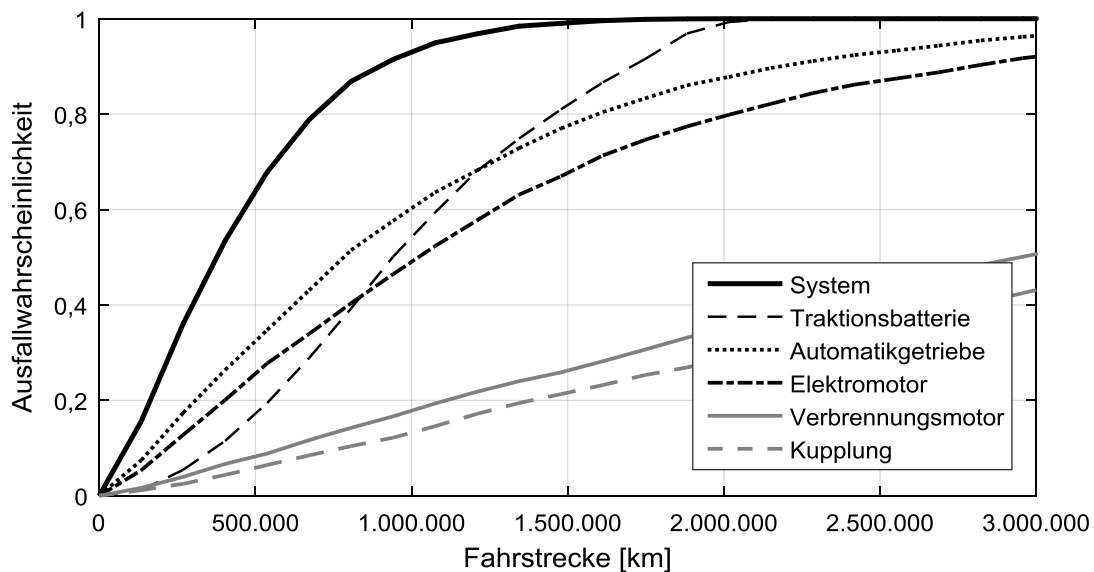


Bild 6.12: Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten und des Systems im NEFZ

Der Verlauf zeigt, dass der Verbrennungsmotor und die Kupplung den geringsten Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit haben. Dies ist auf die geringen Anteile der Betriebsmodi cDrive und Boosten zurückzuführen. Der Einfluss der Traktionsbatterie, des Automatikgetriebes und des E-Motors ist deutlich höher. Der Anstieg der Steigung für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Traktionsbatterie lässt sich mit dem Erreichen der 2500 Ladezyklen erklären. Beim WLTC und CADC steigt der Einfluss des Verbrennungsmotors und der Kupplung auf die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems durch den gestiegenen Anteil der verbrennungsmotorischen Fahrt und der gestiegenen Anzahl an Kupplungsbetätigungen (vgl. Tabelle 6.3).

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten und des Systems vom NEFZ über den WLTC hin zum CADC aufgrund der gestiegenen Lasten erhöht hat. Bild 6.13 zeigt diesen Effekt anhand der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems in Abhängigkeit des jeweiligen Fahrzyklus.

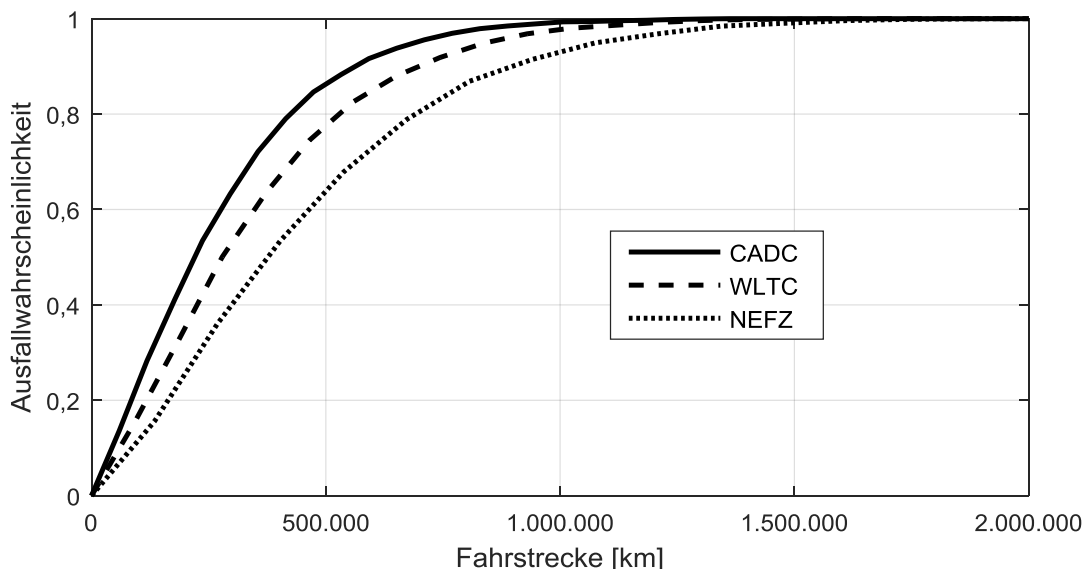


Bild 6.13: Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems in Abhängigkeit der verschiedenen Fahrzyklen

Tabelle 6.4 zeigt ausgewählte B_q -Lebensdauern des Systems.

Tabelle 6.4: B_q -Lebensdauern des Gesamtsystems

	NEFZ	WLTC	CADC
B_1	11894,4 km (100 %)	7672,5 km (-35,5 %)	6689,6 km (-43,8 %)
B_{10}	88267,2 km (100 %)	65379 km (-25,9 %)	44696 km (-49,4 %)
B_{50}	375883 km (100 %)	278814 km (-25,8 %)	219928 km (-41,5 %)

Mit den erreichten Ergebnissen können Systemoptimierungen durchgeführt werden. Denkbar sind Optimierungen der Betriebsstrategie hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Systems oder des Kraftstoffverbrauchs, der in diesem Beispiel nicht berücksichtigt wurde. Schwachstellen des Systems können erkannt werden und z. B. Komponenten mit höheren Lebensdauern eingesetzt werden.

Ein großer Vorteil der methodischen Vorgehensweise ist, dass das Modell jederzeit leicht um weitere Modellierungsaspekte, wie z. B. Berücksichtigung weiterer Komponenten oder Betriebsmodi, erweitert und modifiziert werden kann. Durch den Einsatz von globalen Variablen kann die Betriebsstrategie sehr schnell durch Änderung dieser Variablen angepasst werden. Durch den Aufbau der methodischen Vorgehensweise über verschiedene Ebenen ist es darüber hinaus jederzeit möglich Anpassungen und Änderungen in den einzelnen Modellierungsschritten durchzuführen.

7 Ausblick und Weiterentwicklungsansätze

Ziel dieses Kapitels ist es, Potentiale aufzuzeigen, wie die Modellierung mit Petrinetzen noch effektiver gestaltet werden kann. Die Weiterentwicklungsansätze ergaben sich bei der Arbeit mit der Methode und der Entwicklung der methodischen Vorgehensweise. Softwareseitige Optimierungen sollen an dieser Stelle keine Rolle spielen, da das Softwarepaket REALIST stetig weiterentwickelt wird. Es geht vielmehr darum, grundsätzliche Ansätze zur Optimierung der Modellierungsmethode aufzuzeigen, um das schon vorhandene Potential von Petrinetzen weiter zu steigern.

7.1 Hierarchisierung

Hierarchisierung kommt in den verschiedensten Disziplinen mit den unterschiedlichsten Bedeutungen zum Einsatz. Durch Aufteilung in Hierarchieebenen soll ein besserer Überblick über das Gesamtproblem erreicht werden. Ein Beispiel für eine Hierarchisierung ist die Unterteilung eines Gesamtsystems in einzelne Baugruppen und darunter angeordnete Bauteile.

Für die Umsetzung einer Hierarchisierung für Petrinetze wird die Aufteilung in Hierarchieebenen gemäß den Modellierungsebenen der vorgestellten methodischen Vorgehensweise vorgeschlagen. Zwar existiert die Möglichkeit, Netze in Subsystemen aufzubauen, eine hierarchische Aufteilung auf Basis der Modellierungsebenen ist bisher nicht möglich. Die Modellierung und Berechnung der Netze für die Betriebsstrategie wird z. B. derzeit auf der gleichen Ebene durchgeführt.

Durch den Einsatz verschiedener Hierarchisierungsebenen für die Modellierungsebenen können die spezifischen Problemstellungen dieser Ebenen besser berücksichtigt werden. Fehler, die in der Modellierung auftreten können, werden durch die Trennung in Hierarchie- bzw. Modellierungsebenen schneller entdeckt und somit minimiert. Teilergebnisse der einzelnen Ebenen könnten auf diese Weise berechnet und somit die modellierten Teilnetze validiert werden.

Die Berechnung der Petrinetze wird derzeit trotz Einsatz von Subsystemen auf einer Ebene durchgeführt. Hier bestehen durch eine hierarchische Modellierung Potentiale zur Verringerung der Rechenzeit. Die Potentiale durch die Trennung in einzelne Modellierungsebenen werden im nächsten Abschnitt durch die automatisierte Modellerstellung verdeutlicht.

7.2 Automatisierte Modellerstellung

Eine automatisierte Modellerstellung stellt eine große Herausforderung dar, da komplexe Systeme komplexe Netze zur Folge haben. Die Trennung in verschiedene Ebenen eröffnet die Möglichkeit, Grundnetze automatisch zur Verfügung zu stellen. Wie das Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 zeigt, sind z. B. die Netze für die Zuverlässigkeitsmodellierung und der Betriebsstrategie strukturell sehr unterschiedlich aufgebaut. Für die Erstellung der Basismodelle auf der Komponentenebene können, durch Angabe der schädigenden Betriebsmodi und der zu verknüpfenden globalen Variablen für die Zuverlässigkeit der Komponenten, die Netze automatisch erstellt werden. Bild 7.1 zeigt das Prinzip für eine automatisierte Modellerstellung der Basismodelle.

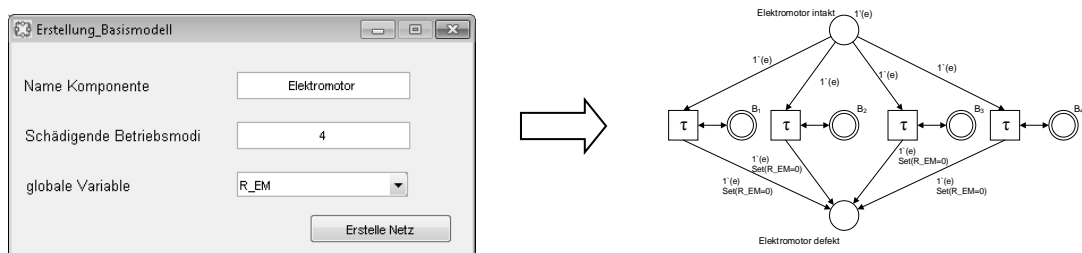


Bild 7.1: Automatisierte Erstellung der Basismodelle

Eine automatisierte Modellerstellung kann nach dem gleichen Prinzip auch auf der Betriebsebene zur Erstellung der Betriebsstrategie eingesetzt werden. Auf diese Weise kann aufgrund der komplexen Modellerstellung durch die meist große Anzahl an Eingangsbedingungen für die Betriebsmodi der Modellierungsaufwand verringert werden. Bild 7.2 zeigt die Eingangsparameter für eine automatisierte Modellerstellung für die Betriebsstrategie. Das Ergebnis dieser Eingabeparameter ist das modellierte Teilnetz aus Bild 6.9.

Das Dialogfenster 'Erstellung_Betriebsstrategie' zeigt die Konfiguration von Eingangsparametern und -bedingungen. Unter 'Eingangsparameter' sind vier Dropdown-Menüs für 'P_e', 'a', 'v' und 'SOC' sowie ein '+'-Button. Unter 'Eingangsbedingungen' sind vier Spalten mit Eingabefeldern für Werte wie '< 0', '< 5', '-', '>= 90' und '< 90'. Rechts ist ein Bereich 'Betriebsmodus' mit vier Dropdown-Menüs für 'mechanisches Bremsen' und 'Rekuperieren'. Ein 'Erstelle Netz' Button befindet sich unten rechts.

Bild 7.2: Automatisierte Erstellung der Betriebsstrategie

7.3 Visualisierung der Zuverlässigkeit

Durch die graphische Benutzeroberfläche des REALIST-Editors besteht bereits eine Visualisierung der komplexen Sachverhalte. Stellen beschreiben Zustände oder Objekte

te, Transitionen modellieren Änderungen dieser Zustände und Kanten verknüpfen die Stellen und Transitionen. Durch die Möglichkeit der Visualisierung der Schaltabläufe, wobei die aktuellen Zustände des Systems identifiziert werden können, existiert eine Verknüpfung zwischen Modell und realem System. Um die angezeigten Zustände zu verstehen und dem realen System zuzuordnen, ist nach wie vor eine gewisse Affinität zur Modellierungsmethodik notwendig.

Das Ziel dieses Ansatzes ist es, die Sachverhalte der Zuverlässigkeit aus den Ergebnissen der Simulationen durch eine Verknüpfung mit CAD-Modellen des Systems zu veranschaulichen. Eine Möglichkeit wäre z. B. den Verlauf der Alterung der Komponenten durch eine farbliche Veränderung darzustellen oder kritische Komponenten, die ihr Lebensdauerende erreicht haben, zu markieren. Die Ergebnisse, die bisher nur als Zahlenwerte zur Verfügung stehen, können auf diese Weise einfacher und zur Förderung des allgemeinen Systemverständnisses besser kommuniziert werden. Bild 7.3 zeigt prinzipiell, wie eine Visualisierung der Zuverlässigkeit aussehen könnte. Es werden drei Zeitpunkte einer kontinuierlichen Animation der Ergebnisse gezeigt.

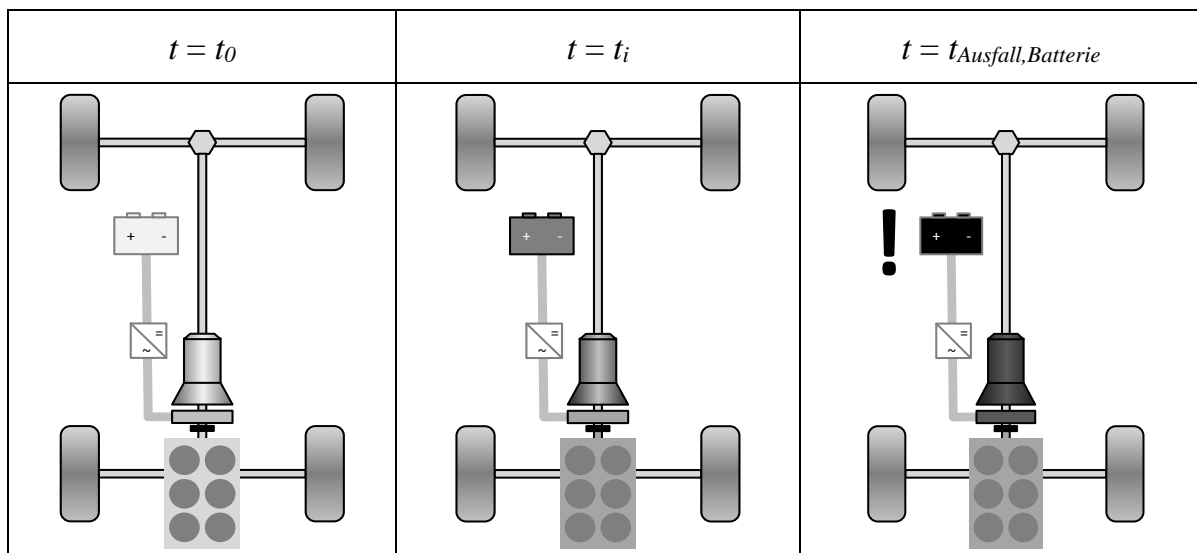


Bild 7.3: Visualisierung der Zuverlässigkeit für drei Zeitpunkte t_i

7.4 Verknüpfung zu Datenbanken und relevanten Informationen

Eine weitere Möglichkeit die Potentiale von Petrinetzen und der methodischen Vorgehensweise zu steigern, ist die Untersuchung von möglichen Schnittstellen zur Verknüpfung mit Datenbanken und relevanten Informationen. Datenbanken könnten z.B. Werte oder Hinweise über das Ausfallverhalten beinhalten. Sie sollen dann zum Einsatz kommen, wenn das Ausfallverhalten des zu modellierenden Systems oder der Komponenten nicht bekannt ist. Um den subjektiven Charakter einer Schätzung der Ausfallparameter zu verhindern, können Ausfalldaten von ähnlichen Bauteilen für die Zuverlässigkeitsmodellierung verwendet werden. Ähnlichkeit bedeutet in diesem Zusammenhang einen vergleichbaren Aufbau der Bauteile und eine vergleichbare rele-

vante Belastung. Als Datenbanken können bereits bekannte Ausfallratenkataloge zum Einsatz kommen. Denkbar ist auch der Aufbau einer problemspezifischen eigenen Datenbank an Zuverlässigkeitsdaten. Die Schaltverzögerung der Transitionen können dann durch deren Verknüpfung mit den relevanten Datenbanken definiert werden.

Dies gilt aber nicht nur für Datenbanken, sondern auch für Informationen allgemein. Hier stellt sich die Frage, wie vorhandene Informationen für die Methode verwendet werden und wie generierte Informationen aus der Methode während des Produktentwicklungsprozesses an anderen Stellen genutzt werden können. Dieser Austausch von Informationen gewinnt während des Produktentwicklungsprozesses, besonders im Kontext der modellbasierten Produktentstehung zunehmend an Bedeutung [111]. Darüber hinaus ist bei der Entwicklung von z.B. sicherheitsrelevanten Systemen die Rückverfolgbarkeit (Traceability) enorm wichtig. [112] Hier bestehen bereits Ansätze, wie etablierte Methoden durch Traceability-Modelle unterstützt werden können. Speziell für die hier entwickelte methodische Vorgehensweise wären diese möglichen Schnittstellen zu untersuchen. Durch die Wahl eines Ebenenansatzes mit in sich abgeschlossenen Arbeitsabläufen wären hier mehrere Schnittstellen auf den einzelnen Ebenen für den Informationsaustausch denkbar. Informationen könnten hier in Form von bestehenden Systemstrukturen, Modellen oder auch Kennwerten ausgetauscht werden.

8 Zusammenfassung

Durch den Einsatz von mechatronischen Systemen mit den Wissensdomänen Mechanik, Elektronik und Software kommt es zu einer weitaus höheren technischen Komplexität in den Systemen. Darüber hinaus ist es aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten und zur Förderung des Systemverständnisses wichtig die Zuverlässigkeit dieser Systeme zu verstehen und berechnen zu können. Die komplexen Zusammenhänge können mit gewöhnlichen Zuverlässigkeitsmethoden nicht mehr beschrieben werden. Hier setzen die dynamischen Modellierungsmethoden an, wobei diese häufig aufgrund der aufwendigen Modellierung noch keine hinreichende Beachtung finden.

Ziel dieser Arbeit war es, mit der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise die Motivation zur Anwendung einer geeigneten dynamischen Modellierungsmethode zu fördern. Diese wird durch eine Reduzierung des Modellierungsaufwands und einer realitätsnahen, strukturierten und nachvollziehbaren Modellierung erreicht. Die methodische Vorgehensweise soll dabei als ein Leitfaden für mögliche Anwender dienen.

Zu Beginn der Arbeit wurden der Stand der Technik und Forschung zur prinzipiellen Modellierung der Zuverlässigkeit und deren Aspekte in Bezug auf den Modellierungsprozess von mechatronischen Systemen betrachtet. Anschließend wurden die bekanntesten und am verbreitetsten dynamischen Modellierungsmethoden beschrieben. Diese wurden bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Aufgrund dieser Untersuchung wurde gezeigt, weshalb die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (ECSPN) und speziell die verbundene Modellierung (CSM) für die Modellierung der Zuverlässigkeit von komplexen technischen Systemen geeignet sind.

Den Kern dieser Arbeit bildet die Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Modellierung der Zuverlässigkeit von technischen Systemen. Dieser Inhalt teilt sich auf drei Kapitel auf. Zunächst wurden die Anforderungen an die methodische Vorgehensweise formuliert. Es wurden allgemeine Anforderungen, die sich aus der generellen Entwicklung einer Methode ergaben, ausgearbeitet. Die Anforderungen aufgrund des Entwicklungsprozesses ergaben sich aus den speziellen Problemstellungen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme. Weiterhin wurden Anforderungen aufgrund der gewählten Modellierungsmethode und zuverlässigkeitsspezifische Anforderungen formuliert.

Für die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise wurde ein Ebenenansatz gewählt, wobei die jeweiligen Ebenen mehrere Arbeitsschritte beinhalten. Vorteil dieses Ansatzes ist die hohe gesamtheitliche Durchgängigkeit in jeder Modellierungsphase. Weiterhin wird eine starre unidirektionale Modellierung vermieden. Die methodische

Vorgehensweise gliedert sich dabei in eine funktionale Ebene, in eine Komponenten-, Betriebs- und Systemebene und in eine Ebene für das Zuverlässigkeitsmodell und die Zuverlässigkeitsanalyse.

Auf der funktionalen Ebene wurden Zuverlässigkeitsnetze der relevanten Komponenten auf Basis der bereitzustellenden Funktionen erstellt. Diese wurden auf der Komponentenebene zu Zuverlässigkeitsmodellen erweitert. Wechselwirkungen, die zwischen den Komponenten entstehen können, fanden ebenfalls Berücksichtigung. Auf der Betriebsebene wurden die zeitabhängigen Belastungen der Komponenten bestimmt. Maßgeblichen Einfluss darauf haben die Lastkollektive und die Betriebsstrategie, für die die Vorgehensweise bei deren Modellierung beschrieben wurde. Auf der Systemebene wurden die vervollständigten Zuverlässigkeitsmodelle zu einem Gesamtmodell zusammengefügt und schließlich auf der untersten Ebene berechnet und analysiert. Der Einfluss der Alterung der Komponenten wurde gezeigt und deren Modellierung beschrieben.

Anhand den zuvor formulierten Anforderungen wurde die methodische Vorgehensweise reflektiert. Durch den Ebenenansatz wurde eine für den Anwender transparente und nachvollziehbare Vorgehensweise erreicht. Die Modellierung in den Ebenen kann unabhängig voneinander durchgeführt und zu einem späteren Zeitpunkt verknüpft werden. Die wesentlichen Herausforderungen, die bei der Modellierung von komplexen technischen Systemen entstehen, konnten erfüllt werden. Die Modellierung von Betriebsstrategien, zeitabhängigen Lastkollektiven, Alterungseinflüssen und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, die die Zuverlässigkeit maßgeblich beeinflussen, wurden gezeigt.

Anhand eines Hybridantriebsstrangs eines Parallel-PlugIn-Hybridfahrzeugs wurde die methodische Vorgehensweise angewendet. Hier wurde der Einfluss von verschiedenen Fahrzyklen auf die Zuverlässigkeit der relevanten Komponenten und des Systems gezeigt.

In einem Ausblickskapitel wurden die wesentlichen Potentiale und Weiterentwicklungsansätze, die sich bei der Entwicklung der methodischen Vorgehensweise ergaben, dargestellt. Hierarchisierung in der Modellierung und eine automatische Modellerstellung eröffnen Potentiale, mit denen die Leistungsfähigkeit der Modellierungsmethode weiter gesteigert werden kann. Eine Visualisierung der Zuverlässigkeit, die zu einer Steigerung der Akzeptanz der Methode führen soll und die Verknüpfung zu Datenbanken und relevanten Informationen sind weitere Aspekte, die Inhalt von zukünftigen Arbeiten sein können.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Automobil Treuhand GmbH: DAT-Report-2016, 2016
- [2] Norm DIN 40041: Zuverlässigkeit Begriffe. Berlin : Beuth Verlag, 1990
- [3] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4001 Blatt 2 - Terminologie der Zuverlässigkeit. Düsseldorf, 2006
- [4] Liebl, J. ; Lederer, M. ; Rohde-Brandenburger, K. ; Biermann, J.-W. ; Roth, M.; Schäfer, H.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [5] Beck, R.: Prädiktives Energiemanagement von Hybridfahrzeugen. Dissertation, RWTH Aachen, 2011
- [6] Keilhoff, D.: Ein methodischer Ansatz zur Erstellung von Hybrid-Betriebsstrategien für die simulative Ermittlung von Lastkollektiven. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, 2016
- [7] Stiegeler, M.: Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge. Dissertation, Universität Ulm, 2008
- [8] Stohrer, M. ; Kemmler, S. ; Koller, O. ; Zeiler, P. ; Bertsche, B.: Zuverlässigkeitsorientierte Online-Optimierung von Betriebsstrategien mechatronischer Produkte. In: SPATH, Dieter (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013 : Stuttgart, 20. Juni 2013; Konferenz. Stuttgart : Fraunhofer Verl, 2013
- [9] Isermann, R.: Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe : Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010
- [10] Romer, A.: Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2014
- [11] Bertsche, B. ; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2004 (VDI)
- [12] Gäng, J.: Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2012
- [13] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Düsseldorf, 2004

- [14] Dutheillet, C. ; Haddad, S.: Aggregation of states in colored stochastic Petri nets: application to a multiprocessor architecture. In: Proceedings of the Third International Workshop on Petri Nets and Performance Models, PNPM89, 1989, S. 40–49
- [15] Li, Y. ; Woodside, C. Murray: Iterative decomposition and aggregation of Stochastic marked graph Petri nets. In: Rozenberg, Grzegorz (Hrsg.): Advances in Petri Nets 1993. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1993, S. 325–349
- [16] Nishi, T. ; Tanaka, Y.: Petri Net Decomposition Approach for Dispatching and Conflict-Free Routing of Bidirectional Automated Guided Vehicle Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 42 (2012), Nr. 5, S. 1230–1243
- [17] Feldhusen, J. ; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2013
- [18] Kopp, M.: Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2013
- [19] Birolini, A.: Reliability engineering: Theory and practice: with 190 figures, 60 tables, 140 examples, and 70 problems for homework. Seventh edition, 2014
- [20] Elsayed, E. A.: Reliability engineering. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012 (Wiley series in systems engineering and management)
- [21] Meeker, W. Q.; Escobar, L. A.: Statistical methods for reliability data. New York: Wiley, 1998 (Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics section)
- [22] Meyna, A. ; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik : Quantitative Bewertungsverfahren. 2. überarb. und erw. Aufl. München, Wien : Hanser, 2010 (Praxisreihe Qualitätswissen)
- [23] Abernethy, R. B.: The new Weibull handbook : Reliability & statistical analysis for predicting life, safety, risk, support costs, failures, and forecasting warranty claims, substantiation and accelerated testing, using Weibull, Log normal, crow-AMSAA, probit, and Kaplan-Meier models. 5th ed. North Palm Beach, Fla. : R.B. Abernethy, 2006
- [24] Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo-Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001
- [25] Dubi, A.: Monte Carlo applications in systems engineering. Chichester [West Sussex, England], New York : Wiley, 2000

- [26] Hauschild, J. ; Althaus, D. ; Plinke, F.: Simulation technischer und betriebswirtschaftlicher Risiken bei Instandhaltungsverträgen im Bereich der Windenergie : Technische und betriebswirtschaftliche Risiken umfassend ermitteln, Verträge optimieren! In: 27. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2015, S. 3–18
- [27] Rieker, T. ; Bartholdt, M. ; Jacobi, A. ; Zeiler, P. ; Bertsche, B.: Zuverlässigkeitsprognose in der Anlaufphase für „x-Months-in-Service“ : Präzisierung und Validierung der Beanstandungsquote. In: 28. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2017.
- [28] Zio, E.: The Monte Carlo simulation method for system reliability and risk analysis. London: Springer, 2013 (Springer series in reliability engineering)
- [29] Sobol , Ilya M.: A primer for the Monte Carlo method. Boca Raton, FL : Crc Press, 1994
- [30] Rzepka, B. ; Schröpel, H. ; Bertsche, B.: Studie zur Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden in der Industrie. In: Zuverlässige Produkte : Basis für hohe Kundenzufriedenheit ; Tagung Stuttgart, 10. und 11. Oktober 2002. Düsseldorf : VDI-Verl., 2002 (VDI-Berichte / Verein Dt. Ingenieure, 1713), S. S.279-299
- [31] Pickard, K. ; Bertsche, B.: Determination of failure probability distributions of complex systems based on FMEA assessment. In: ESREL 2006, 18th-22nd September 2006, Estoril, Portugal.
- [32] Verband der Automobilindustrie: VDA 3 Teil 2 Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. 4. Aufl. Frankfurt am Main, 2016
- [33] Harashima, F.; Tomizuka, M. ; Fukuda, T.: Mechatronics – Mechatronics - What is it, why, and how? : In: Transactions on Mechatronics. IEEE. Piscataway, NJ, 1996
- [34] Isermann, R.: Mechatronische Systeme : Grundlagen. 2., vollständig neu bearb. Aufl. Berlin : Springer-Verlag Berlin und Heidelberg, 2008
- [35] Roddeck, W.: Einführung in die Mechatronik: 1. 1. 5., überarb. u. erw. Aufl. 2016. Wiesbaden, S.l. : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016
- [36] Hering, E. ; Steinhart, H.: Taschenbuch der Mechatronik : Mit zahlreichen Tabellen. 2., neu bearb. Aufl. München [u.a.] : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl; Hanser, Carl, 2005 // 2015
- [37] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [38] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Düsseldorf, 1994

- [39] MIL-HDBK-217-Military Handbook: Reliability Prediction for Electronic Equipment. United States of America, Department of Defense. Washington, 1991
- [40] Siemens AG: SN 29500: Siemens Norm
- [41] IEC International Electrotechnical Commission: IEC/TR 62380:2004(E) : Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronic components, PCBs and equipment, 2004
- [42] Zeiler, P. ; Koller, O. ; Bertsche, B.: Electronic Components with Time-Dependent Failure Rates. In: Steenbergen, R. D. J. M (Hrsg.): Safety, reliability and risk analysis: Beyond the horizon, 2014, S. 1761–1769
- [43] Koller, O.: Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2016
- [44] Büchel, A. ; Becker, M. ; Daenzer, W. F. ; Habermellner, R. ; Huber, F. ; Masow, H. von ; Nagel, P.: Systems engineering : Methodik und Praxis. 8. verb. Aufl. Zürich : Verl. Industrielle Organisation, 1994
- [45] Musa, J. D. ; Iannino, A. ; Okumoto, K.: Software reliability : Measurement, prediction, application. Professional ed. New York: McGraw-Hill, 1990 (McGraw Hill Software engineering series)
- [46] Lyu, M. R.: Handbook of software reliability engineering. Los Alamitos, Calif.[u.a.] : IEEE Computer Society Press[u.a.], 1996 (Computing McGraw-Hill)
- [47] Moranda, P. B.; Jelinski, Z.: Final report on Software Reliability Study, McDonnell Douglas Astronautics Company, MADC Report Number 63921, 1972
- [48] Musa, J. D.: "Software Reliability," Handbook of Software Engineering, C.R. Vick and C.V. Ramamoorthy (eds.), New York : Van Nostrand Reinhold, 1984
- [49] Jäger, P. ; Hitziger, T. ; Bertsche, B.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. 4. Paderborner Workshop, 30. – 31. März 2006, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn. In: HNI Verlagsschriftenreihe, Band 189, S. 25–42
- [50] Jäger, P.: Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2007
- [51] Bertsche, B. ; Göhner, P. ; Jensen, U. ; Schinköthe, W. ; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme : Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009

- [52] Jäger, P.; Wedel, M. ; Gandy, A. ; Bertsche, B. ; Göhner, P. ; Jensen, U.: Zuverlässigkeitsbewertung softwareintensiver mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. In: VDI-Berichte 1892.2 Mechatronik 2005, Düsseldorf.
- [53] Li, M. N.; Malaiya, Y. K. ; Denton, J.: Estimating the Number of Defects: A Simple and Intuitive Approach. In: International Symposium of Software Reliability, 1998.
- [54] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4008 Blatt 1: Voraussetzungen und Anwendungsschwerpunkte von Zuverlässigkeitsanalysen. Düsseldorf, 1998
- [55] Norm DIN EN 61078 - Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit - Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boolesche Verfahren. Berlin : Beuth Verlag, 2006
- [56] Boole, G.: The Mathematical Analysis of Logic: being an essay towards a calculus of deductive reasoning: Cambridge: Macmillian, Barclay & Macmillian; London: George Bell, 1847
- [57] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4008 Blatt 2: Boolesches Modell. Düsseldorf, 1998
- [58] Kececioglu, D.: Reliability engineering handbook: Its quantification and optimization. Norwood Mass. : Books24x7.com, 2005
- [59] Bertsche, B.: Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbauprodukten. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1989
- [60] Brodbeck, P.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1995
- [61] Distefano, S.; Xing, L.: A new approach to modeling the system reliability: Dynamic reliability block diagrams. In: Annual Reliability and Maintainability Symposium: 2006 proceedings: the International Symposium on Product Quality and Integrity: Newport Beach, California USA, 2006 January 23-26. Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, S. 189–195
- [62] Distefano, S.; Puliafito, A.: Dynamic reliability block diagrams: Overview of a methodology. In: Aven, Terje; Vinnem, Jan Erik (Hrsg.): Risk, reliability and societal safety: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2007 (ESREL 2007), Stavanger, Norway, 25-27 June 2007. London: Taylor and Francis, 2007, S. 1059–1068
- [63] Xu, H.; Xing, L.: Formal semantics and verification of dynamic reliability block diagrams for system reliability modeling. In: Smith, Jeffrey (Hrsg.): Proceedings of the 11th IASTED International Conference on Software En-

- gineering and Applications: November 19 - 21, 2007, Cambridge, Massachusetts, USA. Anaheim, Calif. [u.a.]: Acta Press, 2007, S. 155–162
- [64] Xu, H.; Xing, L.; Robidoux, R.: DRBD: Dynamic Reliability Block Diagrams for System Reliability Modeling. In: International Journal of Computers and Applications 31 (2009), Nr. 2
- [65] Ericson, C. A.: Fault Tree Analysis - A History. In: System Safety Society (Hrsg.): Proceedings: 17th International System Safety Conference, Orlando, Fl, August 16-21, 1999: System Safety Society, 1999
- [66] Norm DIN 25424-1 - Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. Berlin : Beuth Verlag, 1981
- [67] Norm DIN EN 61025 - Fehlzustandsbaumanalyse. Berlin : Beuth Verlag, 2007
- [68] Norm DIN 25424-2 - Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Berlin: Beuth Verlag, 1990
- [69] Dugan, J. B.; Bavuso, S. J. ; Boyd, M. A.: Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems. In: IEEE Transactions on Reliability 41 (1992), Nr. 3, S. 363–377
- [70] Aubry, J.-F. ; Brinzei, N.: Systems Dependability Assessment: Wiley, 2015
- [71] Liu, Y.: Anwendungsspezifische Optimierung von Methoden der dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse. Dissertation, München, Technische Universität, 2008
- [72] Schilling, S. J.: Beitrag zur dynamischen Fehlerbaumanalyse ohne Modulbildung und zustandsbasierte Erweiterungen. Bergische Universität Wuppertal. Dissertation. 2009
- [73] Jensen, F. V.; Jordan, M.; Nielsen, T. D. ; Kleinberg, J.: Bayesian Networks and Decision Graphs. Second Edition. New York, NY: Springer New York, 2007 (Information Science and Statistics)
- [74] Bayes, T.: An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. Philosophical Transactions of the Royal Society, 53,(erneut veröffentlicht in: Biometrika, 45, 1958, S. 296-315), 1763
- [75] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2004
- [76] Rauschenbach, M. ; Nuffer, J. ; Mayer, D.: Probabilistische Systemfehler- und Zuverlässigkeitsanalyse auf Basis von FMEA und hierarchischen Bayes-Netzwerken. In: 27. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit 2015, S.139-154
- [77] Weber, P.; Jouffe, L.: Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN). In: Reliability Engineering & System Safety 91 (2006), Nr. 2, S. 149–162

- [78] Dagum, P.; Galper, A.; Horvitz, E.: Dynamic Network Models for Forecasting. In: D. Dubois, M. P. Wellman, B. D'Ambrosio & P. Smets (Hrsg.), *Uncertainty in Artificial Intelligence: Proceedings of the Eighth Conference*. San Fransisco : Morgan Kaufmann, 1992, S. 41–48
- [79] Wittig, F.: *Maschinelles Lernen Bayes'scher Netze für benutzeradaptive Systeme*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation. 2002
- [80] Brandherm, B.: *Eingebettete dynamische Bayessche Netze n-ter Ordnung*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation. 2006
- [81] Bolch, G.: *Queueing networks and Markov chains: Modeling and performance evaluation with computer science applications*. 2. ed. Hoboken, N.J.: Wiley, op. 2006
- [82] IEC International Electrotechnical Commission: IEC 61165: Application of Markov techniques: IEC International Electrotechnical Commission, 2006
- [83] Kumar, G.; Jain, V.; Gandhi, O. P.: Availability Analysis of Repairable Mechanical Systems Using Analytical Semi-Markov Approach. In: *Quality Engineering* 25 (2013), Nr. 2, S. 97–107
- [84] Loganathan, M. K.; Kumar, G.; Gandhi, O. P.: Availability evaluation of manufacturing systems using Semi-Markov model. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (2015), Nr. 7, S. 720–735
- [85] Petri, C. Adam: *Kommunikation mit Automaten*. Universität Bonn. Dissertation. 1962
- [86] Pozsgai, P.: *Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme*. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2006
- [87] Zeiler, P. ; Bertsche, B.: *Potenziale der Zuverlässigkeits- und Instandhaltungssimulation in der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung*. In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013* : Stuttgart, 20. Juni 2013 ; Konferenz. Stuttgart : Fraunhofer Verl, 2013
- [88] Golob, F.: *Bewertung des Anwendungspotentials von Petrinetzen zur Produktionsprozessanalyse von Produktionsnetzwerken*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Diplomarbeit 2014
- [89] IEC International Electrotechnical Commission: IEC62251: Analysis techniques for dependability - Petri net techniques: IEC International Electrotechnical Commission, 2012
- [90] Jensen, K.; Kristensen, L. M.: *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*. Online-ausg. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

- [91] Trost, M.: Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2008
- [92] Pozsgai, P.; Bertsche, B.: Conjoint Modelling with Extended Coloured Stochastic Petri Net and Reliability Block Diagram for System Analysis. In: Spitzer, Cornelia; Schmocker, Ulrich; Dang, Vinh N. (Hrsg.): Probabilistic Safety Assessment and Management: PSAM 7 - ESREL '04 June 14-18, 2004, Berlin, Germany, Volume 6. London : Springer London, 2004, S. 1382–1387
- [93] Schienmann, B.: Kontinuierliches Anforderungsmanagement : Prozesse, Techniken, Werkzeuge. München, Boston [u.a.] : Addison-Wesley, 2002 (Programmer's Choice)
- [94] Kohler, M.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Berlin : Springer, 2012
- [95] Tietjen, T.; Müller, D. H.: FMEA-Praxis : Das Komplettpaket für Training und Anwendung ; mit 22 Tabellen ; 2., überarb. Aufl. München : Hanser, 2003
- [96] Trost, M.; Nebel, S. ; Bertsche, B.: Modellierungs- und Simulationsumgebung REALIST. In: Schnieder, E. (Hrsg.): Proc. Entwicklung komplexer Automatisierungssysteme (EKA 2006), May 2006, Braunschweig, Deutschland.
- [97] Jünger, M. ; Kindler, E. ; Weber, M.: The Petri Net Markup Language. In: S. Phillipi (Ed.): Workshop Algorithmen und Werkzeuge für Petrinetze. Oktober 2000.
- [98] Nebel, S.: Entwicklung eines Monte-Carlo Simulationsprogramms zur Analyse von verbundenen Systemmodellen, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Diplomarbeit, 2006
- [99] Matsumoto, M. ; Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-random Number Generator. In: ACM Trans. Model. Comput. Simul. 8 (1998), Nr. 1, S. 3–30.
- [100] Pfeufer, H.-J.: Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA), Kamiske, Gerd F. (Hrsg.). München : Hanser, Carl, 2014
- [101] Verband der Automobilindustrie: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Band 4: Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, Kapitel Produkt- und Prozess-FMEA, 2. überarbeitete Auflage 2006, aktualisiert im Juni 2012. Frankfurt am Main, 2012
- [102] Müller, F. ; Gröber, J. ; Rieker, T. ; Zeiler, P. ; Bertsche, B.: Development-based reliability modelling and analysis with Petri nets considering interactions. In: Cepin, Marko; BRIS, Radim (Hrsg.): Safety and Reliability – Theory and Applications: Proceedings of the 27th European Safety and Relia-

- bility Conference, ESREL 2017, 18.06.-22.06.2017, Portorož, Slowenia, S. 1949–1957
- [103] Rieker, T. ; Zeiler, P. ; Bertsche, B.: Reliability Modelling of a Hybrid Car Drive System with advanced Petri Nets considering dependencies and aging. In: Podofillini, Luca; Sudret, Bruno; Stojadinović, Božidar; Zio, Enrico; Kröger, Wolfgang (Hrsg.): Safety and reliability of complex engineered systems : Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015, Zürich, Switzerland, 7-10 September 2015
- [104] Nebel, S. ; Dieter, A. ; Müller, P. ; Bertsche, B.: Application of ECSPN to RAMS Modeling and Analysis of Hybrid Drive Systems. In: Proceedings: San Jose, California, USA, 25 - 28 Jan. 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010
- [105] Rieker, T. ; Zeiler, P. ; Bertsche, B.: Reliability Analysis of a Hybrid Car Drive System with ECSPN. In: 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), S. 562–568
- [106] Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge : Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. Wien : Springer, 2014
- [107] Reif, K.: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012 [108]
 Basshuysen, R. ; Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [109] Tutuianu, M. ; Marotta, A. ; Steven, H. ; Ericsson, E. ; Haniu, T. ; Ichikawa, N. ; Ishii, H.: Development of a World-wide Worldwide harmon-ized Light duty driving Test Cycle (WLTC) - Technical Report, UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG, DHC Subgroup. 2013
- [110] Michel, A.: The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. In: Science of The Total Environment 334 (2004), S. 73–84
- [111] Anderl, Reiner/Eigner, Martin/Sendler, Ulrich/Stark, Rainer (Hrsg.): Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung (acatech DISKUSSION), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.
- [112] Beier, G.: Verwendung von Ttraceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin, 2014

Verwendete Studienarbeiten unter Anleitung des Verfassers

- [113] Hurst, S.: Markovmethode vs. Petrinetze: Potentiale und Grenzen. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Studienarbeit, 2015
- [114] Wieler, D.: Einfluss von verschiedenen Fahrzyklen auf die Zuverlässigkeit eines Hybridantriebsstrangs. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Studienarbeit, 2015

10 Anhang

10.1 Funktionsmatrizen der einzelnen Betriebszustände

eDrive:

Komponente	Zustand
Verbrennungsmotor	aus
Kupplung	geöffnet
E-Motor	Leistungsabgabe
Traktionsbatterie	Entladen
Getriebe	Zugbetrieb

Bild 10.1: Funktionsmatrix für Betriebsmodus eDrive

cDrive:

Komponente	Zustand mit LPA	Zustand ohne LPA
Verbrennungsmotor	an	an
Kupplung	geschlossen	geschlossen
E-Motor	Leistungsaufnahme	unbelastet
Traktionsbatterie	Laden	unbelastet
Getriebe	Zugbetrieb	Zugbetrieb

Bild 10.2: Funktionsmatrix für Betriebsmodus cDrive

Boosten:

Komponente	Zustand
Verbrennungsmotor	an
Kupplung	geschlossen
E-Motor	Leistungsabgabe
Traktionsbatterie	Entladen
Getriebe	Zugbetrieb

Bild 10.3: Funktionsmatrix für Betriebsmodus Boosten

Rekuperieren:

Komponente	Zustand
Verbrennungsmotor	aus
Kupplung	geöffnet
E-Motor	Leistungsaufnahme
Traktionsbatterie	Laden
Getriebe	Schubbetrieb

Bild 10.4: Funktionsmatrix für Betriebsmodus Rekuperieren

Fahrzeugstillstand:

Komponente	Zustand
Verbrennungsmotor	an/aus
Kupplung	geöffnet
E-Motor	unbelastet
Traktionsbatterie	unbelastet
Getriebe	unbelastet

Bild 10.5: Funktionsmatrix für Betriebsmodus Fahrzeugstillstand

10.2 Ausfallparameter der Komponenten

Tabelle 10.1 zeigt eine Übersicht über die Ausfallparameter der Komponenten für die jeweiligen relevanten Betriebsmodi. Das Ausfallverhalten der Komponenten wird dabei durch eine zweiparametrische Weibullverteilung mit dem Formparameter b und der charakteristischen Lebensdauer T beschrieben. Die charakteristischen Lebensdauern für die verschiedenen Fahrzyklen ergeben sich aus der charakteristischen Lebensdauer über die Laufleistung durch Umrechnung mit Hilfe der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit auf die charakteristische Lebensdauer über die Zeit.

Tabelle 10.1: Ausfallparameter der Komponenten [114]

			NEFZ	WLTC	CADC
	b	T [km]	T [h]	T [h]	T [h]
Verbrennungsmotor					
Boosten	1,20	145632	4330	3130	2460
Fahrzeugstillstand, Verbrennungsmotor eingeschaltet	1,05	317312	9440	6820	5360
cDrive mit LPA	1,20	145632	4330	3130	2460
cDrive ohne LPA	1,15	149184	4440	3210	2520
Kupplung					
Boosten	1,20	173456	5160	3730	2930
cDrive mit LPA	1,20	173456	5160	3730	2930
cDrive ohne LPA	1,20	173456	5160	3730	2930
Kupplungsbetätigungen (nach 330.000 Betätigungen)	2,00	336256	10010	7230	5680
E-Motor					
Boosten	1,20	1039552	30940	22360	17560
eDrive im Nennlastbereich	1,20	1075664	32010	23130	18170
eDrive im Überlastbereich	1,30	806896	24010	17350	13630
cDrive mit LPA	1,20	1075664	32010	23130	18170
Rekuperieren	1,20	1075664	32010	23130	18170

			NEFZ	WLTC	CADC
	<i>b</i>	<i>T</i> [km]	<i>T</i> [h]	<i>T</i> [h]	<i>T</i> [h]
Traktionsbatterie					
Boosten	2,00	828800	24670	17820	14000
eDrive im Nennlastbereich	2,00	1006400	29950	21640	17000
eDrive im Überlastbereich	2,00	828800	24670	17820	14000
cDrive mit LPA	2,00	1006400	29950	21640	17000
Rekuperieren	2,00	828800	24670	17820	14000
Kalendarische Lebensdauer	2,00	-	87600	87600	87600
Ladezyklen Lebensdauer (ab 2535 Ladezyklen)	2,00	252000	7500	5420	4260
Getriebe					
Boosten	1,25	816960	24310	17570	13800
eDrive im Nennlastbereich	1,18	816960	24310	17570	13800
eDrive im Überlastbereich	1,22	816960	24310	17570	13800
cDrive mit LPA	1,22	816960	24310	17570	13800
cDrive ohne LPA	1,22	816960	24310	17570	13800
Rekuperieren	1,22	816960	24310	17570	13800

10.3 Fahrzyklen

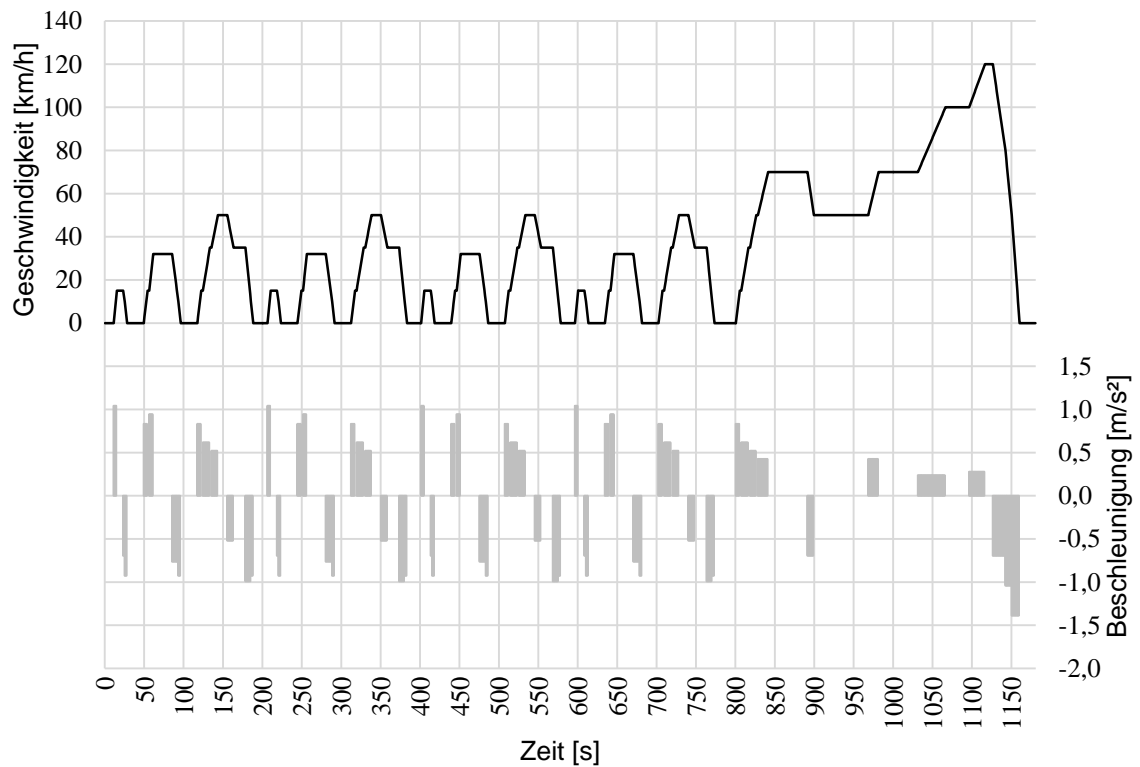


Bild 10.6: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf NEFZ

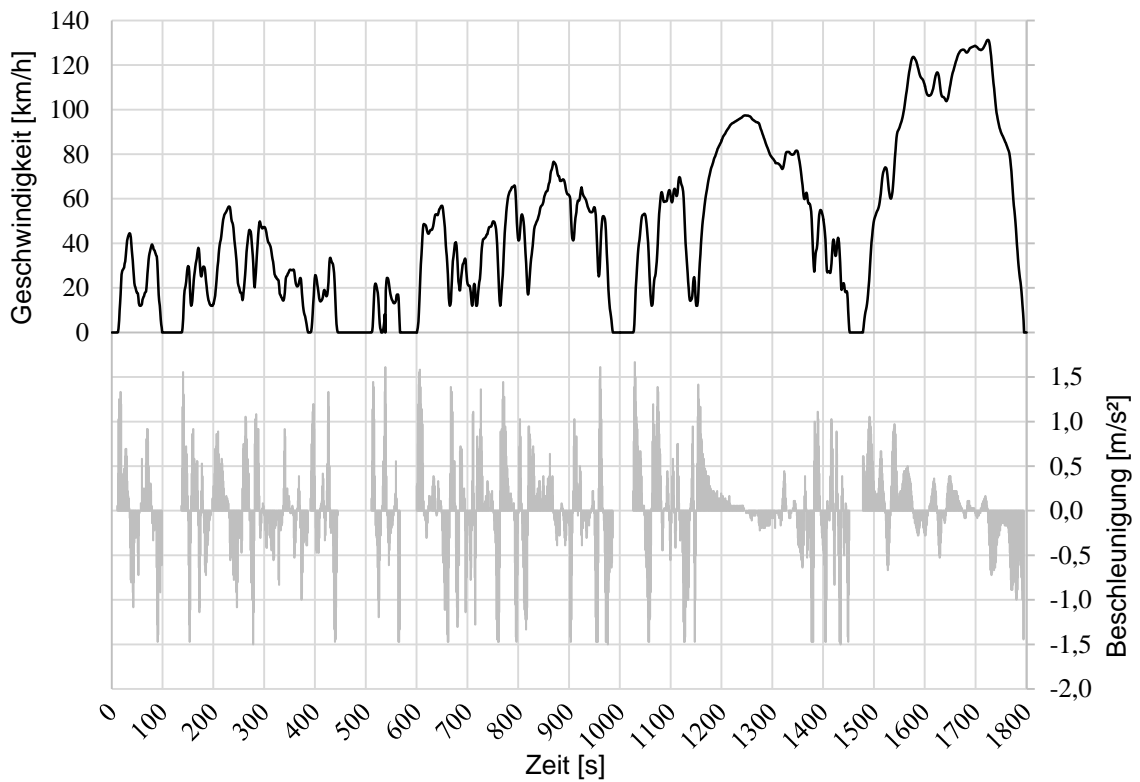


Bild 10.7: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf WLTC

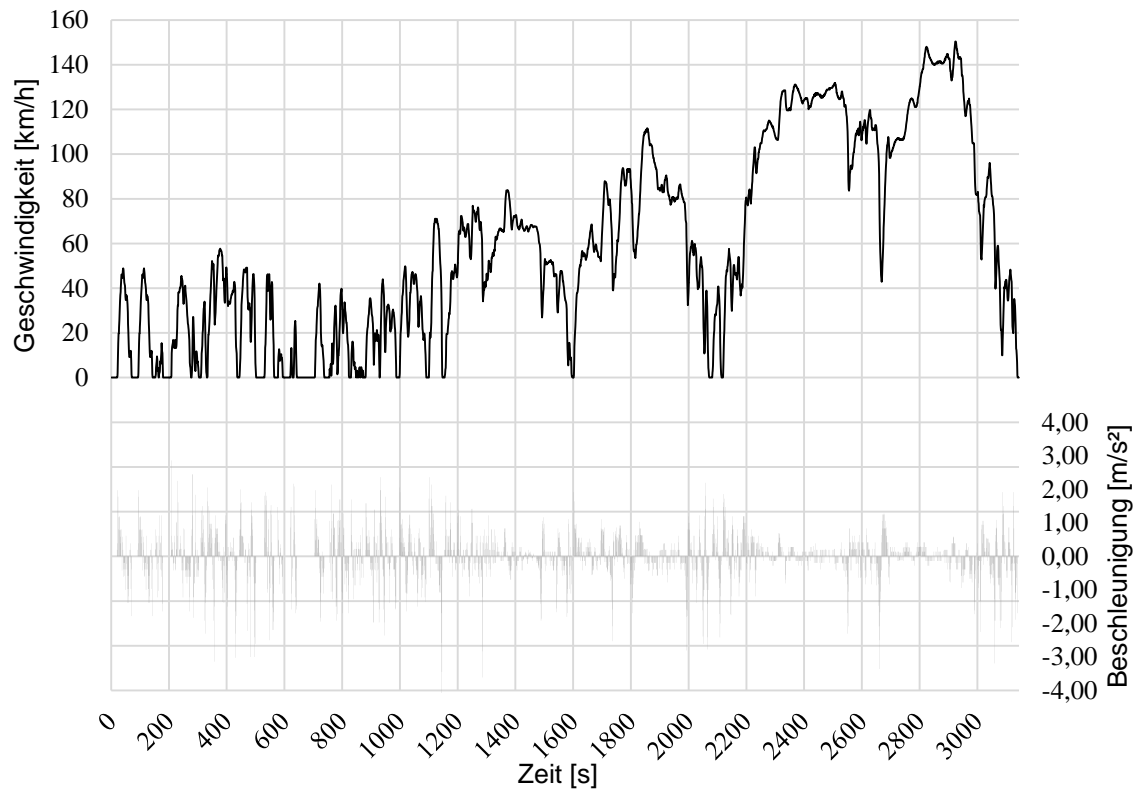


Bild 10.8: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf CAD/CAM

Tabelle 10.2: Vergleich der Fahrzyklen NEFZ, WLTC, CADC

	NEFZ	WLTC	CADC
Starttemperatur	20-30 °C	23 °C	kalt
dynamische Fahrwerte	nein	ja	ja
individuelle Schaltepunkte	nein	ja	nein
Steigung/Gefälle	nein	nein	nein
Zyklusstrecke	11028,2 m	23266,3 m	51687,3 m
Gesamtzeit	1180 s	1800 s	3143 s
Fahrzeit	887 s	1573 s	2812 s
Konstantfahrzeit	475 s	66 s	509 s
Beschleunigungszeit	247 s	789 s	1221 s
Verzögerungszeit	178 s	719 s	1110 s
Standzeit	280 s	226 s	303 s
Fahrzeit anteilig	75,2 %	87,4 %	89,5 %
Konstantfahrzeit anteilig	40,3 %	3,7 %	16,2 %
Beschleunigungszeit anteilig	20,9 %	43,8 %	38,8 %
Verzögerungszeit anteilig	15,1 %	39,9 %	35,3 %
Standzeit anteilig	23,7 %	12,6 %	9,6 %
Durchschnittsgeschwindigkeit	33,6 km/h	46,5 km/h	59,2 km/h
Maximalgeschwindigkeit	120,0 km/h	131,3 km/h	150,4 km/h
durchschnittliche Beschleunigung	0,59 m/s ²	0,41 m/s ²	0,54 m/s ²
durchschnittliche Verzögerung	-0,82 m/s ²	-0,45 m/s ²	-0,59 m/s ²
maximale Beschleunigung	1,04 m/s ²	1,67 m/s ²	2,86 m/s ²
maximale Verzögerung	-1,39 m/s ²	-1,50 m/s ²	-4,08 m/s ²

10.4 Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse

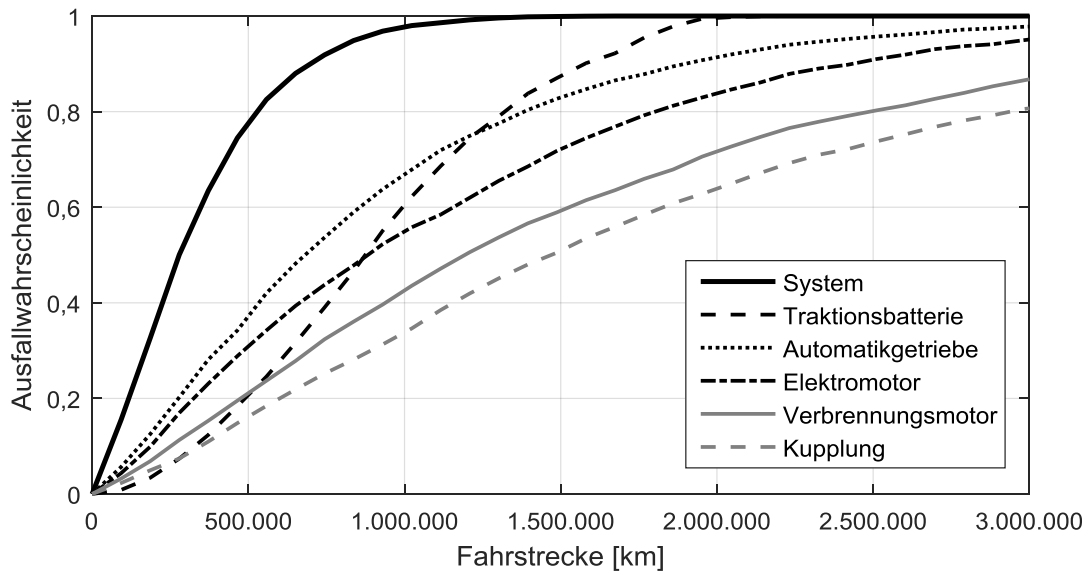


Bild 10.9: Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten und des Systems im WLTC

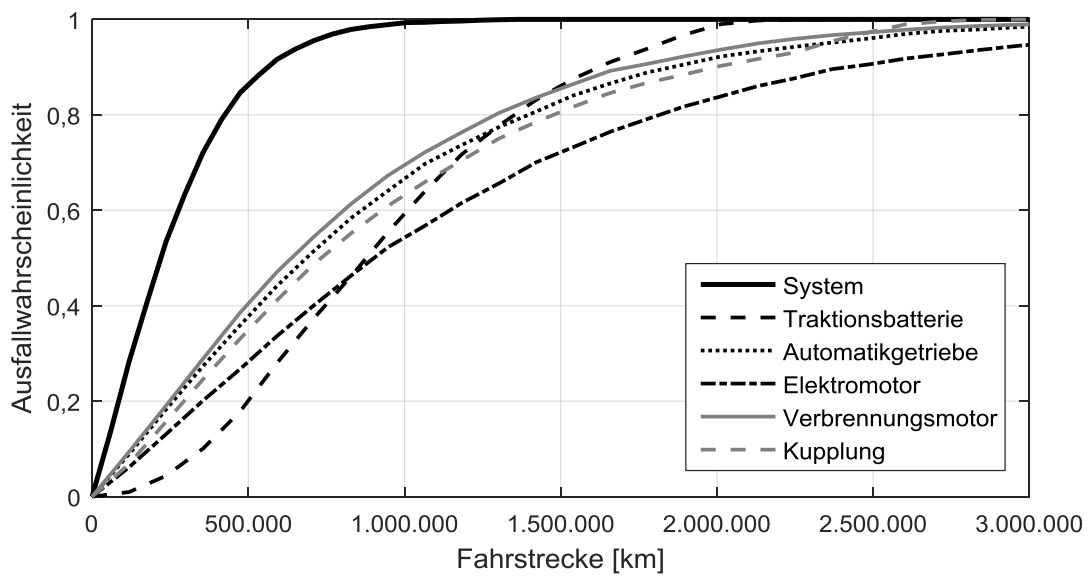


Bild 10.10: Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten und des Systems im CAD-C

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Timo Rieker
Geburtsdatum/-ort: 17.07.1984 in Waiblingen

Schulbildung

1991 – 1995 Albert-Schweitzer-Schule in Fellbach-Schmiden
1995 – 2004 Gustav-Stresemann-Gymnasium in Fellbach-Schmiden

Zivildienst

09/2004 – 05/2005 Akademie für Natur- und Umweltschutz
Baden-Württemberg

Studium

10/2005 – 03/2011 Studium Maschinenwesen an der Universität Stuttgart
Hauptfächer:
- Konstruktionstechnik
- Werkzeugmaschinen
24.03.2011 Abschluss als Diplom-Ingenieur

Beruf

04/2011 – 03/2017 Akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart
seit 08/2017 Qualitätsingenieur bei der Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
3	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszylinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnern mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzählter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlageeinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-berechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-wendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätssystem für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräse-herstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozess
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Krafffahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlaufläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenläufigen Flächen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenaufläufen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsgeräusche am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Klaißer	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenaufläufen
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtungen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Remppis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenaufläufen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebstrangerprobung
170	J. Gölz	Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprognosen
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten