

Michael Kopp

Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden

D 93
ISBN 978-3-936100-52-5

Institut für Maschinenelemente

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

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

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

Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden

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. Michael Kopp
aus Filderstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner

Tag der mündlichen Prüfung: 14. November 2013

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter im Fachbereich Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung dieser Arbeit, seine fortwährende Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner, Leiter des Instituts für Automatisierungs- und Softwaretechnik, für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Des Weiteren danke ich allen Beteiligten im Kooperationsprojekt „Geplante Zuverlässigkeit“ der Universität Stuttgart und der Daimler AG für die spannenden und interessanten Einblicke in die Automobilindustrie. Der Erfahrungsgewinn durch die damit verbundenen Tätigkeiten war enorm und hat mich sehr vorangebracht.

Sehr herzlich danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Maschinenelemente für die schöne und ereignisreiche Zeit. Das positive Institutsklima sowie der freundschaftliche Umgang haben mich ungemein motiviert. Ebenfalls ein herzliches Dankeschön an die Mitarbeiterinnen des Sekretariats für ihre stetige Hilfsbereitschaft bei allen Organisations- und Verwaltungsfragen.

Meinen Kollegen aus „Büro 2.139“, Dr.-Ing. Jochen Gäng und Dr.-Ing. Daniel Hofmann, danke ich für die tolle fachliche Unterstützung, die tiefgreifenden Diskussionen und die gute Stimmung im Arbeitsalltag.

Für ihre konstruktiven Anmerkungen zu meiner Arbeit danke ich besonders meinen Lektoren Dr.-Ing. Daniel Hofmann, Dr.-Ing. Daniel Kirschmann sowie meiner Lektorin Gisela Kopp. Ihre Hinweise haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, welche meine Entwicklung intensiv geprägt sowie meinen bisherigen Lebensweg mit viel Interesse verfolgt und unterstützt haben. Der größte Dank gilt schließlich meiner Frau für ihre Geduld, den Verzicht auf viele gemeinsame Stunden und für ihre stetige Unterstützung und Motivation.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	x
Abstract	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Ziele dieser Arbeit	5
1.2 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen der Zuverlässigkeitsabsicherung	9
2.1 Begriffsdefinitionen.....	9
2.2 Unterschiedliche Ansätze zur Optimierung der Zuverlässigkeit.....	13
2.2.1 Präventive und reaktive Methodenansätze	14
2.2.2 Methodenansätze für unterschiedliche Domänen.....	15
2.2.3 Quantitative und qualitative Methodenansätze.....	18
2.3 Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung	20
2.4 Quantitative Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse	22
2.4.1 Grundlagen der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse	22
2.4.2 Statistische Verteilungen	25
2.4.3 Systemberechnungen nach Boole.....	27
2.4.4 Fehlzustandsbaumanalyse	28
2.4.5 Erprobungsplanung.....	30
2.4.6 Zuverlässigkeitswachstumsanalyse	30
2.5 Qualitative Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse	31
2.5.1 Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse.....	31
2.5.2 Gefährdungs- und Betreibbarkeitsuntersuchung	34
2.5.3 Qualitative Konzeptbewertung.....	34

3 Methoden und Modelle in Produktentwicklung und Zuverlässigkeitsabsicherung	36
3.1 Methoden im Produktentwicklungsprozess	36
3.2 Methodenkritik.....	40
3.3 Der Prozess der Zuverlässigkeitsabsicherung.....	42
3.3.1 Zielsetzung der Zuverlässigkeitsabsicherung	43
3.3.2 Methodik im Rahmen von Design for Six Sigma.....	46
3.4 Methode und Modell.....	47
3.4.1 Der Modellbegriff in der Wissenschaftstheorie.....	47
3.4.2 Modelle in Zuverlässigkeitsmethoden	48
3.5 Stand der Forschung zur Flexibilisierung der Produktentwicklung.....	49
3.6 Zwischenfazit.....	55
4 Modularisierung komplexer Methoden	56
4.1 Grundlagen des Modulansatzes	57
4.1.1 Gründe für einen Modulansatz	57
4.1.2 Eigenschaften des Modulansatzes.....	58
4.1.3 Erfolgreiche Modulansätze.....	59
4.2 Anforderungen an die Modularisierung.....	60
4.2.1 Grad der Modularisierung.....	61
4.2.2 Formale Anforderungen an die Modularisierung.....	62
4.3 Aufbau und Eigenschaften der Module.....	66
4.3.1 Innerer Aufbau der Basismodule.....	67
4.3.2 Äußerer Aufbau der Basismodule	68
4.3.3 Basisaktionen als Teil der Basismodule	70
4.4 Schnittstellen der Module	71
4.4.1 Darstellung der Schnittstellen.....	71
4.4.2 Konzeption der Schnittstellen.....	72
4.5 Vorgehensweise bei der Modularisierung.....	74
4.5.1 Modelle und Schnittstellen ermitteln und abbilden	75
4.5.2 Prinzipielles Vorgehen zur Ermittlung neuer Modulgrenzen.....	75
5 Identifikation von Basismodulen in der Zuverlässigkeitsabsicherung	78
5.1 Modularisierung bestehender Methoden.....	78
5.1.1 Basismodule der quantitativen Fehlzustandsbaumanalyse als Beispiel einer quantitativen Zuverlässigkeitsmethode	78
5.1.2 Basismodule der Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse als Beispiel einer qualitativen Zuverlässigkeitsmethode	82

5.2	Variationsmöglichkeiten bei bestehenden Methoden.....	84
5.2.1	Variation der Basismodule.....	85
5.2.2	Variation der Modelle innerhalb der Basismodule	86
6	Synthese der Module zur flexiblen Zuverlässigkeitsabsicherung	89
6.1	Verknüpfung entlang des Produktentwicklungsprozesses.....	91
6.1.1	Makrozyklus als Vorgehensmodell	92
6.1.2	Mikrozyklus der Zuverlässigkeitsabsicherung.....	96
6.1.3	Kombination von Mikro- und Makrozyklus sowie deren Anwendung auf Basismodule	101
6.2	Verknüpfung quantitativer und qualitativer Analysearten	102
6.2.1	Verknüpfungsansätze in anderen Wissenschaften	103
6.2.2	Übertragung der Möglichkeiten auf die Zuverlässigkeitsanalyse.....	108
6.2.3	Weitere Kombinationsmöglichkeiten in der Zuverlässigkeitstechnik.....	109
6.3	Zusammenfassung der Verknüpfungsmöglichkeiten	110
7	Anwendung der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung	112
7.1	Synthese der identifizierten Module.....	113
7.2	Auswahl der geeigneten Modulkombinationen.....	114
7.3	Anwendungsbeispiel Zuverlässigkeitsprognose.....	115
7.3.1	Vorstellung des Beispielsystems.....	116
7.3.2	Ermittlung der notwendigen Module.....	117
7.3.3	Umsetzung der mithilfe von Basismodulen konfigurierten Methoden	120
7.3.4	Darstellung der Informationsebene	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	128
9	Literaturverzeichnis	130

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

6σ	Six Sigma
A	Ausgang
b	Formparameter der Weibullverteilung
C	Costs, dt.: Kosten-/Zeitfaktor (bei einer QLK)
CMMI	Capability Maturity Model Integration
D	Detection, dt.: Entdeckungswahrscheinlichkeit (bei einer FMEA)
D	Developability, dt.: Entwicklungsfähigkeit (bei einer QLK)
DfSS	Design for Six Sigma
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control
DMADOV	Define, Measure, Analyze, Design, Optimize, Validate
DMM	Domain Mapping Matrix
DoE	Design of Experiments, dt.: Statistische Versuchsplanung
DRBFM	Design Review based on Failure Mode
DSM	Design Structure Matrix, auch: Dependency Structure Matrix
E	Eingang
EN	Europäische Norm
F	Feasibility, dt.: Technische Umsetzbarkeit (bei einer QLK)
$f(t)$	Ausfalldichte zum Zeitpunkt t, engl.: failure density function
$f^*(t)$	Empirische Ausfalldichte zum Zeitpunkt t
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t, engl.: failure distribution
$F^*(t)$	Empirische Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t
FHA	Functional Hazard Analysis

FMEA	Failure Mode and Effects Analysis, dt.: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, dt.: Fehlzustandsart-, auswirkungs- und -kritizitätsanalyse
FTA	Fault Tree Analysis, dt.: Fehlzustandsbaumanalyse
HAZOP	Hazard and Operability Analysis, dt.: Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung
i, j	Laufvariablen
IDOV	Identify, Define, Optimize, Validate
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
λ	Ausfallrate der Exponentialverteilung
LW	Lastwechsel
μ	Erwartungswert der Normalverteilung
MDM	Multiple Domain Matrix
n	Anzahl der Funktionen/Anforderungen eines Systems
O	Occurrence, dt.: Auftretenswahrscheinlichkeit (bei einer FMEA)
PHA	Preliminary Hazard Analysis
ppm	Parts Per Million, dt.: Teile pro 1 Million Teile
Q	Quantifier, dt.: Gewichtung der Systemfunktionen (bei einer QLK)
QFD	Quality Function Deployment
QLK	Qualitative Konzeptbewertung
QM	Qualitätsmanagement
R	Reliability, dt.: Zuverlässigkeit
$R_s(t)$	Zuverlässigkeit des Gesamtsystems
RCA	Root Cause Analysis
RPN	Risk Priority Number, dt.: Risikoprioritätszahl
S	Severity, dt.: Schwere (bei einer FMEA)
σ	Streuung der Normalverteilung
SPC	Statistical Process Control, dt. Statistische Prozessregelung

SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
T	Charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung
t_0	Ausfallfreie Zeit der Weibullverteilung
TOC	Theory of Constraints, dt.: Theorie der Engpässe
TQM	Total Quality Management
TRIZ	Teoria reschenija isobretatjelskich sadatsch, dt.: Theorie des erfinderischen Problemlösens
VDA	Verband der Deutschen Automobilhersteller
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
WE	Wissenselement
ZIM	Zuverlässigkeits-Informations-Modell

Abstract

Modularization and Synthesis of Reliability Methods

Methods for reliability validation exist in large quantity with different, but partially overlapping objectives. As a result, it occurs in the product development that actually important methods are left out and other topics are processed twice. This affects not only negatively the effectiveness, but also the acceptance of methods by developers.

Therefore, the present work concentrates on the fundamental idea that not the methods themselves have to be moved to the fore, but the underlying questions. On this basis, a better combination of methods can be done. The further idea is, that also a systematic can be detected in the fundamental questions of the methods which could lead to a new understanding of the reliability validation.

The aim of this study is to scrutinize the large number of existing methods for reliability validation and to bring their level of content to the fore. As an aid, the approach of modularization is picked up. This approach allows both, an increased standardization by small, prescribed modules as well as a greater flexibility through the multitude of possible combinations of modules.

For this purpose, at first, reliability methods in particular and development methods in general are considered and broken down into their essential functions. Subsequently, the requirements to a modularization are defined. Additionally, existing methods for reliability validation are investigated to determine whether these can be represented with the modularization approach.

Core of this work is eventually to develop a system for the modular construction of the complete reliability validation process. This system is based on a macrocycle as signposts along the product development process and a microcycle to adapt the working steps to the human way of thinking.

In an excursus it also will be shown that a consistent reliability validation is not only possible along the product development cycle, but a combination also across quantitative and qualitative approaches is possible at various levels.

Finally, the proposed systematic of a modularized reliability validation following a macro- and microcycle is validated by an exemplary application on two mechatronic systems out of the automotive industry.

1 Einleitung

Im industriellen Umfeld sind die Herausforderungen seit Jahrzehnten vergleichbar: die Komplexität der Produkte steigt und die Qualität soll zumindest gleich bleiben, idealerweise sogar besser werden. Veranschaulicht wird diese steigende Komplexität in **Abbildung 1.1** anhand eines Vergleichs der erhältlichen Sonderausstattungen eines VW Golf der ersten Generation mit denen der sechsten Generation. Während 1974 nur 21 Optionen in der Preisliste vorhanden waren, sind es 2010 bereits über 160 Optionen. Dieses Spannungsfeld beruht einerseits auf dem steigenden Anspruch des Kunden und andererseits auf dem stärkeren Wettbewerbsdruck durch die intensivere Industrialisierung und Globalisierung.

Im Gegensatz zu den Anforderungen sinken das relative Entwicklungsbudget und die Entwicklungszeit. Seit jeher ist diese Situation eine große Herausforderung für die Produktentwicklungsbereiche, welche nur durch immer effizienter werdende Entwicklungswerkzeuge, -methoden und -prozesse bewältigt werden kann. Hinsichtlich dieser Arbeit bedeutet dies für die Entwicklungsabteilungen, eine relativ zur Produktkomplexität höhere Qualität mit niedrigeren Kosten und geringerem Zeitbedarf gewährleisten zu müssen, damit das Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität in **Abbildung 1.2** nicht aus dem Gleichgewicht kommt.

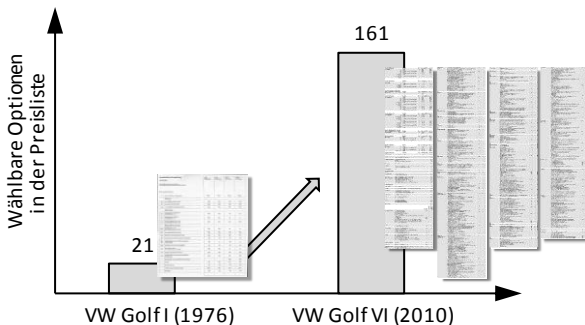


Abbildung 1.1: Vergleich der Preislisten des Golf I und des Golf VI

Dabei ist die Verwendung von Methoden als Hilfsmittel bei den Entwicklern zwar umstritten [Hei03], verschiedene Untersuchungen geben allerdings eindeutige Be-

weise für deren Sinnhaftigkeit. So ergab eine Untersuchung im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie finanzierten Programms [Gra97], dass der Methodeneinsatz unerlässlich für eine hohe Qualität des Produktentwicklungsprozesses ist sowie eine Ersparnis von Kosten und Zeit ermöglicht. Aufgrund der starken Konkurrenz aus Niedriglohnländern ist eine Effizienzsteigerung generell wichtig. Dies betrifft zunehmend auch die in Deutschland stark vertretenen Produktentwicklungsbereiche.

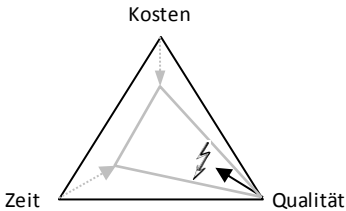


Abbildung 1.2: Das „magische“ Dreieck der Produktentwicklung

Während sich die bisherigen Ausführungen hauptsächlich auf den allgemeinen Produktentwicklungsprozess bezogen, soll in dieser Arbeit der Fokus speziell auf die Absicherung der Qualität über Zeit – der Zuverlässigkeit – gerichtet werden. Der Grund ist die hohe Bedeutung der Zuverlässigkeit für den Kunden und der damit unmittelbar verbundene Unternehmenserfolg durch eine höhere Kundenzufriedenheit. Die Situation bei der Zuverlässigkeitsabsicherung ist direkt vergleichbar mit der Situation der allgemeinen Produktentwicklung. Es ist bekannt, dass die Zuverlässigkeit ein wichtiger Faktor ist; dennoch existiert in vielen Unternehmen keine konsequente Zuverlässigkeitsorientierung.

Kosten und Zeit können vor allem durch eine Reduktion von Iterationsschleifen aufgrund besser vorbereiteter Entscheidungen gespart werden. Iterationen produzieren besonders dann viel Aufwand und Kosten, wenn sie kurz vor dem Produktionsstart auftreten. Zudem bedroht jede Änderung kurz vor dem Anlauf die Zuverlässigkeit des Produkts, da kurzfristige Änderungen oftmals nicht ausgereift genug sind. Trotz positiver Auswirkungen der Methodenanwendung werden Methoden in der Zuverlässigkeitsabsicherung – abgesehen von der Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), die oftmals vorgeschrieben ist – nur begrenzt eingesetzt. Doch was sind die Gründe für den spärlichen Methodeneinsatz?

Zu dieser Frage enthält [Gra97] vielzählige Antworten, siehe **Tabelle 1.1**. Hauptsächlich wird jedoch der Aufwand für die Durchführung und Einarbeitung genannt sowie ein fehlendes ganzheitliches Methodensystem mit integrierten Einzelmethoden. Außerdem bleibt oftmals unklar, welche Methoden für welche Problemstellung geeignet sind. Dies gilt sowohl für die Fragestellungen als auch für den Einsatzzeitpunkt etablierter Methoden.

Tabelle 1.1: Umfrageergebnisse zu den Gründen des mangelnden Methodeneinsatzes, sortiert nach Häufigkeit der Nennungen [Gra97]

Zu hoher Aufwand
Zu starker Theorieballast
Mangelhafte Vorbereitung/Unterstützung des Methodeneinsatzes
Fehlende Rechnerunterstützung
Fehlende Unterstützung der methodischen Vorgehensweise durch CAD-Systeme
Fehlende Bereitschaft zur bereichsübergreifenden Methodenanwendung
Zu langsame Umsetzung neuer Methoden
In Abhängigkeit von der Unternehmensgröße variierende Anwendbarkeit von Methoden
Häufige Unterschätzung der Bedeutung von Methoden
Fehlen eines ganzheitlichen Methodensystems mit integrierten Einzelmethoden
Fehlendes Variantenmanagement
Fehlende Methoden des Änderungsmanagements
Fehlende Standardisierung von Lösungskonzepten

Die Situation ist jedoch die, dass in der wissenschaftlichen Literatur für jeden erdenklichen Anwendungsfall eine spezielle Methode entwickelt wurde. Beispielhaft seien die verschiedenen Methoden für frühe und späte Entwicklungsphasen, für quantitative und qualitative Zuverlässigkeitsanalysen sowie für mechanische, elektronische oder softwarebasierte Komponenten genannt. Für den exakten Anwendungsfall, für den eine Methode erarbeitet wurde, mag das zwar ein geeignetes Vorgehen sein, aber bei allen anderen Anwendungsfällen ist es umso schwerer, unter den existierenden Methoden die richtige zu finden. Oftmals kommt es vor, dass entweder auftretende Problemstellungen nur eine Teilmenge der Methodenantworten benötigen oder nur Teilmengen der Problemstellung durch eine Methode beantwortet werden. Häufig treffen sogar beide Situationen zu.

Die vielen spezifischen Methoden bereiten aber nicht nur bei der Auswahl Schwierigkeiten. Auch bei der Integration in den Produktentwicklungsprozess ist eine durchgängige Zuverlässigkeitsabsicherung nicht unmittelbar möglich, da zwischen den Methoden keine geschlossene Informationskette existiert. Für viele Detailspekte der Zuverlässigkeitsabsicherung wurden spezifische Methoden entwickelt. Diese besitzen aufgrund ihrer Spezialisierung einen kleinen Wirkungsbereich. Durch die Anwendung vieler solcher Methoden steigt das Risiko, einen wenig effizienten „Methodenwald“ zu erhalten, der viele doppelte Schritte sowie zahlreiche einmalig verwendete Informationen aufweist. Dies hat einen negativen Einfluss sowohl auf die Produktivität als auch auf die Motivation, Zuverlässigkeitsmethoden einzusetzen. Für lange und zähe Methodensitzungen gibt es im sowieso schon stark belasteten Arbeitsalltag eines Entwicklers keinerlei Akzeptanz.

Ein häufig genanntes Beispiel für die Überschneidung zweier Methoden ist die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Diese weist in ihren ersten Arbeitsschritten – der Funktionsanalyse – eine Überschneidung mit der Fehlerbaumanalyse (FTA) auf, führt aber üblicherweise zu leicht anderen Ergebnissen. Diese doppelten Schritte bewirken, dass die Entwicklungsabteilungen durch unnötige

Mehrarbeit zusätzlich belastet werden. Dies erschwert die Realisierung einer kürzeren Entwicklungszeit und ist damit kontraproduktiv.

Eine Lösung zur Reduktion der Komplexität und zur Reduktion der doppelten Schritte könnte die Anwendung einer ganzheitlichen, umfassenden Universalmethode sein. Dies ist aber aufgrund der unzähligen Varianten im Produktentwicklungsprozess nicht zielführend, wie bereits eine Untersuchung in [SmRe91] zeigt. Das universelle Vorgehen wäre entweder viel zu umfangreich, wenn es alle möglichen Ausnahmen abzudecken versucht oder, im entgegengesetzten Fall, unvollständig. Nichtsdestotrotz ist eine Standardisierung der Zuverlässigkeitsabsicherung anzustreben, um die Methodenvielfalt einzuschränken und einen Lerneffekt durch wiederkehrende Arbeitsschritte zu erzielen.

Das Paradoxon aus dem Wunsch nach Standardisierung einerseits und dem Wunsch nach Flexibilität andererseits scheint auf den ersten Blick vollkommen gegensätzlich. Das ist es aber nicht: Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Dilemmas ist das Prinzip der Modularisierung, siehe **Abbildung 1.3**. Dabei sollen standardisierte Grundbausteine durch vielfältige Kombinationsmöglichkeiten ein flexibles Vorgehen ermöglichen. Die Modularisierung stellt einen Kompromiss aus Standardisierung und Individualisierung dar. Dass dieses Prinzip sinnvoll ist, zeigt der große Erfolg der Modularisierung in der Vergangenheit: Viele Veröffentlichungen sehen in der Modularisierung einen Schlüssel für drastische Verbesserungen, [BaCl00, Ber06, Bla01, Cor et al. 08, Ell07, Göp98, Hei03, Les01].

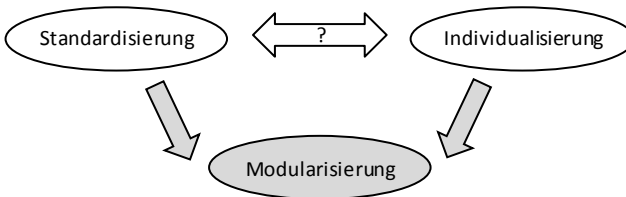


Abbildung 1.3: Modularisierung als Kompromiss aus Standardisierung und Individualisierung

Die Mehrheit komplexer Gebilde – seien es technische, organisatorische oder sogar soziologische Systeme – weist mittlerweile eine modulbasierte Struktur auf und kann somit effizienter entwickelt und organisiert werden. Ein weiterer Aspekt der Modularisierung ist psychologischer Natur – mehrere kleine Aufgaben lassen sich leichter bewältigen als eine große.

Das vielleicht prominenteste Beispiel für den erfolgreichen Einsatz der Modularisierung ist die Einführung der ISO-Container im internationalen Warenverkehr. Dort ist es durchaus möglich, gleichzeitig die Komplexität zu reduzieren und dennoch alle Anforderungen zu erfüllen. 1956 begann der US-Amerikaner McLean, Großbehälter sowohl für den Transport mit dem LKW als auch auf Schiffen einzusetzen. Zuerst wurde seine Idee belächelt, doch wenige Jahre später begann der Siegeszug der Container, ohne die vor allem die Seefracht heute lange nicht so leistungsfähig wäre

[Lev06]. Die universellen Einsatzmöglichkeiten der Container, die unterschiedlichen Ausprägungen in Größe und Funktion sowie die Kombinierbarkeit auf Containerfrachtern ermöglichen einen effizienten Warenumsschlag. Kernpunkt war die Standardisierung der einzelnen Containergrößen, die eine individuelle Zusammenstellung einer Schiffsladung ermöglichen und somit einen modularisierten Warenverkehr zulassen.

1.1 Ziele dieser Arbeit

Als Konsequenz der erläuterten Zustände in der Zuverlässigkeitsabsicherung ergeben sich direkt die Ziele dieser Arbeit. Der Einsatz von Methoden soll gefördert werden, indem die Akzeptanz für systematische Vorgehensweisen gesteigert wird. Das soll durch einen Beitrag zur Reduktion der Komplexität und zur Steigerung der Effizienz geschehen. Dieses Ziel soll mithilfe einer konsequenten Modulstrategie anstatt einer statischen Methodenauswahl und -anwendung erreicht werden.

Die Fragestellungen speziell in der Zuverlässigkeitsabsicherung mechatronischer Systeme sind zwar vielfältig, ähneln bzw. wiederholen sich aber häufig. Daher muss es möglich sein, die typischen Fragestellungen mit einer endlichen Anzahl an Methodenmodulen beantworten und somit für jedes Problem das richtige Modul verwenden zu können. Bei der Anwendung und Kombination der Module soll berücksichtigt werden, dass diese flexibel an die aktuelle Situation anpassbar sind. Das umfasst folgende Kriterien:

- **Kritizität:**
Sicherheitsrelevante und häufig benutzte Systeme müssen intensiver analysiert werden als Systeme für Komfortfunktionen, die für den Kunden nur eine geringe Relevanz besitzen.
- **Komplexität:**
Die Zuverlässigkeit trivialer Systeme kann oftmals durch ebenfalls triviale Analysen abgesichert werden – bei komplexen Systemen dagegen führt die erforderliche komplexe Absicherung häufig zu Unklarheit.
- **Innovationsgrad:**
Ausgehend von den verfügbaren Erfahrungen muss die Zuverlässigkeitsabsicherung in entgegengesetztem Verhältnis ausgeweitet werden – je weniger Erfahrungen vorhanden sind bzw. je innovativer das zu betrachtende System ist, desto genauer muss die Zuverlässigkeitsabsicherung erfolgen.
- **Verfügbares Personal und Budget:**
Je nachdem, wie knapp die verfügbaren Entwicklungsressourcen sind, muss es genügen, nur eine unvollständige Zuverlässigkeitsabsicherung durchzuführen; besonders hier sollte das Verhältnis aus Aufwand und Ertrag maximal sein.
- **Verfügbare Daten:**
Sind ausreichend viele und genaue Daten vorhanden, können diese auch genutzt

werden. Fehlen diese und ist die Datenlage unvollständig, muss die Zuverlässigkeit über qualitative Ansätze und Abschätzungen abgesichert werden.

Das Ziel der Arbeit ist daher, die Möglichkeit eines dynamischen Baukastensystems zu untersuchen und die Anforderungen hierfür zu ermitteln. Mit einem solchen Baukastensystem soll es möglich sein, die Auswahl der Arbeitsschritte im Zuverlässigkeitsprozess sowie deren Umfang flexibel an die aktuelle Situation und Fragestellung anzupassen, um die Arbeitsbelastung für die Entwicklung zu reduzieren.

Ebenfalls soll untersucht werden, inwieweit bestehende Methoden so in einzelne Module zerlegt werden können, dass aus diesen Modulen durch neue Kombinationen individuelle Vorgehensweisen ermöglicht werden. Dabei soll geprüft werden, ob hinter den einzelnen Methodenschritten Gesetzmäßigkeiten stehen, die verallgemeinert und bei der späteren Synthese verwendet werden können.

Um diese Schritte nachvollziehbar durchführen zu können, wird zu Beginn das Verständnis für die zuverlässigkeitstechnischen Grundlagen geschaffen sowie die aktuelle Situation in der allgemeinen Produktentwicklung aufgezeigt. Zudem wird sowohl eine Begründung für den Einsatz von Methoden als auch ein Überblick über aktuelle Forschungstätigkeiten im Bereich der Modularisierung gegeben.

Als Grundvoraussetzung einer modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung wird die Klärung der Frage gesehen, wie solche Module aussehen sollen und wie festgestellt werden kann, welche Module die passenden sind. Dies stellt vor allem eine für das Management entscheidende Frage dar, die es zu beantworten gilt. Dazu sollen in dieser Arbeit Module aus bestehenden Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse extrahiert oder neu gebildet werden.

Als weiteres Ziel gilt die Beantwortung der Frage, ob – und wenn ja, wie – die grundsätzliche Zerteilung der Zuverlässigkeitstechnik in qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsanalysen überwunden werden kann. Ebenso ist eine allgemein durchgängige Modulkette ein wichtiges Ziel dieser Arbeit, um eine schlüssige und nachvollziehbare Zuverlässigkeitsabsicherung zu gewährleisten. Durch die kontinuierliche Verknüpfung der einzelnen Module sowohl über den Entwicklungsprozess als auch über die zwei Ansätze der qualitativen und quantitativen Analyse hinweg entsteht die Möglichkeit, gewonnene Informationen durchgängig weiterzuverwenden. Daher ist auch ein konsequenter Informationsfluss Ziel dieser Arbeit.

Schlussendlich soll die entwickelte Metamethode an einem anschaulichen und nachvollziehbaren Praxisbeispiel validiert werden. Am Beispiel einer durchgängigen Methode zur frühzeitigen Zuverlässigkeitsbewertung und Testplanung soll gezeigt werden, wie eine modularisierte Zuverlässigkeitsabsicherung aussehen kann.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Hauptabschnitte gegliedert, die die Modularisierung von Zuverlässigkeitsanalysemethoden systematisch beleuchten. Der Aufbau ist in **Abbildung 1.4** schematisch dargestellt.

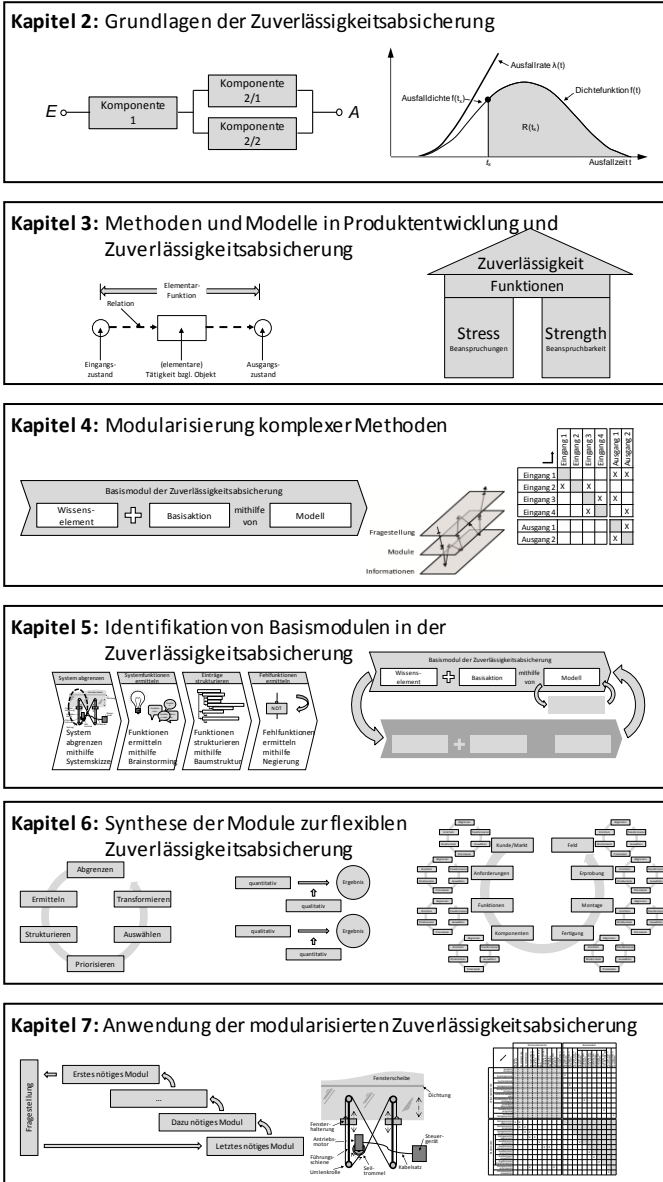


Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel wird die Zuverlässigkeitsanalyse detailliert betrachtet. Dazu wird zuerst ausgeführt, was unter dem Begriff *Zuverlässigkeit* zu verstehen ist. Ebenso werden die unterschiedlichen Gesichtspunkte der Zuverlässigkeitsanalyse erläutert und abgegrenzt. Letztendlich wird eine Auswahl der relevantesten Analysemethoden vorgestellt.

Anschließend, im dritten Kapitel, wird zuerst der Produktentwicklungsprozess im Allgemeinen untersucht. Dabei wird die Frage beantwortet, warum es Methoden gibt und wie diese aussehen. Zudem wird ein Überblick über aktuelle Ansätze zur Modularisierung von Methoden gegeben. Die Betrachtung der Methoden wird durch einen ersten Ausblick auf die Modularisierung ergänzt.

Das vierte Kapitel befasst sich mit den Eigenschaften und Anforderungen eines modulbasierten Problemlösungsprozesses. Nach der Erarbeitung der diesbezüglichen Grundlagen wird analysiert, welche Prinzipien zu berücksichtigen sind und wie der Aufbau und die Struktur der Basismodule aussehen soll. Anschließend werden die nötigen Schnittstellen betrachtet sowie eine Vorgehensweise zur Modularisierung bestehender Methoden vorgeschlagen.

Das fünfte Kapitel gibt einen ersten Eindruck davon, wie Zuverlässigkeitsmodule aussehen können, indem bestehende Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse in Module aufgeteilt und anschließend mögliche Variationen der bisherigen Modulkonstellationen vorgestellt werden.

Das sechste Kapitel zeigt verschiedene Möglichkeiten zur Neugestaltung des Problemlösungsprozesses durch Kombination der Zuverlässigkeitsanalysemodule auf. Nach einer Vorstellung der generell möglichen Kombinationsansätze wird die Verknüpfung entlang der Zeitachse sowie von funktions- und komponentenorientierten Sichtweisen ebenso wie die Kombination quantitativer und qualitativer Analysearten als Kernthemen betrachtet.

Zum Abschluss wird im siebten Kapitel die vorgestellte Methodik angewandt. Dabei werden zuerst Hinweise zur Anwendung der Modularisierung gegeben. Umgesetzt werden diese im Anschluss an folgendem Beispiel: einer durchgängigen, qualitativ-quantitativen Zuverlässigkeitsprognose.

2 Grundlagen der Zuverlässigkeitsabsicherung

Diese Arbeit befasst sich mit den aktuellen Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsabsicherung mechatronischer Systeme. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Arbeit und im Sinne einer methodischen Ableitung der Erkenntnisse wird in diesem Kapitel ein Einblick in das Themenfeld der Zuverlässigkeitsabsicherung gegeben. In den folgenden Abschnitten werden zuerst die notwendigen Definitionen und mathematischen Grundlagen der Zuverlässigkeit behandelt. Anschließend werden die unterschiedlichen Analysearten erläutert und am Ende die wichtigsten Methoden vorgestellt und analysiert.

2.1 Begriffsdefinitionen

Um ein einheitliches Verständnis der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe zu erhalten, werden die zentralen Begriffe aus dem Themenfeld der Zuverlässigkeitsabsicherung und der Methodenlehre jeweils kurz definiert und erläutert.

Zuverlässigkeit

Die technische Zuverlässigkeit wird in verschiedensten Normwerken definiert. Grundlegend lassen sich dabei zwei Aspekte unterscheiden.

Die Norm DIN ISO 9000-4 [ISO9000] hebt identisch mit der VDI 4001 [VDI4001] die umfassende Bedeutung des Begriffes heraus: „Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“.

Im Gegensatz dazu bezieht sich die Definition nach DIN 40041 [DIN40041] konkret auf technische Systeme und geht gezielt auf deren Zuverlässigkeit ein:

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

Das bedeutet, dass die Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt. Damit beschreibt die Zuverlässigkeit die Veränderung der Produktqualität über der Zeit und stellt daher eine mögliche

Betrachtungsart der Qualität dar. Für weitere Definitionen wird auf [Rak01] verwiesen.

Da die Zuverlässigkeit eng verwandt ist mit der Qualität und oftmals mit ihr gleichgesetzt wird, ist es sinnvoll, den Unterschied von Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit darzustellen.

Denn Qualität ist nach [ISO9000] ein „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt.“ Das bedeutet, dass Qualität immer *zu einem bestimmten* Zeitpunkt messbar ist, nicht aber allgemein für den ganzen Produktlebenszyklus gelten kann. Zudem ist Qualität stets relativ zu den gestellten Anforderungen zu betrachten. Wird die Veränderung der Qualität über der Zeitachse betrachtet, ergibt sich die Zuverlässigkeit eines Produktes. Diese muss in Verbindung mit sicherheitsrelevanten Aspekten gegeben sein, um von Sicherheit sprechen zu können.

Die Sicherheit wiederum stellt die „Freiheit von unvermeidbaren Risiken“ [DIN61508] dar und ist damit abhängig von den beiden zuvor genannten Eigenschaften.

Zuverlässigkeitsabsicherung

Im Allgemeinen lautet das Ziel einer Produktentwicklung, eine möglichst hohe Zuverlässigkeit zu erhalten. Da die Zuverlässigkeit das Ergebnis eines sehr komplexen Zusammenspiels aus den

- Funktionen und Merkmalen des Produkts und den
- Nutzungs- und Umgebungsbedingungen

ist, ist auch deren Optimierung ein sehr komplexes Problem, das eine große Herausforderung für die Produktentwicklung darstellt. Zur Lösung dieses Problems wurden verschiedenste methodische Ansätze und Verfahren entwickelt, welche den Anwender durch den Problemlösungsprozess leiten. Die Zuverlässigkeitsabsicherung umfasst die Gesamtheit dieser Maßnahmen, um im Rahmen einer Produktentwicklung sicherzustellen, dass das Produkt zuverlässig ist. Dazu gehört neben der Zuverlässigkeitsanalyse auch die Zuverlässigkeitserprobung, die mithilfe realer Tests die getroffenen Annahmen überprüfen.

Methode

Das Wort *Methode* basiert auf den altgriechischen Wörtern *meta* und *hodos*, diese bedeuten *nach* und *Weg, Bewegung*. Damit steht *Methode* für *einem Weg folgen* und beschreibt eine festgelegte Vorgehensweise, die ausgeführt werden soll.

Auch der Begriff *Methode* wird in vielfältigen Disziplinen verwendet und beschreibt eine systematische Vorgehensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels. Diesen Aspekt greift die DIN EN ISO 8402 [DIN8402] ebenfalls auf, definiert aber den Begriff *Verfahren* als Synonym zu *Methode* wie folgt:

Ein Verfahren (procedure) ist eine festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit auszuführen.

Ein *Verfahren* kann also synonym zu *Methode* verwendet werden. Wichtiger Gesichtspunkt ist jedenfalls die systematisierte Vorgehensweise im Gegensatz zu einer intuitiven, teilweise zufälligen Vorgehensweise. Diese Art von Vorgehensweise hat ebenfalls ihre Daseinsberechtigung. Wenn es aber darum geht, nachvollziehbar zu einer Erkenntnis oder einem Ergebnis zu gelangen, empfiehlt sich eine methodische Handlungsweise.

Im Kontext der Zuverlässigkeitsabsicherung hat eine Methode noch eine weitere Funktion. Da die Zuverlässigkeitsabsicherung darauf beruht, reale Objekte und Zusammenhänge mithilfe von Modellen handhabbar zu machen, wird in [Rak02] die Anwendung von Modellen speziell hervorgehoben: „Eine Methode ist eine geordnete, systematisierte Vorgehensweise für die Abbildung eines Objektes auf ein Modell“.

Modell

Sowohl in der Zuverlässigkeitsabsicherung als auch in allen anderen technischen und nichttechnischen Bereichen werden Modelle angewandt, um komplexe Zusammenhänge handhabbar zu machen. Zumeist wird versucht, reale Abläufe oder Zusammenhänge mithilfe eines Modells darzustellen. Nach [VDI2221] ist ein Modell daher definiert als: „Abstrahierte Darstellung eines Produkts (z. B. durch dessen Daten, Eigenschaften oder Gestalt)“.

Diese Definition orientiert sich sehr an technischen Modellen und ist daher für die Betrachtung von Methoden zu spezifisch. Daher wird dieser Arbeit die allgemeinere Definition der VDI 4001 [VDI4001] zugrunde gelegt:

Abbildung eines Objektes oder Prozesses in den für die jeweilige Betrachtung wichtigen oder interessierenden Merkmalen und Zusammenhängen.

Übertragen auf Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung sind Modelle die kleinsten unteilbaren Elemente eines Problemlösungsprozesses. Dabei helfen diese Modelle, menschliche Denk- oder Analysevorgänge abzubilden. Gleichzeitig führen diese die Entwickler zu einem Ergebnis oder stellen Informationen anschaulich dar. Eigenschaften und Aufbau von Modellen werden in Abschnitt 3.4 intensiver behandelt.

System

Die Systemtheorie bildet ein wichtiges Fundament dieser Arbeit. Sowohl Methoden und ihre Modelle als auch die zu betrachtenden technischen Produkte können als Systeme dargestellt werden. Dabei hilft der abstrakte Charakter eines Systems, unterschiedliche reale Gebilde zu beschreiben und zu strukturieren. International ist ein System nach [ISO9000] wie folgt definiert:

Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Elementen.

Nach [Hab et al. 02] bestehen Systeme aus Elementen, die wiederum Systeme darstellen können. Elemente in einem System stehen miteinander in Verbindung bzw. sind durch Beziehungen verbunden, siehe **Abbildung 2.1**. Die Systemgrenze ist prinzipiell beliebig wählbar und kann je nach Anwendungsfall variieren. Im Allge-

meinen sind Systeme als offene Systeme zu betrachten, da die Umgebung und darin enthaltene Umfeldsysteme einen Einfluss haben.

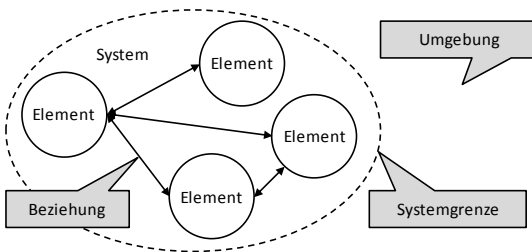


Abbildung 2.1: Grundbegriffe des Systemdenkens, vgl. [Hab et al. 02]

Die allgemeine Beschreibung im Systems Engineering deckt sich mit der etwas konkreteren Definition der Norm VDI 2221 [VDI2221], welche die Beziehungen des Systems mit seinem Umfeld hervorhebt:

Gesamtheit von der Umgebung abgrenzbarer (Systemgrenzen), geordneter und verknüpfter Elemente, die mit diesen durch technische Eingangs- und Ausgangsgrößen in Verbindung stehen.

Im Kontext der Zuverlässigkeitsabsicherung besitzt ein System nach [DIN60300 b]

- einen festgelegten Zweck, ausgedrückt durch geforderte Funktionen, sowie
- festgelegte Betriebs- und Einsatzbedingungen.

Modul

Der Begriff Modul wird vielfältig eingesetzt, daher gibt es auch viele Definitionen. Zu beachten ist der Unterschied zwischen dem *männlichen Modul* und dem *neutralen Modul*. Das *Modul* kommt vom lateinischen *modus* und bezeichnet dort einen Baustein, ein Bauelement oder allgemein gesprochen einen Teil eines größeren Systems. Dagegen bezeichnet *der Modul*, welcher vom lateinischen *modulus* abstammt, ein Maß oder mathematisches Verhältnis [Bae01], wie beispielsweise beim Elastizitätsmodul oder dem Modul von Zahnrädern.

In dieser Arbeit wird allerdings das *neutrale Modul* verwendet. Nach [Bae01] ist es in der Elektrotechnik ein „austauschbares, komplexes Teil eines Geräts oder einer Maschine, das eine geschlossene Funktionseinheit bildet“. In der Informatik ist ein Modul „eine sich aus mehreren Elementen zusammensetzende Einheit innerhalb eines Gesamtsystems, die jederzeit ausgetauscht werden kann“.

Dagegen ist die in [VDI4008b] gegebene Definition sehr abstrakt und betrifft hauptsächlich die Sicht auf ein Modul von außen: „Ein Modul ist ein Subsystem, das sich so verhält, als ob es nur eine Komponente wäre“.

Da die aufgeführten Definitionen für die Belange dieser Arbeit unzureichend sind, wird eine eigene Definition erstellt, die die wichtigsten Aspekte eines Moduls – egal ob technischer oder methodischer Natur – beschreibt:

Ein Modul ist eine abgeschlossene, austauschbare Einheit zur Realisierung einer Funktionalität, welche über definierte Schnittstellen mit der Umgebung interagiert. Seine volle Wirkung entfaltet es erst in Kombination mit anderen Modulen.

Information

Da in dieser Arbeit Modelle, Methoden und Module verwendet werden, um Informationen zu generieren oder zu bearbeiten, ist auch eine Definition des Begriffs *Information* wichtig. Die Informationstheorie sieht in Informationen den Transfer von Wissen und geht davon aus, dass Informationen nur punktuell entstehen, wenn Menschen Wissen benötigen. [Sei82] gibt daher für den umgangssprachlichen Gebrauch von Information folgende Definition:

Information ist eine [...] gegenwarts- und praxisbezogene Mitteilung über Dinge, die uns im Augenblick zu wissen wichtig sind.

Inhaltlich sind Informationen hingegen anders zu bewerten und zu unterscheiden. Umgangssprachlich werden häufig *Wissen*, *Information* und *Daten* gleichgesetzt; dabei gibt es zwischen diesen Begriffen eine klare Unterscheidung. Hierbei stellen Daten eine unbeschriebene Angabe wie bspw. *70* dar. Erst in der nächsten Ebene der Informationen wird den Daten ein Kontext zugewiesen, bspw. *70 km/h*. Durch Erfahrung entsteht schließlich Wissen, bspw. dass *70 km/h im Ort zu schnell* sind, vgl. [Hof et al. 10]. Es ist also in der Zuverlässigkeitsabsicherung wichtig, dass vorhandene Daten immer mit dem dazugehörigen Kontext weitergegeben oder gespeichert werden, da sie ansonsten nicht als hilfreiche Information weiterverwendet werden können.

2.2 Unterschiedliche Ansätze zur Optimierung der Zuverlässigkeit

In diesem Abschnitt werden verschiedene Herangehensweisen vorgestellt, wie die Zuverlässigkeit erhöht bzw. ihre ausreichende Höhe abgesichert werden kann. Wie bereits in Kapitel 1 erläutert wurde, sind die möglichen Stellschrauben und Zeitpunkte ihrer Betätigung sehr vielfältig.

Zur Absicherung der Zuverlässigkeit existieren sehr viele spezifische Zuverlässigkeitsanalysen. Unter anderem gibt es unterschiedliche Methoden für mechanische, elektronische und softwarebasierte Komponenten und Systeme oder für frühe und späte Entwicklungsphasen. **Abbildung 2.2** zeigt verschiedene quantitative und qualitative Methoden entlang des Produktlebenszyklus.

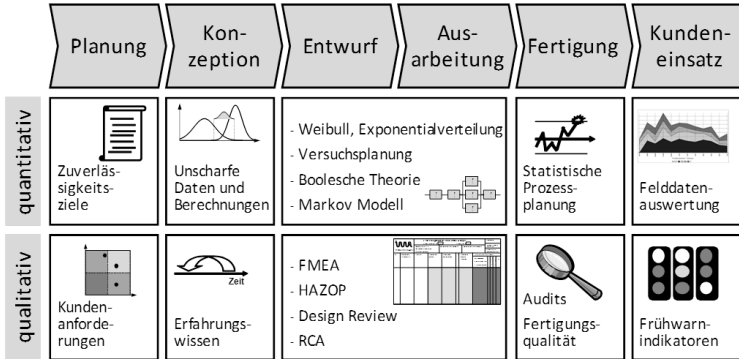


Abbildung 2.2: Übersicht quantitativer und qualitativer Zuverlässigkeitsanalysen in verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses, vgl. [Ber08]

2.2.1 Präventive und reaktive Methodenansätze

Um die Zuverlässigkeit eines Produktes zu erhöhen, gibt es aus zeitlicher Sicht grundsätzlich zwei verschiedene Herangehensweisen, die sich gegenseitig ergänzen können. Einerseits gibt es den präventiven Ansatz, welcher eine verbesserte Planung und Auslegung des Produktes anstrebt. Ziel hierbei ist, durch ein geschicktes Design bzw. durch eine gründlichere Produktentwicklung das Auftreten von Fehlern im Vorhinein zu vermeiden. Andererseits gibt es den reaktiven Ansatz, mit welchem versucht werden soll, so viele Fehler wie möglich vor der Auslieferung des Produktes an den Kunden zu finden [Str96].

Klar erkennbar sind hierbei die zeitlichen Rahmenbedingungen für die beiden Ansätze. Während die präventiven Methoden hauptsächlich in frühen Phasen der Produktentwicklung angewandt werden, kommen die reaktiven Methodenansätze erst spät im Produktentwicklungsprozess zum Einsatz. Mit dem Einsatzzeitpunkt verbunden sind sowohl der für Änderungen zur Verfügung stehende Spielraum [Ber et al. 09] als auch die durch Änderungen verursachten Kosten [Ses04]. Dass diese beiden Faktoren eindeutig für den präventiven Ansatz sprechen, zeigt **Abbildung 2.3**. Die weitere Reduktion von Prüfkosten sowie die Vermeidung hektischer Aktionen zur Fehlerabstellung sind Gründe für die Vorverlagerung.

Gegen präventive Zuverlässigkeitsabsicherung spricht hingegen, dass immer nur von Fehlermöglichkeiten gesprochen wird. Der Erfolg dieses Ansatzes hängt somit stark davon ab, wie gut die beteiligten Entwickler diese Fehlermöglichkeiten einschätzen können – denn nicht umsonst heißt es: „Nichts ist so verrückt wie die Realität“. Zudem ist der wirtschaftliche Nutzen dieser frühen Aktionen kaum messbar, da bei einem dadurch entdeckten Fehler nie bekannt ist, ob dieser nicht sowieso entdeckt worden wäre. Das hier beschriebene Vorgehen kann als *Design of Mind* bezeichnet werden und ist darauf angewiesen, ausreichend Informationen über ein

System zur Verfügung zu haben bzw. mit unzureichenden Informationen umgehen zu können.

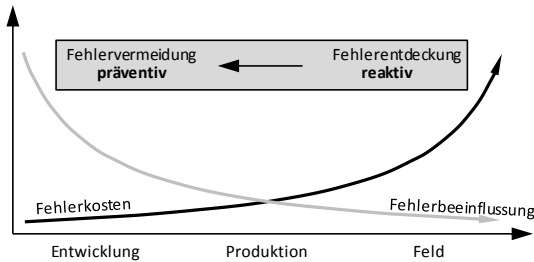


Abbildung 2.3: Zusammenhang von Fehlerkosten bzw. Fehlerbeeinflussung und Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, auch bekannt als Zehnerregel, vgl. [Lin09]

Bei der dem *Design of Experiments* entsprechenden reaktiven Zuverlässigkeitsabsicherung hingegen gibt es die Thematik der mangelnden Informationen nicht, denn die Fehler sind tatsächlich aufgetreten und aufgrund des späten Zeitpunkts im Produktentwicklungsprozess sind bereits genügend Informationen vorhanden. Hier kann für den konkreten Fall untersucht werden, wie Fehler dauerhaft abgestellt werden können.

Da reaktive Maßnahmen meist sehr kostenintensiv und von ihrer Wirkung her beschränkt sind, empfiehlt sich immer eine Kombination mit einer präventiven Herangehensweise. Diese darf ihrerseits wiederum nicht alleine eingesetzt werden, um Fehleinschätzungen der Entwickler oder übersehene Fehler mithilfe reaktiver Maßnahmen auffinden zu können.

2.2.2 Methodenansätze für unterschiedliche Domänen

Mechatronische Systeme bilden heute den Großteil der technischen Entwicklungen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie sowohl mechanische Komponenten als auch Elektronikbauteile und Softwarebestandteile enthalten. Daher ist es unerlässlich, bei der Zuverlässigkeitsanalyse alle drei Domänen – Mechanik, Elektronik, Software – zu analysieren. Für jede Domäne bestehen hierzu spezifische Methoden und Begrifflichkeiten, die für eine effiziente Zuverlässigkeitsanalyse vereint werden müssen.

Während in der Mechanik der Verschleiß als wichtigste Ausfallursache gilt, werden elektronische Komponenten hauptsächlich durch Alterungsvorgänge [O’C06] geschwächt. Bei Software hingegen entstehen Ausfälle dann, wenn inhärente, von Beginn an enthaltene Programmfehler zu einem unerwarteten Ereignis führen. Allen Domänen liegt die Tatsache zugrunde, dass mit steigender Benutzungszeit Fehler immer wahrscheinlicher werden. Das bedeutet, dass zumindest aus abstrahierter Perspektive die Zuverlässigkeit aller Domänen ähnlich handhabbar ist. Wie die Zu-

verlässigkeit in den einzelnen Domänen analysiert und sichergestellt wird, ist im Folgenden dargestellt.

Mechanik

Mechanische Bauteile fallen meistens aufgrund von Verschleiß- oder Korrosionserscheinungen aus, die mithilfe chemischer oder physikalischer Gesetze erklärt werden können. Eine ebenfalls wichtige Ausfallursache sind Fertigungsfehler, die als ursprüngliche Qualitätsprobleme auch die Lebensdauer beeinträchtigen können, vgl. [Ber08]. Alterung ist bei metallischen oder keramischen Bauteilen weniger wichtig, jedoch bspw. bei Kunststoffen eine ernstzunehmende Größe.

Angewandt auf technische Systeme geben die Materialwissenschaft und die Mechanik Auskunft über das zu erwartende Verhalten des Systems. Die Kenntnis dieser Disziplinen ist fundamental wichtig für die beanspruchungsgerechte Auslegung mechanischer Bauteile. Daraus entstanden sind sowohl die *Stress-Strength-Interference* zur Beschreibung des Zusammenhangs aus Belastung und Belastbarkeit [O'C06] als auch das *Wöhlermodell* [Hai02] zur Beschreibung der belastungsabhängigen Bauteilermüdung. Erstere wird in Abschnitt 3.3.1 nochmals aufgegriffen.

Ausfälle aufgrund Verschleißes sind aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht weniger problematisch, da diese sich meist durch einen sinkenden Wirkungsgrad, Geräusche oder größere Freiheitsgrade vorankündigen, [Bir10]. Dichtungen bspw. zeigen eine zunehmende Leckage oder Wälzlager erzeugen ein stärkeres Geräusch.

Dieser Vorteil wird allerdings von einem weit größeren Nachteil überlagert: Da sich im Allgemeinen mechanische Komponenten durch nicht zu vernachlässigende Massen und Volumina auszeichnen, werden diese aus Kosten-, Gewichts- und Platzgründen selten bis gar nicht redundant ausgelegt, sodass bei einem Einzelausfall in der Regel das gesamte System ausfällt, [Jäg07].

Elektronik

Ausfälle in der Elektronik basieren im Allgemeinen ebenfalls auf physikalischen und chemischen Abläufen, die die elektrischen Leitungseigenschaften beeinflussen. Korrosion und Versprödung sind die Hauptursachen für elektronische Ausfälle. Dabei wird unterschieden in Unterbrechung, Kurzschluss, Drift und Funktionsausfall, [Bir10].

Für temperaturabhängige Alterungsvorgänge gibt es mit dem *Arrhenius-Modell* [Eig03] ein sehr gutes Instrument zur Prognose späterer Ausfälle bzw. zur gerafften Lebensdauererprobung bei höheren Temperaturen. Unerwartete Ausfälle sind üblicherweise auf Fehler im Design oder in der Fertigung zurückzuführen und bieten damit ebenso wie bei mechanischen Bauteilen die Möglichkeit, sowohl präventiv als auch reaktiv entdeckt zu werden.

Da ein Großteil der elektronischen Produkte nur eine kurze Lebensdauer von wenigen Jahren besitzt [Hna03], wurde die Zuverlässigkeit in der Vergangenheit nicht ausreichend betrachtet. Deshalb sind Ausfälle mechatronischer Systeme häufig auf Elektronikausfälle zurückzuführen.

Diese Ausfälle treten meist zufällig und für den Benutzer ohne Vorwarnung auf [Pau97], was aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht besonders kritisch ist. Dagegen kann aber im Gegensatz zur Mechanik leichter mithilfe redundanter Strukturen vorgegangen werden.

Das Ausfallverhalten jedes elektronischen Bauteils für sich kann mithilfe der *Badewannenkurve*, siehe Abschnitt 2.4.2, beschrieben werden. Aufgrund der bei elektronischen Systemen üblicherweise großen Anzahl unterschiedlicher Komponenten und der kurzen Lebensdauer ergibt sich für das gesamte System ein konstantes Ausfallverhalten, [Eig03]. Daher kommen bei der Auslegung der Systemzuverlässigkeit häufig Ausfallratenkataloge zum Einsatz, wie beispielsweise das Military Handbook MIL-HDBK-217 [MIL95] oder die in Deutschland verbreitete Siemens-Norm SN 29500 [SN29500]. Darin sind Angaben über zu erwartende konstante Ausfallraten einzelner Komponenten enthalten, die mithilfe der Regeln zur Systemberechnung in Abschnitt 2.4.3 zur Systemausfallrate kombiniert werden können.

Software

Im Gegensatz zu den bisher behandelten Domänen Mechanik und Elektronik unterliegt die Software keinen chemischen oder physikalischen Einflüssen und zeigt daher auch keine verschleiß- oder alterungsbedingten Ausfälle. Dennoch ist die Softwarezuverlässigkeit ein wichtiger Faktor, da auch Softwarekomponenten häufig zu Ausfällen mechatronischer Systeme führen. [Sho84] definiert die Softwarezuverlässigkeit analog zur Zuverlässigkeit in der Mechanik:

Software reliability is the probability that a given software system operates for some period without software error, on the machine for which it was designed, given that it is used within the design limits.

Ein aufsehenerregendes Beispiel für einen Software-Ausfall war der durch einen Fehler in der Geschwindigkeitsberechnung verursachte Absturz der Ariane-5-Trägerrakete 1996 [Dow97].

Da die zu mangelnder Zuverlässigkeit führenden Fehler bereits vor Inbetriebnahme durch menschliches Versagen entstanden sind, wird hierbei von inhärenten Fehlern gesprochen [LaGö99]. Daher ist nicht der Zeitpunkt der Entstehung des Fehlers, sondern der Aktivierung dieses Fehlers relevant für Zuverlässigkeitsbetrachtungen. Diese bestimmten Anwendungskonstellationen sind jedoch rein zufällig und nicht vorhersehbar – das Risiko steigt aber mit der Benutzungshäufigkeit. Diese ergibt sich aus dem Betriebsprofil der Software, welches das Nutzungsverhalten des Anwenders beschreibt. Die Zuverlässigkeit wird folglich nicht in Abhängigkeit der Zeit, sondern als relative Häufigkeit erfolgreicher Aufrufe dargestellt:

$$R_{\text{Software}} = \frac{\text{Anzahl korrekter Aufrufe}}{\text{Anzahl aller Aufrufe}} \quad (2.1)$$

Die Absicherung der Softwarezuverlässigkeit geschieht aufgrund der genannten Besonderheiten anders als in den bisher beschriebenen Domänen. Es wird einerseits versucht, durch strikt umgesetzte Vorgehensmodelle, Programmierparadigmen und

-stile die Fehlerentstehung einzudämmen und/oder andererseits durch fehlertolerante Programmierung Fehler im Code zuzulassen [Bal09a].

Zur Bewertung der Softwarezuverlässigkeit existiert ebenfalls eine Vielzahl unterschiedlicher Zuverlässigkeitsmodelle. Präventive Zuverlässigkeitsabsicherung in der Softwareentwicklung konzentriert sich auf die Spezifikations- und Implementierungsphase. Dabei wird die Zuverlässigkeit schon während der Implementierung durch eine Bestimmung von Komplexitätsmaßen des Programmcodes selbst oder des Reifegrads des Softwareentwicklungsprozesses abgeschätzt. Für Letzteres existieren mit den Ansätzen *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) und *Software Process Improvement and Capability Determination* (SPICE) zwei weit verbreitete Hilfsmittel. Dieses Vorgehen hat sich jedoch nicht vollständig durchgesetzt, [Wed11].

Eine weitere Möglichkeit stellen die vielfältigen Zuverlässigkeitsmodelle dar, die davon ausgehen, dass jede Software zu Beginn eine bestimmte Anzahl an Fehlern enthält, welche nach und nach in der Software-Testphase entdeckt werden. Angewandt auf die Theorie des Zuverlässigkeitswachstums sind über zeitabhängige Modelle Prognosen der zu erwartenden Zuverlässigkeit möglich. Hervorzuheben sind hierbei als bekannteste Modelle das *Shooman-Modell*, das *Jelinski-Moranda-Modell* oder das *Poisson-Modell* [Mus et al. 90].

2.2.3 Quantitative und qualitative Methodenansätze

Neben den Ansätzen für verschiedene Domänen und unterschiedliche Produktentwicklungsphasen gibt es noch die Unterscheidung zwischen quantitativen und qualitativen Analysemethoden. Um besser verstehen zu können, worin die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede zwischen diesen beiden Ansätzen liegen, sollen aufbauend auf [Kop et al. 11a] zuerst deren begriffliche Bedeutung geklärt und nach einer Darstellung der Vorteile beider Ansätze auf deren Unterscheidung näher eingegangen werden.

Das Wort *quantitativ* stammt vom lateinischen *quantitas* für *Menge* oder *Größe* und beschreibt Objekte und deren Eigenschaften mengenmäßig. Das zeigt, dass *quantitativ* keinen vollständigen Gegensatz zu *quantitativ* darstellt. Denn *Qualität* hat ebenfalls einen lateinischen Ursprung und bezeichnet eine *Eigenschaft*. Also beschreibt eine qualitative Angabe ganz allgemein die Eigenschaft eines Objekts.

Oftmals wird *quantitativ* als Antonym zu *qualitativ* dargestellt. Das ist offensichtlich falsch. Tatsächlich beschreibt der quantitative Wert „0,95“ (zusammen mit der Dimension „%“) in **Abbildung 2.4** die Eigenschaft *Systemzuverlässigkeit nach 1000 Stunden*, $R(1000h)$. Das macht deutlich, dass die *quantitative* Beschreibung eines Objekts immer auch eine *Qualität* bzw. Eigenschaft des Objekts enthält.

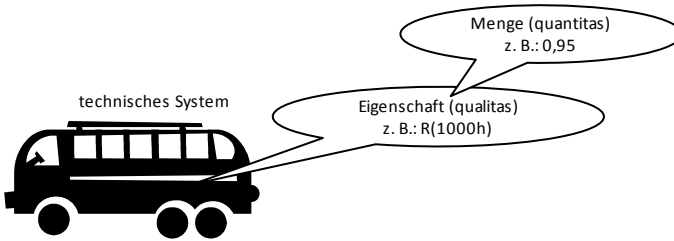


Abbildung 2.4: Zusammenhang zwischen Qualität und Quantität, vgl. [Kop et al. 11a]

Eigenschaften quantitativer Methoden

Quantitative Vorgehensweisen zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass alle Arbeitsschritte auf statistischen beziehungsweise mathematischen Zusammenhängen messbarer Eigenschaften basieren. Die komplexe Realität kann dadurch auf einfacher handhabbare mathematisch beschreibbare Größen reduziert werden. Zusätzlich führt die formalisierte Vorgehensweise zu objektiveren Ergebnissen, indem der Einfluss der beteiligten Personen reduziert wird. Dies kann aber auch zu Scheinobjektivität führen. Dennoch führt die nomothetische – d.h. analytische – Vorgehensweise zu einer verbesserten Reproduzierbarkeit [Bog09].

Eigenschaften qualitativer Methoden

Qualitative Vorgehensweisen beschreiben Attribute, d.h. Eigenschaften des betrachteten Systems. Die Ergebnisse werden stark von der individuellen und subjektiven Meinung der beteiligten Personen geprägt, was die Repräsentativität und Objektivität beeinträchtigen kann. Zusätzlich reduziert sich die Reproduzierbarkeit und Standardisierung der Ergebnisse. Qualitative Methoden ermöglichen aber durch ihre ideografische – d.h. erfahrungsbasierte – Vorgehensweise eine umfassendere und vollständigere Betrachtung eines komplexen Systems [Bog09].

Differenzierung der Ansätze

Um zu verstehen, was eine quantitative oder eine qualitative Methode ausmacht, wird zuerst geklärt, worin die Unterschiede der beiden Ansätze liegen. Mangels in der Literatur auffindbarer brauchbarer Differenzierung wird eine eigene Unterscheidung vorgeschlagen. Die Analyse der Wortherkunft zeigt, dass Zuverlässigkeitsmethoden nicht in zwei getrennte Gruppen aufgeteilt werden können.

Aus formaler Sicht sind quantitative Methoden ein Spezialfall der qualitativen Methoden, siehe **Abbildung 2.5**. Denn qualitative Methoden beschreiben Eigenschaften eines Systems oder Objekts. Das machen auch quantitative Methoden – mit der Besonderheit, dass die dort betrachteten Eigenschaften quantitativer Natur sind bzw. die Eigenschaften mengenmäßig beschrieben werden. Dies sind stochastische Größen wie beispielsweise die Ausfallrate oder die Ausfallwahrscheinlichkeit, aber auch Größen wie der Redundanzgrad eines Systems.

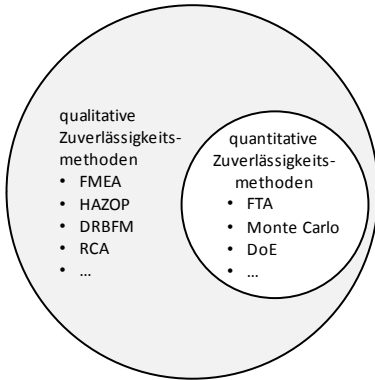


Abbildung 2.5: Quantitative Zuverlässigkeitsmethoden als Untergruppe der qualitativen Zuverlässigkeitsmethoden, vgl. [Kop et al. 11a]

Letztendlich bedeutet dies, dass qualitative Methoden die Frage „*in welcher Art?*“, quantitative Methoden die Frage „*wie oft?*“ beantworten. Dabei zeigt sich, dass jeder Ansatz seine speziellen Vorteile hat, welche bei einem verknüpften Methodenansatz genutzt werden könnten.

2.3 Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung

Wie bereits eingangs beschrieben ist die Absicherung und Erhöhung der Produktzuverlässigkeit ein wichtiger Bestandteil der Produktentwicklung, da mangelnde Zuverlässigkeit später im Feldeinsatz sowohl kostenintensiv als auch imageschädigend sein kann und somit sehr nachteilig für ein Unternehmen. Folglich bestand und besteht in der Industrie ein hoher Bedarf an Vorgehensweisen zur wirtschaftlichen Sicherstellung einer ausreichenden Zuverlässigkeit.

Aufgrund ihres systematischen und zielorientierten Charakters haben sich hierbei Methoden ganz besonders etabliert. Mit ihnen ist es möglich, durch striktes Befolgen der Handlungsleitfäden zu einem vernünftigen Ergebnis zu kommen. Das heißt, dass Methoden die Qualität von Arbeitsergebnissen zu einem gewissen Maß von Intuition und Talent einzelner Personen entkoppeln können. Daher ist ihr Einsatz vor allem für größere Unternehmen unerlässlich.

Aufgrund der facettenreichen Zuverlässigkeitsabsicherung und dem hohen Bedarf an effizienzsteigernden Maßnahmen wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlichster Methoden entwickelt. Nahezu jede Fragestellung auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsabsicherung hat eine eigene Methode zur Lösungsfindung erhalten. Um eine Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden zu bekommen, empfehlen sich die umfangreichsten deutschsprachigen Normen VDI 4003 [VDI4003] und

DIN EN 60300-3-1 [DIN60300b]. Die darin enthaltenen Methoden sind in **Tabelle 2.1** und **Tabelle 2.2** aufgeführt.

Tabelle 2.1: Methoden und Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse aus VDI 4003, [VDI4003]

Systemanalyse	Importanzanalyse
Funktionsanalyse	Unsicherheitsanalyse
Gefährdungsanalyse (HAZOP), inkl. Functional Hazard Analysis (FHA) u. Preliminary Hazard Analysis (PHA)	Sensitivitätsanalyse Bayes'sche Verfahren
Ausfallarten- und Auswirkungsanalyse (FMEA, FMECA)	Softwarezuverlässigkeitsanalyse Instandhaltbarkeitsanalyse
Fehlerbaumanalyse (FTA)	Quality Function Deployment (QFD)
Zonensicherheitsanalyse	Sneak Circuit Analysis
Personal-Zuverlässigkeitsanalyse	RCM/MSG-3 (präventive Instandhaltung)
Blockdiagramm	Risikobasierte Inspektion
Zustandsanalysen/Markov-Modelle	Risikoanalyse
Monte-Carlo-Simulation	Statistische Prozessregelung (SPC)
Erneuerungsmodelle	Missionszuverlässigkeitsanalyse
Petri-Netze	Sicherheitsanalyse
Verfügbarkeitsanalyse	Ereignisablaufanalyse

Auch die Fachliteratur hat sich intensiv mit den verschiedenen Methoden zur Zuverlässigkeit befasst und dabei unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. In der deutschsprachigen Literatur sind Bertsche [Ber08] mit seinem Fokus auf die Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie und mechanische Systeme sowie Meyna [Mey10] mit dem Schwerpunkt stochastischer anstatt deterministischer Vorgehensweisen, z. B. Fuzzy-Modellierung, Monte-Carlo-Simulation oder neuronale Netze hervorzuheben.

International zu nennen sind unter anderem Birolini [Bir10] mit einem starken Fokus auf Instandhaltung und reparierbare Systeme, O'Connor [O'C06] für die Zuverlässigkeitsabsicherung mechatronischer Systeme, Yang [Yan07] mit dem Schwerpunkt der Zuverlässigkeitsvalidierung, Pham [Pha03] für mathematische Probleme der Zuverlässigkeitsanalyse und -bestimmung sowie Rakowsky, Kececioglu, Rausand und Dhillon [Rak02, Kec05, RaHø04, Dhi07].

Tabelle 2.2: Methoden und Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse nach DIN EN 60300, [DIN60300b]

Vorhersage der Ausfallrate	Fehlzustandsart- und –auswirkungsanalyse (FMEA)
Fehlzustandsbaumanalyse	Statistische Zuverlässigkeitsverfahren
Ereignisbaumanalyse	Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit
Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse	Beanspruchungsanalyse
Markovanalyse	Wahrheitstabelle
Petri-Netz-Analyse	Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung (HAZOP)

Eine besondere Stellung besitzt die Qualitätssicherungsinitiative *Design for Six Sigma* (DfSS) [YaEl03, ElH05]. Die in den USA entstandene Vorgehensweise hat die Zielsetzung, mithilfe von Methoden, Werkzeugen und Messungen sowohl Prozesse als auch Produkte auf das sog. 6σ -Niveau zu bringen. Dazu wurde der Entwicklungszyklus *Identify, Define, Optimize, Validate* (IDOV) erstellt, der wiederum bereits vorhandene Methoden anwendet. Dieser wird in Abschnitt 3.3.2 näher betrachtet.

Aus dieser großen Menge an verfügbaren Methoden werden in den folgenden Abschnitten exemplarisch einige quantitative und qualitative Methoden ausgewählt und näher beleuchtet, da sich deren Vorgehensweise grundlegend unterscheidet.

2.4 Quantitative Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse

Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert wurde, dienen quantitative Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse einer mengenmäßigen Beschreibung des erwarteten oder beobachteten Ausfallverhaltens technischer Systeme. Hierzu werden meist statistische Maßzahlen beziffert, die einen spezifischen Aspekt der Produktzuverlässigkeit beschreiben. Üblicherweise handelt es sich um die quantitative Beschreibung der Produktlebensdauer, welche als Erwartungswert der Ausfallwahrscheinlichkeit modelliert wird. Im Folgenden werden sowohl die mathematischen Grundlagen als auch die darauf basierenden Lebensdauerverteilungen erläutert. Im Anschluss daran wird die konkrete Anwendung in der Zuverlässigkeitstechnik anhand mehrerer Methoden aufgezeigt.

2.4.1 Grundlagen der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse

Da das Ausfallverhalten bzw. die Zuverlässigkeit von Systemen im Allgemeinen sehr stark streut, geschieht die Analyse mithilfe von Methoden der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie, die im Folgenden erläutert werden. Ausführlichere Erklärungen und die Grundlage für die Ausführungen in dieser Arbeit liefert beispielsweise [Ber08].

Um das Ausfallverhalten eines Systems zu ermitteln, werden üblicherweise entweder Lebensdauerversuche durchgeführt oder Ausfälle beim Kunden – sogenannte Feldausfälle – dokumentiert und ausgewertet. Werden die beobachteten, zufällig verteilten Ausfallzeiten eines Systems in Klassen eingeteilt und in einem Histogramm dargestellt, kann bereits die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ als Verbindung der Balkenoberkanten abgelesen werden, siehe **Abbildung 2.6**.

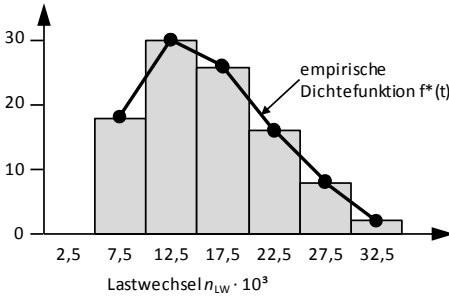


Abbildung 2.6: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ nach [Ber08]

Wird die Anzahl der beobachteten Ausfälle kontinuierlich erhöht und die Klassenbreite immer weiter reduziert, ergibt sich für infinitesimal breite Klassengrenzen die tatsächliche Dichtefunktion $f(t)$. Bei kleinen Stückzahlen, die in der Praxis häufig vorkommen, kann die empirische Dichtefunktion stark von der tatsächlichen Dichtefunktion abweichen. Daher wird versucht, diejenige bekannte und mathematisch definierte Dichtefunktion zu finden, die dem beobachteten Ausfallverhalten zugrunde liegt. Verschiedene allgemein gebräuchliche Dichtefunktionen werden im folgenden Abschnitt 2.4.2 vorgestellt.

Mithilfe des Histogramms ist zwar die Ausfallverteilung über der Zeit bekannt, viel interessanter ist jedoch die Angabe, zu welchem Zeitpunkt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ausfall zu erwarten ist. Dies kann mit dem Histogramm der Summenhäufigkeiten erreicht werden. Dazu wurden in **Abbildung 2.7** die Ausfallzeiten pro Klasse aufsummiert.

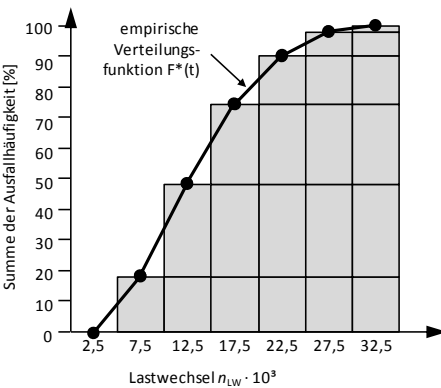


Abbildung 2.7: Histogramm der Summenhäufigkeiten und empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$ nach [Ber08]

Die Verbindung der Balkenoberkanten stellt hierbei die empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$ für die Ausfallwahrscheinlichkeit dar. Diese beginnt immer bei $F^*(0) = 0$ und endet bei $F^*(\infty) = 1$, wenn alle Teile ausgefallen sind. Die tatsächliche Verteilungsfunktion $F(t)$ ergibt sich ebenso durch die Erweiterung der Prüfteile und Reduktion der Klassenbreite. Die Verteilungsfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ stellt dabei das Integral der Dichtefunktion $f(t)$ dar:

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

Da alle Systeme zu jeder Zeit entweder intakt oder ausgefallen sind, ist die Überlebenswahrscheinlichkeit die Differenz zwischen 100 Prozent der Systeme und der Ausfallwahrscheinlichkeit:

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

Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ wird auch als Zuverlässigkeit eines Systems zum Zeitpunkt t bezeichnet. Diese beträgt – entgegengesetzt zur Ausfallwahrscheinlichkeit – zu Beginn $R(0) = 1$, wenn alle Systeme intakt sind und endet bei $R(\infty) = 0$, wenn alle Systeme ausgefallen sind.

In der Zuverlässigkeitstechnik wird neben der Dichtefunktion und der Zuverlässigkeit die Ausfallrate $\lambda(t)$ verwendet, um das Verhältnis der Anzahl ausgefallener Systeme zur Anzahl intakter Systeme zum Zeitpunkt t_x anzugeben:

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

Abbildung 2.8 zeigt die drei Größen Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t_x)$, Dichtefunktion $f(t_x)$ und Ausfallrate $\lambda(t)$. Bei der Ausfallrate ist noch zu beachten, dass diese gegen Unendlich strebt, wenn die Anzahl intakter Systeme gegen Null geht. Jedoch ist bei den meisten Analysen nur der vordere Bereich von Interesse, da dort die unerwünschten vorzeitigen Ausfälle stattfinden.

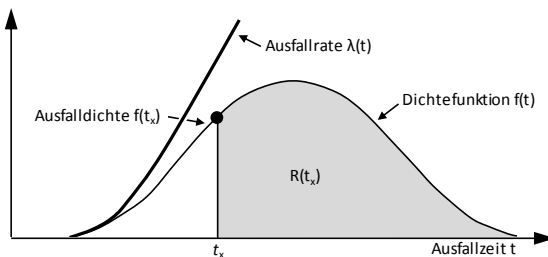


Abbildung 2.8: Ermittlung der Ausfallrate $\lambda(t)$ aus Dichtefunktion $f(t)$ und Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ nach [Ber08]

2.4.2 Statistische Verteilungen

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erläutert wurde, ist es üblich, eine begrenzte Anzahl Lebensdauertests durchzuführen und die gesuchte Lebensdauerverteilung anhand vorhandener Verteilungsfunktionen aus der Literatur zu approximieren. Da das Ausfallverhalten der meisten Systeme ähnlich ist bzw. eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Typen existieren, haben sich einige wenige Verteilungsfunktionen in der Zuverlässigkeitstechnik etabliert. Im Folgenden werden die wichtigsten Verteilungsfunktionen vorgestellt: die *Normalverteilung* als bekannteste, die *Exponentialverteilung* als einfachste und die *Weibullverteilung* als variabelste. Des Weiteren finden die *Lognormal-, Gamma-, Hjorth-, Erlang- und SB-Johnson-Verteilung* sowie andere, weniger bekannte Verteilungen Verwendung in der Zuverlässigkeitstechnik. Weiterführende Informationen dazu sind in [Ber08] gegeben.

Normalverteilung

Die Normalverteilung mit der Glockenkurve als Dichtefunktion ist zwar die bekannteste Verteilung, findet aber in der Zuverlässigkeitstechnik nur selten Verwendung. Der Grund dafür ist, dass die Normalverteilung ein zum Mittelwert zeitlich symmetrisches Ausfallverhalten repräsentiert, welches bei technischen Systemen sehr ungewöhnlich ist. Nach [VoBu04] ist bei der Normalverteilung die Überlebenswahrscheinlichkeit definiert als

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau. \quad (2.5)$$

Zur Anpassung der Verteilung kann nur der Erwartungswert μ und die Breite der Streuung σ verändert werden, nicht aber die prinzipielle Form des Ausfallverhaltens.

Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist die am einfachsten anwendbare und daher am weitesten verbreitete Verteilungsfunktion für Lebensdauern, da sie nur von einem Parameter abhängt, der konstanten Ausfallrate λ . Nach der Exponentialverteilung ist die Überlebenswahrscheinlichkeit definiert als

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.6)$$

Die konstante Ausfallrate wird üblicherweise bei elektronischen Systemen angewandt [VoBu04], entspricht aber auch gut dem Ausfallverhalten mechanischer Systeme mit stark unterschiedlicher Benutzungsintensität. Die konstante Ausfallrate entspricht dabei zufälligen Ausfällen, die jederzeit mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintreten können. Zudem entspricht sie dem Kehrwert des Erwartungswerts der Lebensdauer.

Weibullverteilung

Die Weibullverteilung wurde von Waloddi Weibull (1887–1979) [Wei51] entwickelt. Diese Verteilungsfunktion für Lebensdauern ist sehr flexibel und bildet das im Maschinenbau übliche Ausfallverhalten in der Regel gut ab. Die vollständige Verteilung besitzt drei Parameter zur Anpassung der Funktion, sodass die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ definiert ist als

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (2.7)$$

mit Formparameter b , charakteristischer Lebensdauer T und ausfallfreier Zeit t_0 . Die Weibullverteilung wird aber in vielen Fällen nur mit zwei Parametern angewandt, da einerseits die Funktion ohne ausfallfreie Zeit t_0 leichter handhabbar und andererseits der Existenznachweis einer ausfallfreien Zeit aufwändig bzw. gar nicht möglich ist oder schlichtweg keine ausfallfreie Zeit vorhanden ist.

Die große Flexibilität beruht vor allem auf dem Formparameter b , der für verschiedene Wertebereiche unterschiedliche Stereotype des Ausfallverhaltens darstellen kann, siehe **Abbildung 2.9**:

- Bei $b < 1$ ergibt sich eine monoton fallende Ausfallrate, die typisch ist für Frühausfälle.
 - Bei $b = 1$ ergibt sich eine konstante Ausfallrate, die identisch ist mit der Exponentialverteilung und wie bereits erläutert zufällig auftretende Ausfälle darstellt.
 - Bei $b > 1$ ergibt sich eine monoton steigende Ausfallrate, die typisch ist für am Lebensdauerende auftretende Verschleiß- oder Ermüdungsausfälle.
- Für $b = 3,5$ ähnelt der Verlauf der Normalverteilung.

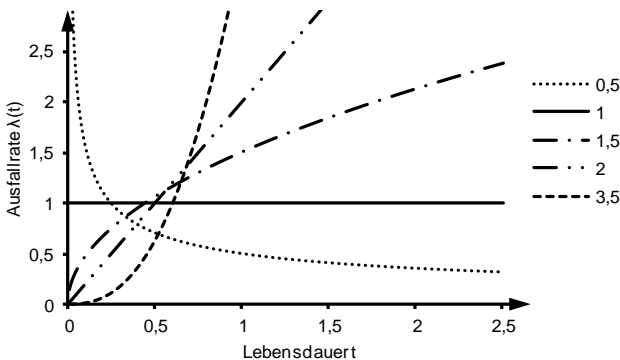


Abbildung 2.9: Ausfallratenverläufe der zweiparametrischen Weibullverteilung mit unterschiedlichem Formparameter b

Üblicherweise durchläuft jedes technische System alle drei Bereiche. Der sich dann ergebende kombinierte Verlauf der Ausfallrate wird umgangssprachlich auch als

Badewannenkurve bezeichnet, da der zum Anfang und zum Ende steil ansteigende, in der Mitte aber flache Verlauf der Form einer Badewanne ähnelt.

Zu den universellen Einsatzmöglichkeiten kommt bei der Weibullverteilung noch hinzu, dass die Kurven der Ausfallwahrscheinlichkeit in einem doppeltlogarithmischen Diagramm – dem Weibullpapier – als Geraden mit der Steigung b dargestellt werden können und damit auch ohne EDV-Unterstützung einfach handhabbar sind. Dies gilt jedoch nicht für die dreiparametrische Weibullverteilungsfunktion, da sie auf dem Weibullpapier keine Gerade, sondern einen Kurvenverlauf besitzt.

2.4.3 Systemberechnungen nach Boole

Nachdem im vorherigen Abschnitt erklärt wurde, wie die Zuverlässigkeit einer einzelnen Komponente bestimmt und modelliert werden kann, wird nun der Frage nachgegangen, wie die Zuverlässigkeit ganzer Systeme ermittelt werden kann. Dabei hilft die Boolesche Theorie [Boo54, Boo01], ausgehend von den Zuverlässigkeiten der einzelnen Komponenten und der Systemarchitektur auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems schließen zu können.

Angewandt werden darf die Boolesche Theorie nach [Ber89] und [VDI4008 a] nur mit folgenden Einschränkungen:

- Das System ist *nichtreparierbar*
- Jede Systemkomponente besitzt nur die zwei Zustände *funktionsfähig* oder *ausgefallen*
- Die Systemelemente sind *unabhängig*
- Die *Anzahl* der Systemelemente ist *endlich*

Zur Veranschaulichung der mathematischen Zusammenhänge wird im Allgemeinen auf Zuverlässigkeitsblockschaltbilder zurückgegriffen, siehe dazu auch DIN 61078 [DIN61078]. Diese Zuverlässigkeitsblockschaltbilder können veranschaulichen, wie sich der Ausfall einer Komponente auf den Ausfall des Gesamtsystems auswirkt. Dabei zeigt sich, dass sämtliche Konstellationen auf zwei Grundanordnungen bzw. ihre Mischformen reduziert werden können, siehe **Abbildung 2.10**. Das ist zum einen die Parallelanordnung und zum anderen die Serienanordnung. Die Parallelanordnung beschreibt den Aufbau einer redundanten Struktur, bei der erst bei einem Ausfall aller Komponenten die Funktion des Gesamtsystems betroffen ist. Die in der Praxis deutlich häufiger anzutreffende Anordnung ist die Serienschaltung, die wie bei einer Kette auf die Funktionsfähigkeit jeder einzelnen Komponente angewiesen ist, um die Funktion des Gesamtsystems gewährleisten zu können.

Diese Anordnungen können mithilfe der Booleschen Theorie mathematisch beschrieben werden. Dabei ergibt sich die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems $R_S(t)$ einer Parallelanordnung wie folgt:

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_n(t)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (2.8)$$

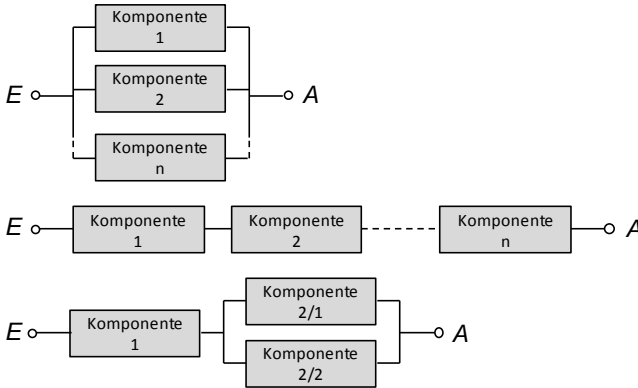


Abbildung 2.10: Parallel-, Serien- und gemischte Zuverlässigkeitsstruktur

Die Gesamtzuverlässigkeit $R_S(t)$ einer Serienanordnung ermittelt sich nach folgendem Ausdruck, wobei die Systemzuverlässigkeit schlechter ist als die schlechteste Komponentenzuverlässigkeit:

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (2.9)$$

Mischstrukturen können mithilfe von Ersatzzuverlässigkeitswerten einzelner Strukturen immer in diese beiden genannten Anordnungen überführt werden. Für das Beispiel in **Abbildung 2.10** bedeutet dies, dass die beiden redundanten Komponenten 2/1 und 2/2 mithilfe der Formel für Parallelsysteme zu einem Ersatzwert zusammengefasst werden und dieser wiederum gemeinsam mit Komponente 1 als Seriensystemstruktur behandelt wird. Somit ist auch für komplexere Systeme eine Ermittlung der Systemzuverlässigkeitsfunktion möglich.

2.4.4 Fehlzustandsbaumanalyse

Ein Fehlzustandsbaum ist neben dem Zuverlässigkeitsblockschaltbild eine weitere grafische Darstellung der Booleschen Theorie und hilft dabei, Fehlzustände und vor allem ihre Abhängigkeiten und Wechselwirkungen visuell aufzubereiten und die mathematische Berechnungsformel für die Gesamtsystemzuverlässigkeit aufzustellen. Geläufig ist hierbei die Vorgehensweise nach [Sch99] und nach den Normen DIN EN 61025 [DIN61025] sowie IEC 61025 [IEC61025]. Teilweise wird auch noch die alte deutsche Norm zur Fehlerbaumanalyse DIN 25424 [DIN25424] angewandt.

Während die qualitative Betrachtung der Zusammenhänge von Fehlzuständen eine häufig genutzte Zwischenstufe des Fehlzustandsbaumes darstellt, ist die eigentliche Zielsetzung mathematischer, quantitativer Natur. Mithilfe der Fehlzustandsbaumanalyse wird ein vollständiges System, z. B. ein Produkt oder Prozess, modelliert. Falls Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Grundereignisse angegeben

werden können, wird mithilfe der Baumstruktur die Eintrittswahrscheinlichkeit des Hauptereignisses und damit auch die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls ermittelt [Bar et al. 82].

Die Fehlzustandsbaumanalyse gehört damit zu den deduktiven Methoden, die ausgehend von einem unerwünschten Top-Ereignis untersuchen, welche Ursachen auf der darunterliegenden Systemebene zu diesem unerwünschten Top-Ereignis führen können. Angewandt werden sie sowohl für mechanische, elektronische als auch für Softwaresysteme. Besonders häufig wird die Fehlzustandsbaumanalyse in der Sicherheitstechnik angewandt, wo der Nachweis einer adäquaten Systemausfallrate von zentraler Bedeutung ist [Ves81]. Mit den gestiegenen Zuverlässigkeitsanforderungen und der höheren Komplexität hält der Fehlzustandsbaum verstärkt Einzug in den klassischen Maschinenbau-Branchen.

Ein Auszug eines Fehlzustandsbaums ist in **Abbildung 2.11** gegeben. Dabei ist der nicht bedarfsgerecht beleuchtete Raum das unerwünschte Top-Ereignis, das beispielsweise nur auftritt, wenn sowohl Glühbirne 1 als auch Glühbirne 2 ausfallen. Mit den für die Grundereignisse gegebenen Ausfallwahrscheinlichkeiten kann nun die Eintrittswahrscheinlichkeit des Top-Ereignisses berechnet werden.

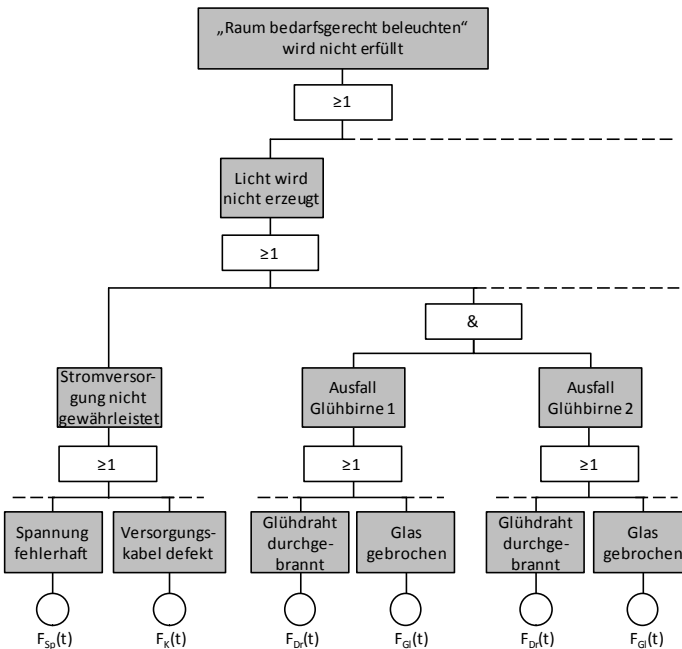


Abbildung 2.11: Ausschnitt eines Fehlzustandsbaums nach DIN EN 61025

2.4.5 Erprobungsplanung

Die Planung von Zuverlässigkeitstests ist eine ebenfalls wichtige Disziplin innerhalb der Zuverlässigkeitsabsicherung, da mit der Durchführung dieser Tests immer sehr viele Kosten und Zeit verbunden sind. Im Gegenzug kann ein sinnvoll geplanter Lebensdauertest sehr viele Erkenntnisse über das getestete System liefern. Neben einer versuchstechnisch-messtechnischen Planung ist die statistische Versuchsplanung der zentrale Aspekt [BaBe94]. Dabei wird zwischen vollständigen, zensierten und gerafften Tests unterschieden. Vor allem bei den beiden Letzteren sind detaillierte Kenntnisse über das zu testende System unabdingbar.

Grundsätzlich gilt: je mehr Vorwissen über ein System vorhanden ist, desto geringer fällt der Testaufwand aus. Beispielsweise sollte für geraffte Lebensdauertests der Raffungsfaktor bekannt sein, da dieser ansonsten versuchstechnisch ermittelt werden muss, falls er nicht über chemisch-physikalische Gesetze errechnet werden kann. Auch unabhängig von Raffungsfaktoren kann Vorwissen dazu beitragen, mithilfe des Satzes von Bayes den Testaufwand zu reduzieren, siehe [Ber08].

Wichtiges Vorwissen für effiziente Zuverlässigkeitstests ist zudem die Kenntnis über die späteren Einsatzbedingungen des betrachteten Systems. Dazu gehören die im Betrieb vorherrschenden Schadensparameter ebenso wie die zugrunde liegenden Lastkollektive, die das System ertragen muss. Nur wenn das Kundennutzungsverhalten bekannt ist oder abgeschätzt werden kann, kann es auch in Lebensdauertests abgebildet werden und so zu aussagekräftigen Ergebnissen führen.

Weitere Erkenntnisse im Rahmen der Produkterprobung können zudem durch eine zielgerichtete Befundung der ausgefallenen sowie nicht ausgefallenen Systeme gewonnen werden. Dazu sollten mögliche Fehlerarten vorab bekannt sein, um die Befundung auf die wichtigsten Punkte beschränken zu können.

2.4.6 Zuverlässigkeitswachstumsanalyse

Meistens wird die Zuverlässigkeitswachstumsanalyse in Softwareprojekten angewandt, siehe Abschnitt 2.2.2. Zunehmend wird sie aber auch in der Mechanik und Elektrotechnik eingesetzt. Denn die Grundannahme, dass ein frisch entwickeltes Produkt eine bestimmte Anzahl Fehler enthält, die dann nach und nach entdeckt werden, gilt auch in diesen Domänen. In [Bri97] wird eine erfolgreiche Anwendung der Zuverlässigkeitswachstumsanalyse für komplexe mechatronische Systeme gezeigt.

Ein Vorteil der Zuverlässigkeitswachstumsanalyse ist, dass zur Anwendung prinzipiell keine Kenntnisse über das System selbst nötig sind, sondern nur eine ausführliche Dokumentation der entdeckten Fehler während der Entwicklung selbst oder der Erprobungsphase wichtig ist. Durch die Zeitpunkte der Fehlerentdeckung kann anschließend eine auf bestimmten mathematischen Wachstumsmodellen beruhende Kurve ähnlich der Lernkurve gelegt werden; so kann einerseits die am Ende des Entwicklungsprozesses erreichte Zuverlässigkeit oder auch der momentane Abstand

zur Zielzuverlässigkeit ermittelt werden. Dies ist besonders für die Reifegradabschätzung in den späteren Phasen der Entwicklung wichtig und umsetzbar, [Bir10].

2.5 Qualitative Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse

Das Ziel der qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse ist die Identifikation möglicher Schwachstellen im betrachteten System, die unter Umständen zu einem Ausfall führen können. In Abschnitt 2.2.3 wurde gezeigt, dass qualitative Analysen der Frage nachgehen, in welcher Art etwas vorhanden ist oder passiert. In den meisten Fällen werden qualitative Analysen eingesetzt, um ein Design oder einen Prozess zu hinterfragen. Dabei werden gedanklich alle Elemente auf ihre Fehlerfreiheit beziehungsweise Robustheit untersucht. Das heißt, dass möglichst alle bei der Entwicklung auf Basis hypothetischer Überlegungen getroffenen Annahmen hinterfragt und überprüft werden müssen.

Für Robustheitsuntersuchungen werden alle vorhandenen bzw. erkannten Parameter variiert und untersucht, wie funktionsfähig das System dabei bleibt oder ob es bei leichten Abweichungen bereits zu Systemausfällen kommen kann. Dies gilt sowohl für Eigenschaften von Bauteilen als auch für Arbeitsschritte, die beispielsweise nicht exakt durchgeführt werden. Viele Methoden umfassen auch den Umgang mit Optimierungsmaßnahmen, wenn Elemente gefunden werden, die anfällig sind für Fehler oder sogar bereits einen Fehler darstellen. Somit soll erreicht werden, dass das Produkt eine höhere Zuverlässigkeit erreicht.

Wichtigste Methoden zur Sicherstellung der Robustheit sind die im Folgenden vorgestellte Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse sowie die Gefährdungs- und Betreibbarkeitsuntersuchung. Ergänzend wird die Qualitative Konzeptbewertung vorgestellt, die das Entstehen von Schwachstellen bereits in der Konzeptphase verhindern soll.

2.5.1 Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse

Die *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse* kommt ursprünglich aus den USA und wird dort als *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) bezeichnet. Daher ist sie hierzulande teilweise auch als Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse bekannt. Die FMEA stellt die wichtigste qualitative Zuverlässigkeitsmethode in der Industrie dar; in vielen Bereichen ist ihre Durchführung sogar verpflichtend für jedes Produkt. Dies gilt speziell für Lieferanten. Die DIN EN 60812 bzw. IEC 60812 [DIN60812] beschreibt sowohl die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) als auch die *Fehlzustandsart-, -auswirkungs- und -kritizitätsanalyse* (FMECA), die die FMEA um einen weiteren Bewertungsschritt zur Klassifizierung der Schwere von Ausfallarten ergänzt. Neben den allgemeingültigen Normen finden sich auch Anleitungen für die Anwendung in verschiedenen Industriezweigen, beispielsweise in [VDA3-1] für die Automobilindustrie.

Generell stellt die FMEA eine systematische Vorgehensweise zur Analyse von Fehlzuständen, ihren Auswirkungen und Ursachen dar. Sie bringt die beteiligten, idealerweise aus verschiedenen Unternehmensbereichen stammenden Mitarbeiter dazu, das vorliegende System kritisch zu hinterfragen und potenzielle Schwachstellen aufzuspüren. Dabei gilt der bereits erwähnte Grundsatz, dass die Möglichkeit zur Fehlerbehebung umso größer ist, je früher die FMEA durchgeführt wird. Zudem ist die Methode so konzipiert, dass sie entwicklungsbegleitend weitergeführt werden kann.

Das induktive Vorgehen nach [VDA4-2] umfasst fünf Hauptschritte, da es den ursprünglichen FMEA-Schritten 3. – 5. noch eine systematische System- und Funktionsanalyse voranstellt:

Systemelemente und Systemstruktur
Funktionen und Funktionsstruktur
Fehleranalyse
Risikobewertung
Optimierung

Ähnlich der Fehlzustandsbaumanalyse in Abschnitt 2.4.4 wird in den ersten Schritten eine Baum- oder Netzstruktur der Komponenten und Funktionen sowie Fehlfunktionen angelegt, um eine vollständigere und gleichmäßig detaillierte Übersicht der Fehlzustände zu erhalten. Prinzipiell ist dieses Vorgehen identisch mit der Fehlzustandsbaumanalyse, allerdings werden bei der FMEA zuerst Bauteile und danach deren Funktionen ermittelt, während bei der Fehlzustandsbaumanalyse zuerst die Funktionen und anschließend die beteiligten Bauteile ermittelt werden. Ist also die Verknüpfung von Funktionen und Bauteilen bspw. durch eine Transformationsmatrix bekannt, können die beiden Methoden ineinander überführt werden.

Anschließend werden die Fehlfunktionen in ein Formblatt übertragen. Dabei ist zu beachten, dass die Fehlfunktionen der betrachteten Komponente als Ausfallart, die in der Baumstruktur darüberstehenden Fehlfunktionen als Ausfallauswirkungen und die darunter stehenden als Ursachen der Ausfallart übertragen werden. Entgegen früheren Normen ist das Formblatt mittlerweile nicht mehr normiert. Jedoch sind die einzelnen Schritte im Formblatt nach [DIN60812] vorgegeben und in **Abbildung 2.12** dargestellt.

Nach der Fehleranalyse wird das Risiko bewertet. Dazu werden die Schwere der End-Auswirkung (Severity) S und die geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit (Occurrence) O zu einem Risikowert multipliziert. Häufig wird zusätzlich noch der Grad der Fehlererkennung (Detection) D mit einbezogen. Damit ergibt sich dann durch Multiplikation aller drei Werte die Risikoprioritätszahl

$$RPN = S \cdot O \cdot D . \quad (2.10)$$

Teilweise wird die FMEA aufgrund dieser mathematischen Risikobewertung als quantitative Methode angesehen. Das ist aber nicht korrekt, da – wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt – das Ziel der Methode relevant ist. Zudem ist das Ziel der FMEA die Beantwortung der Frage „*wie*“ oder „*warum* kommt es zu einem Ausfall?“ und nicht

„Wie oft?“ „Wie lang?“ oder „Wie viel?“. Die Methode bezieht sich immer auf die Ermittlung von Qualitäten bzw. Eigenschaften und nicht auf die Ermittlung von Mengen. Dass die Priorisierung der gefundenen Fehlzustände mithilfe mathematischer Modelle realisiert wird, ändert daran nichts.

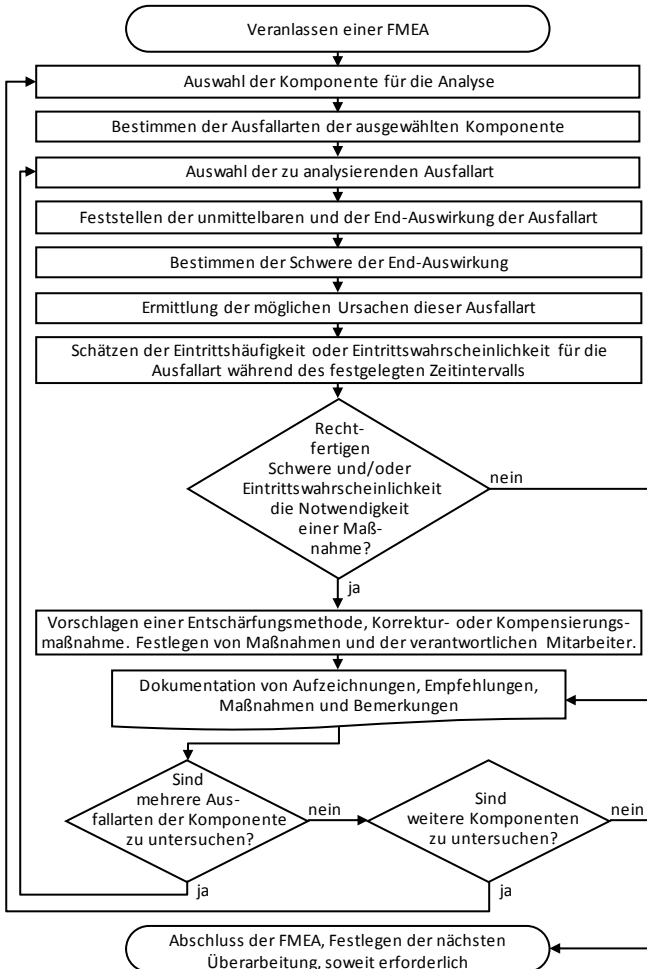


Abbildung 2.12: Ablauf einer FMEA nach [DIN60812]

2.5.2 Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung

Eine vor allem in der Prozesstechnik gebräuchliche qualitative Zuverlässigkeitsanalyse ist die nach [IEC61882] genommene *Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung*, im Englischen auch *Hazard and Operability Analysis* (HAZOP) genannt. Sie wurde 1963 im britischen Chemieunternehmen *Imperial Chemical Industries* entwickelt und ähnlich wie die FMEA mithilfe multidisziplinärer Teams durchgeführt. Diese Methode ist ein klassischer Vertreter der Robustheitsanalysen, da sämtliche Betriebszustände, die in einem System auftreten können, variiert werden. Die Methode HAZOP basiert auf Schlüsselwörtern, die mit den betrachteten Funktionsparametern kombiniert werden. Einige Beispiele dazu sind in **Tabelle 2.3** aufgeführt. Für jeden dieser Betriebszustände werden anschließend mögliche Ursachen und mögliche Auswirkungen ermittelt und dokumentiert.

Tabelle 2.3: Schlüsselwörter zur Durchführung der HAZOP-Analyse

Schlüsselwort	Allgemeine Bedeutung	Beispiel
NEIN oder NICHT	Verneinung der Funktion	Kraft A nicht vorhanden
MEHR	Quantitative Zunahme	Durchfluss B mehr als geplant
WENIGER	Quantitative Abnahme	Durchfluss B weniger als geplant
ZUSÄTZLICH	Quantitative Zunahme	Kraft B zusätzlich zu Kraft A
TEILWEISE	Quantitative Abnahme	Kraft A teilweise geleitet
UMGEKEHRT	Logische Umkehrung	Kraft A in umgekehrter Richtung
AUSSER	Logischer Ausschluss	Lastfrei außer Kraft A
ANSTATT	Substitution	Kraft B anstatt Kraft A vorhanden

Damit ist die Vorgehensweise einerseits stark formalisiert, regt aber die beteiligten Personen zur Diskussion über die Folgen eines solchen aus Schlüsselwort und Substantiv bestehenden Betriebszustands an. Die systematische Erfassung der Betriebszustände stellt damit eine vollständige Analyse der potenziellen Gefahren sicher.

Zur Durchführung dieser Methode ist ein ausgeprägtes Systemverständnis, vor allem der funktionellen und technischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, vonnöten.

2.5.3 Qualitative Konzeptbewertung

Bei der qualitativen Konzeptbewertung (QLK) [Man et al. 07] geht es darum, schon in der Konzeptphase vermehrt den Zuverlässigkeitsgedanken mit einzubringen, obwohl zu diesem frühen Zeitpunkt der Entwicklung nur eine geringe dokumentierte Datenbasis und nur ein unzureichender Detaillierungsgrad der Lösung existiert. Allerdings liegt bei den Entwicklern umfassendes implizites Wissen und Erfahrung von Vorgängerprodukten vor, sodass in der Praxis dennoch ausreichend viele Informationen vorhanden sind.

Unter diesen Voraussetzungen würden herkömmliche Zuverlässigkeitsmethoden, wie zum Beispiel die FMEA oder die FTA, nicht zum Ziel führen, da für diese Methoden umfassende Aussagen bezüglich der Bauteile und deren Beziehungen untereinander benötigt werden.

Ziel der qualitativen Konzeptbewertung ist, die Entwicklungsfähigkeit der bisher erstellten Konzepte miteinander vergleichen zu können. Dabei soll nicht nur nach Kosten und Aufwand, sondern auch nach Zuverlässigkeit bewertet werden, da bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium das Lösungsprinzip bekannt ist.

Nachdem das System mit seinen Funktionen und Fehlfunktionen definiert ist, werden die Umsetzung der Funktionen in den einzelnen Lösungskonzepten und die dabei möglichen Fehler untersucht. Anschließend werden die einzelnen Systemfunktionen nach ihrer Wichtigkeit mit dem Gewichtungsfaktor Q klassiert. Außerdem werden die einzelnen Realisierungen dieser Systemfunktionen in den Konzepten nach ihrer technischen Umsetzbarkeit (F) und ihren Entwicklungskosten (C) bewertet. Die Entwicklungsfähigkeit wird dann für jede Funktion i eines Konzepts j mithilfe der Gleichung

$$D_{ij} = (1 - Q_i) \cdot F_{ij} \cdot C_{ij} + Q_i \cdot \left(\frac{F_{ij} + C_{ij}}{2} \right) \quad (2.11)$$

ermittelt. Im Anschluss daran werden die einzelnen Entwicklungsfähigkeiten D_{ij} multipliziert, um die Gesamtentwicklungsfähigkeit D_j für jedes Konzept zu erhalten. Zusammen mit anderen Bewertungsfaktoren, wie beispielsweise die Herstellkosten, kann nun eine objektivere und zuverlässigkeitsorientierte Konzeptentscheidung erfolgen.

3 Methoden und Modelle in Produktentwicklung und Zuverlässigkeitsabsicherung

Zur Absicherung der Zuverlässigkeit werden vielfältige Methoden angewandt, siehe Abschnitt 2.4 und 2.5. Weil diese Arbeit einen tieferen Einblick in die Methoden geben will und mit dem hier gezeigten Modularisierungsansatz nicht auf der Anwendungsebene, sondern im Kern der Methoden ansetzt, wird ein besonderes Augenmerk auf die Grundlagen von Methoden gelegt. In diesem Kapitel wird im ersten Abschnitt der Methodeneinsatz sowohl in der allgemeinen Produktentwicklung als auch in der Zuverlässigkeitsabsicherung betrachtet. Zentrale Frage dieses Abschnittes ist, warum Methoden eingesetzt werden und ob sie das einzige Mittel zur Unterstützung der Entwickler sind.

Im zweiten Abschnitt werden die Grundlagen zu Methoden im Allgemeinen und deren Aufbau tiefergehend analysiert, die darin enthaltenen Modelle näher untersucht und erklärt. Im dritten Abschnitt werden schließlich Ansätze zu Elementarmethoden in der klassischen Produktentwicklung dargestellt; sie bilden den Aufsetzpunkt dieser Arbeit. Die im vierten Abschnitt gegebene Übersicht über aktuelle Forschungsarbeiten zum Thema Modularisierung zeigt die Einflüsse auf die vorliegende Arbeit auf. Das abschließende Fazit gibt einen Rückblick auf dieses Kapitel und fasst nochmals die nötigen Maßnahmen zur Optimierung der Zuverlässigkeitsabsicherung zusammen.

3.1 Methoden im Produktentwicklungsprozess

In diesem Abschnitt wird die im klassischen Produktentwicklungsprozess übliche Methodik vorgestellt. Da die Zuverlässigkeitsabsicherung einen möglichen Aspekt der Produktentwicklung darstellt, ist die hier gezeigte Methodik auch für die Zuverlässigkeitsabsicherung von Bedeutung und wird daher näher beleuchtet. Die Schnittmenge zwischen klassischer Produktentwicklung und Zuverlässigkeitsanalyse ist sehr groß. Daher ist eine scharfe Abgrenzung der beiden Sichtweisen nicht möglich. Dies verdeutlicht auch die Bezeichnung „Integrierte Produktentwicklung“, welche von Ehrlenspiel [Ehr09] geprägt wurde und die Produktentwicklungsmethodik als Hilfsmittel aller am Produktentwicklungsprozess beteiligten Personen auffasst.

In Deutschland kamen erstmals in den 1940er-Jahren Methoden zur Produktentwicklung auf, welche oftmals produktspezifisch ausgelegt waren [Nie50]. Parallel dazu entwickelte sich in den USA die Disziplin des Systems Engineering [GoMa57]. In den Folgejahren wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Produktentwicklung geschaffen. Der erfolgreichste Ansatz war der in die vier Phasen *Planen und Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen* und *Ausarbeiten* gegliederte methodische Konstruktionsprozess von Pahl und Beitz [Pah et al. 06]. Das Ziel dieser Methode ist, dass das Ergebnis einer Entwicklung kein Zufallsprodukt, sondern das Resultat einer systematischen Lösungssuche darstellt. Dieser Ansatz floss schließlich gemeinsam mit dem Systems Engineering-Ansatz von Daenzer [Hab et al. 02] in die VDI-Normen 2221 [VDI2221] und 2222 [VDI2222] ein, welche die bis dahin üblichen Ansätze bündelten und die grundlegenden Forschungsarbeiten zur Produktentwicklung abschlossen sowie deren internationale Bekanntheit verfestigten. **Abbildung 3.1** zeigt den Konstruktionsprozess nach [Pah et al. 06] inklusive einer Vielzahl von Teilschritten, welche die Entwickler zu den wichtigsten Hauptarbeitsergebnissen führen.

Weitere bedeutende Arbeiten entstanden durch Rodenacker [Rod76] oder Roth [Rot00], die sich zwar in großen Teilen mit den oben genannten Normen decken, aber auch zusätzliche Aspekte wie bspw. Kosten oder Varianten mitberücksichtigen. Mit steigender Verbreitung von EDV-Systemen wurde die Konstruktionsmethodik von Koller [KoKa98] um eine Unterstützung durch Rechnerhilfsmittel ergänzt. Ehrlenspiel [Ehr09] integrierte schließlich sämtliche neu entstandenen Aspekte wie z. B. das Qualitätsmanagement.

In den späten 1990er-Jahren bzw. Anfang des 21. Jahrhunderts stand die Produktentwicklung stark unter dem Einfluss der steigenden Mechatronisierung. Diese Entwicklung mündete in die VDI-Norm 2206 [VDI2206], welche einen standardisierten Produktentwicklungsprozess für mechatronische Systeme, aufbauend auf dem sogenannten V-Modell, darstellt.

Nach einem kurzen Überblick über die Entstehung der methodischen Produktentwicklung wird nun vorgestellt, wie die Produktentwicklung durch einen methodischen Konstruktionsprozess unterstützt wird.

Methoden wurden entwickelt, weil sich herausgestellt hatte, dass unser menschliches Gehirn ab einer bestimmten Problemkomplexität an seine Grenzen stößt. Ehrlenspiel [Ehr09] nennt folgende vier Defizite des menschlichen Denkvermögens:

- **Mangelnde Funktionalität**

Dazu gehört die begrenzte Kapazität und Geschwindigkeit des menschlichen Gehirns ebenso wie die fehlende Multitaskingfähigkeit, die uns zwingt, einzelne Aspekte nacheinander abzuarbeiten.

- **Mangelnde Fähigkeit, abstrakt und logisch zu denken**

Das menschliche Gehirn ist nur darauf ausgelegt, unsere eigenen Lebensumstände zu bewältigen. Dafür waren nur eine begrenzte Reichweite und kompakte Kausalketten notwendig, die der heutigen Komplexität und Vielschichtigkeit nicht mehr gerecht werden.

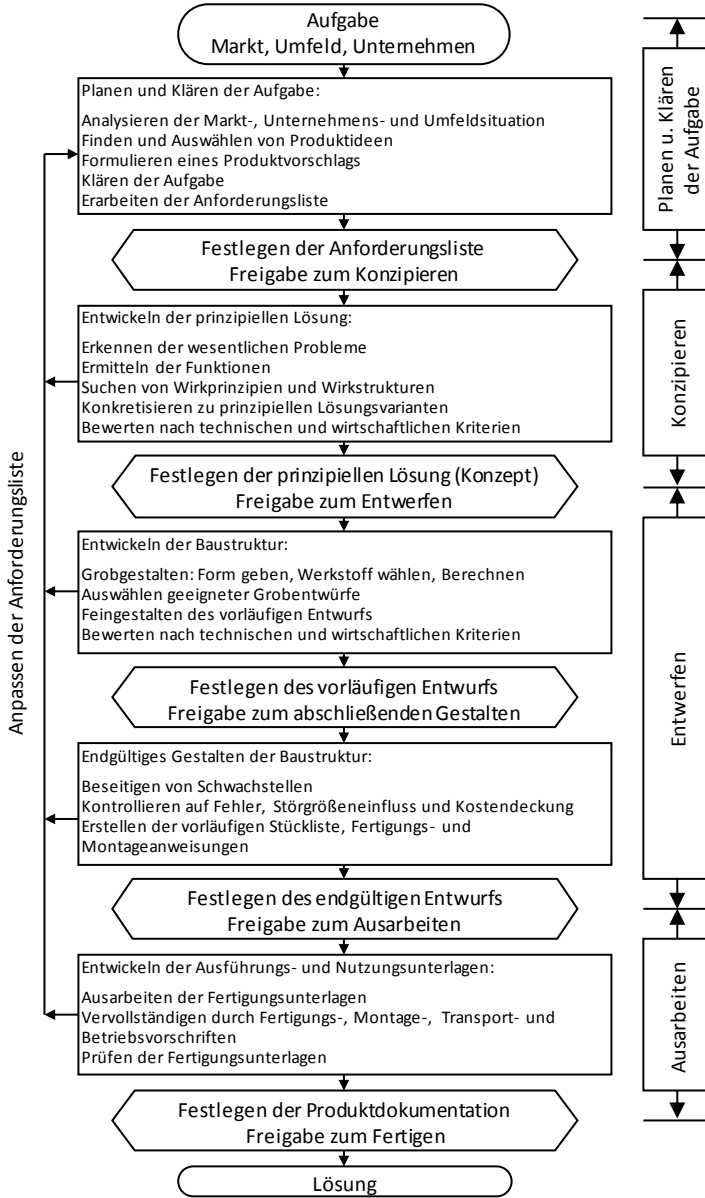


Abbildung 3.1: Methodischer Konstruktionsprozess nach [Pah et al. 06]

- **Minimierung von Aufwand und Zeit**

Ein allgemeines Naturprinzip ist, Aufwand und Zeit zu minimieren. Es hilft uns in vielen Situationen, ist aber dann ein Hindernis, wenn wir nur die vermeintlich wichtigsten Einflussgrößen betrachten oder wenn wir uns sofort auf eine Lösung beschränken.

- **Maximierung der Sicherheit**

Der Mensch beharrt lieber auf dem bisher Gewohnten und lässt neue Situationen nur ungern zu. Dadurch verhindert er kreative, neue Möglichkeiten.

Diese begrenzten physiologischen Fähigkeiten, die mit begrenztem Wissen und begrenzter Objektivität einhergehen, führen dazu, dass bereits einfache Entwicklungsprojekte für einen einzelnen Menschen zu umfangreich werden. Deshalb werden diese Entwicklungsprozesse parallelisiert, um eine höhere Kapazität zu schaffen. Neben den genannten Grenzen des menschlichen Gehirns kommt somit auch noch der Aspekt der Komplexität zum Tragen. In **Tabelle 3.1** sind unterschiedliche Arten der Komplexität in einem Entwicklungsprojekt aufgeführt. Dabei wird nicht nur die unternehmensinterne Komplexität aufgeführt, sondern auch die durch äußere Einflüsse des Marktes, der Gesetzeslage und der existierenden Normen hervorgerufene Komplexität.

Tabelle 3.1: Komplexität in der Produktentwicklung [Ehr09]

Art der Komplexität		Beispiele für Einflüsse
Unternehmensinterne Komplexität	Produktkomplexität	- steigende Produkt-, Variantenvielfalt - steigende Komponentenvielfalt - zunehmende externe Zulieferungen - sinkende Losgrößen
	Prozesskomplexität	- steigende Prozessvielfalt - steigende Prozessvernetzung - steigender Zeitdruck
	Organisationskomplexität	- steigende Anforderungen an Organisationsstrukturen - zunehmende Vernetzung der Beteiligten (Einzel, Team)
Externe Komplexität	Marktkomplexität	- Forderung nach mehr individuellen und multifunktionalen Produkten - Globalisierung - Spezialisierung
	Gesetzeskomplexität	- zunehmende nationale Gesetzesflut - zunehmend relevante internationale Gesetze
	Normenkomplexität	immer mehr nationale Normen (insbes. Sicherheitstechnik) immer mehr internationale Normen (Kundenländer) immer mehr firmenspezifische Richtlinien, Normen

Neben der Beherrschung externer und interner Komplexität stellen Pahl und Beitz besonders das Problemlösen in den Vordergrund der Methoden. Dabei wird angenommen, dass der Produktentwicklungsprozess vielfältige Situationen hervorruft, in denen ein Anfangszustand über beliebige Hindernisse hinweg in einen Endzustand überführt werden soll, [Pah et al. 06]. Dieser Prozess kann auch wie in **Abbildung 3.2** aus Sicht des Informationsflusses als kontinuierlicher Informationsumsatz abgebildet werden, wobei die Informationen mit jeder weiteren Iterationsschleife höherwertiger werden.

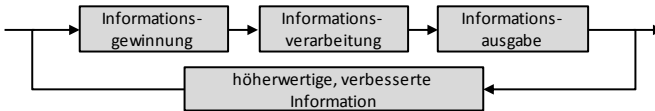


Abbildung 3.2: Lösungsprozess als Informationsumsatz mit Iterationsschleife, vgl. [Pah et al. 06]

3.2 Methodenkritik

Nach den vorhergehenden Argumenten scheint es, als ob an Methoden zur Problemlösung oder speziell Methoden zur Produktentwicklung kein Weg vorbeiführt, da sie unerlässlich für den systematischen Umgang mit komplexen Problemstellungen sind. Allerdings haben nach [Ehr09] Methoden auch in der Produktentwicklung aus verschiedenen Gründen Akzeptanzschwierigkeiten. Verdeutlicht wird das durch die Studie des Berliner Kreises [Gra97], deren Ergebnisse bereits in Kapitel 1 bzw. **Tabelle 1.1** dargestellt wurden.

Die Ablehnungshaltung führt dazu, dass Methoden oft nur zögerlich und wenn, dann abgewandelt eingesetzt werden. Die wichtigsten Gründe für die Ablehnungshaltung werden im Folgenden erläutert.

Mangelnde Effizienz?

Auch in der Produktentwicklung ist ein Grundproblem von Methoden, dass ihre Wirksamkeit nicht oder nur schwer nachgewiesen werden kann. Daher werden häufig unter Zeit- und Kostendruck aus Angst vor einem Misserfolg keine systematischen Methoden eingesetzt.

Einen grundlegenden Erklärungsansatz gibt Hacker unter dem Stichwort der Denkökonomie, [Hac92]. Darunter ist das Verhältnis von Denkergebnis zu Denkaufwand zu verstehen. Das Denkergebnis umfasst dabei den Nutzen und die Qualität der neuen Erkenntnis, während der Denkaufwand als die dafür nötige Zeit betrachtet wird. Beobachtungen von Hacker haben gezeigt, dass der Mensch grundsätzlich versucht, seinen Aufwand zu minimieren bzw. sich ökonomisch zu verhalten. Erklärt wird dieses Verhalten sogar mit der Evolution, die die ökonomischsten Lebewesen fördert. Die Auswirkungen dieses Verhaltens der Aufwandsminimierung sind überall

beim menschlichen Handeln zu erkennen. Beispiele dafür sind das nur schrittweise Vorgehen, das iterative Arbeiten oder das teilproblemorientierte Vorgehen. Meist werden Methoden dazu verwendet, genau diese Verhaltensweisen zu durchbrechen und erscheinen dadurch ineffizient.

Nun gibt es auch in der Produktentwicklung zwei verschiedene Herangehensweisen. Einerseits die pragmatische, intuitive Vorgehensweise und andererseits die methodische, systematische Vorgehensweise. Es liegt klar auf der Hand, dass die pragmatische Vorgehensweise bei den Entwicklern beliebter ist als die methodische Vorgehensweise, da sie gefühlt schneller ans Ziel führt. Um hier Klarheit zu schaffen, führte Hacker verschiedene Studien durch und kam zu dem in **Abbildung 3.3** dargestellten Ergebnis.

Dieses zeigt, dass die pragmatische Vorgehensweise in der Tat zu einem schnelleren Ergebnis führt. Im Gegenzug benötigt die methodische Vorgehensweise etwas mehr Zeit, erreicht dafür aber eine höhere Qualität des Ergebnisses. Wird diese Erkenntnis vor dem Hintergrund der eingangs erwähnten hohen Qualitätsanforderungen eingeordnet, so sind methodische Vorgehensweisen zukünftig weiter zu forcieren – und die bestehenden, teilweise begründeten Bedenken auszuräumen, indem die Effizienz von Methoden gesteigert wird.

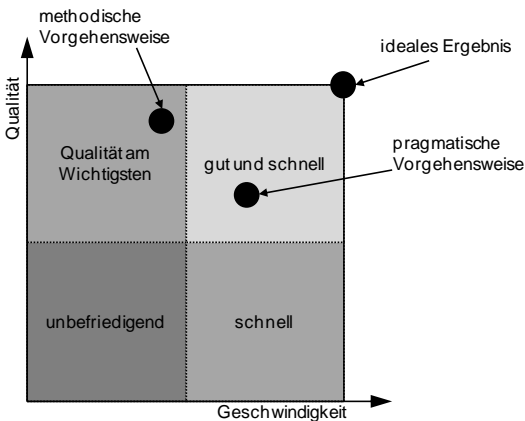


Abbildung 3.3: Qualität und Geschwindigkeit des Entwicklungsergebnisses von methodischer und pragmatischer Vorgehensweise im Vergleich, [Hac92]

Mangelnde Effektivität?

Neben den inhaltlichen Aspekten gibt es aus arbeitsorganisatorischer Sicht weitere Gründe für die Ablehnungshaltung. So benötigen Methoden deutlich mehr theoretisches Wissen und Übung als intuitives Konstruieren, und die häufige Sachorientierung von Methoden vernachlässigt Themen wie bspw. die Hierarchie einer Projektgruppe. Ebenso sind Methoden selten in die Arbeitswerkzeuge der Entwickler integriert, was eine weitere Hürde darstellt. Und schließlich haben Entscheider oft-

mals das Problem, bei den abstrakt formulierten Methoden den konkreten Anwendungsfall zu erkennen. Das zeigt, dass schon die Entscheidung für die Anwendung einer Methode mehr unterstützt werden muss, um diese Startschwierigkeiten zu reduzieren.

Ebenso trifft die Zielsetzung der Methoden nicht immer genau die Situation in der Industrie. Beispielsweise sind die meisten Methoden auf Neukonstruktionen ausgerichtet, während Änderungskonstruktionen die Mehrheit der Arbeitsaufgaben darstellen. In Verbindung mit dem teilweise starren und unflexiblen Aufbau von Methoden führt dies zu weiterer Ablehnung bei den Konstrukteuren. Zudem zielen viele Methoden auf die Funktionsentwicklung ab; die späteren Probleme liegen jedoch im Detail.

Mangelnde Flexibilität?

Wie die meisten vorgestellten Konstruktionsprozesse ist das Vorgehensmodell nach VDI 2221 [VDI2221] in einzelne Arbeitsabschnitte unterteilt, die jeweils mit einem definierten Abschlussdokument enden. Dies zeigt die damals noch vorhandene Vorstellung des idealen Ablaufplans. Dieses Idealbild wurde jedoch zunehmend kritisiert, und auch die Realität hat gezeigt, dass eine Produktentwicklung mehr iterativ und individuell abläuft. Dörner [Dör94, S. 159] erkannte bereits: „Konstruktionsprozesse haben wohl keine kanonisierbare Optimalform, welcher der Konstrukteur nach einem festen Ablaufplan folgen kann.“

Seit dieser Erkenntnis wurde kontinuierlich versucht, den Produktentwicklungsprozess flexibler zu gestalten. Die ersten Arbeiten dazu wurden in [Bir et al. 01] veröffentlicht. Die Herausforderungen durch komplexe Systeme und der Bedarf an flexiblen Methoden zur Unterstützung der Produktentwicklung bildeten schließlich die zentralen Forschungstätigkeiten der letzten Jahre [Lin09]. So sollten Methoden beispielsweise mithilfe adaptiver Modelle flexibilisiert und an die aktuelle Situation angepasst werden, [Ger02].

Diese Gründe haben allesamt dazu beigetragen, dass auch in der allgemeinen Produktentwicklung über modularisierte Vorgehensweisen nachgedacht wird und verschiedene Arbeiten dazu entstanden sind. Diese werden in Abschnitt 3.5 näher beleuchtet. Auch für die vorliegende Arbeit gilt es, ein hohes Maß an Flexibilität zu ermöglichen, damit die genannten Kritikpunkte vermieden werden können.

3.3 Der Prozess der Zuverlässigkeitsabsicherung

Nachdem in Kapitel 2 auf die einzelnen Methoden der Zuverlässigkeitsabsicherung eingegangen wurde, wird in diesem Abschnitt die gesamte Zuverlässigkeitsabsicherung und ihre Zielsetzung eine Ebene höher, auf Prozessebene, betrachtet.

3.3.1 Zielsetzung der Zuverlässigkeitsabsicherung

Es wurde bereits erwähnt, dass nur eine konsequente Zielorientierung dabei helfen kann, Entwicklungsprozesse im Allgemeinen und die Zuverlässigkeitsabsicherung im Speziellen effizienter zu gestalten. Um das Ziel der Zuverlässigkeitsabsicherung zu finden bedarf es der Frage, was überhaupt zu Unzuverlässigkeit führt. Die Antwort darauf ist schnell gefunden: Unzuverlässigkeit entsteht, wenn die auf ein System wirkenden Belastungen größer sind als die vom System ertragbaren Belastungen – anders formuliert: wenn die Beanspruchung die Beanspruchbarkeit übersteigt, siehe Abschnitt 2.2.2.

Dabei handelt es sich in beiden Fällen um statistisch streuende Zufallsgrößen aufgrund der vielzähligen, nicht erfassbaren Einflüsse. Die Kenntnis dieser Zufallsgrößen bzw. ihrer zugrunde liegenden Verteilungen und damit die Kenntnis ihres überlappenden Bereichs ermöglicht statistische Aussagen über die Zuverlässigkeit des Systems und ist als *Stress-Strength-Interference* bekannt. Eine Darstellung dieses Zusammenhangs gibt **Abbildung 3.4**.

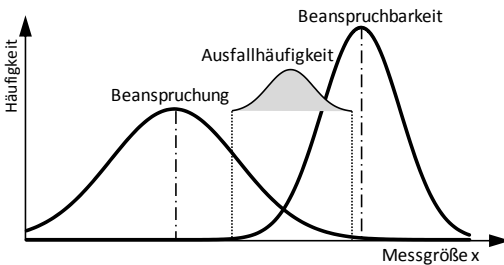


Abbildung 3.4: Der statistische Überlappungsbereich von Beanspruchbarkeit (Strength) und Beanspruchung (Stress) ist die Ursache für Unzuverlässigkeit, ebenfalls bekannt als *Stress-Strength-Interference*

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass alle Tätigkeiten im Rahmen der Zuverlässigkeitsabsicherung darauf abzielen, diesen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit zu verstehen und zu optimieren. Sind nämlich die Mittelwerte der beiden Größen zu weit auseinander, wird das System zwar besonders robust, aber eine hohe Beanspruchbarkeit ist allgemein auch mit hohen Kosten verbunden. Es gilt also, den kleinstmöglichen vertretbaren Abstand zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit zu finden, [ScSc02].

Die größte Herausforderung besteht allerdings darin, dass zum einen die Beanspruchung erst in der Zukunft auftreten wird und heute nicht genau bekannt ist, und zum anderen, dass sich die Beanspruchbarkeit mit der Zeit ändert. Der Faktor Zeit ist maßgeblich in der Zuverlässigkeitsabsicherung und zwingt die Entwickler dazu, lediglich mit Annahmen über die Zukunft arbeiten zu können. Zuverlässigkeitsabsicherung zu betreiben bedeutet damit, ständig in die Zukunft zu blicken und voraus-

sichtliche Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten abzuschätzen und gegeneinander – theoretisch oder praktisch – abzugleichen.

Eine allgemeinere Darstellung bietet **Abbildung 3.5**, indem sie die Funktionen eines Systems und damit verbunden die Zuverlässigkeit eines Systems als Folge von Beanspruchungen und Beanspruchbarkeit darstellt. Des Weiteren wird deutlich, dass die Basisaktivitäten im Zuverlässigkeitsabsicherungsprozess die qualitative Ermittlung und Quantifizierung der genannten Systemeigenschaften sind.

Doch wie ergeben sich Beanspruchungen und Beanspruchbarkeit? Erstere basieren auf dem Zusammenspiel aus Umgebungs- und Nutzungsanforderungen sowie den zu realisierenden Funktionen. Die Beanspruchbarkeit hingegen beruht auf den Bauteilen und deren Beschaffenheit sowie dem Herstellprozess, bestehend aus Fertigung und Montage.

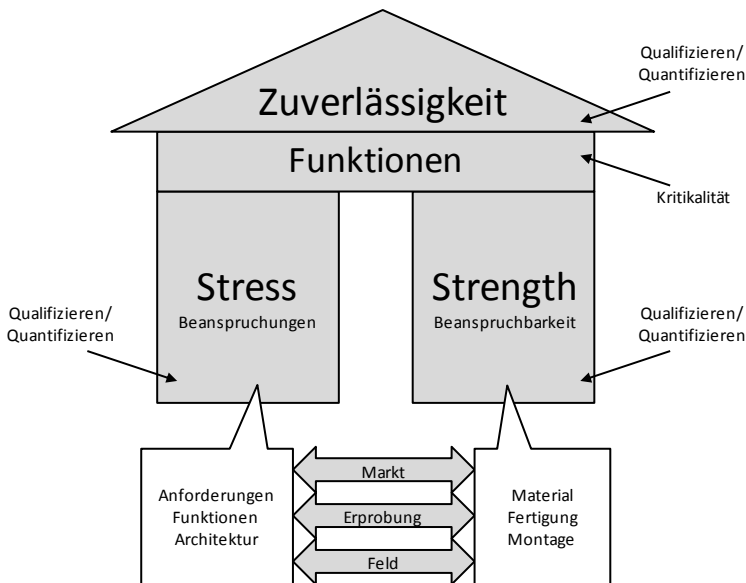


Abbildung 3.5: Zielsetzung der Zuverlässigkeitsarbeit: Qualifizierung und Quantifizierung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit, um die Zuverlässigkeit qualifizieren und quantifizieren zu können

Wie bereits erläutert ergibt sich die Zuverlässigkeit aus dem Abgleich von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit. Dieser Abgleich erfolgt zu Beginn einer Produktentwicklung rein theoretisch, wenn der zukünftige Markt identifiziert bzw. das Produkt geplant wird. Während der Entwicklung erfolgt regelmäßig ein beispielhafter Abgleich durch das Testen des Entwicklungsobjektes während der Erprobung. Schließlich erfolgt der finale und entscheidende Abgleich von Beanspruchung und

Beanspruchbarkeit beim Kunden im Feld. Erst dort zeigt sich, ob alle bisher getroffenen Annahmen korrekt waren.

Bestehende Zuverlässigkeitsprozesse orientieren sich allerdings weniger an der hier beschriebenen inhaltlichen Kausalkette, sondern sind vielmehr handlungsorientiert und ordnen den allgemein gebräuchlichen Produktentwicklungsphasen verschiedene Handlungen zu. Nennenswert sind hierbei die Arbeiten von Allen [All85], Bertsche [Ber08], Birolini [Bir10] und Yang [Yan07]. Daneben gibt es Hinweise zur zeitlichen Abfolge der Zuverlässigkeitsabsicherung in den Normschriften von DIN, VDA und VDI [DIN60300 a], [VDA3-1]. Charakteristisch für diese Zuverlässigkeitsprozesse ist das zuverlässigkeitsorientierte *V-Modell* der VDI 4003 [VDI4003], welches in **Abbildung 3.6** dargestellt ist. Die Analyse dieser Prozesse zeigt, dass Methoden darin nur als Werkzeuge gesehen werden, nicht als integrierte Handlungskette.

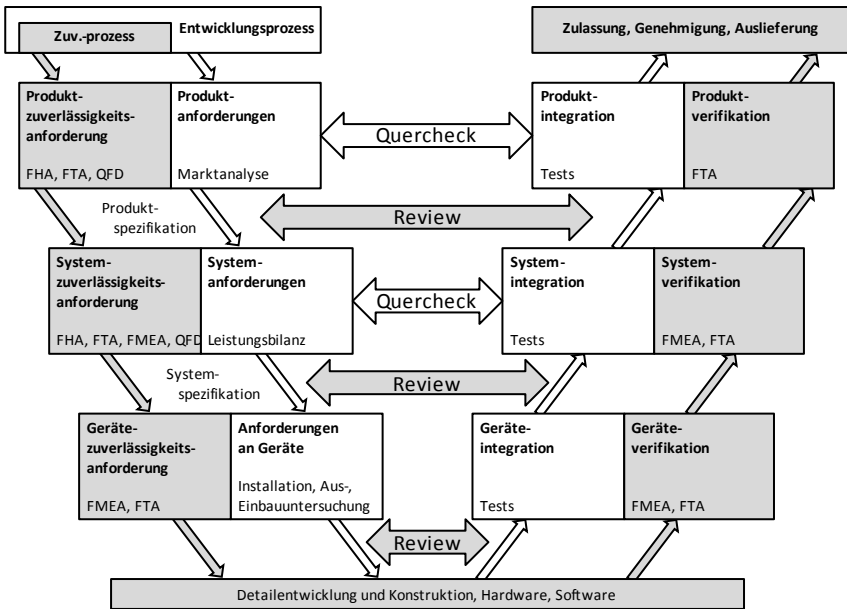


Abbildung 3.6: Zuverlässigkeitsorientiertes V-Modell in VDI 4003 [VDI4003]

Eine weitere Strategie zur Einbindung von Markt, Management und Mitarbeitern stellt das Qualitätssicherungssystem des *Total Quality Managements* (TQM) dar, [Her et al. 99]. Der Kern dieses Ansatzes ist die Bildung eines TQM-Hauses aus relevanten Qualitätsmanagement-Bausteinen. Aber auch in diesem Fall handelt es sich eher um eine Sammlung einzelner Arbeitsschritte, und Methoden sind ebenfalls nicht integriert. Eine weitere Strategie zur Qualitätssicherung ist *Design for Six Sigma*, auf das im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird.

3.3.2 Methodik im Rahmen von Design for Six Sigma

Auch im Rahmen von Design for Six Sigma (DfSS) hat sich eine Methodik entwickelt, die hier betrachtet werden soll. Die klassische Six Sigma (6σ)-Bewegung hatte zum Ziel, Prozesse robust und den Ausschuss so gering wie möglich zu gestalten, indem die Streuung von Prozess- und Produktmerkmalen verringert und damit Fehler reduziert werden. Dabei bedeutet ein 6σ -Niveau, dass Prozesse eine Ausbeute von mindestens 99,9997% oder eine Ausschussrate von maximal 3,4 ppm aufweisen. Ursprünglich wurde der Ansatz nur für die Optimierung der Fertigungsgenauigkeit verwendet; mittlerweile findet 6σ auch allgemein Anwendung für Prozesse, Dienstleistungen und Produkte, [YaEl03].

Eine große Rolle in dieser 6σ -Bewegung spielen Makrozyklen, beispielsweise *Define, Measure, Analyse, Improve, Control* (DMAIC). Diese geben einen groben Ablaufplan vor, der in den Unternehmen systematisch abgearbeitet werden sollte. Der Fokus von DMAIC ist die Verbesserung bestehender Prozesse und bezieht sich hauptsächlich auf die späteren Produktentwicklungsphasen. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass das reaktive Vorgehen des DMAIC-Zyklus teuer und aufwändig ist und dass ein präventiver Ansatz, der schon von vornherein in der Konzeptphase auf das Six-Sigma-Qualitätsniveau eines Produkts hinarbeitet, fehlt.

Herausgekommen ist die Methodik *Design for Six Sigma* mit dem Ziel der Schaffung eines robusten Produktdesigns. Dazu wird ebenfalls ein Vorgehen nach dem Makrozyklus *Identify, Design, Optimize, Validate* (IDOV) für Neuentwicklungen und *Define, Measure, Analyse, Design, Optimize, Validate* (DMADOV) für Redesignaufgaben vorgegeben.

Allerdings ist DfSS eher als Philosophie oder Strategie zu sehen, da es nicht nur einen Sollprozess für den Entwicklungsprozess vorgibt, sondern auch mögliche Werkzeuge zur Umsetzung des Prozesses sowie Maßnahmen für das Projektmanagement, wie beispielsweise Dokumentationsrichtlinien, vorschlägt. Diese drei Säulen des Entwicklungsprozesses nach *Design for Six Sigma* sind in **Abbildung 3.7** dargestellt.

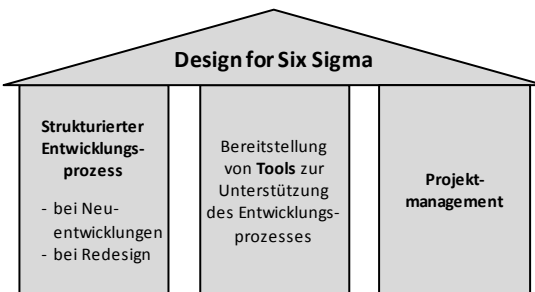


Abbildung 3.7: Die tragenden Säulen von Design for Six Sigma

3.4 Methode und Modell

Wie bereits dargestellt wurde, liegt der Hauptfokus dieser Arbeit auf der Modularisierung verschiedener Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung. Methoden sind gemäß der Definition in Abschnitt 2.1 eine Sammlung verschiedener Schritte oder – im Kontext der Zuverlässigkeitsabsicherung – eine vorgegebene Anwendungsreihenfolge von Zuverlässigkeitsmodellen. Um Methoden zu modularisieren ist es wichtig, das Innenleben und die zu Grunde liegenden Modelle zu kennen.

Ein Beispiel hierzu ist die FMEA (siehe Abschnitt 2.5.1), welche eine Methode zur frühzeitigen Erkennung von möglichen Fehlzustandsarten darstellt. Diese Methode wendet wiederum verschiedene Modelle an, wie beispielsweise die Formulierung von Funktionen als Abbild eines technischen Systems. Des Weiteren wird die Risikoprioritätszahl verwendet, ein mathematisches Produkt aus drei Bewertungszahlen – diese stellen im Übrigen jeweils ebenfalls ein Modell dar. Jedenfalls bildet die Risikoprioritätszahl das Risiko einer möglichen Fehlzustandsart ab, indem eine mathematische Operation angewendet wird. Während die Risikoprioritätszahl selbst ein Modell darstellt, ist deren Anwendung auf eine Fehlzustandsart wieder Bestandteil einer Methode.

3.4.1 Der Modellbegriff in der Wissenschaftstheorie

Die Wissenschaftstheorie befasst sich mit der Wissenschaft im Allgemeinen sowie deren Methoden zum Erkenntnisgewinn. Die Wissenschaftstheorie besitzt als Betrachtungsobjekte einzelne Wissenschaften – ähnlich der Mechanik, die physikalische Teilchen und deren Bewegungen als Objekte betrachtet. Dazu gehört auch die Thematik der Modellbildung und -anwendung; denn diese bildet einen wichtigen Baustein für den Erkenntnisgewinn. Nach Stachowiak [Sta73] ist ein Modell durch drei Merkmale gekennzeichnet:

- **Abbildung:**
Modelle stellen immer ein Abbild oder eine Repräsentation eines realen Originals dar; dabei ist es irrelevant, ob das Original ein natürlicher Gegenstand ist oder selbst ein Modell.
- **Verkürzung:**
Ein Modell umfasst nur die Attribute des Originals, die für den Ersteller oder Nutzer des Modells relevant sind oder als relevant erscheinen; ein Modell kann nie alle Attribute des Originals umfassen, denn dann wäre es kein Modell, sondern das Original.
- **Pragmatismus:**
Ein Modell entsteht immer durch eine subjektive Auswahl der für den momentanen Anwendungsfall als relevant erachteten Attribute und ist daher als zweckgebunden einzustufen.

Balzer [Bal88, Bal09b] unterscheidet zwischen potenziellen Modellen und Modellen. Dabei zeichnen sich Erstere dadurch aus, dass sie Komponenten lediglich miteinander in Verbindung bringen, aber keine Gesetzmäßigkeit für deren Verbindung darstellen. Modelle hingegen enthalten Hypothesen, die Aussagen über die Verbindungen der Komponenten innerhalb der potenziellen Modelle treffen. Auch Balzer stellt drei Bedingungen an ein Modell:

- Jedes Modell ist eine Struktur der zugrunde liegenden Theorie, besteht also aus Objekten und Relationen.
- Modelle sind immer Modelle für bestimmte Hypothesen, d. h. einem Modell wohnt immer bereits eine Hypothese inne.
- Hypothesen haben keine atomare Form, d. h. sie drücken keine einzelnen Sachverhalte aus, sondern eine Sammlung davon.

Nach [Rak02] gibt es bei den Menschen schon immer das Bestreben, die Realität abzubilden und sich mit dieser zu beschäftigen. Dazu gehören auch Bilder, Skulpturen oder Pläne. Allerdings wird bei Modellen aus dem kulturellen Bereich der Fokus mehr auf die Verfremdung der Realität gelegt, während in der Wissenschaft und Technik die valide Abbildung der Realität im Vordergrund steht.

Vor allem im Kontext dieser Arbeit ist wichtig, dass Modelle nicht zwingend gegenständlich sein müssen, sondern auch theoretische Konstrukte sein können. Beispielsweise ist die Mathematik, die umfassend auf Modellen aufbaut, ein Vertreter der theoretischen Modelle. Ebenso wird in der Soziologie oder in den Wirtschaftswissenschaften intensiv mit theoretischen Modellen gearbeitet.

3.4.2 Modelle in Zuverlässigkeitsmethoden

Die Eigenschaft von Modellen, menschliche Denkvorgänge abzubilden und zu unterstützen, ist in der Zuverlässigkeitsabsicherung besonders gefragt, denn sie beruht auf zwei hauptsächlichen Vorgehensweisen: Einerseits sollen durch Beobachtungen von Ausfällen oder des Verhaltens von Produkten im realen Einsatz Erkenntnisse für zukünftige Produkte und deren Verhalten gewonnen werden. Dazu muss ein ausreichend abstraktes und für Entwickler verständliches Modell dieser realen Produkte erstellt werden, mit dem das zukünftige Verhalten der neuen Produkte abgebildet werden kann. Andererseits werden bei der Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsabsicherung die Arbeitsweisen und Denkvorgänge der Entwickler studiert und mithilfe von Modellen erklärt, um angepasste und unterstützende Methoden entwickeln zu können.

In der quantitativen Zuverlässigkeitsabsicherung haben Modelle die spezielle Aufgabe, zuverlässigkeitsrelevante Eigenschaften eines technischen Systems zu formalisieren und mathematisch beschreibbar zu machen. Geht es nicht nur um die mathematische Beschreibung bereits erfolgter Ausfälle, sondern um das Modellieren von Einflussfaktoren, ist es das Ziel, diese Einflüsse so realitätsnah wie möglich abzubilden. Dazu eignet sich besonders die Verbindung mehrerer Modelle, beispiels-

weise aus der Werkstoffalterung und der Mechanik. Wichtige Vertreter dieser Modelle sind beispielsweise die Modelle von *Arrhenius* [Eig03] und *Wöhler* [Hai02].

Modelle, die in Zuverlässigkeitsmethoden Verwendung finden, sind beispielsweise:

- Baumstruktur
- Boolesche Algebra
- Klassierung
- Risikoprioritätszahl
- Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die genannten Modelle zeigen, dass diese grundlegender Art sind und damit weder qualitativ noch quantitativ sein können. Je nachdem mit welchen Informationen sie verwendet werden, führen sie wieder auf spezifische Ergebnisse. Das zeigt sich beispielsweise an der Baumstruktur. Diese kann mit qualitativem Expertenwissen verwendet werden und führt so zu einem qualitativen Ergebnis, zum Beispiel einem kritischen Fehlerpfad. Alternativ kann die Baumstruktur auch mit quantitativen Ausfallraten verwendet werden und führt so zu einem quantitativen Ergebnis, zum Beispiel der Gesamtausfallrate.

3.5 Stand der Forschung zur Flexibilisierung der Produktentwicklung

Bevor in dieser Arbeit die Modularisierung der Zuverlässigkeitsabsicherung intensiv behandelt wird, soll eine Analyse der bisherigen Forschungsansätze in der Produktentwicklung und Zuverlässigkeitsabsicherung durchgeführt werden. Die Frage hierbei ist, inwieweit der Modularisierungsgedanke bereits für methodische Vorgehensweisen umgesetzt wurde.

Dazu wurde eine umfassende Literaturrecherche über englischsprachige und deutschsprachige Veröffentlichungen durchgeführt. Die historisch starke deutschsprachige Dominanz auf dem Gebiet der Methodenlehre spiegelt sich auch in den ermittelten Arbeiten wider. Zum Themengebiet der modulbasierten Produkte gibt es hingegen im englischsprachigen Raum vermehrt relevante Literatur.

Die problemorientierte modulbasierte Vorgehensweise wurde in der Forschung bereits vielfältig behandelt und für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle durchgeführt. Besonders hervorzuheben ist hierbei der Sonderforschungsbereich 361 *Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung* der RWTH Aachen [EvSc05], aus dem mehrere Forschungsarbeiten zur Modularisierung im klassischen Qualitätsmanagement hervorgegangen sind.

Die umfangreichste Arbeit stammt von *Lesmeister* [Les01] und verfolgt das Ziel, die Methodenanwendung auf das jeweilige Projekt anzupassen. Diese Untersuchung wird speziell für die Methoden QFD, FMEA und Target Costing durchgeführt. Die Vorgehensweise wird in acht definierte und abgegrenzte Methodenteile unterteilt:

- Forderungsanalyse
- Funktionsbestimmung
- Systembestimmung
- Risikoanalyse
- Risikobewertung
- Risikominimierung
- Zielkostenspaltung
- Kostenminimierung

Diese Methodenteile werden Module genannt und entstehen aus der Schnittmenge der bestehenden Methoden und enthalten ihrerseits wieder verschiedene Untermodule, die jeweils mit Aufgabe, In- und Output sowie den möglichen Tools zur Bearbeitung dargestellt werden. Für die erarbeiteten Inhalte erstellt Lesmeister ein detailliertes Datenmodell.

Zudem wurden ein hypertextbasierter Handlungsleitfaden sowie eine Integration in eine EDV-Anwendung geschaffen, um den Bearbeitungsaufwand und die Komplexität situationsgerecht minimal zu halten.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit, wie beispielsweise die Skalierbarkeit, Flexibilität oder Austauschbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte, werden bei Lesmeister nicht thematisiert, da sich die Vorgehensweise stark auf die unterschiedlichen Fragestellungen im Qualitätsmanagement fixiert und damit eine Auswahl genau definierter Methodenkombinationen vorgegeben wird. Zudem findet die Modularisierung nur auf einer sehr hohen Methodenebene statt.

Aufbauend auf der Arbeit von Lesmeister stellt *Heiliger* [Hei03] den *Quality Function Deployment* genannten Ansatz eines modularisierten Qualitätsmanagementsystems vor. Sein Ansatz entstammt ebenfalls dem klassischen Qualitätsmanagement; daher lauten die Anforderungen an das vorgestellte Modell, in welches die Qualitätsmanagementmethoden eingebunden werden sollen: Komplexitätsreduzierung, einfache Integration und Qualitätscontrolling. Diese unterscheiden sich offensichtlich von den Zielwerten in der Zuverlässigkeitstechnik.

Die Schwerpunkte der Arbeit beziehen sich daher auf die genannten Forderungen und lauten: Definition der Qualitätsmodule, Planung der Anwendung und Controlling der Effizienz und Effektivität. Jedoch werden diese Aspekte hauptsächlich allgemein betrachtet und beispielhafte Module nur für die Methode *Quality Function Deployment* dargestellt. Der entsprechende Modulansatz sieht zwar ebenfalls eine flexible Verwendung der Module durch in sich abgeschlossene und unabhängige Einheiten vor, jedoch wird nur die Qualitätsplanungsmatrix aus **Abbildung 3.8** gezeigt.

In der Arbeit *Modulare Prüfplanung* beschreibt *Bernards* [Ber06] einen in Module aufgeteilten Prozess zur Planung und Konzeption der in die fünf Phasen *Planung, Entwicklung, Anlauf, Serie* und *Einsatz* unterteilten Prüfplanung. Dabei verwendet er die drei Gestaltungsdimensionen *Funktionen der Prüfplanung, Einsatz der QM-Methoden* und *Expertise der Fachabteilungen*. Ziel der Arbeit ist es, eine besser in den Produktentwicklungsprozess integrierte Prüfplanung zu erreichen. Dies soll durch eine stärker prozessorientierte Organisation anstatt einer institutionellen Ori-

entierung gelingen. Unberücksichtigt bleibt allerdings der Grundgedanke der beliebigen Austausch- und Anpassbarkeit einzelner Module.

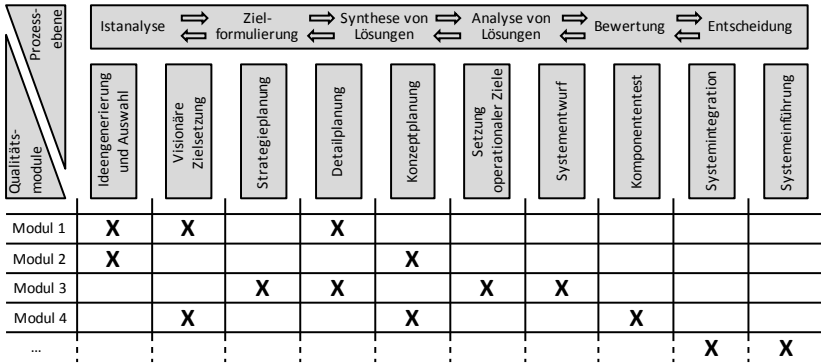


Abbildung 3.8: Qualitätsplanungsmatrix nach Heiliger [Hei03]

Des Weiteren beschäftigt sich *Lindemann* [Lin et al. 09] mit der Modularisierung in der Produktentwicklung. Auch dort wurden umfangreiche Arbeiten veröffentlicht, die im Folgenden betrachtet werden.

Wulf [Wul02] stellt vor dem Hintergrund des schwachen Anklangs klassischer Konstruktionsmethoden fest, dass sich das strikte Befolgen methodischer Richtlinien in Konstruktionsprozessen als nicht zielführend erwiesen hat. Demgegenüber hat sich aber herausgestellt, dass das Vernachlässigen zentraler Aspekte wichtiger Methoden, wie beispielsweise das Klären der Aufgabenstellung, zu Nachteilen beim Erfolg von Produktentwicklungsprojekten führt. Als Fazit aus dieser Beobachtung wird festgehalten, dass die in der Konstruktionsmethodik vorgesehenen Arbeitsschritte prinzipiell gut und wichtig sind, jedoch nicht als Standardablaufprogramm angewandt werden können.

Wulf meint mit Elementarmethoden die grundlegenden Methoden, die die elementaren handlungslogischen Mikrozyklen der Produktentwicklung unterstützen. Dabei stellt er fest, dass die Makrostruktur nur einen Teil der erfolgreichen Lösungssuche ausmacht. Aus seinen Beobachtungen heraus definiert er die diskursive Lösungssuche als elementarmethodisches Konzept mit abstrakten Zielformulierungen. Damit stellt er sicher, dass auch spontane Einschätzungen im Entwicklungsprozess möglich sind und einen politischen Prozess der Lösungssuche, bestehend aus einer Variantengenerierung und einer anschließenden Konsensfindung, hervorrufen.

Pulm [Pul04] führt eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung durch. Die Arbeit wird hier erwähnt, weil der Systemansatz notwendige Voraussetzung für eine modularisierte Vorgehensweise ist. Allerdings wird in der Arbeit nicht direkt auf die Modularisierung eingegangen, sondern eher das komplexe soziotechnische System der Produktentwicklung analysiert. Dabei wird gezeigt, dass verschiedene Prinzipien der Soziologie auch in der Produktentwicklung gelten. Damit

ist bewiesen, dass die Produktentwicklung nichts anderes als ein normaler sozialer Prozess ist. In der Arbeit geht es weniger um konkrete Umsetzungen als vielmehr um eine neue Sichtweise auf die Produktentwicklung.

Gerst [Ger02] zeigt in seiner Arbeit, wie strategische Produktentscheidungen durch einzelne Elementarmethoden unterstützt werden können. Er versteht Elementarfunktionen als Grundelemente komplexer Methoden. Zur Beschreibung der Elementarfunktionen bezieht sich Gerst auf die in [Ehr09] vorgestellte ablauforientierte Funktionsmodellierung, siehe **Abbildung 3.9**. Eine Sammlung der Elementarfunktionen wird allerdings nicht gezeigt. Damit wird eine Abstrahierung der Methodenbeschreibung ermöglicht, die sämtliche Fragen zur Umsetzung und Durchführung der Methode ausblendet. Denn diese Methodenmerkmale, die nicht die Elementarfunktionen betreffen, lassen Methoden als komplex erscheinen. Somit soll durch die Abstrahierung die Komplexität reduziert werden.

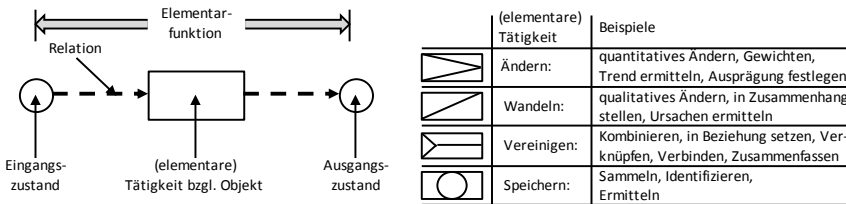


Abbildung 3.9: Modelldarstellung und Symbolausprägungen für Elementarfunktionen einer Methode nach Gerst [Ger02]

Hutterer [Hut05] beschäftigt sich mit den derzeitigen Problemen der Methodenanwendung und untersucht, wie Entwickler zu einem verstärkten methodischen Handeln gebracht werden können. Dabei stellt er fest, dass ohne das Infragestellen des eigenen Handelns auch kein Bedarf an sinnvollen Methodenanwendungen erkannt wird. Daher stellt er den Lösungsansatz der *reflexiven Dialoge* vor, die mithilfe geeigneter Fragestellungen den Entwickler zur Selbstreflexion bringen.

Zudem wird erkannt, dass oftmals nur einzelne Methodenbestandteile erfolgreich eingesetzt werden. *Denkbausteine von Methoden* sollen hierbei die Wirkmechanismen von Methoden stärker in den Vordergrund rücken. Beispielhafte Denkbausteine sind *Definiere das Ziel!*, *Generiere Alternativen!* oder *Ermittle Rangfolgen!*. Dieser Ansatz ist zwar nicht direkt auf das Feld der Zuverlässigkeitsabsicherung übertragbar, aber dennoch ein sehr interessanter Aspekt, der bei der Definition von Zuverlässigkeitsmodulen berücksichtigt werden sollte.

Eine weitere Arbeit zur Flexibilisierung der Produktentwicklung stammt von Ambrosy [Amb97]. Er zeigt, wie ein Problemlösungsprozess in seine elementaren Tätigkeiten unterteilt werden kann. Diese elementaren Tätigkeiten lauten beispielsweise *vergleichen*, *kombinieren* oder *variieren* und werden sog. *Elementarmethoden* wie beispielsweise *ABC-Analyse*, *Morphologie* oder *Tabellen* zugeordnet und gemeinsam als Methodenbaukasten angewandt.

Zimmermann [Zim95] entwickelt in seiner Arbeit einen Qualitätsentwicklungsprozess, welcher den situationsspezifischen Einsatz des Quality Function Deployments (QFD) zum Ziel hat. Dazu wird die Methode QFD in Module gegliedert, die wiederum vier Basisaktivitäten als Hauptfunktionen besitzen. Allerdings ist die Arbeit sehr abstrakt gehalten, sodass konkrete Handlungsanweisungen, wie und wann welches Modul gewählt werden soll, fehlen.

Bereits sehr früh stellt Hoffmann [Hof97] in seiner Arbeit einen speziell für kleinere Unternehmen konzipierten Ansatz einer modularisierten QFD-Analyse vor. Er teilt die Methode QFD in einzelne Hauptschritte auf und verwendet komplexe Tabellen, um abhängig von der jeweiligen Situation die relevanten Schritte auszuwählen. Dabei konzentriert sich dieser Ansatz, der als Grundlage für vielzählige Arbeiten diente, hauptsächlich auf das Fehlermanagement. Demzufolge bleiben für die Zuverlässigkeitsanalyse wichtige Themen, wie beispielsweise die Betrachtung des Produkttrisikos, unberücksichtigt.

Die produktionsprozessorientierte Arbeit von Ellouze [Eli07] hat sich zum Ziel gesetzt, den Widerspruch aus hohem Komplexitätsgrad und mangelnder Problemorientierung als Hauptdefizit des Methodeneinsatzes im Fehlermanagement zu überwinden. Dies kann mithilfe von vier Maßnahmen erreicht werden: inhaltliche Erweiterung der Methoden oder Kombination konventioneller Methoden sowie wesentlich tiefgreifender mithilfe der Adaption von Methoden aus anderen Disziplinen und der Modularisierung von Methoden. Die Forderung der Komplexitätsreduktion berücksichtigt er durch die Zerlegung komplexer Methoden in funktionale Bausteine.

Das Ergebnis ist ein Referenzprozess mit acht Hauptprozessen und 73 Teilprozessen für das Fehlermanagement, siehe **Abbildung 3.10**. Geeignete Methoden werden dabei als Module den entsprechenden Hauptprozessen zugeordnet. Allerdings werden die bestehenden Methoden nur auf Gesamtmethodenebene verknüpft – lediglich die FMEA wird in Module aufgeteilt. Eine mehrfache Kombination der Module ist dabei nicht vorgesehen. Allerdings entsprechen die Module den bekannten Hauptschritten der Methode. Zudem wird eine Einführungsmethodik vorgestellt, die als Selbsteinschätzung der eigenen Handlungsfähigkeit dienen soll. Unterstützt wird diese Vorgehensweise von einem Workflow-Management-System.

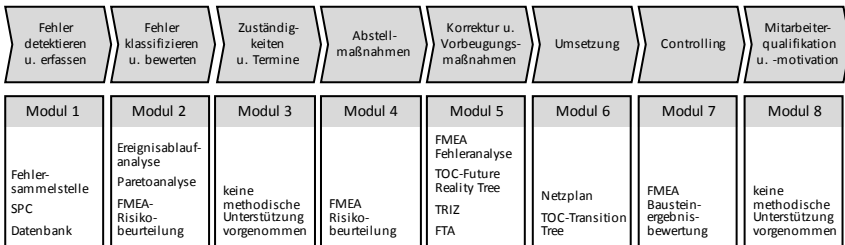


Abbildung 3.10: Modularisierter Referenzprozess zum Fehlermanagement [Eli07]

Neben den genannten Arbeiten, die sich hauptsächlich der Flexibilisierung von Methoden widmen, gibt es weitere Studien, die sich speziell mit dem Thema Modulari-

sierung beschäftigen. Besonders zu erwähnen sind die Arbeiten zur Modularisierung von Dienstleistungen von Dresch [Dre09] und Corsten [Cor et al. 08] sowie die Arbeiten von Göpfert [Göp98] und Baldwin [BaCl00] zur Modularisierung technischer Produkte. Einzelne Aspekte können für die aktuelle Arbeit berücksichtigt werden, die Grundausrichtung dieser Werke ist jedoch eine andere.

Weitere Arbeiten zur Optimierung der Zuverlässigkeitsabsicherung beschäftigten sich mit der Verknüpfung der FMEA mit der Qualitativen Konzeptbewertung [Pic09], mit der Verknüpfung der Zuverlässigkeitsprognose von mechanischen, elektronischen und Softwarekomponenten [Jäg07] sowie mit der Verknüpfung von CAD-Systemen mit der Zuverlässigkeitsabsicherung [Vei99, Rup02]. Des Weiteren wurde von Gäng [Gän12] eine Methode zur Wechselwirkungsbetrachtung vorgeschlagen. Hofmann [Hof13] betrachtet den Umgang mit Informationen in der Zuverlässigkeitsabsicherung. Dabei erstellt er ein Zuverlässigkeitsinformationsmodell, welches als Grundlage für die vorliegende Arbeit herangezogen werden kann.

Fazit zu den aufgeführten Arbeiten

Weder in internationalen noch in nationalen Publikationen wurden Hinweise gefunden, dass die eingangs erwähnte Zielstellung in dieser Art bereits behandelt wurde. Es existieren zwar mehrere Arbeiten zur Modularisierung von Methoden im Allgemeinen oder Qualitätsmanagementmethoden im Speziellen, aber ein Konzept, welches flexible, anpassbare, skalierbare und austauschbare Module zur Zuverlässigkeitsabsicherung bietet, gibt es bisher nicht.

Auch betrachten bisherige Ansätze meistens direkt die oberste Methodenebene und behandeln die Kombination vorhandener Methoden. Zudem liegt bei diesen Arbeiten häufig ein starker Fokus auf der Umsetzung des vorgestellten Methodenbaukastens, z. B. mittels IT-Unterstützung.

Oftmals wird die Modularisierung mit einer Phasenabgrenzung gleichgesetzt oder das Prinzip eines Puzzles angewandt: Eine Vorgehensweise wird in einzelne Schritte unterteilt, die anschließend wieder miteinander verknüpft werden. Allerdings widerspricht ein Puzzle dem Modularisierungsgedanken, denn jedes Puzzleteil hat nur eine einzige Position, an der es zum Ganzen beiträgt. Das bedeutet, dass ein Puzzle erst fertig ist, wenn sich alle Teile an ihrem einzigen richtigen Ort befinden. Damit handelt es sich bei einem Puzzle um genau das Gegenteil dessen, was in der vorliegenden Arbeit erreicht werden soll.

Hier soll daher ein stärkerer Fokus auf die grundlegenden Mechanismen einer Methodenmodularisierung gelegt werden, einschließlich einer detaillierten Analyse der zugrunde liegenden Modelle, ihrer Schnittstellen und der Kombinationsmöglichkeiten. Dabei soll die Arbeit die Thematik auszugsweise beleuchten, da ein fertiger Modulkasten oder Handlungsleitfaden den Rahmen sprengen würde.

3.6 Zwischenfazit

Die bisherige Analyse der heutigen Zuverlässigkeitsabsicherung sowie der allgemeinen Produktentwicklung zeigt die aktuelle Situation auf: Methoden sind unabdingbar aufgrund der Grenzen des menschlichen Gehirns und der großen vorherrschenden Komplexität in der Produktentwicklung. Dennoch sind Methoden umstritten, da sie auf den ersten Blick mehr Zeit benötigen, um zu einer Lösung zu führen.

Die wichtigste Forderung ist daher eine Effizienzsteigerung von Methoden, um auch bei weiterhin steigender Komplexität eine gleichbleibende Zuverlässigkeit gewährleisten zu können. Zudem soll die Effizienzsteigerung Entwickler schneller zur Lösung der vielzähligen Fragestellungen während der Produktentwicklung führen.

So wie bereits in der allgemeinen Produktentwicklung erkannt wurde, dass starre prozedurale Vorgehensweisen nicht der Denkweise des Menschen entsprechen und daher flexible, adaptive Ansätze entwickelt wurden, ist auch in der Zuverlässigkeitsabsicherung ein Umdenken notwendig. Jedoch hat sich ebenfalls gezeigt, dass es nicht zielführend sein kann, Methoden ganz aufzulösen und nur noch auf der Modellebene nach Kombinationen zu suchen. Folglich ist ein Kompromiss aus zu starren Methoden und zu detaillierten Modellen notwendig.

Bei der Betrachtung der aktuellen Forschungslandschaft zeigt sich, dass in Richtung Flexibilisierung bereits einige Arbeiten veröffentlicht wurden und dass der in dieser Arbeit verfolgte Modularisierungsansatz vielversprechend ist. Dennoch beleuchtet keine der Arbeiten konkret die Mechanismen hinter einer Methode und kann direkt auf die Zuverlässigkeitstechnik übertragen werden. Allerdings wurden einige erfolgversprechende Ansätze in anderen Disziplinen dargestellt, welche in den folgenden Abschnitten für die Zuverlässigkeitsabsicherung entwickelt und zusammengeführt werden sollen.

4 Modularisierung komplexer Methoden

Nachdem in den vorigen Kapiteln die heutige Situation sowohl in der allgemeinen Produktentwicklung als auch in der Zuverlässigkeitsabsicherung dargestellt und diskutiert wurde, soll nun untersucht werden, wie universell kombinierbare Methodenmodule auszusehen haben und wie bestehende Zuverlässigkeitsmethoden in Module unterteilt werden können. Dabei soll im Gegensatz zu den vorgestellten bisherigen Forschungsarbeiten nicht nur eine Methode in ihre Hauptschritte unterteilt werden, sondern auch der Unterbau der jeweiligen Methode, die Zuverlässigkeits- und Wissensmodelle, berücksichtigt werden.

Ein einfaches Beispiel vorab zur Unterteilung von Zuverlässigkeitsanalysemethoden ist die Anfertigung eines Fehlerbaums. Der große Zeitaufwand für dessen Erarbeitung anhand der in Abschnitt 2.4.4 aufgezeigten Methode führt dazu, dass dieser selten erstellt wird. Aber müssen immer alle Schritte ausgeführt werden?

Bei einem modulbasierten Konzept könnte die Aufstellung eines Fehlerbaums in drei separate Module aufgeteilt werden:

- Funktionen eines Systems ermitteln
- Fehlfunktionen eines Systems ermitteln
- In Baumstruktur überführen

Nicht unbedingt alle drei Module müssen verwendet werden, um zu einem Ergebnis zu kommen. Aber je mehr Module bearbeitet werden, desto detaillierter ist das Ergebnis.

Dabei ist zu beachten, dass Funktionen und Fehlfunktionen jeweils ein mögliches Systemmodell darstellen und die Baumstruktur ebenfalls ein Modell des funktionalen Zusammenhangs ist. Die Trennung der Schritte erfolgt dementsprechend zwischen den einzelnen Modellen. Es ist klar, dass ein idealer Fehlerbaum alle drei Schritte benötigt. Jedoch reicht es manchmal aus, lediglich die Funktionen detailliert aufzulisten, ohne die Fehlfunktionen zu ermitteln und ohne eine Baumstruktur anzuwenden. Diese Funktionsliste könnte beispielsweise in der Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung weiterverwendet werden; Fehlfunktionen oder die Anwendung einer Baumstruktur sind dort nicht nötig. Des Weiteren sind anstatt Baumstrukturen auch andere Strukturen (Modelle) zur Funktionsstrukturierung denkbar, z. B. Netze. Diese ermöglichen nicht nur 1:n-Beziehungen wie die Baumstruktur, sondern auch n:n-Beziehungen.

4.1 Grundlagen des Modulansatzes

Im Folgenden wird dargestellt, was die Gründe für die Verwendung eines Modulansatzes sind und was eine modulbasierte Vorgehensweise leisten kann. Ebenso werden neben dem Beispiel des internationalen Warenverkehrs aus Kapitel 1 weitere erfolgreiche Modulansätze aus dem alltäglichen Leben aufgezeigt.

4.1.1 Gründe für einen Modulansatz

Bereits in Kapitel 1 wurde dargestellt, dass nicht nur in der Zuverlässigkeitsabsicherung, sondern auch in vielen anderen Bereichen ein Dilemma zwischen Standardisierung und Individualisierung herrscht. Hier verspricht der Modulansatz eine Zwischenebene, die sowohl den Großteil des Bedürfnisses nach Individualisierung als auch ein gutes Maß an Standardisierung erreichen kann. Demzufolge lassen sich mögliche Vorteile einer erfolgreichen Modularisierung wie folgt zusammenfassen:

- Reduktion der Entwicklungs-/Produktionskosten
- Reduktion der Entwicklungszeit
- Reduktion der Variantenanzahl
- Erhöhung der Angebotsvielfalt

Hinzu kommt die Tatsache, dass einzelne kleine Module verständlicher sind als lange Vorgehensweisen oder komplexe Systeme. Dieses Prinzip wird beispielsweise in der komponentenbasierten Entwicklung von Software eingesetzt, um komplexe Softwaresysteme beherrschen zu können. Durch die geschickte Aufteilung und Abtrennung einzelner Funktionen ist die Entwicklung und Erprobung einzelner Module besser handhabbar als bei zusammenhängenden Systemen.

Neben der *Komplexität* gibt es nach [Göp98] weitere Faktoren, die insgesamt eine große Unklarheit bei der Produktentwicklung und damit auch bei der Zuverlässigkeitsabsicherung hervorrufen. Dazu gehört *Neuartigkeit* ebenso wie *Dynamik* und *Zielunklarheit*. Diese vier Einflussgrößen auf die Unklarheit sind für sich selbst genommen zwar auch schon eine große Herausforderung, dennoch sind ihre Wechselwirkungen bedeutend und die gegenseitigen Abhängigkeiten besonders stark. Diesen Zusammenhang stellt **Abbildung 4.1** dar und verdeutlicht, dass auch in der Zuverlässigkeitsabsicherung alle vier Störgrößen beherrscht werden müssen.

Obwohl diese vier genannten Einflussgrößen als Störgrößen bezeichnet werden, besitzen sie teilweise auch einen positiven Aspekt. Dynamik hat zwar den Nachteil, dass zu keiner Zeit ein stationärer, abgesicherter Zustand herrscht. Dies ist in Bezug auf das Entwicklungsprojekt zwar nachteilig, eine dynamische Vorgehensweise allerdings kann jederzeit auf Änderungen von außen reagieren und ist damit vor Überraschungen und Störungen geschützt. Diesen Umstand macht sich [Pul04] zunutze, indem er die modularisierte Produktentwicklung als dynamisches System sieht, bei dem es nie *die* richtige Lösung bzw. Modulkonstellation geben kann, sondern diese sich mit der Zeit ändert. Als Beispiel führt er den kontinuierlichen Verbesserungs-

prozess an, der dafür sorgt, dass sich eine Organisation ständig überprüft und optimiert. Diesem Grundprinzip wird die modulbasierte Zuverlässigkeitsabsicherung gerecht.

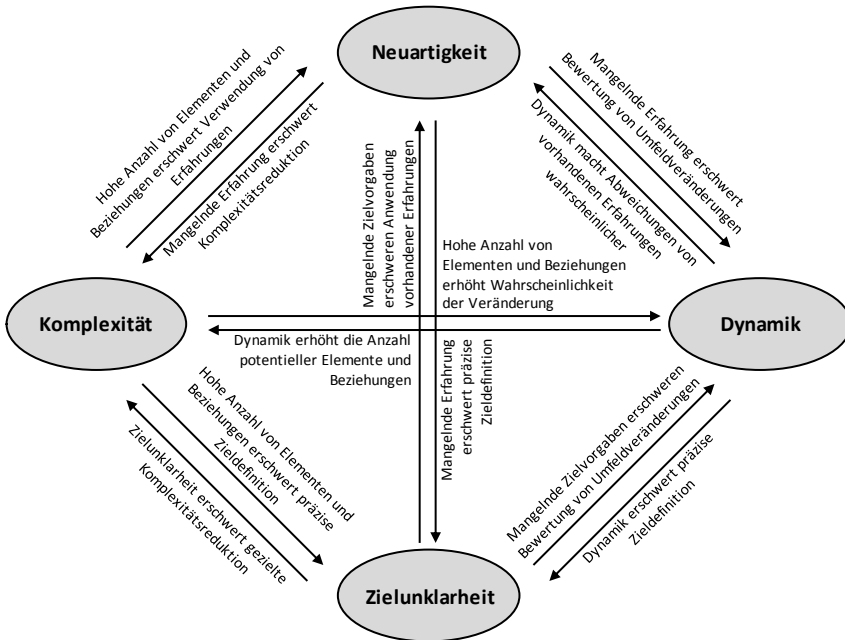


Abbildung 4.1: Mögliche Beziehungen zwischen den Ursachen der Unklarheit, vgl. [Göp98]

4.1.2 Eigenschaften des Modulsatzes

Inhaltlich bezeichnet ein Modul nach Abschnitt 2.1 im Kontext eines technischen Systems ein „austauschbares, komplexes Teil eines Geräts oder einer Maschine, das eine geschlossene Funktionseinheit bildet“ [Bae01, S. 643] bzw. im Kontext der Informationsverarbeitung „eine sich aus mehreren Elementen zusammensetzende Einheit innerhalb eines Gesamtsystems, die jederzeit ausgetauscht werden kann“ [Bae01, S. 643]. Der Gegensatz zu einem modularen System wird als monolithisches System bezeichnet, beispielsweise eine Kaffeemaschine. Wird diese in ihre Komponenten aufgeteilt, können diese nicht wieder neu kombiniert werden und das Gesamtsystem ist defekt, [BaCl00].

Umgangssprachlich wird bei der Austauschbarkeit teilweise noch weiter gegangen, indem unter einem modularen System ein Aufbau aus standardisierten Einzelbauteilen verstanden wird. Damit stellt die Modularisierung eine Maßzahl dar, wie

tief oder fein ein Gesamtsystem in seine Komponenten aufgeteilt und diese neu kombiniert werden können. Damit beschreibt die Modularisierung sowohl die Bindung zwischen den Systemkomponenten als auch den Grad, bis zu welchem die Systemarchitektur den Austausch und die Rekombination von Komponenten zulässt.

In [Les01] werden Methodenmodule unabhängig von der technischen Sichtweise charakterisiert. Dort löst ein Modul genau ein Teilproblem.

4.1.3 Erfolgreiche Modulansätze

Beispiele für erfolgreich umgesetzte Modularisierung gibt es viele. Aus technischer Sicht sind hier die Normteile oder der aktuelle Trend zur Plattformstrategie zu nennen, die jeweils versuchen, durch standardisierte Komponenten, wie beispielsweise Wälzlager, einerseits die Produktionszahlen pro Komponente zu erhöhen, um diese günstiger herstellen zu können sowie andererseits die Anzahl unterschiedlicher Komponenten zu reduzieren, um beispielsweise die Lagerhaltung oder Austauschbarkeit zu vereinfachen.

Neben der in Kapitel 1 erwähnten modularisierten Seefracht baut auch die Computerindustrie stark auf der Modularisierung auf. Module gibt es hier auf unterschiedlichen Ebenen, angefangen von den standardisierten Bauteilen auf einer Platine über die standardisierten Bauteile eines Computers bis hin zu den standardisierten Komponenten eines Rechenzentrums. Nicht nur die Hardware ist modular aufgebaut, auch die ganze Vernetzung sowie die meiste Software besteht aus standardisierten und austauschbaren Modulen.

Im Gegensatz dazu sind das modular aufgebaute Kinderspielzeugsystem Lego oder die ebenfalls aus Modulen bestehenden Bachelor- und Masterstudiengänge fast schon trivial. Auch die Musik basiert auf Modulen unterschiedlicher Ebenen. Teilweise können einzelne Takte als Module (z. B. das Motiv) gesehen werden, aber auch ganze Strophen können beliebig kombiniert werden. Ein letztes Themenfeld soll zeigen, dass die Modularisierung kein vom Menschen erfundenes Prinzip ist, sondern auch in der Natur vorhanden ist: man denke nur an den modularen Aufbau eines Bienennests oder den Zellaufbau aller Lebewesen. Selbst in der Kognitionswissenschaft wird davon ausgegangen, dass unser Gehirn ebenfalls aus abgeschlossenen und unabhängigen Modulen besteht [Fod83].

Die Beispiele verdeutlichen, dass die Modularisierung in sehr vielen Bereichen erfolgreich eingesetzt wird und dort Folgendes ermöglicht:

- Flexibilität durch verschiedene Kombinationsmöglichkeiten
- Standardisierung und Wiederverwendbarkeit durch einheitliche Module
- Bessere Verständlichkeit durch isolierte Betrachtungsmöglichkeiten
- Unabhängigkeit durch Abgrenzungen
- Erweiterbarkeit durch vorhandene Schnittstellen

Diese Vorteile gilt es auch in der Zuverlässigkeitsabsicherung zu verwenden. Denn die Herausforderungen sind vergleichbar und die möglichen Vorteile tragen zu einer

Effizienzsteigerung bei. Dazu werden im folgenden Abschnitt die nötigen Anforderungen an die Modularisierung formuliert.

4.2 Anforderungen an die Modularisierung

Bisher wurde erläutert, dass eine Modularisierung in der Zuverlässigkeitsabsicherung für effizientere und flexiblere Abläufe sorgen kann. Nun soll geklärt werden, wie diese Zuverlässigkeitsmodule im Allgemeinen aufgebaut sein sollen und welche Regeln dabei beachtet werden müssen.

In Abschnitt 3.4 wurde der Zusammenhang von Methode und Modell aufgezeigt und erkannt, dass Methoden eine aufeinanderfolgende Anwendung verschiedener Modelle darstellen. Daher wird die Aufspaltung von Methoden immer zwischen den enthaltenen Modellen erfolgen. Offen bleibt aber die Frage nach der Größe der Module. Denn prinzipiell könnte einerseits eine ganze Methode ein Modul darstellen und andererseits ein einzelnes Modell die kleinste Einheit.

Dies verdeutlicht die Ebenenthematik: Auf welcher Ebene sollen die Module erstellt werden? Dazu muss nochmals klargestellt werden, in welchem Bereich sich die Module befinden. **Abbildung 4.2** zeigt daher den Zusammenhang der wichtigsten Elemente. Bisher gibt es Methoden, die auf einzelnen Modellen oder auf zusammengesetzten Modellen basieren. Als neue Zwischenebene gibt es Module, die auf der untersten – direkt über der Ebene der Modelle liegenden – Ebene Basismodule genannt werden. Diese können ebenfalls wie Modelle zusammengesetzt werden und bilden dann weitere Module.

Wichtig ist jedoch, dass mithilfe der Modularisierung eine hierarchische Modulstruktur möglich ist, die mehrere Ebenen enthält. Das bedeutet, dass die Module in einem ersten Ansatz unabhängig von der Ebene definiert werden müssen, damit sie sowohl auf der untersten Arbeitsschrittebene als auch auf der obersten Geschäftsprozessebene gültig sind.

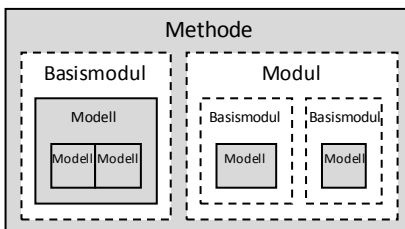


Abbildung 4.2: Zusammenhang von Methode und Modell – erweitert um eine Zwischenebene, den Modulen und Basismodulen

4.2.1 Grad der Modularisierung

Unabhängig von der Wahl der richtigen Ebene muss bei der Modularisierung der richtige Grad der Detaillierung gewählt werden. Denn es existiert ein Dilemma zwischen der Verwendung vieler kleiner Module und der Verwendung weniger großer. Hierbei führen einerseits viele kleine Module wieder zu einem komplexen System [Lin et al. 09], welches jedoch vermieden werden soll. Andererseits beinhalten wenige große Module mehr Modulzwänge, die ebenfalls die Komplexität steigen lassen. Modulzwänge sind beispielsweise fehlende Flexibilität durch sehr spezifische Module oder mangelnde Transparenz der Abhängigkeiten innerhalb eines komplexen Moduls ohne definierte Schnittstellen.

Das Optimum ergibt sich, wie in **Abbildung 4.3** dargestellt, aus dem gemeinsamen Minimum der Modulzwänge und der Modulabhängigkeiten. Damit liegt es gleichzeitig im Gleichgewicht aus Modularisierungsdruck und der Funktionalität durch spezifische Komponenten.

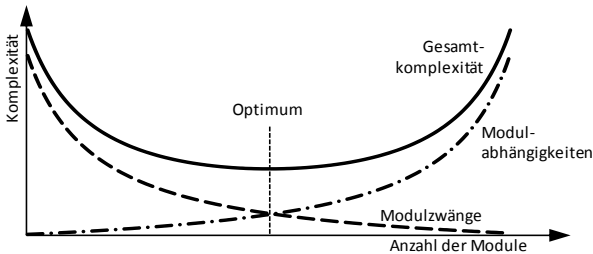


Abbildung 4.3: Optimum des Modularisierungsgrads am gemeinsamen Minimum der Modulzwänge und der Modulabhängigkeiten

Die Modularisierung fördernde oder reduzierende Einflussfaktoren zeigt **Abbildung 4.4**. Dabei sind direkte Einflüsse auf die steigende Modularisierung mit durchgezogenen und indirekte Einflüsse mit gestrichelten Linien dargestellt. Als wichtigste Faktoren werden die Vielfalt der Nachfrage und die Vielfalt der Eingangsgrößen genannt. Die Vielfalt der Eingangsgrößen ist in diesem Fall gleichgesetzt mit der Diversifikation der Wettbewerber, die Produkte mit gleicher Funktion herstellen, beispielsweise Heimkinoanlagen. Diese zeichnen sich durch eine hohe Modularisierung aus, weil viele Hersteller mit unterschiedlichen Technologien auf dem Markt vertreten sind und der Kunde sich je nach persönlicher Vorliebe sein eigenes System zusammenstellen kann.

Neben dem weiteren fördernden Faktor Dringlichkeit gibt es auch Gründe, die eine Reduzierung der Modularisierung erfordern. Dies sind beispielsweise speziell aufeinander abgestimmte Komponenten, wie dies heute beim Office-Paket der Firma Microsoft der Fall ist. Es ist zwar möglich, die einzelnen Anwendungen wie Textverarbeitung und Tabellenkalkulation von unterschiedlichen Herstellern zu benutzen,

aber viele Zusatzfunktionen sind nur möglich, wenn alle Programme vom gleichen Hersteller stammen.

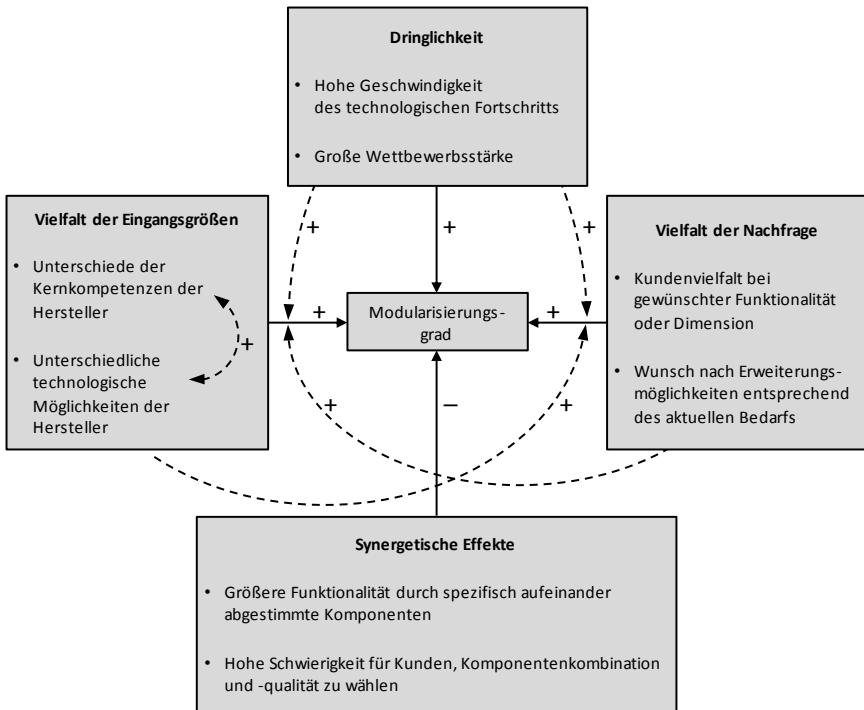


Abbildung 4.4: Zusammenhänge, die eine steigende oder reduzierte Modularisierung hervorrufen, vgl. [Sch00]

4.2.2 Formale Anforderungen an die Modularisierung

Die formalen Anforderungen vertiefen nochmals den Modularisierungsansatz, welcher zwar in vielen Forschungsarbeiten verwendet wird, aber dessen methodische Grundlagen selten beleuchtet werden, [Göp98]. Dazu gehört das oftmals verwendete Prinzip des Puzzles als scheinbar typischer Vertreter der Modularisierung.

Im Gegensatz zur Annahme in vielen Veröffentlichungen ist ein klassisches Puzzle nämlich kein Beispiel für eine Modularisierung, da jedes Puzzlestück individuell und nicht eigenständig verwendbar ist. Und nur wenn alle Puzzleteile an ihrer einzigen, richtigen Position im Gesamtsystem liegen, ist das Gesamtsystem Puzzle vollständig und das Motiv darauf erkennbar. Ein Puzzle ist weder erweiterbar noch sind einzel-

ne Teile austauschbar. Auch eine Hierarchie ist bei üblichen Puzzles nicht vorhanden, jedes Puzzleteil ist gleich wichtig.

Wenn es um formale Anforderungen an Module geht, ist die Softwaretechnik mit ihrem Fokus auf Formalismen der vielversprechendste Aufsetzpunkt. Zudem ist die Softwaretechnik vermutlich die Wissenschaftsdisziplin mit der intensivsten Verbreitung der Modularisierungstechnik. Daher gibt es in diesem Feld detaillierte Anweisungen zum Themengebiet. Speziell das Konzept der objektorientierten Programmierung basiert direkt auf der Modularisierung. Balzert [Bal09a] nennt folgende Eigenschaften eines Softwaremoduls:

- Stellt eine funktionale Einheit dar
- Ist möglichst unabhängig vom Umfeld, d. h. es lässt sich isoliert entwickeln, testen, warten und verstehen
- Weist definierte Schnittstellen auf
- Ist vom Umfang her begrenzt und überschaubar

Zudem finden sich in der Softwaretechnik Module auf den unterschiedlichsten Ebenen. So gibt es auf einer sehr hohen Ebene beispielsweise Programmpakete als Module, während auf der unteren Ebene Klassen und Objekte als Module ausgebildet sind.

Heiliger [Hei03] hat ebenfalls die Softwaretechnik als Vorbild genommen und folgende Kriterien aus den Anforderungen zur Softwarequalität nach der zurückgezogenen ISO 25010 abgeleitet:

- Abgeschlossenheit
- Autonomie
- Integrierbarkeit
- Planbarkeit
- Prüfbarkeit
- Schnittstellenoptimum
- Wiederverwendbarkeit

Bernards [Ber06] nennt zusätzlich noch die Kriterien Abstrahierbarkeit als notwendige Bedingung für die Reduktion der Modulbeschreibung auf das Wesentliche und Robustheit als notwendige Bedingung für ein unempfindliches Gesamtsystem bei Änderungen des Umfelds.

Werden diese Anforderungen umgesetzt, ist eine gewisse Standardisierung der Module möglich, was deren Wiederverwendbarkeit deutlich erhöhen kann. Ebenso ist es leichter, umgebende oder parallele Prozesse und Methoden mit standardisierten Modulen zu verknüpfen.

Diese genannten Anforderungen können nach [Göp98] zusammengefasst werden zu den drei Grundprinzipien *Unabhängigkeit*, *Integrität* und *Dekomposition*.

Unabhängigkeitsprinzip

Das Unabhängigkeitsprinzip besagt, dass die einzelnen Module bzgl. ihres inneren Aufbaus voneinander unabhängig sein müssen. Dieses Prinzip ist im Allgemeinen un-

ter dem *Black-Box-Prinzip* bekannt und findet sich auch in der objektorientierten Softwareentwicklung als sogenanntes Geheimnisprinzip wieder. Module in der Zuverlässigkeitsabsicherung müssen also derart aufgebaut sein, dass sie eine abgegrenzte Fragestellung auf eine beliebige Art und Weise beantworten, jedoch ein definiertes Ergebnis liefern. Ebenfalls dürfen sie ihrerseits nicht von der Art vorhergehender Module beeinflusst werden, sondern nur von den Eingangsinformationen selbst.

Anders formuliert bedeutet das, dass nur das Ziel, nicht aber der Weg dorthin nach außen sichtbar ist. Das Befolgen dieser Forderung ermöglicht es, Module mit gleichen Ein- und Ausgangsgrößen beliebig austauschen zu können, auch wenn die Vorgehensweisen der Module unterschiedlich sind, siehe **Abbildung 4.5**.

Das Befolgen dieses Prinzips hat den großen Vorteil, dass – ähnlich wie in der objektorientierten Softwareentwicklung – ein Modul bearbeitet werden kann, ohne dass über den Inhalt anderer Module nachgedacht werden muss. Somit ist durch die klar vorgegebenen Grenzen eine unabhängige oder parallele Methodenanwendung möglich, beispielsweise indem ein Methodenmodul bereits vom Lieferanten abgearbeitet wird, ohne dass dieser Einblick in die restlichen Module erhält.

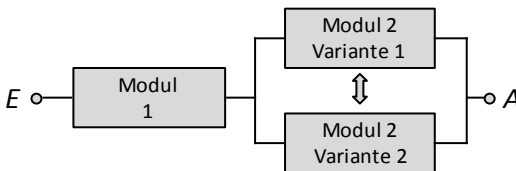


Abbildung 4.5: Unabhängige Module nach dem Unabhängigkeitsprinzip

Integritätsprinzip

Das Integritätsprinzip besagt, dass zwar jedes Modul separat betrachtet werden kann, aber alleine nutzlos ist. Erst die Integration mit anderen Modulen über kompatible Schnittstellen erfüllt eine Funktion, die oftmals größer ist als die Summe der Modulfunktionen. Während das Unabhängigkeitsprinzip alleine noch kein funktionierendes Gesamtsystem hervorbringt, ergänzt das Integritätsprinzip die wichtigen Aspekte des Zusammenwirkens.

Abbildung 4.6 zeigt zwei Module mit kompatiblen Schnittstellen, die dafür sorgen, dass definierte Ausgangsgrößen des einen Moduls als Eingangsgröße des anderen Moduls verwendet werden können. Erst die richtige Relation zwischen diesen beiden Prinzipien ermöglicht ein modulbasiertes System.

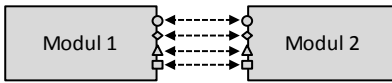


Abbildung 4.6: Kompatible Module nach dem Integritätsprinzip

Dekompositionsprinzip

Bei näherer Betrachtung der Methodenlandschaft und der bestehenden Zuverlässigkeitsmodelle wird deutlich, dass es eine ganze Ansammlung verschiedener Ebenen gibt, die es zu überblicken gilt. Dieser Tatsache wird das Dekompositionsprinzip gerecht, das ähnlich wie die Systembetrachtung von Pahl und Beitz [Pah et al. 06] komplexere Systeme auf einer tieferliegenden Ebene detaillierter mithilfe von Subsystemen abbildet, siehe **Abbildung 4.7**. Auch komplexe Module können somit in einfachere Submodule unterteilt werden. Damit werden Module überschaubarer, je tiefer die Betrachtungsebene gewählt wird. Es muss nur noch geklärt werden, wie die unterste Ebene aussieht.

Ebenso beinhaltet das Dekompositionsprinzip die Tatsache, dass das Verständnis der inneren Abläufe eines Systems eine notwendige und zumeist auch hinreichende Bedingung für eine Modularisierung dieses Systems darstellt. So ermöglicht beispielsweise die Kenntnis der inneren Abläufe im menschlichen Körper Organtransplantationen, die nüchtern betrachtet ebenfalls eine Form der Modularisierung darstellen [Sch00].

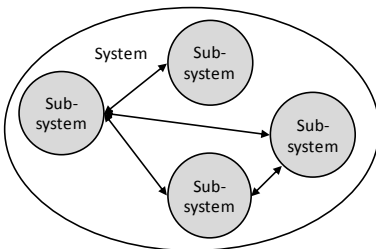


Abbildung 4.7: Unterteilbare Systeme nach dem Dekompositionsprinzip

Zusammenfassend stellt **Abbildung 4.8** dar, wie die ursprünglichen Störgrößen, welche zu Unklarheit im Entwicklungsprozess führen, mithilfe der drei soeben genannten Prinzipien beherrscht werden und die bereits genannten Anforderungen an bzw. Möglichkeiten durch eine Modularisierung aussehen können.

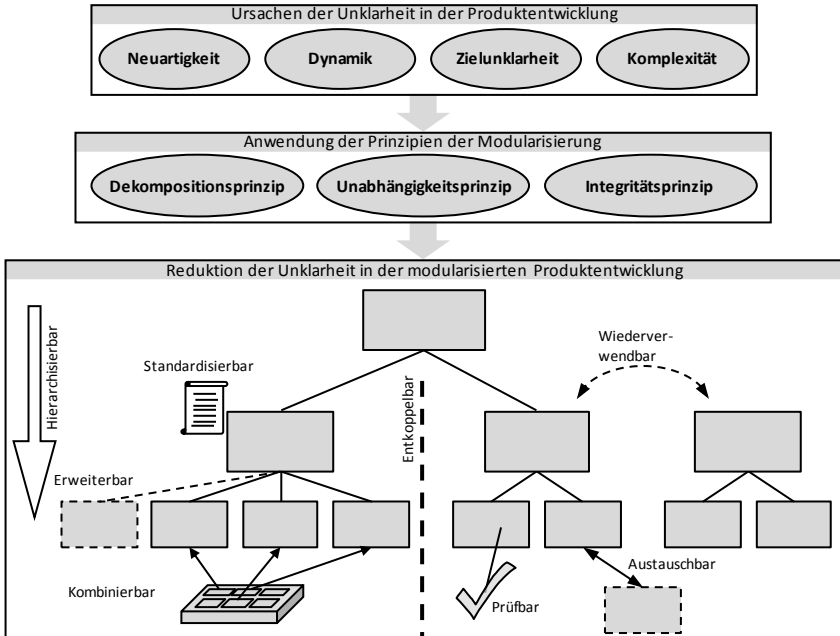


Abbildung 4.8: Reduzierung von Unklarheit durch Anwendung der Modularisierung, vgl. [Göp98]

4.3 Aufbau und Eigenschaften der Module

Nachdem die Anforderungen an die Module geklärt wurden, gilt es nun, den Aufbau und die Eigenschaften von Zuverlässigkeitsmodulen zu ermitteln und festzulegen. Dabei sind zwei Aspekte mit einzubeziehen: der äußere Aufbau der Module, der hauptsächlich das Integritätsprinzip betrifft, und der innere Aufbau, der zu großen Teilen vom Dekompositionsprinzip bestimmt wird.

Es wurde bereits erwähnt, dass ein Modul *eine* Aufgabe erfüllen soll. Diese Eigenschaft muss nun auf die Zuverlässigkeitsabsicherung und die dabei zur Anwendung kommenden Methoden übertragen werden. Bei Methoden ist bekannt, dass diese ein systematisches, schrittweises Vorgehen darstellen und zur Umsetzung dieser Schritte Modelle anwenden. Beispielsweise wird ein System durch Funktionen abgebildet, wobei Funktionen ein Modell der Produktfunktionalität darstellen. Ebenso wird das Ausfallverhalten durch das Modell der Weibull-Verteilung dargestellt. Diese mathematischen Modelle oder Denkmodelle stellen bereits eine in sich geschlossene Betrachtungseinheit dar und sollten nicht weiter unterteilt werden. Auch deren Anwendung erfordert vom Menschen einen zusammenhängenden Denkschritt. Daher

sollen auch die kleinstmöglichen Zuverlässigkeitsmodule, im Folgenden *Basismodule* genannt, diese Größenordnung übernehmen.

4.3.1 Innerer Aufbau der Basismodule

Ein Basismodul beschreibt die Anwendung eines mathematischen Modells oder Denkmodells. Als nächstes stellt sich die Frage, worauf diese Modelle angewandt werden. Modelle an sich besitzen üblicherweise keine Bedeutung, was am Modell der Baumstruktur als solches deutlich wird: Ohne Inhalt besitzt eine Baumstruktur keine Aussage. In bisherigen Beispielen wurden bereits Funktionen genannt; von Lebensdauern oder ganzen Komponenten oder Systemzuständen ist in Methodenbeschreibungen ebenfalls häufig die Rede. Diese Systemmerkmale oder Informationsmengen werden im Folgenden *Wissenselement* genannt, da es sich dabei im Allgemeinen um zusammenhängende Informationen handelt, welche nach [Hof13] als Wissen bezeichnet werden.

Mit dieser Erkenntnis lässt sich ein Basismodul als Anwendung eines grundlegenden Modells auf ein Wissensselement beschreiben. **Abbildung 4.9** zeigt hierzu den systematischen Aufbau eines Basismoduls. Ein Basismodul wäre: *Systemlebensdauer bewerten mithilfe der Weibullverteilung*. Dabei ist *Systemlebensdauer* ein Wissensselement, *bewerten* eine Basisaktion und *Weibullverteilung* das entsprechende Modell zur Abbildung der realen Systemlebensdauer. Module einer höheren Ebene wenden nach dem Dekompositionsprinzip ein komplexeres, aus mehreren grundlegenden Modulen bestehendes Modell an. Beispielsweise kann ein Fehlerbaum als komplexes Modell der zuverlässigkeitsrelevanten Systemzusammenhänge angesehen werden, welches wiederum aus den grundlegenden Modellen einer Booleschen Baumstruktur und einer Funktionsabbildung besteht.

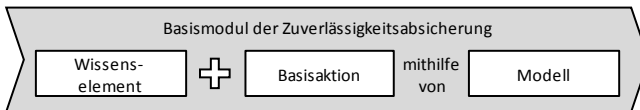


Abbildung 4.9: Innerer Aufbau eines Basismoduls

Der Aufbau und die Definition eines Basismoduls lehnen sich dabei direkt an die Vorgaben zur Funktionsbeschreibung technischer Systeme an. Demnach beschreibt eine Funktion den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen einer Black Box mithilfe einer „Wortangabe mit einem Haupt- und Zeitwort“, beispielsweise *Handkraft verstärken* [Pah et al. 06]. Diese Funktionsbeschreibung ist abstrakter Natur, um dem Konstrukteur eine voreingedenkte Lösungssuche zu ermöglichen. Diese Lösungssuche hat das Ziel, passende Wirkprinzipien zu ermitteln, mithilfe derer die Funktion verwirklicht werden kann. Damit wird die zuvor unbekannte Black Box transparent und die Art und Weise sichtbar, wie die Eingangs- zur Ausgangsgröße umgeformt wird.

Damit zeigt sich, dass Wissenselement und Basisaktion der abstrakten Funktionsbeschreibung entsprechen. Das zusätzlich angegebene Modell stellt das Wirkprinzip dar und ist für die nachfolgenden Module irrelevant, da diese nur die Ausgangsgröße sehen werden.

Ebenso wie Funktionen eines technischen Systems können die Basismodule der Zuverlässigkeitsabsicherung in Haupt- und Nebenfunktionen/-module aufgeteilt sowie miteinander zu einer ganzen Modulkette verknüpft werden. Dies muss beim äußeren Aufbau der Module berücksichtigt werden.

4.3.2 Äußerer Aufbau der Basismodule

Bei der Konzeption des äußeren Aufbaus hilft die Disziplin des Systems Engineering [Hab et al. 02] oder das Modell des lebensfähigen Systems [Gom81], welche das Systemdenken umfassend beschreiben. Wichtige Aspekte sind hierbei die Elemente und ihre Beziehungen, welche eine Hierarchie aus Teilsystemen und Übersystemen bilden. Übertragen auf die Modularisierung der Zuverlässigkeitsabsicherung bedeutet das, Module als Elemente eines übergeordneten Systems – beispielsweise einer Methode – zu betrachten. Die Module können dabei verschiedenartige Beziehungen miteinander aufweisen und bilden damit eine Struktur, welche nach [Bla01] folgende Formen annehmen kann:

- *Horizontale Struktur*: Diese besitzt keine Hierarchie, jedes Modul ist gleich bedeutend. Diese Form entspricht dem rein sequentiellen Vorgehen klassischer Produktentwicklungsmethoden. Damit stellt es aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht ein serielles System ohne Redundanzen dar. Die Beziehungen lassen sich immer als 1:1-Beziehungen abbilden.
- *Hierarchische Struktur*: Diese ist zwar eine unrealistische und künstliche Struktur, die sich dennoch vielfach bewährt hat, um ein beliebiges System koordinierbar und handlungsfähig zu gestalten. Jedes Element bis auf das oberste Wurzelement hat dabei ein genau festgelegtes Über-Element. Die Beziehungen lassen sich immer als 1:n-Beziehungen abbilden. Beispielsweise wäre so eine Boolesche Modulstruktur ähnlich eines Fehlerbaums möglich. Damit könnten auch optionale, also redundante Module, welche in der Praxis häufig vorkommen, abgebildet werden.
- *Netzstruktur*: Diese ist vollständig losgelöst von strukturellen Zwängen, jedes Element kann Beziehungen zu beliebigen anderen Elementen besitzen. Dies ist zwar die realistischste Strukturabbildung, aufgrund der möglichen m:n-Verbindungen aber auch die am schwierigsten zu organisierende.

Wird der äußere Modulaufbau entsprechend der im vorigen Abschnitt angegebenen Anforderungen gewählt, muss an dieser Stelle keine Beschränkung auf eine der Strukturformen vorgenommen werden, da das Black-Box-Prinzip sowie die Verwendung definierter Schnittstellen alle drei Strukturformen ermöglicht. Allerdings müssen auch Aspekte wie die Zeitabhängigkeit einzelner Module und aufeinander auf-

bauende Informationen berücksichtigt werden. Dies wird in Kapitel 6 eingehend betrachtet.

Neben innerem und äußerem Aufbau der Module als sogenannter Mikroaufbau ist auch der Aufbau des gesamten Modulgebildes relevant. Die leitende Frage hierbei ist, wie zukünftig der Lösungsweg einer zuverlässigkeitsrelevanten Fragestellung aussehen kann. Beispielsweise ergibt sich häufig die Frage, welche Komponenten eines Produktes am kritischsten für die Systemlebensdauer sind oder waren – je nachdem, ob es sich um ein neues oder bestehendes Produkt handelt.

Diese Fragestellung kann im Allgemeinen nicht mit einem Modell beantwortet werden, denn einerseits kann eine Fragestellung sehr komplexe Betrachtungen erfordern und andererseits oftmals sehr abstrakt sein. Das zeigt, dass es sich bei der modulbasierten Zuverlässigkeitsabsicherung um ein mehrschichtiges Vorgehen handelt. Fragestellungen, Methoden, Module oder Informationen repräsentieren unterschiedliche Ebenen, die nicht miteinander vertauscht werden können.

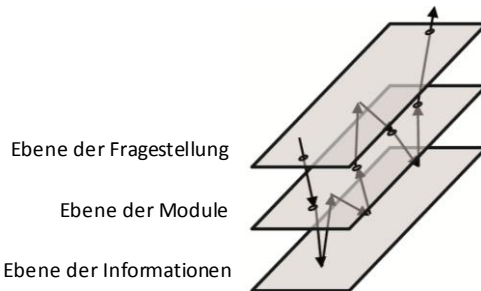


Abbildung 4.10: Verschiedene Ebenen der modulbasierten Zuverlässigkeitsabsicherung

Eine mögliche Umsetzung dieser Ebenen ist in **Abbildung 4.10** dargestellt. Danach ist die *Ebene der Fragestellung* sowohl die abstrakteste Ebene als auch der Auslöser oder Trigger eines Problemlöseprozesses. Um diese Fragestellung beantworten zu können, ist eine tiefere, weniger abstrakte Ebene notwendig. Auf ihr befinden sich sowohl Methoden als auch die Zuverlässigkeitsanalysemodule und ihre Modelle. Diese *Ebene der Module* besitzt jedoch ihrerseits auch wieder mehrere Teilebenen, die beispielsweise komplexere, aus anderen Modellen bestehende Modelle höher einordnen können. Die untere Ebene ist die *Ebene der Informationen*. Sie stellt die Verbindung der Module miteinander sicher, da die Wissens Elemente auf Informationen dieser Ebene aufbauen. Diese Ebene kann bei Bedarf noch auf die Datenebene heruntergebrochen werden. **Abbildung 4.11** bettet die in **Abbildung 4.2** dargestellten Methoden, Module und Modelle in die drei Ebenen ein und veranschaulicht den Gesamtzusammenhang. Dargestellt ist auch die bisher häufig anzutreffende Situation, wonach *eine* Fragestellung mithilfe *einer* Methode beantwortet wird.

Der Prozess der Zuverlässigkeitsabsicherung ist demnach ein ständiges Wechseln der Ebenen, was auch organisatorisch berücksichtigt werden muss. So ist die oberste Ebene hauptsächlich das Handlungsfeld des Managements, während Methodenspe-

zialisten die Modulplanung auf der mittleren Ebene übernehmen. Die unterste Ebene ist einerseits die rein technische Informationsverarbeitung und andererseits die des einzelnen Entwicklers, der die Zuverlässigkeitsabsicherung umsetzt.

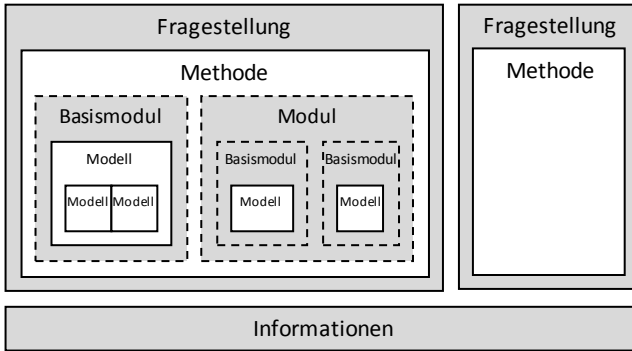


Abbildung 4.11: Zusammenhang der drei Elemente Fragestellung, Modul, Information mit Methoden und Modellen

4.3.3 Basisaktionen als Teil der Basismodule

Während Wissens-elemente bereits in Abschnitt 4.3.1 als vernetzte Informationsblöcke, wie beispielsweise *Funktionen eines Systems* erklärt wurden, blieben die Basisaktionen und die dazu verwendeten Modelle bisher unbekannt. Basisaktionen sind elementare Tätigkeiten, die immer wieder während der Zuverlässigkeitsabsicherung durchgeführt werden. Für vergleichbare Elementartätigkeiten in der Produktentwicklung wird auf [Wul02] verwiesen. Beispielhafte Basisaktionen sind *Ermitteln*, *Bewerten* oder *Auswählen*. In Kapitel 6 werden diese Basisaktionen noch genauer beleuchtet und gezeigt, dass es nur eine begrenzte Menge dieser Basisaktionen gibt.

Jedoch steht bereits fest, dass jede Basisaktion mit einer Sammlung unterschiedlichster Modelle umgesetzt werden kann. Diese Sammlung enthält dabei sowohl einfachere als auch komplexere Modelle, welche je nach aktueller Anforderung eingesetzt werden können. Eine Sammlung unterschiedlicher Modelle für die Basisaktion *Bewerten* gibt beispielsweise Breiing [BrKn97]. Er zeigt eine Sammlung unterschiedlichster Modelle zum qualitativen und quantitativen Bewerten. Dabei reicht die Spanne von scharfen bis unscharfen oder von eindimensionalen bis n-dimensionalen Bewertungszahlen. Des Weiteren zeigt [Amb97] eine Sammlung von Elementarmethoden, die er verschiedenen, in der Produktentwicklung vorkommenden Elementartätigkeiten zuweist.

4.4 Schnittstellen der Module

Werden klassische prozedurale Methoden aufgetrennt, werden anschließend spezifische Schnittstellen benötigt, um trotz der Trennung eine durchgängige Informationskette bilden zu können. Zudem ist die durchgängige Informationskette ausdrückliches Ziel der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung und soll deshalb speziell betrachtet werden.

Wie bereits im vorigen Abschnitt dargestellt wurde, sind die Zuverlässigkeitsmodule über eine darunterliegende Informationsebene verbunden. Wird die bestehende Methodenlandschaft betrachtet, zeigt sich eine unbefriedigende Situation: Etablierte Methoden besitzen üblicherweise keine Schnittstelle, sondern weisen entweder deutliche Überschneidungen (z. B. zwischen FTA und FMEA) auf oder benötigen eine spezielle Verbindung, um einmal generierte Informationen weiterverwenden zu können. Ausnahme bilden einzelne Methoden wie beispielsweise die *Qualitative Konzeptbewertung* (siehe Abschnitt 2.5.3), die bewusst mit einer Schnittstelle zur FMEA ausgestattet wurde.

Schnittstellen werden benutzt, wenn zwei Black Boxes miteinander interagieren sollen und bestehen in dieser Arbeit aus dem Output des übermittelnden Moduls, dem Input des empfangenden Moduls und der Informationsübertragung.

4.4.1 Darstellung der Schnittstellen

Zur Darstellung von Schnittstellen gibt es nach [Hab et al. 02] zwei geeignete Möglichkeiten: die Verwendung von Graphen oder von Matrizen, wobei diese beiden Darstellungen ineinander überführt werden können. **Abbildung 4.12** zeigt die beiden möglichen Darstellungsformen für ein Modul mit vier Ein- und vier Ausgangsgrößen.

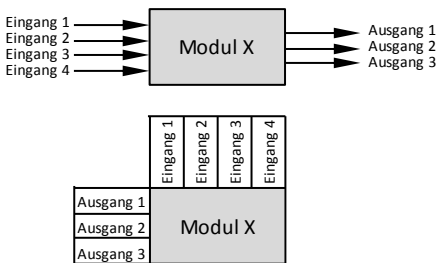


Abbildung 4.12: Darstellung eines Moduls als Flussgraph oder als Matrix

Üblicherweise wird der Flussgraph zur Abbildung eines aus Black Boxes bestehenden Systems verwendet, während Matrizen besser für die Abbildung von White Box-Systemen geeignet sind.

Wie bereits in Abschnitt 3.5 erwähnt, knüpft die vorliegende Arbeit an das in [Hof13] vorgestellte *Zuverlässigkeits-Informations-Modell* an. Dabei handelt es sich um ein matrixbasiertes Konzept zur Realisierung eines zuverlässigkeitsorientierten Informationsflusses. Da es bei der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung auf diesen Informationsfluss ankommt, bietet diese Arbeit den richtigen Aufsetzpunkt.

Das dort vorgestellte Vorgehen baut auf dem Ansatz der *Design Structure Matrix* (DSM), der *Multiple Domain Matrix* (MDM) und der *Domain Mapping Matrix* (DMM) nach [Ste81] oder [Lin et al. 09] auf. Dies sind drei spezielle Matrixtypen, die Abhängigkeiten zwischen Ein- und Ausgangsgrößen sowohl ungewichtet und damit binär als auch gewichtet abbilden können. Eine Besonderheit der Multiple Domain Matrix ist, dass Abhängigkeiten sowohl zwischen Ein- und Ausgangsgrößen mithilfe der Domain Mapping Matrix als auch innerhalb der Ein- und Ausgangsgrößen mithilfe der Design Structure Matrix abgebildet werden können. **Abbildung 4.13** zeigt eine MDM als mögliche Kombination aus zwei DMMs und zwei DSMs.

	Eingang 1	Eingang 2	Eingang 3	Eingang 4	Ausgang 1	Ausgang 2
Eingang 1					X	X
Eingang 2	X		X			
Eingang 3				X	X	
Eingang 4		X				X
Ausgang 1						
Ausgang 2					X	

Abbildung 4.13: Darstellung einer Multiple Domain Matrix, bestehend aus zwei Design Structure Matrizen (oben links und unten rechts) und zwei Domain Mapping Matrizen (oben rechts und unten links)

4.4.2 Konzeption der Schnittstellen

Bei der Konzeption von Schnittstellen bietet sich ebenfalls eine Betrachtung der Softwarekonzepte im Rahmen der objektorientierten Programmierung an. [Mey90] nennt bzgl. der Gestaltung von Schnittstellen folgende Prinzipien, die für eine korrekte Modularisierung umgesetzt werden müssen:

- Wenige Schnittstellen
- Schmale Schnittstellen
- Explizite Schnittstellen

Das erste Prinzip *Wenige Schnittstellen* betrifft die Anzahl der Schnittstellen. Prinzipiell könnte jedes Modul mit allen anderen Modulen verbunden sein. Dies ist jedoch nicht zielführend, da so die Austauschbarkeit und Übersicht erschwert wird, siehe **Abbildung 4.14** Mitte. Besser ist es, entweder jedes Modul nur mit einem speziellen Modul kommunizieren zu lassen, siehe **Abbildung 4.14** rechts, oder aber jedes Modul mit seinem Vorgänger und seinem Nachfolger, siehe **Abbildung 4.14** links. Sind aber Vorgänger und Nachfolger entweder unbekannt, variabel oder werden diese gar von anderen Personen bearbeitet, empfiehlt sich die Verwendung einer zentralen Plattform zum Informationsaustausch. Hier bietet sich das von [Hof13] vorgestellte *Zuverlässigkeits-Informations-Modell* (ZIM) an.

Dieses Modell ist auch der richtige Ort, um vor Beginn einer Modulbearbeitung zu prüfen, ob alle nötigen Informationen vorhanden sind und welche Informationen zusätzlich benötigt oder überarbeitet werden müssen. Das Ergebnis dieses Vorbereitungsschrittes bzw. dieser Situationsanalyse ist schließlich die Empfehlung für ein bestimmtes Modul bzw. eine Sammlung mehrerer Module. Ergibt sich eine Änderung im Zuverlässigkeitsabsicherungsprozess, kann diese bei einer zentralisierten Struktur besser durchgeführt werden als bei verteilten Strukturen, wo oftmals die Auswirkungen einer Änderung gar nicht nachvollzogen werden können.

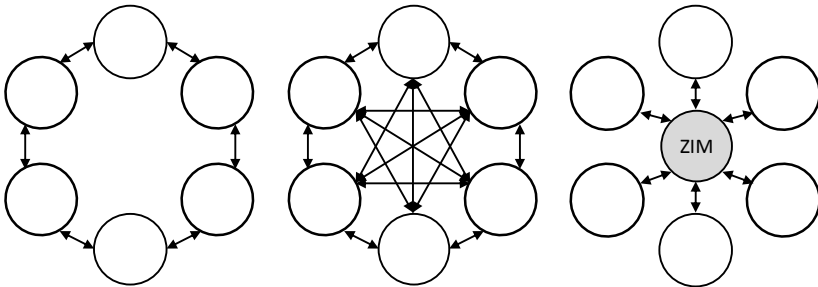


Abbildung 4.14: Verschiedene Möglichkeiten zur Schnittstellenbildung

Das zweite Prinzip *Schmale Schnittstellen* betrifft den Umfang der übertragenen Informationen. Dieser sollte so gering wie möglich sein, sodass ausschließlich wichtige und relevante Informationen übergeben werden. Oftmals wird der Fehler begangen, dass ganze Lastenhefte oder FMEA-Dokumente als Eingangsinformationen verwendet werden. Dabei geht nicht nur die Motivation verloren, die Menge an Informationen zu bearbeiten, sondern es steigt auch das Risiko, wichtige Informationen zu übersehen. Überdies erleichtern schlanke, auf das Wesentliche reduzierte Schnittstellen das Nachverfolgen bzw. Durchführen von Änderungen, die im Entwicklungsprozess unweigerlich auftreten.

Das letzte Prinzip *Explizite Schnittstellen* soll bewirken, dass „Außenverbindungen“ deutlich gemacht werden, damit übertragene Informationen von generierten Informationen zu unterscheiden sind. In der realen Zuverlässigkeitsabsicherung bedeutet dies, dass externe Informationen nur mit Quellennachweis verwendet wer-

den. Dies dient nicht nur der Verständlichkeit, weil klar ist, was von außen kommt und was selbst generiert werden muss, sondern verbessert auch die Zerlegbarkeit und Kombinierbarkeit.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist der Umgang mit unterschiedlichen Ein- und Ausgangsinformationen. Eine Forderung an diese Arbeit und an die modularisierte Zuverlässigkeitsabsicherung ist die Flexibilität bezüglich verwendbarer Eingangs- und erzeugter Ausgangsinformationen. Dies gilt jedoch nicht für ein Basismodul als solches, da dieses keine optionalen Ein- und Ausgangsinformationen bietet. Vielmehr wird die geforderte Flexibilität dadurch erreicht, dass für unterschiedliche Rahmenbedingungen unterschiedliche Module verwendet werden. Somit ist sichergestellt, dass die Basismodule nur eine Konstellation von Ein- und Ausgangsinformationen ermöglichen müssen.

4.5 Vorgehensweise bei der Modularisierung

Eine mögliche Vorgehensweise zur Modularisierung von Zuverlässigkeitsmethoden und zur Neukombination der identifizierten Module wird in **Abbildung 4.15** schematisch dargestellt. Am Anfang steht eine Sammlung verschiedener, bereits existierender Zuverlässigkeitsmethoden, welche zusammengeführt werden sollen, siehe Abschnitt 2.3. Anschließend können die Methoden abhängig von ihrem Anwendungsbereich beziehungsweise ihrer Domäne Mechanik, Elektronik oder Software und ihrem Anwendungszeitpunkt gemeinsam angeordnet werden. Diese sich ergebende Methodenlandschaft stellt die verschiedenen Methoden beispielsweise entlang des Produktentwicklungsprozesses dar.

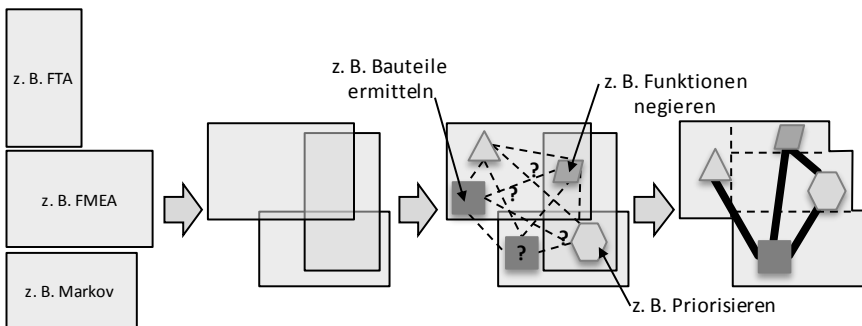


Abbildung 4.15: Vorgehensweise bei der Modularisierung und Kombination von Zuverlässigkeitsmethoden

Nach dem Ordnen der Methoden werden die Einzelschritte und Modelle analysiert, die den Methoden zugrunde liegen. Diese Analyse, welche die detaillierte Betrachtung der verwendeten Modelle und deren Ein- und Ausgangsgrößen mit einschließt

ist wichtig, um im nächsten Schritt korrekt miteinander verbundene Module zu erhalten. Dies geschieht, indem die identifizierten Modelle neu angeordnet und zu sich gegenseitig möglichst nicht überlappenden Modulen kombiniert werden. Im gleichen Schritt können die Module als optional oder obligatorisch konzipiert und mögliche Modulkombinationen festgelegt werden.

4.5.1 Modelle und Schnittstellen ermitteln und abbilden

Ein wichtiger Hinweis zum Vorgehen wird vom Urheber des Modularisierungsgedankens in der Softwaretechnik, Parnas [Par72], gegeben. Er empfiehlt, eine Vorgehensweise nicht auf Basis eines Flussdiagramms der Arbeitsschritte zu modularisieren, sondern eine Liste schwieriger oder variierender Entscheidungen anzulegen. Jedes Modul wird anschließend so gestaltet, dass es eine dieser Entscheidungen vor den anderen versteckt. Nach und nach werden damit alle kritischen Entscheidungen in Module aufgeteilt. Der Hintergrund ist, dass viele Entscheidungen übergreifend über mehrere Arbeitsschritte entstehen und daher nicht den tatsächlichen Arbeitsschritten in einem Flussdiagramm entsprechen. Für diese Arbeit ist folglich zu beachten, weniger die tatsächlichen Arbeitsschritte als vielmehr die gedanklichen Schritte als Ablauf zu verstehen.

Dies trifft auch auf die Modelle als Kernelemente der Zuverlässigkeitsabsicherungsmethoden zu, da diese in erster Linie gedankliche Abbildungen darstellen und nicht immer mit Arbeitsschritten vereinbar sind. Beispielsweise ist die tabellarische Darstellung der Fehlzustandsarten in der FMEA unabhängig von den Arbeitsschritten, ermöglicht dem Bearbeiter aber eine Übersicht der kritischen Zustände eines Systems und ist deshalb ein entscheidender Erfolgsfaktor der FMEA.

Bei der Ermittlung der Modelle und Schnittstellen hilft wieder ein Blick in Richtung Produktentwicklungsmethodik. Dort werden Funktionalitäten eines Systems abstrakt als Teilfunktionen abgebildet. Das ermöglicht einen unvoreingenommenen Lösungsfindungsprozess zur Ermittlung des optimalen Wirkprinzips bzw. der besten Umsetzung dieser Funktionen. Wird dies auf die Abbildung von Zuverlässigkeitsabsicherungsmethoden übertragen, hilft eine abstrakte Methodenbeschreibung zur Erkennung der tatsächlichen Denkprozesse, die normalerweise im Hintergrund liegen. Oftmals steht nämlich leider die konkrete Umsetzung einer Methode zu sehr im Vordergrund. Speziell in dieser Arbeit sollen diese Methodenmerkmale, die nur der konkreten Umsetzung dienen, getrennt von den tatsächlichen Abläufen betrachtet werden.

4.5.2 Prinzipielles Vorgehen zur Ermittlung neuer Modulgrenzen

Generell eignen sich zum Auffinden neuer Module bzw. derer Grenzen verschiedene Vorgehensweisen. Einerseits kann top-down vorgegangen werden, um bestehende Methoden aufzutrennen, was Bestandteil des folgenden Kapitels sein soll. Andererseits kann eine bottom-up-Strategie, bei der neue Module aus einzelnen Modellen

aufgebaut werden, zu gänzlich neuen Sichtweisen führen. Dies soll im Praxisbeispiel in Kapitel 7 geschehen. Im Folgenden wird jedoch zuerst das Auftrennen bzw. Modularisieren bestehender Methoden betrachtet, da das Bilden gänzlich neuer Module bzw. Modulkombinationen Inhalt von Kapitel 6 ist.

Beim Finden der relevanten Modulgrenzen kommt es darauf an, die Beziehungsstärken zwischen den einzelnen Modellen bzw. deren Anwendungen zu analysieren und deren Intensität zu bestimmen. Beispielsweise ist es wenig sinnvoll, die Ermittlung von Funktionen und deren Strukturierung voneinander zu trennen. Die Verbindungen zwischen diesen Schritten sind zu stark, als dass eine Person zunächst die Ermittlung und anschließend eine andere Person die Strukturierung sinnvoll durchführen könnte. Demgegenüber kann ein Ranking dieser Funktionen von einer Person, die Auswahl der wichtigsten Funktionen jedoch von einer anderen Person durchgeführt werden.

Bei den einzelnen Modellanwendungen heutiger Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung kann zwischen unterschiedlich stark ausgeprägten Beziehungen unterschieden werden. Ein extremer Fall ist, wenn alle Modelle innerhalb einer Methode sehr starke Beziehungen zueinander besitzen, aber nach außen hin praktisch keine Beziehungen vorhanden sind. Diese Konstellation deutet bereits darauf hin, dass hier keine Modularisierung sinnvoll ist. Der andere Extremfall wären durchweg sehr starke Beziehungen – sowohl innerhalb der Methoden als auch nach außen. Auch hier ist eine Modularisierung nicht zielführend; die betrachtete Methode sollte eher mit den sie umgebenden Methoden verbunden werden.

Bei allen anderen Konstellationen gibt es sowohl starke als auch schwache Beziehungen, die auf mögliche Modulgrenzen hinweisen können. Innerhalb der Modulgrenzen sollten alle Modelle mit einer starken Verbindung zueinander stehen. Die schwachen Verbindungen über Modulgrenzen hinweg sorgen sodann als Brücken für das Zusammenwirken der Module, siehe **Abbildung 4.16**.

Die *Cluster-Analyse* [Bac et al. 11] ist ein Verfahren zur Ermittlung von Strukturen in einer Menge von Daten. Dabei werden mithilfe eines hierarchischen Clusterverfahrens Gruppen zusammengehörender Daten gebildet. Wird der Average-Linkage-Algorithmus verwendet, kann eine Fehlerquadratsumme als Maß der Varianz innerhalb einer Gruppe ermittelt und über der Anzahl der Gruppen aufgetragen werden. Dabei nimmt die Fehlerquadratsumme stetig ab, je kleiner die Gruppen sind. Signifikante Abnahmen bei einer bestimmten Gruppenanzahl deuten auf eine optimale Gruppengröße hin.

Übertragen auf die Modularisierung entsprechen die Gruppen einzelnen Modulen mit eng verbundenen Modellanwendungen. Allerdings ist das Verfahren bei der Modularisierung eher theoretisch anwendbar, da es exakt definierte Beschreibungen der Beziehungsarten und -stärken benötigt. Diese werden aber wohl in den seltensten Fällen vorliegen.

Dass dies dennoch funktionieren kann, zeigen die Arbeiten von Corsten und Dresch zur Modularisierung von Dienstleistungen [Cor et al. 08]. Nach deren Definition sind Dienstleistungen – genau wie die Zuverlässigkeitsabsicherung – eine Folge elementarer Transformationen. Und auch dort ist es erstrebenswert, standardisierte Teilprozesse anstatt individueller, komplexer Dienstleistungsprozesse zu erhalten.

Um dies zu erreichen, wird auf Basis einer Design Structure Matrix eine Clusteranalyse nach [Sos et al. 03] durchgeführt, um Module in Abhängigkeit der Stärke von Interdependenzen der Teilprozesse zu wählen. Dies wird zusätzlich unterstützt durch die Bildung der Zeilen- und Spaltensummen über die Interdependenzstärken, um beeinflussende und beeinflusste Aktionen gruppieren zu können [Dre09].

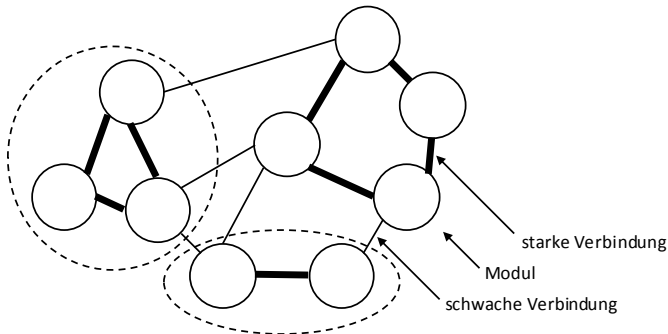


Abbildung 4.16: Module werden nach der relativen Stärke ihrer Verbindungen identifiziert [Bla01]

5 Identifikation von Basismodulen in der Zuverlässigkeitsabsicherung

Nachdem im vorigen Kapitel die formellen Kriterien für eine modularisierte Zuverlässigkeitsabsicherung auf abstrakte Art und Weise festgelegt wurden, wird in diesem Kapitel deren Umsetzung erklärt. Dazu werden in diesem Abschnitt die bisher dargestellten theoretischen Grundlagen auf bestehende Methoden der Zuverlässigkeitsabsicherung angewandt, indem mehrere Methoden ausgewählt und jeweils in einzelne Methodenmodule aufgeteilt werden.

5.1 Modularisierung bestehender Methoden

Aufgrund des Schwerpunktes der vorliegenden Arbeit in den frühen Entwicklungsphasen werden im Folgenden die quantitative Fehlzustandsbaumanalyse (FTA) sowie die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) daraufhin untersucht, ob auch bestehende Methoden durch die im vorigen Kapitel beschriebenen Basismodule dargestellt werden können. Erst wenn sich zeigt, dass bestehende Methoden nach den ermittelten Gesetzmäßigkeiten aufgebaut sind, können die Module dazu verwendet werden, neue Methoden bzw. eine methodenunabhängige Zuverlässigkeitsabsicherung zu gestalten.

Die wichtigsten bei der Modularisierung zu berücksichtigenden Aspekte aus Kapitel 4 sind die Betrachtung von Gedankenschritten anstatt von Arbeitsschritten und die Berücksichtigung der verschiedenen Ebenen. Die verschiedenen möglichen Modulstrukturen kommen hingegen nicht zur Anwendung, da nur bestehende Methoden modularisiert werden sollen.

5.1.1 Basismodule der quantitativen Fehlzustandsbaumanalyse als Beispiel einer quantitativen Zuverlässigkeitsmethode

Als Basis für weitere Funktionsbetrachtungen wird die Fehlzustandsbaumanalyse als Fallbeispiel ausgewählt. Eine interessante Beobachtung dabei ist, dass die Erstellung der Fehlfunktionsstruktur in verschiedenen anderen Arbeiten zum Thema, beispielsweise [Les01], als ein Arbeitspaket betrachtet wird. Dennoch gibt es einerseits

mehrere gedankliche Schritte, die zum Aufbau einer Fehlfunktionsstruktur nötig sind. Andererseits gibt es aber auch sehr viele unterschiedliche Herangehensweisen zur Erstellung einer Fehlfunktionsstruktur.

Es muss nur die Erstellung einer Fehlfunktionsstruktur zur Analyse der funktionalen Sicherheit mit der Erstellung einer Fehlfunktionsstruktur für eine FMEA verglichen werden. Prinzipiell handelt es sich um die gleichen Dinge; in der Praxis kann ein FMEA-Moderator jedoch den Fehlerbaum einer Sicherheitsanalyse nicht verwenden. Dies gilt auch für den umgekehrten Fall.

Die Differenz spiegelt sowohl die unterschiedliche Zielstellung der beiden Fehlfunktionsbäume als auch die unterschiedliche Betrachtungsrichtung der Bearbeiter wider. Ein modulares Vorgehen kann hier helfen, die gemeinsamen Schritte nur einmal zu gehen und die spezifischen Erweiterungen in getrennten Modulen zusätzlich durchzuführen. Die allgemeinen Arbeitsschritte der Fehlzustandsbaumanalyse lauten wie folgt:

- Ermittlung der Funktionen
- Strukturierung der Funktionen mithilfe einer Baumstruktur
- Ermittlung der Fehlfunktionen

Verglichen mit dem Aufbau eines Basismoduls in **Abbildung 4.9** zeigt sich, dass in den Arbeitsschritten der Fehlzustandsbaumanalyse einmal ein Modell vorgeschrieben ist, ein andermal nicht. Wie die Ermittlung jeweils zu erfolgen hat ist unklar; wie die Strukturierung erfolgt, ist jedoch festgelegt.

Ein erster Ansatz ist, die Baumstruktur als *ein* mögliches Modell zur Strukturierung vorzuschlagen, aber nicht als Zwang anzusehen. Für einfache technische Systeme oder triviale Fragestellungen ist eine Baumstruktur viel zu umständlich, für sehr komplexe Systeme ist sie unzureichend. Beispielsweise ist für die Fehlfunktionsdarstellung eines Gabelschlüssels sicher keine Baumstruktur notwendig.

In Abschnitt 4.3.2 wurde das Ebenenkonzept erläutert, welches auch bei der Fehlzustandsbaumanalyse angewandt werden kann. Die Fragestellung stellt dabei die höchste Ebene dar und lautet im Fall der Fehlzustandsbaumanalyse je nach Anwendungsfall leicht unterschiedlich. Die häufigste Fragestellung ist die nach dem Zusammenhang einzelner Fehlfunktionen und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem. Andere Fragestellungen zielen nur auf die umfassende Ermittlung möglicher Ausfälle ab und wieder andere bezwecken eine Übersicht verschiedener „Schreckensszenarien“, beispielsweise zur Betrachtung der funktionalen Zuverlässigkeit. Auf den ersten Blick handelt es sich um identische Fragestellungen, doch die Blickwinkel der Betrachtung unterscheiden sich und generieren damit auch unterschiedliche Ergebnisse.

Die nächsttiefer Ebene ergibt sich aus einem Abgleich der Fragestellung und der bisher vorhandenen Informationen und umfasst die verschiedenen Zuverlässigkeitsmodule, die zur Lösung der Fragestellung erforderlich sind. Eine mögliche Konstellation von Basismodulen ist in **Abbildung 5.1** dargestellt.

Üblicherweise sind zum Zeitpunkt der Durchführung der Fehlzustandsbaumanalyse keine funktionalen Zusammenhänge dokumentiert; eine zumindest grobe Systemskizze existiert jedoch. Auf dieser Basis kann der Betrachtungsumfang abge-

grenzt und Funktionen des Systems ermittelt werden. Dies geschieht oftmals in einer Teamsitzung, bei der die Prinzipien des Brainstormings angewandt werden. Anschließend werden die Funktionen strukturiert, was mithilfe einer Baumstruktur für eine systematische Vorgehensweise sorgt. Es wird empfohlen, die Module zur Ermittlung der Funktionen und zur Strukturierung der Funktionen als Schleife zu betrachten: Für jede neue Detaillierungsebene, die betrachtet wird, werden die beiden Module erneut durchlaufen. Nicht zu verwechseln sind dabei die Ebenen des Funktionsbaums mit den bereits angesprochenen Ebenen der gesamten Vorgehensweise. Jede Ebene des Funktionsbaums kann folglich als eigenständiges Modul gesehen werden. Somit kann durch die Anzahl der Iterationen auch die Detaillierungstiefe des Funktionsbaums individuell festgelegt werden.

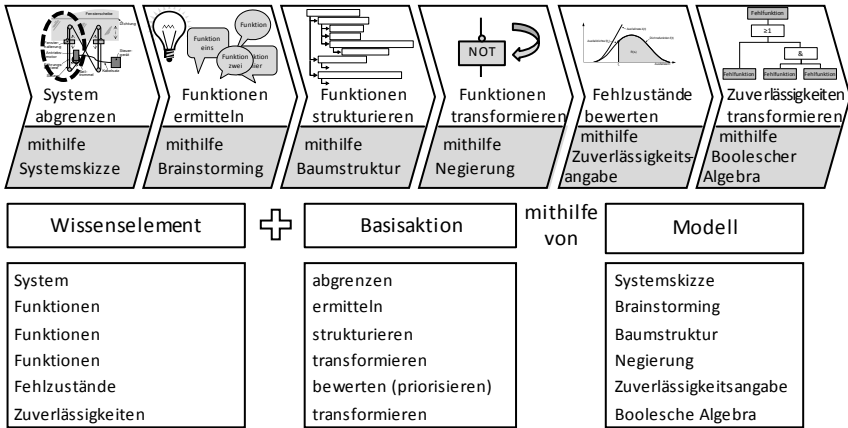


Abbildung 5.1: Basismodule der Fehlzustandsbaumanalyse als Phasen- (oben) und Spaltendarstellung (unten)

Ein neuer gedanklicher Abschnitt ist anschließend die Umwandlung der Funktionen in Fehlfunktionen. Sind die Funktionen korrekt bestimmt, können alle möglichen Fehlfunktionen als negierte Funktionen beschrieben werden. Nach diesem Modul wäre der qualitative Fehlerbaum vollständig; für den quantitativen Fehlerbaum fehlten jedoch noch die Lebensdauerwerte, die zur Bewertung der Zuverlässigkeit dienen. Daher lautet das Modul *Fehlzustände bewerten mithilfe Zuverlässigkeitsangabe* (oder vergleichbaren Lebensdauerinformationen). Zuletzt werden die einzelnen Zuverlässigkeiten der Fehlfunktionen mithilfe der Baumstruktur und der Booleschen Algebra zu einer Systemzuverlässigkeit agglomeriert.

Die unterste Ebene des Vorgehensmodells ist die Informationsebene, die sowohl die verfügbaren Informationen über das zu analysierende System als auch die späteren Arbeitsergebnisse umfasst. Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 erläutert wurde, lässt sich diese Ebene mithilfe von Matrizen abbilden. Die in **Abbildung 5.2** dargestellten Informationsflüsse zeigen die Interaktion der Module mit einem zentralen Informa-

tionsspeicher. Dieser ist nicht näher beschrieben und kann entweder das in [Hof13] vorgestellte Zuverlässigkeits-Informations-Modell (ZIM) oder allgemein bestehende Informationen in der Produktentwicklung darstellen.

Grundlegend ist jedoch der Aufbau der Matrix, welche aus zwei $n \times n$ -DSMs und zwei $n \times m$ -DMMs besteht. Die erste DSM oben links bildet dabei die Informationszusammenhänge der Umgebung ab, welche hier nicht näher betrachtet werden und daher ausgegraut sind. Die zweite DSM unten rechts beschreibt die Zusammenhänge der modularisierten Fehlzustandsbaumanalyse. Sie enthält alle Module sowie deren Reihenfolge. Im Fall einer zentralisierten Vorgehensweise, die keine direkte Verknüpfung der Module untereinander vorsieht, enthält sie daher keine Einträge. Im Falle einer dezentralen Vorgehensweise kann sie nur Einträge unter der Diagonalen enthalten, da Einträge oberhalb der Diagonalen entgegen der zeitlichen Abfolge wären.

		Wissenselemente									Basismodule					
		Systemskizze	Systemabgrenzung	Systemgrenze	Kundenforderungen	Systemfunktionen	Funktionszusammenhänge	Systemfehlfunktionen	Zuverlässigkeit Fehlfunktionen	Systemzuverlässigkeit	System abgrenzen	Funktionen ermitteln	Funktionen strukturieren	Funktionen transformieren	Fehlfunktionen bewerten	Zuverlässigkeiten transformieren
Wissenselemente	Systemskizze															
	Systembeschreibung															
	Systemgrenze									X						
	Kundenforderungen															
	Systemfunktionen										X					
	Funktionszusammenhänge											X				
	Systemfehlfunktionen												X			
	Zuverlässigkeit Fehlfunktionen													X		
	Systemzuverlässigkeit															X
Basismodule	System abgrenzen	X	X													
	Funktionen ermitteln		X	X	X											
	Funktionen strukturieren			X	X	X										
	Funktionen transformieren					X										
	Fehlfunktionen bewerten								X							
	Zuverlässigkeiten transformieren						X	X	X							

Abbildung 5.2: Darstellung von Informationsflüssen der Fehlzustandsbaumanalyse bei zentralisierter Modulordnung – bei sequenzieller Informationsweitergabe wären bei der Basismodul-DSM die Einträge unterhalb der Hauptdiagonalen ausgefüllt

Die DMM unten links umfasst die Eingangsinformationen, die aus der Umgebung bezogen werden. Als Pendant dazu beschreibt die DMM oben rechts die Ausgangsinformationen, die an die Umgebung abgegeben werden.

Damit wird deutlich, dass das im vorigen Kapitel 4 vorgestellte Konzept der modulbasierten Zuverlässigkeitsabsicherung funktionsfähig ist. Die bestehende Methode der Fehlzustandsbaumanalyse kann mithilfe der Basismodule abgebildet und das dreigliedrige Ebenenmodell kann angewandt werden. Das bedeutet, dass die Fehlzustandsbaumanalyse als eine mögliche Modulkonstellation betrachtet werden kann. Ob dies auch für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse gilt, wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

5.1.2 Basismodule der Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse als Beispiel einer qualitativen Zuverlässigkeitsmethode

Die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) als eine der wichtigsten und umfangreichsten Methoden der Zuverlässigkeitsabsicherung wird üblicherweise ebenfalls in den früheren Phasen der Produktentwicklung angewandt und soll daher auf die Anwendbarkeit der Modulstrategie hin untersucht werden. Zur Unterteilung der FMEA gab es bereits sehr viele Arbeiten, die zumeist auf einer weniger detaillierten Betrachtung basieren. So wird die FMEA häufig in die in Abschnitt 2.5.1 genannten fünf Schritte *Systemelemente und Systemstruktur*, *Funktionen und Funktionsstruktur*, *Fehleranalyse*, *Risikobewertung* sowie *Optimierung* unterteilt. In [Les01] werden die fünf Schritte *Funktionsbestimmung*, *Systembestimmung*, *Risikoanalyse*, *Risikobewertung* und *Risikominimierung* genannt.

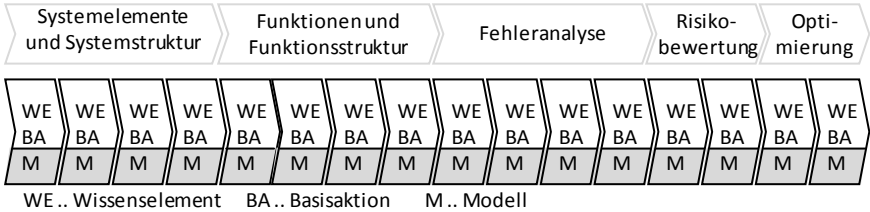
Die vorliegende Arbeit hat jedoch das Ziel, die Modularisierung auf einer ganz elementaren Ebene durchzuführen und damit die Mechanismen „hinter“ der FMEA zu beleuchten und Ansätze zur Flexibilisierung zu geben; daher sind die Module auf einer darunterliegenden Ebene zu suchen.

Auch hier soll die Analyse wieder vor dem Hintergrund des Ebenenmodells ablaufen. Die darin vorgesehene Fragestellung könnte für die FMEA lauten: „Auffinden und Bewerten potenzieller Fehlzustände und deren Auswirkungen“. Somit werden auf der Modulebene Module zur umfassenden Ermittlung von Fehlzuständen, den dabei existierenden Zusammenhängen und zur Bewertung der gefundenen Schwachstellen benötigt. Die Vorgehensweise nach [VDA4-2] kombiniert dazu eine Funktions- und Fehlfunktionsstruktur mit der Bauteilstruktur, um die relevanten Zusammenhänge zu erkennen und die Vollständigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Eine dreifaktorielle Bewertung priorisiert anschließend die Ergebnisse und leitet für die kritischsten Schwachstellen die Planung von Optimierungsmaßnahmen ein.

Diese grobe Modulstruktur wird nun – wie auch im vorherigen Beispiel – auf einzelne gedankliche und in sich abgeschlossene Schritte heruntergebrochen. Damit entsteht eine Sammlung wie in **Abbildung 5.3**, die die Basismodule der FMEA, sortiert nach deren logischer und inhaltlicher Abfolge, darstellt. Bereits jetzt wird deutlich, dass sich die Basisaktionen öfter wiederholen. Es wird demnach vermutet, dass

eine begrenzte Anzahl an Basisaktionen ausreicht, um die meisten bestehenden Methoden nachzubilden.

Die Informationsebene kann ebenfalls wie bei der Fehlzustandsbaumanalyse in Form einer Kombination aus DSM für die Methodenschritte und DMM für die Ein- und Ausgangsinformationen dargestellt werden. Aufgrund der deutlich höheren Anzahl an Modulen und der vielzähligen Informationen, die für eine umfassende Systembetrachtung nötig sind, umfasst die Darstellung der Informationsflüsse eine deutlich höhere Anzahl an Einträgen als bei der Fehlzustandsbaumanalyse.



Wissenselement	+	Basisaktion	mithilfe von	Modell
System		abgrenzen		(Prinzipiskizze)
Baugruppen		ermitteln		Brainstorming
Bauteile		ableiten (transformieren)		Deduktion
Bauteile		strukturieren		Baumstruktur
Baugruppen-Funktionen		ermitteln		Brainstorming
Bauteilfunktionen		ableiten (transformieren)		Deduktion
Funktionen		strukturieren		Baumstruktur
Funktionen		transformieren		Negierung
Fehlzustände		ermitteln		Brainstorming
Fehlzustände		strukturieren		Matrixform
Vermeidungsmaßnahmen		ermitteln		Brainstorming
Entdeckungsmaßnahmen		ermitteln		Brainstorming
Fehlzustandskombinationen		bewerten (priorisieren)		3-dimensionale lineare Bewertungszahl
Fehlzustandskombinationen		auswählen		Grenzwert
Optierungsmaßnahmen		ableiten (transformieren)		Brainstorming
Optierungsmaßnahmen		bewerten (priorisieren)		lineare Bewertungszahl

Abbildung 5.3: Basismodule der Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) als Phasen- (oben, schematisch) und Spaltendarstellung (unten)

Die Aufteilung der Fehlzustands- und -auswirkungsanalyse in Basismodule zeigt auch in diesem Fall die Funktionsfähigkeit der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung. Auch bei dieser Methode konnten alle Schritte in Basismodule umformuliert werden und ermöglichen damit einen Blick hinter die Methode und eine ver-

stärkte Betrachtung der zugrunde liegenden Fragestellungen. Somit kann mit dem Konzept der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung der Einfluss der starr vorgegebenen Methoden reduziert und die eigentlich wichtigen Fragestellungen mehr in den Vordergrund des Handelns gestellt werden.

Zudem zeigen sich beim Vergleich der quantitativen Fehlzustandsbaumanalyse und der qualitativen Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse mehrere Wiederholungen – sowohl bei Wissenselementen, bei den Modellen als auch ganz besonders bei den Basisaktionen:

Allein bei der FMEA wird drei Mal *strukturiert*, fünf Mal werden verschiedene Wissenselemente *ermittelt*. Diese beiden und weitere Basisaktionen sind auch bei der FTA zu finden: *abgrenzen, ermitteln, strukturieren, transformieren* und *bewerten* gibt es bei beiden Methoden. Die große Übereinstimmung der beiden Methoden ist offensichtlich. Auch bei den Wissenselementen erscheinen die *Funktionen* und Fehlzustände mehrmals. Ebenso gibt es viele Wiederholungen bei den Modellen.

5.2 Variationsmöglichkeiten bei bestehenden Methoden

Im vorigen Abschnitt lautete das Ziel, bestehende Methoden auf die Möglichkeit einer Unterteilung in Basismodule hin zu untersuchen. Mit anderen Worten handelte es sich um eine statische Betrachtungsweise, die die vollständige Abbildung bestehender Methoden zum Ziel hatte. In diesem Abschnitt hingegen soll der dynamische Aspekt der modularisierten Zuverlässigkeitsanalyse im Mittelpunkt stehen.

Wie können nun die gefundenen Basismodule variiert werden, um unterschiedliche Fragestellungen beantworten und unterschiedliche Rahmenbedingungen berücksichtigen zu können? Diese Fragen sollen am Beispiel der im vorigen Abschnitt beleuchteten Methoden beantwortet werden. Neben der Variation der Basismodule wird auch auf die Variation der Modelle eingegangen. Diese beiden Variationsmöglichkeiten sind in **Abbildung 5.4** schematisch dargestellt.

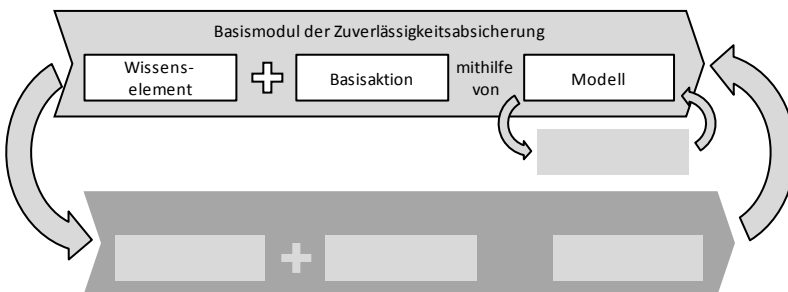


Abbildung 5.4: Variation des gesamten Basismoduls oder eines einzelnen Modells

5.2.1 Variation der Basismodule

Unter der Variation der Basismodule wird verstanden, einzelne Basismodule entweder ganz wegzulassen, die Reihenfolge der Basismodule zu ändern oder vorhandene Basismodule durch andere Basismodule mit anderen Wissenselementen und Basisaktionen auszutauschen.

Denn nicht immer sind alle Schritte der bestehenden Methoden notwendig und erzeugen dadurch überflüssigen Zusatzaufwand. Ein Beispiel wurde bereits in der Einleitung zu Kapitel 4 erwähnt: Bei der Fehlzustandsbaumanalyse muss nicht zwangsweise immer zuerst eine Ermittlung der Funktionen erfolgen, um darauf basierend die Fehlfunktionen ableiten zu können. Dieser Schritt ermöglicht zwar ein vollständigeres Ergebnis, ist aber aufwändig. Ist das System ausreichend bekannt oder die Zeit entsprechend knapp, kann dieses Modul auch weggelassen und die Fehlfunktionen können direkt ermittelt werden, ohne vorher die Funktionen zu betrachten.

Dies gilt im Übrigen auch für die Strukturierung der Einträge im Fehlzustandsbaum. Eine Struktur kann helfen, komplexe Systeme besser verstehen oder kritische Systeme exakter analysieren zu können. Handelt es sich beim zu analysierenden System aber um ein sehr einfaches, lange bekanntes oder unkritisches System, ist eine derartige Strukturierung wahrscheinlich überflüssig.

In der Einleitung zu dieser Arbeit in Abschnitt 1.1 wurde als Ziel die individuelle Anpassung der Zuverlässigkeitsanalyse an die soeben angesprochenen Rahmenbedingungen genannt. Im Detail waren dies die Kritizität, die Komplexität, der Innovationsgrad, die zur Verfügung stehende Kapazität und die vorhandenen Daten.

Die erste Rahmenbedingung, die Kritizität des zu analysierenden Systems, kann nicht nur durch das Weglassen unterstützender Basismodule bei geringer Kritizität berücksichtigt werden, sondern auch durch zusätzliche Basismodule bei signifikanter Kritizität. Dies wird bei der FMEA bereits durch die FMECA, die eine Erweiterung der FMEA darstellt, umgesetzt.

Die letzte Rahmenbedingung, das Vorhandensein von Daten, beeinflusst das Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse unmittelbar. Sind keine oder nur wenige Daten vorhanden, wird auch eine Zuverlässigkeitsanalyse nur wenige neue Erkenntnisse bringen. Demnach werden bei einer schlechteren Datenlage weitere Basismodule benötigt, um vor der eigentlichen Zuverlässigkeitsanalyse die vorhandenen Daten zu verdichten bzw. neu zu gewinnen.

Eine generelle Möglichkeit der modulbasierten Vorgehensweise, auf vorhandene Rahmenbedingungen zu reagieren, ist die separate Betrachtung der Analyseebenen. Unter Analyseebenen ist der Detaillierungsgrad zu verstehen, mit dem ein System analysiert wird. Je tiefergehend und detaillierter ein System betrachtet wird, desto mehr Analyseebenen werden beleuchtet. Am besten wird das am Fehlzustandsbaum erkennbar, der von oben nach unten immer detailliertere Analyseebenen darstellt. Wird die Bearbeitung einer Analyseebene als eigenständiges Modul betrachtet – und das ist aufgrund der in sich abgeschlossenen Betrachtung der jeweiligen Ebene möglich – kann die Analysetiefe durch die Anzahl der vorgegebenen Module direkt beeinflusst werden.

5.2.2 Variation der Modelle innerhalb der Basismodule

Bisher wurde die Fehlzustandsbaumanalyse als Summe von sechs separaten Basismodulen dargestellt. Jedes dieser Basismodule hat im obigen Beispiel ein spezielles Modell angewandt. Diese Modelle repräsentieren aber nur eine Möglichkeit, wie die jeweiligen Basisaktionen umgesetzt werden. Prinzipiell können nun alle Modelle gegen andere Modelle mit der gleichen Funktion ausgetauscht werden. Dieses Vorgehen setzt den dynamischen Aspekt der Modularisierung um. Beispielhaft soll dies im Folgenden für ausgewählte Basismodule geschehen, beginnend bei der Ermittlung der Systemfunktionen.

Die Ermittlung von Systemfunktionen oder auch Systemkomponenten wurde bei den bisher analysierten Methoden mithilfe des Brainstormings umgesetzt. Dies ist aber nur eine von vielen Möglichkeiten. Je nach Komplexitätsgrad, Neuheitsgrad, Kritizitätsgrad oder anderen Rahmenbedingungen sollten zur Ermittlung andere Modelle angewandt werden. Modelle im engeren Sinne sind hierbei das Kano-Modell oder das Axiomatic Design [YaEl03]; aber auch komplexere Modelle wie das Quality Function Deployment [Kin89, Aka92] oder allgemeine Marktforschungs-Studien sollten bei entsprechenden Bedingungen zur Funktionsanalyse herangezogen werden. Auf der anderen Seite können im einfachsten Fall bestehende Systemfunktionen aus Vorgängern oder entwicklungsbegleitenden Dokumenten übernommen werden. Speziell die Basisaktion *Ermitteln* sollte unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Informationen ausgestaltet werden, um eine erneute Ermittlung und damit doppelte Schritte zu vermeiden.

Ein weiteres oft anzutreffendes Basismodul dient der Bewertung. Es findet sich sowohl bei der Bewertung der Fehlfunktionen in der FTA als auch bei der Bewertung der Fehlzustandskombinationen in der FMEA.

Die Bewertung in der FTA erfolgt klassischerweise mithilfe quantitativer Daten zur erwarteten Lebensdauer, üblicherweise in Form von Überlebenswahrscheinlichkeiten nach einer gewissen Zeitspanne oder in Form von Ausfallraten. Diese Informationen erlauben eine sehr exakte Modellierung des erwarteten Ausfallverhaltens und geben ein genaues Bild des Systems ab. Jedoch ist die Generierung dieser Lebensdauerdaten sehr aufwändig und bisweilen sogar unmöglich, weil umfangreiche Erprobungsprogramme zur Gewinnung dieser Daten durchgeführt werden müssen.

An diesem Punkt muss die Frage geklärt werden, wie exakt die Bewertung der Fehlfunktionen in der FTA sein muss, um gewisse Fragestellungen ausreichend genau zu beantworten. Denn die Bewertung kann nicht nur mit Lebensdauerinformationen erfolgen, sondern auch auf einfachere Art und Weise. Bereits eine eindimensionale Expertenbewertung, bei der beispielsweise Schulnoten zwischen eins und sechs vergeben werden, kann kritische Systemelemente hervorheben. Sind nähere Details notwendig, kann die Bewertung auch mehrdimensional mit verschiedenen Faktoren, beispielsweise für den aktuellen Reifegrad, den Neuheitsgrad oder für die Schwere der Ausfallfolgen durchgeführt werden.

In der FMEA geschieht die Bewertung aktuell mithilfe dreier Bewertungszahlen, die von Experten zwischen 0 und 10 festgelegt werden und anschließend zur Risikoprioritätszahl (RPN) multipliziert werden. Somit ergibt sich eine eindimensionale

Sortierreihenfolge. Es muss aber auch erwähnt werden, dass die Priorisierung anhand der RPN unter Experten umstritten ist. Hier könnte eine andere Variante des Moduls eine Verbesserung herbeiführen, beispielsweise die Verwendung des Portfolio-Modells, das bei zwei Bewertungsparametern eine übersichtliche Darstellung der Bewertungen ermöglicht.

Andere Bewertungsmethoden wurden bereits mehrfach vorgestellt. Mit einer weiteren Variante des Priorisierungsmoduls wird die FMEA als *Fehlzustandsart-, -auswirkungs- und -kritizitätsanalyse* (FMECA) bezeichnet. Dabei wird lediglich im Priorisierungsmodul eine weitere Kennzahl ermittelt, die ein Produkt aus zwei der drei Bewertungszahlen darstellt. Das Priorisierungsmodul in der auf der FMEA aufbauenden Methode *Design Review Based on Failure Mode* (DRBFM) wird ebenfalls anders umgesetzt: Hier wird die Bewertung mithilfe einer Expertendiskussion realisiert. An diesen Beispielen wird die Vielfalt der Möglichkeiten sichtbar; mithilfe der modulbasierten Zuverlässigkeitsabsicherung wird sie auch durchgängig anwendbar.

Allgemein lässt sich feststellen, dass bei quantitativen Methoden auch quantitative Modelle zur Bewertung verwendet werden, wie z. B. Ausfallraten oder die erwartete Ausfallwahrscheinlichkeit, während bei qualitativen Methoden der Schwerpunkt auf umfassenden Merkmalsbeschreibungen zur Bewertung liegt.

Je nach Fragestellung und zur Verfügung stehender Informationen und Ressourcen kann das Modell beliebig ausgetauscht werden, die Basisaktion *Bewerten* wird jedoch immer ausgeführt. Die bisher aufgeführten Modelle sind dabei genauso anwendbar wie folgende weitere Modelle zur Umsetzung der Basisaktion *Bewerten*:

- Messergebnisse
- Portfolio
- (Weibull-/Exponential-/...)Verteilung
- Kundenbefragung
- Kano-Modell
- Eindimensionale Expertenschätzung/-bewertung
- Mehrdimensionale Expertenschätzung/-bewertung
- Binärer Vergleich
- Risikograph

Bei den letzten beiden Modellen spiegelt sich der Systemgedanke wider: Diese Modelle beinhalten wiederum weitere Untermodelle, die angewandt werden und so zu einem übergeordneten Modell führen. Daher kommt auch die Aussage, dass der binäre Vergleich eine Methode und kein Modell sei. Jedoch kann sie zwar auch als Methode gesehen werden, sie stellt aber ebenso ein Modell zur Repräsentation einer Reihenfolge dar.

Eine Übersicht über verschiedene Modelle zur Realisierung beispielhafter Basisaktionen gibt **Tabelle 5.1**. Zu jeder Basisaktion sind allgemein gebräuchliche Modelle aufgeführt.

Tabelle 5.1: Auswahl verschiedener Modelle zur Realisierung von Basisaktionen

Basisaktion	Modell
Abgrenzen	Klassierung Systemskizze Statistisches Quantil Schnittstellenminimierung ... Weitere: siehe Basisaktion <i>Auswählen</i>
Ermitteln	Brainstorming Checkliste Delphi-Verfahren Kundenstudie Mindmapping Übernahme vorh. Dokumente Use Case...
Strukturieren	eindimensionale Liste Baumstruktur Netzstruktur (2-Dim., 3-Dim., n-Dim.) Tag-Cloud Blockdiagramm ...
Priorisieren	Kennzahlen oder Expertenwissen paarweiser Vergleich Nutzwertmodell Expertenschätzung (1-Dim., 2-Dim., ..., n-Dim.) Statistische Messgrößen aus Feld/Erprobung ...
Auswählen	ABC-Klassierung Grenzwert Pareto Statistisches Quantil ...
Transformieren	Ableitung Boolesche Operationen Negierung Transposition Umrechnung ...

Diese Aufzählung ist nicht als abschließend zu sehen. Als weitere Sammlung solcher Modelle dienen folgende Arbeiten: [Hof97, Wul02, Les01].

6 Synthese der Module zur flexiblen Zuverlässigkeitsabsicherung

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine Hilfestellung zur Erreichung einer modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung zu geben. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die meisten Mitarbeiter in Entwicklungsabteilungen keine ausgewiesenen Experten der Zuverlässigkeitstechnik sind. Daher ist eine Metamethode notwendig, die den Entwicklern aufzeigt, wann sie welches Basismodul anwenden sollen. Eine solche Metamethode wird in [Sar08] vorgestellt; dort liegt der Fokus allerdings nicht auf Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung, sondern auf Methoden zur Prozessmodellierung.

Mit diesen Handlungsanweisungen soll die in der Einleitung beschriebene Gefahr eines „Methodenwalds“ reduziert und die Akzeptanz und Effizienz von Zuverlässigkeitsmethoden gesteigert werden. Eine modularisierte Systematik soll den beteiligten Personen aufzeigen, welche Methodenmodule in der aktuellen Entwicklungsphase hilfreich sind.

Ähnlich dem Prinzip eines Baukastensystems sollte es möglich sein, flexibel angepasst an die aktuellen Randbedingungen die nötigen Module anwenden zu können, anstatt starre Methoden durchführen zu müssen. Die aktuellen Randbedingungen beschreiben dabei technische Projektparameter wie beispielsweise die Komplexität, Kritizität oder den Neuheitsgrad des betrachteten Systems aber auch betriebswirtschaftliche Größen wie Budget oder Personalsituation.

Dies ermöglicht zudem einen flexiblen Zuverlässigkeitsprozess, der dynamisch von Arbeitsschritt zu Arbeitsschritt auf Basis der erhaltenen Zwischenergebnisse und der bereits vorhandenen Informationen der Situation angepasst wird. Beispielfhaft zeigt **Abbildung 6.1** ein solches Vorgehen, das nach jedem Prozessschritt die aktuelle Situation inklusive der vorhandenen Informationen prüft und durch eine entsprechende Modulauswahl darauf reagiert.

Somit kann flexibel entschieden werden, welches Modul gebraucht wird. Als Datenbank eignet sich hierfür das in [Hof13] vorgestellte Zuverlässigkeits-Informations-Modell (ZIM), welches in der Lage ist, Informationen über das technische System, über verwendete entwicklungsbegleitende Dokumente und über Methoden oder auch Methodenmodule aufzunehmen.

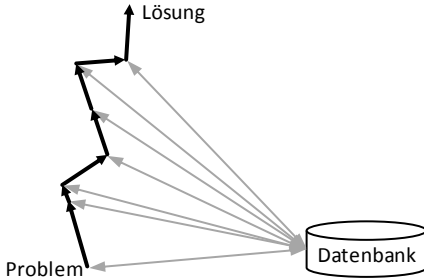


Abbildung 6.1: Regelmäßiger Informationsabgleich mit vorhandenen Zuverlässigkeitsinformationen

Zur Verknüpfung einzelner Basismodule gibt es wegen ihrer abstrakten Formulierung und ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit unzählige Möglichkeiten. Beispielhaft zeigt **Abbildung 6.2** einen denkbaren Lösungsraum der Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den in Abschnitt 2.2.2 erwähnten Domänen, zwischen quantitativen und qualitativen Methoden sowie entlang des Produktentwicklungsprozesses. In der vorliegenden Arbeit werden die beiden letztgenannten Verknüpfungsmöglichkeiten genauer analysiert und vorgestellt.

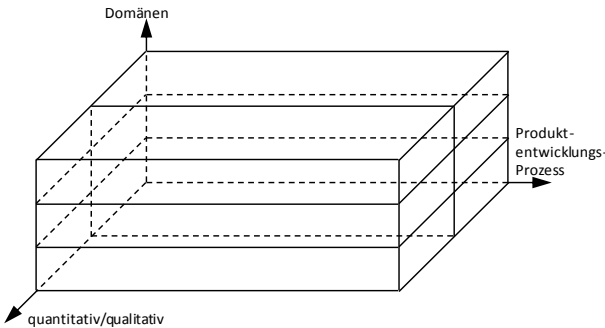


Abbildung 6.2: Verknüpfungsmöglichkeiten für Basismodule in der Zuverlässigkeitsabsicherung

Die grundlegende Frage dieses Abschnitts ist diejenige nach der Reihenfolge oder anderen Kombinationsregeln der anzuwendenden Basismodule. Welche Bedingungen sind bei einer vollkommenen Neuorganisation zu berücksichtigen und wie soll bei dieser Neukombination vorgegangen werden? Aktueller Stand der Technik ist, dass verschiedene etablierte Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung eingesetzt werden, wenn entweder ein Bedarf hierfür erkannt wird oder wenn dies von ande-

rer Seite gefordert wird. Natürlich gilt auch hierbei, dass Methoden erst dann angewandt werden, wenn die dafür notwendigen Eingangsinformationen bekannt oder ermittelbar sind.

Ein erster Ansatz wäre die Gestaltung der Zuverlässigkeitsabsicherung anhand von Dokumenten als Meilensteine anstatt anhand etablierter Methoden als Anwendungsvorschrift. Dies wäre ein Schritt in Richtung Flexibilisierung, da nicht mehr der Weg zu einer Erkenntnis, sondern nur die Erkenntnis selbst und der Zeitpunkt, an dem sie vorliegen muss, festgelegt wird. Festgelegte Informationsstände zu gewissen Zeitpunkten sind zudem eine gute Möglichkeit für Schnittstellen, denn diese Dokumente wären bei verschiedenen Entwicklungsprojekten identisch aufgebaut und erleichtern somit die Informationsübernahme. Zudem enthalten solche Dokumente im Allgemeinen sehr verdichtete und auf das Wesentliche reduzierte Informationen, die wiederum das Kriterium der schmalen Schnittstellen aus Abschnitt 4.4.2 erfüllen. Auch bisher wird in der allgemeinen Produktentwicklung auf Dokumente als Abschluss von Entwicklungsphasen gesetzt. Erwähnenswert sind vor allem die Lasten-, Pflichten- oder Konzepthefte.

Doch welche Dokumente sollten eingesetzt werden und welche Phasen sollten diese abschließen? Ein Blick in die gängigen, aber handlungsorientierten Zuverlässigkeitsprozesse aus Abschnitt 3.3.1 gibt hierzu keine direkte Hilfestellung, da ein dokumentenbasiertes Vorgehen auf einer inhaltlichen bzw. gedanklichen Kausalkette aufbauen muss, die beim handlungsorientierten Vorgehen nur implizit enthalten ist.

Im folgenden Abschnitt 6.1 wird daher untersucht, wie die Vielzahl der möglichen Modulkombinationen strukturiert wird und sich eine an den allgemeinen Produktentwicklungsprozess angepasste Abfolge ergeben kann. In Abschnitt 6.2 hingegen sollen Module nicht entlang der Zeitachse oder des Produktentwicklungsprozesses verknüpft werden, sondern über die oft vorherrschende Trennung zwischen quantitativen und qualitativen Betrachtungsweisen hinweg. Hierbei dient ein Blick in andere Wissenschaftsbereiche als Hinweis auf neue Möglichkeiten.

6.1 Verknüpfung entlang des Produktentwicklungsprozesses

Nachdem in den bisherigen Abschnitten erläutert wurde, dass sämtliche Methoden und Vorgehensweisen in einzelne Module zergliedert und je nach Anforderung individuell kombiniert werden können, ist noch unklar, wie eine vollständige Zuverlässigkeitsabsicherung aus den einzelnen Basismodulen entstehen kann. Auch wenn bisher der Eindruck erweckt wurde, dass alle Module beliebig kombiniert werden können, so muss doch an dieser Stelle eine gewisse Einschränkung vorgenommen werden; die Bearbeiter sollen sich schließlich nicht in der Menge der möglichen Module verlieren.

Die wichtigste Einschränkung ist die der effizienten Vorgehensweise, welche durch eine strikte Zielorientierung umgesetzt werden soll. Zielorientierung heißt dabei, dass – anders als bei formellen Methoden teilweise suggeriert wird – der Weg

nicht das Ziel ist. Das Ziel einer Vorgehensweise soll vielmehr die Beantwortung einer relevanten Fragestellung sein. Die Fragestellung selbst soll nicht dem Selbstzweck dienen, sondern den Prozess der Zuverlässigkeitsabsicherung direkt unterstützen. Die Umsetzung dieser Zielorientierung soll in der vorliegenden Arbeit unterstützt werden.

Das Ergebnis des Abschnittes ist daher eine abstrakte Vorgabe, wie die Module zeitlich und inhaltlich angeordnet werden können und wie mit der geforderten Zielorientierung umgegangen werden muss. Dies geschieht in der vorliegenden Arbeit anhand eines zweigleisigen Vorgehens:

- Ein *Makrozyklus* genannter Ablauf ordnet die während der Produktabsicherung auftretenden Fragestellungen in eine aufeinander aufbauende Kausalkette ein und
- ein *Mikrozyklus* genannter Ablauf ordnet die Basisaktionen, die zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellungen notwendig sind, in eine in sich geordnete Problemlösungsstruktur.

Die zweigleisige Vorgehensweise ermöglicht eine Vorgabe zur Anordnung der Module sowohl auf der obersten Ebene der Zuverlässigkeitsabsicherung – der Ebene der Fragestellungen – als auch auf den darunterliegenden Ebenen der einzelnen Module. Die Strategie eines Makro- und Mikromodells wurde bereits im Systems Engineering [Hab et al. 02] eingeführt und auch im mechatronischen Entwicklungsprozess der VDI 2206 [VDI2206] umgesetzt.

6.1.1 Makrozyklus als Vorgehensmodell

Der Makrozyklus stellt ein allgemeines Vorgehensmodell zur Zuverlässigkeitsabsicherung dar und beschreibt die nacheinander zu durchlaufenden Phasen während des gesamten Absicherungsprozesses. Dabei wird hier im Gegensatz zu bestehenden Arbeiten weniger auf durchzuführende Tätigkeiten eingegangen als vielmehr auf die nacheinander zu beantwortenden Fragestellungen.

Wie bereits erwähnt, soll die Kombination der Methodenmodule vor dem Hintergrund der Zielorientierung stattfinden. Dazu muss im Folgenden zuerst geklärt werden, was das Ziel der Zuverlässigkeitsabsicherung ist.

Die Zuverlässigkeitsabsicherung hat zum Ziel, die Produktentwicklung und die darin getroffenen Entscheidungen zu hinterfragen. Sie muss prüfen, ob auch die Produktentwicklung zielorientiert arbeitet: Ob alle Entscheidungen dazu dienen, dem Markt bzw. dem Kunden das Produkt zu gestalten, das erwartet wird. Der spezielle Fokus der Zuverlässigkeitsabsicherung liegt dabei auf dem richtigen Maß der Zuverlässigkeit: sie darf nicht unnötig hoch sein, um die Kosten zu begrenzen, und sie darf nicht zu gering sein, um die Kundenerwartungen sicher zu erfüllen. Dabei ist letzteres Kriterium sicherlich das kritischere.

Der Aufbau des Makrozyklus orientiert sich daher am allgemeinen Ablauf der Produktentwicklung. Dieser beginnt mit nur wenigen Informationen und der Sprache der Funktionen. Über Wirkprinzipien wird dann auf die tatsächlichen Kompo-

nenten übergegangen. Diese werden im weiteren Verlauf sehr detailliert betrachtet, bevor am Ende der Produktentwicklung bei der Validierung wieder die Funktionen erreicht sind. Dieser Ablauf wird am besten mithilfe des V-Modells, welches ebenfalls einen Makrozyklus darstellt, in **Abbildung 6.3** veranschaulicht.

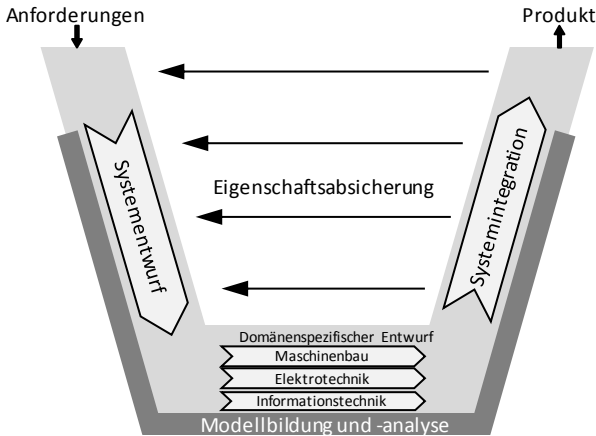


Abbildung 6.3: V-Modell als Beispiel eines Makrozyklus nach [VDI2206]

Um nun den Ablauf der Zuverlässigkeitsabsicherung zielorientiert zu gestalten, bietet sich die Festlegung von nacheinander zu erreichenden Meilensteinen an. Damit soll gewährleistet werden, dass das Ziel selbst – und nicht der Weg dorthin – das Ziel darstellt. Die Meilensteine bestehen aus einer definierten Erkenntnis, die erreicht werden muss. Der Weg, wie der Bearbeiter zu dieser Erkenntnis gelangt, bleibt ihm dabei selbst überlassen. Diese Meilensteine werden im Folgenden nacheinander ermittelt und erläutert. Eine Darstellung des Makrozyklus zeigt **Abbildung 6.4**.

Makrozyklus-Schritt: Kunde/Markt

Zu Beginn und am Ende einer jeden Zuverlässigkeitsabsicherung steht der Kunde. Damit ergibt sich bereits der erste Unterschied zur klassischen Produktentwicklung, die einerseits von marktgetriebenen, andererseits von technologiegetriebenen Innovationen spricht. Die Zuverlässigkeitsabsicherung sollte stets den Kunden bzw. den Markt im Blick behalten, denn immer hängt von diesem der spätere Unternehmenserfolg ab. Der erste Meilenstein umfasst demnach die Erkenntnis, wer die späteren Kunden sind. Nur wenn diese bekannt sind, kann ein entsprechend angepasstes und damit zuverlässiges Produkt entstehen.

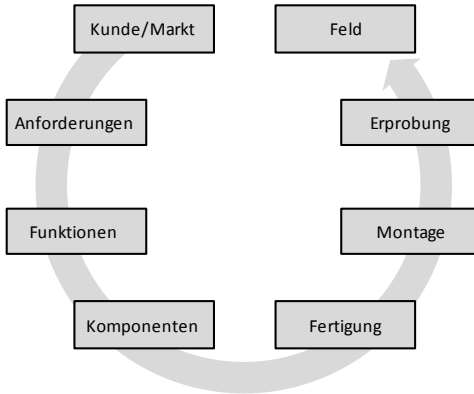


Abbildung 6.4: Makrozyklus der Zuverlässigkeitsabsicherung

Makrozyklus-Schritt: Anforderungen

Um den Markt bzw. den Kunden für die Entwicklung greifbar zu machen, sind genau definierte Anforderungen notwendig. Diese zu ermitteln ist ein zwar aufwändiges Unterfangen, gibt aber den Entwicklern die nötigen Rahmenbedingungen für ihre Tätigkeit. Die Anforderungen können allerdings erst ermittelt werden, wenn die späteren Kunden festgelegt sind. Der zweite Meilenstein umfasst demnach die Erkenntnis, welche Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt gestellt werden. Auch diese müssen bekannt sein, um ein entsprechend angepasstes und damit zuverlässiges Produkt zu gestalten.

Makrozyklus-Schritt: Funktionen

Aus den allgemein gehaltenen Anforderungen lassen sich direkt die zukünftigen Produktfunktionen ableiten. Die Funktionen sind eng verwandt mit den Anforderungen, beschreiben aber die Umsetzung der Anforderungen durch das Produkt. Da die Gewährleistung von Funktionen direkt die Zuverlässigkeit eines Produktes betrifft, müssen diese während der Produktentwicklung immer als Zielgröße betrachtet werden. Der dritte Meilenstein umfasst demnach die Erkenntnis, welche Funktionen vom Entwicklungsobjekt gewährleistet werden müssen.

Makrozyklus-Schritt: Komponenten

Umgesetzt werden Funktionen im Folgenden mithilfe mechanischer, elektronischer oder informationstechnischer Komponenten. Dieser Schritt ist der umfangreichste, da hier die meisten Produkteigenschaften festgelegt werden. Für mechanische Komponenten sind dies beispielsweise Systemarchitektur, Geometrie und Werkstoff. Für die Zuverlässigkeitsbetrachtung ist die Komponentensicht sehr wichtig, da das unerwartete Verhalten einer Komponente meist die Ursache für Funktionsausfälle ist.

Zudem unterliegen Ausfälle in Mechanik und Elektronik wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben physikalischen und chemischen Vorgängen, die nur in materieller Komponentensicht bearbeitet werden können. Diese vielen Aspekte bergen ein enormes Gefahrenpotenzial für die Zuverlässigkeit, sodass deren Absicherung besonders wichtig ist. Der vierte Meilenstein umfasst demnach die Erkenntnis, welche Komponenten mit welchen Eigenschaften im Produkt enthalten sind. Auch diese Erkenntnis ist erforderlich, damit ein entsprechend angepasstes und damit zuverlässiges Produkt entstehen kann.

Makrozyklus-Schritt: Fertigung

Anschließend müssen die gestalteten Komponenten hergestellt werden. Die Fertigung mechanischer oder elektronischer sowie die Implementierung informationstechnischer Komponenten kann die Zuverlässigkeit maßgeblich beeinflussen. Sie muss daher berücksichtigt und in den Prozess der Zuverlässigkeitsabsicherung mit einbezogen werden. Der fünfte Meilenstein umfasst deshalb die Erkenntnis, wie die Produktkomponenten hergestellt werden.

Makrozyklus-Schritt: Montage

Genauso wie die Fertigung beeinflusst die Montage direkt die spätere Zuverlässigkeit eines Produktes und muss daher ebenfalls in die Zuverlässigkeitsabsicherung mit einbezogen werden. Der sechste Meilenstein umfasst daher die Erkenntnis, wie die Produktkomponenten zusammengesetzt werden. Wie alle vorherigen Meilensteine muss diese Information bekannt sein, um ein entsprechend angepasstes und damit zuverlässiges Produkt entstehen zu lassen.

Makrozyklus-Schritt: Erprobung

Da die gesamte Produktentwicklung lediglich auf theoretischen Annahmen und Erfahrungen beruht, kann dort das reale Verhalten der Produkte nur abgeschätzt werden. Die Erprobung muss schließlich zeigen, ob diese Annahmen zutreffend waren. Dabei werden alle vorherigen Meilensteine implizit oder explizit validiert. Der siebte Meilenstein umfasst daher die Erkenntnis, ob die bisher getroffenen Annahmen korrekt sind.

Makrozyklus-Schritt: Feld

Der letzte Schritt ist der wichtigste Schritt für das Unternehmen: Das fertig entwickelte und hergestellte Produkt muss sich in der Realität – im Feld – behaupten. Hier zeigt sich, ob die getroffenen Annahmen bzgl. Beanspruchung und Beanspruchbarkeit im Kundeneinsatz auch tatsächlich korrekt sind. Dies lässt sich einerseits beim Absatz und andererseits bei der Fehlerquote ablesen. Beides muss stimmen, um den Entwicklungsprozess als erfolgreich einstufen zu können. Der achte Meilenstein umfasst daher die Erkenntnis, wie sich das Produkt im realen Einsatz verhält.

Dies ist die letzte Erkenntnis, die für ein entsprechend angepasstes und damit zuverlässiges Produkt vorhanden sein muss.

Die Unterteilung bzw. der Abschluss der einzelnen Schritte durch inhaltsbasierte Meilensteine hat den Vorteil, dass der Weg zur Erlangung der Erkenntnis völlig frei ist. Damit wird kein Methoden- oder Prozesskorsett aufgedrängt, sondern die Schritte können angepasst an das Unternehmen oder das aktuelle Projekt ausgestaltet werden. Allerdings ist ebenso klar, dass der Makrozyklus mit seinen abstrakt formulierten Meilensteinen nicht allein dabei helfen kann, die konkreten Schritte zu gehen. Aus diesem Grund gibt es auf der darunterliegenden zweiten Stufe das Konzept des Mikrozyklus, welcher im folgenden Abschnitt erläutert wird.

6.1.2 Mikrozyklus der Zuverlässigkeitsabsicherung

Die vergangenen Abschnitte haben gezeigt, dass Basismodule aus nahezu beliebigen Kombinationen von Wissenselementen, Basisaktionen und Modellen zusammengestellt werden können. Während Wissenselemente und Modelle in beliebig großer Vielfalt auftreten können, hat sich bei den Basisaktionen gezeigt, dass sich hier immer die gleichen wiederholen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass Basisaktionen im Gegensatz zu den anderen Elementen der Basismodule nicht beliebig sind und daher eine Grundmenge an Basisaktionen vorgegeben werden kann. Diese Vermutung wird im Folgenden überprüft und mögliche Ausprägungen dieser Grundgesamtheit werden vorgestellt.

Die nähere Betrachtung der FMEA in **Abbildung 5.3** ergibt unter 16 Basisaktionen nur sechs unterschiedliche Ausprägungen:

- Ableiten
- Auswählen
- Bewerten (Priorisieren)
- Ermitteln
- Strukturieren
- Transformieren

Daher liegt die Vermutung nahe, dass Basisaktionen – wie in der Konstruktionsmethodik auf der untersten Funktionsebene die Elementarfunktionen – auf eine begrenzte Anzahl reduziert werden können. Für die Konstruktionsmethodik geben die wichtigsten Werke [Rod76, Rot00, KoKa98, Pah et al. 06] für die unterste, allgemein anwendbare Ebene folgende Funktionen an:

- Wandeln
- Ändern
- Verknüpfen
- Leiten
- Speichern

Begrenzte Basisaktionen wurden in der Produktentwicklung ebenso bei der Gestaltung von Problemlösungszyklen oder Verhaltensmodellen aufgegriffen, wenn auch in abstrahierter Form. Ein wichtiger Vertreter der Verhaltensmodelle ist hierbei das *TOTE-Modell* [Hac73] zur Beschreibung des menschlichen Verhaltens. Es besagt, dass der Mensch dazu neigt, einen Zyklus aus *Testen* und *Ausführen* (Operate) zu durchlaufen, bis der Test erfolgreich ist und der Zyklus beendet werden kann (Exit). Die Basisaktionen bestehen hier folglich aus *Testen* und *Ausführen*.

Dieses Grundmodell wurde im Systems Engineering erweitert und als Problemlösungszyklus vorgestellt, siehe **Abbildung 6.5**. Zentrales Element ist die Kombination aus Analyse und Synthese, welche eine andere Sicht des TOTE-Modells darstellt. Testen geht hierbei in Analyse über und Ausführen wird durch Synthese beschrieben, was eher in die spezifische Sprechweise der Produktentwicklung passt. Die Schritte Synthese und Analyse folgen im Systems Engineering auf eine Situationsanalyse und Zielbetrachtung, die unterschiedlich ausgeprägt sind – je nachdem, ob es sich um ein am aktuellen Zustand oder am künftigen Zustand orientiertes Vorgehen handelt.

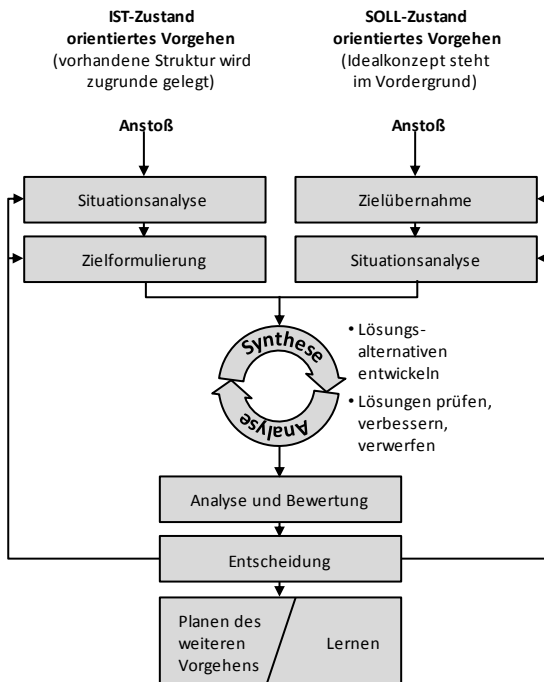


Abbildung 6.5: Problemlösungszyklus nach [VDI2206], abgeleitet aus [Hab et al. 02]

Das zeigt, dass es auch im Systems Engineering den Ansatz gibt, auf der untersten Handlungsebene wenige, aber festgelegte, wiederkehrende Aktionen zu definieren.

Dabei wird der Problemlösungszyklus in jeder Phase und unabhängig von den konkreten Anforderungen durchlaufen. Die Schwerpunkte des abstrakten Zyklus sind zuerst eine Zielsuche, dann eine Lösungssuche und abschließend eine Auswahl.

Als Ergänzung zum Problemlösungszyklus des Systems Engineering oder als Variation desselben wird in [Lin09] das Münchener Vorgehensmodell in **Abbildung 6.6** vorgestellt. Dieses Vorgehensmodell stellt ebenfalls den während des Produktentwicklungsprozesses mehrmals zu durchlaufenden Mikrozyklus dar. Die Neuerung dieses Modells ist die Vermeidung der oftmals linearen Vorgehensweise anderer Modelle. Stattdessen wird ein Standardweg durch die einzelnen Knoten vorgeschlagen; Alternativen sind aber ebenso vorgesehen.

Die verschiedenen Vorgehensmodelle zeigen also, dass es ein legitimer Ansatz ist, die grundlegenden Aktionen zu vereinheitlichen und in einen Mikrozyklus einzuordnen.

Als nächstes gilt es nun, die für die Zuverlässigkeitsabsicherung relevanten Basisaktionen zu identifizieren. Da eine strikte Zielorientierung gefordert ist, ist das Ziel des Mikrozyklus die Erreichung eines Meilensteins des Makrozyklus. Folglich ist das Ziel eines Mikrozyklus-Durchlaufs beispielsweise die Erkenntnis über die Anforderungen an ein Produkt. Allerdings sollte davon ausgegangen werden, dass diese Erkenntnis bis zu einem gewissen Grad bereits im Produktentwicklungsprozess erlangt wurde bzw. zumindest die Wege und Möglichkeiten bekannt sind, wie so eine Erkenntnis erlangt werden kann. Damit ist gemeint, dass im oben genannten Fall nicht die Frage im Vordergrund steht, wie Anforderungen überhaupt ermittelt werden können, sondern wie diese beispielsweise im Lastenheft vollständig, konsistent und plausibel dokumentiert werden.

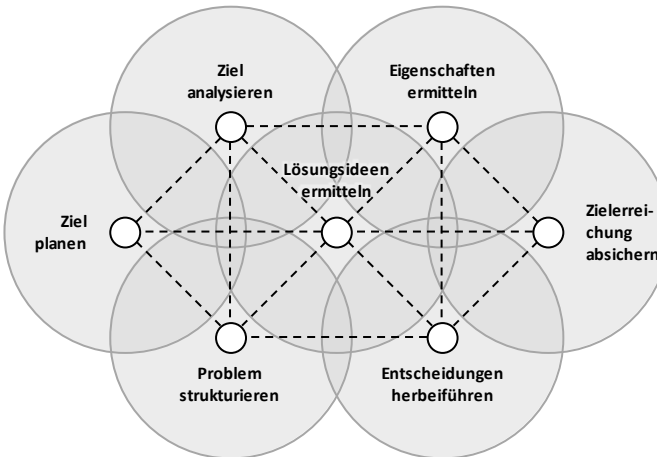


Abbildung 6.6: Das Münchener Vorgehensmodell, [Lin09]

Dies deckt sich mit der bereits gegebenen Erläuterung, dass die Aufgabe der Zuverlässigkeitsabsicherung primär das Hinterfragen der Entscheidungen des Entwicklungsprozesses ist. Während im Entwicklungsprozess der Fokus auf der Synthese neuer Lösungen liegt, handelt es sich bei der Zuverlässigkeitsabsicherung um die Analyse. Diese kann dadurch realisiert werden, dass die auch schon im Makrozyklus enthaltene Kausalkette systematisch durchgegangen und kritisch betrachtet wird.

Bei der systematischen Analyse der Kausalkette wird jedes einzelne Kettenglied bzw. jedes einzelne Element des Makrozyklus zuerst ermittelt und dann systematisch betrachtet. Dabei ist, wie soeben erwähnt, weniger die schiere Ermittlung wichtig als vielmehr deren Vollständigkeit und Systematik. Schließlich ist es keine Neuigkeit, dass ein Hauptproblem der Produktentwicklung darin liegt, dass zwar viele Informationen existieren, aber niemand genau weiß, wo. Das alleinige Zusammentragen und übersichtliche Darstellen relevanter, aber verteilter Informationen ist bereits ein sehr wichtiger Aspekt der Zuverlässigkeitsabsicherung.

Überspitzt gesagt hat die Zuverlässigkeitsabsicherung bereits ihre Hauptaufgabe erfüllt, wenn sie lediglich vorhandene, verteilte Informationen zusammenfasst, vervollständigt sowie strukturiert und übersichtlich darstellt. Dies mag zwar einfach klingen, doch das ist es in der heutigen, zumeist parallelisierten und ohnehin komplexen Produktentwicklung mitnichten.

Die tiefgehenden Analysen, die allesamt auf die Absicherung der Robustheit der Produktentwicklung bzw. des Produkts selbst abzielen, stellen eine gute Ergänzung der wichtigen Basisarbeit dar. Mit tiefgehenden Analysen ist beispielsweise die gezielte Negierung von Anforderungen oder Funktionen, die Variation von Wirkparametern oder auch die Ableitung von Folgeereignissen ausgehend von einem Initialereignis gemeint.

Die Summe dieser Überlegungen führt schlussendlich zu einem sechsstufigen Mikrozyklus als Modell des Denkprozesses in einer Phase des Makrozyklus. Dieser Mikrozyklus ist in **Abbildung 6.7** dargestellt und enthält die Schritte *Abgrenzen*, *Ermitteln*, *Strukturieren*, *Priorisieren*, *Auswählen* und schlussendlich *Transformieren*. Diese Schritte werden im Folgenden einzeln erläutert.

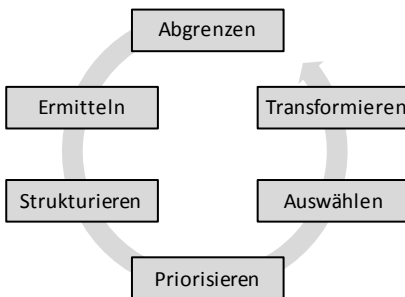


Abbildung 6.7: Mikrozyklus der Zuverlässigkeitsabsicherung

Der erste Schritt *Abgrenzen* ist als Vorbereitung für die nachfolgenden Schritte zu sehen und beinhaltet das bewusste Auswählen der zu betrachtenden Inhalte. Erst wenn die Rahmenbedingungen und der Betrachtungsinhalt bekannt sind, ist eine vollständige Ermittlung der innerhalb dieser Grenzen liegenden Fakten möglich.

Der wichtigste Schritt beim Zusammentragen der relevanten Informationen ist das *Ermitteln*. Wie schon erläutert, ist dieser Schritt bereits eine gute Möglichkeit, das vorhandene Wissen auf Widersprüche oder Lücken zu überprüfen, indem es an verschiedenen Stellen ermittelt wird. Hierbei ist es besonders wichtig, verschiedenste Aspekte zu berücksichtigen, beispielsweise, indem mehrere Personen aus unterschiedlichen Bereichen mit einbezogen werden.

Der nachfolgende Schritt ist mit *Strukturieren* bezeichnet, da es nach dem Ermitteln darum geht, die gefundenen Informationen übersichtlich darzustellen. Die Übersichtlichkeit kann am besten mit einer strukturierten Darstellung erreicht werden. Zudem hilft eine Struktur später beim Auffinden von Informationen, besonders wenn es sich – wie in der Produktentwicklung üblich – um eine große Menge an Informationen handelt.

Mit diesen drei Schritten ist die Basisarbeit der Zuverlässigkeitsabsicherung bereits getan: Verteilt vorliegende Informationen wurden zusammengetragen und ermöglichen die Absicherung einer lückenlosen und widerspruchsfreien Produktentwicklung. Die weiteren, tiefergehenden Analysen sind oftmals sehr umfangreich, sodass es sich lohnt, vorher den Betrachtungsumfang einzuzugrenzen oder nur noch die wichtigen Aspekte zu betrachten. Dieses Ziel verfolgen die nächsten beiden Schritte.

Der vierte Schritt ist das *Priorisieren* beziehungsweise Bewerten. Dadurch können die bereits ermittelten Informationen gemäß ihrer Relevanz bezüglich eines Aspektes sortiert werden. Gemeinsam mit dem fünften Schritt, dem *Auswählen*, ist somit eine Fokussierung auf die wichtigsten Informationen möglich und damit auch eine wirtschaftliche Vorgehensweise.

Der abschließende Schritt *Transformieren* kann entweder trivial oder auch sehr umfangreich ausfallen, je nachdem, in welcher Art die ermittelten und ausgewählten Informationen transformiert werden sollen. Der Schritt umfasst beispielsweise Tätigkeiten wie das Negieren, Ableiten oder Variieren von Wissenselementen. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Tätigkeiten zur Robustheitsbewertung, um die Empfindlichkeit des zu entwickelnden Produkts auf variierende Einflüsse bei der Beanspruchung oder Beanspruchbarkeit hin zu überprüfen. Der generelle Grundsatz hierbei ist, obligatorisch auftretende Streuungen von Beginn an zu berücksichtigen.

Der Mikrozyklus ist somit durchlaufen und erklärt. Wichtig dabei ist, dass der Zyklus nicht als zwanghafte Vorgabe, sondern als Leitlinie anzusehen ist, die je nach Situation angepasst werden kann. So kann es beispielsweise bei einem geringen Funktionsumfang vorkommen, dass gar keine Auswahl durchgeführt werden muss.

6.1.3 Kombination von Mikro- und Makrozyklus sowie deren Anwendung auf Basismodule

Nun sind sowohl der Makro- als auch der Mikrozyklus definiert, deren Kombination und deren Anwendung auf die Basismodule sind jedoch noch festzulegen. Dies wird im Folgenden durchgeführt und damit gezeigt, wie die modularisierte Zuverlässigkeitsabsicherung entlang des Produktentwicklungsprozesses aufgebaut werden kann.

Die Idee hinter den beiden Vorgehensmodellen ist es, eine Leitlinie darzustellen, anhand derer die Basismodule miteinander verknüpft werden können. Für die globale Vorgehensweise wurde dafür bereits ein Makrozyklus entwickelt, welcher die einzelnen Phasen der Zuverlässigkeitsabsicherung analog zum Produktentwicklungsprozess darstellt. Abgegrenzt bzw. definiert sind die Phasen als Meilensteine, die jeweils eine bestimmte Erkenntnis einfordern. Zur systematischen Erlangung dieser Erkenntnis wurde ein Mikrozyklus entwickelt, welcher für jeden Meilenstein des Makrozyklus durchlaufen wird, siehe **Abbildung 6.8**. Diese Anordnung widerspiegelt auch den hierarchischen Systemgedanken, da das übergeordnete System *Makrozyklus* wieder auf ein nächsttieferes System *Mikrozyklus* heruntergebrochen werden kann.

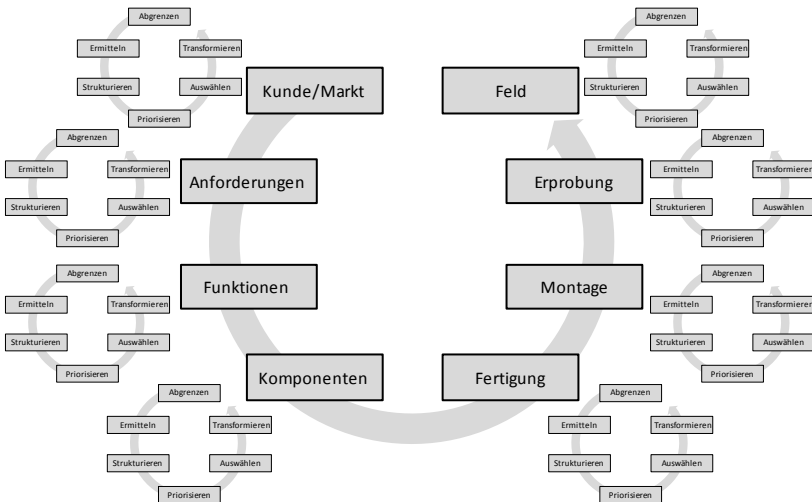


Abbildung 6.8: Kombination von Makro- und Mikrozyklus

Nun ist zwar auf abstrakter Ebene die Abfolge der einzelnen Schritte geklärt, nicht aber deren konkretes Aussehen. Dies wird durch die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Basismodule gewährleistet, denn in den Basismodulen ist neben der Basisaktion auch das konkrete Wissensselement und das zu verwendende Modell hinterlegt. Die

Anwendung der vorgestellten Zyklen auf die Basismodule liegt auf der Hand: Die Basisaktionen entsprechen direkt den einzelnen Schritten des Mikrozyklus.

Damit bestehen Basismodule, wie in **Abbildung 6.9** dargestellt, aus einem beliebigen Wissensselement, einer dem aktuellen Schritt des Mikromodells entsprechenden Basisaktion und einem dazu passenden Modell. Auf abstrakter Ebene könnten zwar auch die Wissensselemente als Menge der im Makrozyklus eingeforderten Meilensteine definiert werden, doch das widerspiegelt nicht die reale Vorgehensweise, die weit mehr und von Anwendungsfall zu Anwendungsfall unterschiedliche Informationen bzw. Wissensselemente handhaben muss.

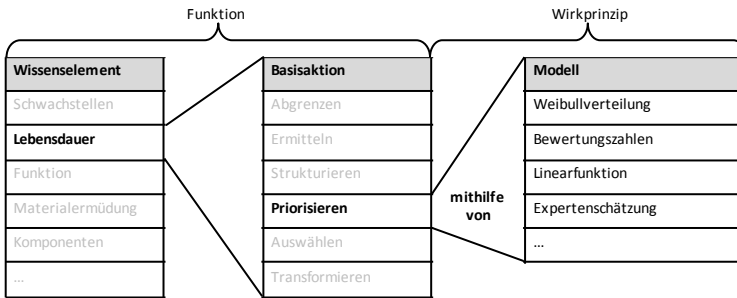


Abbildung 6.9: Anwendung des Mikrozyklus auf Basismodule, wodurch die Basisaktionen fest vorgegeben sind

Mithilfe dieses Konzeptes erhält der Entwickler eine Art Methodenbaukasten, indem die grobe Abfolge der einzelnen Schritte zwar vorgegeben ist, die konkrete Ausgestaltung aber mithilfe einer vorausgewählten Menge an Modellen umgesetzt werden kann.

6.2 Verknüpfung quantitativer und qualitativer Analysearten

Schon seit Beginn der Bestrebungen zur Zuverlässigkeitsabsicherung haben sich zwei getrennte und bis heute nicht ausreichend kombinierte Analysearten entwickelt: zum einen die statistische Analyse des Ausfallverhaltens und zum anderen die expertengestützte qualitative Analyse der möglichen oder bereits aufgetretenen Fehlerarten. Diese beiden Analysearten wurden als grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen behandelt und auch so jeweils weiterentwickelt und perfektioniert. Die Schwierigkeit, qualitative Angaben in quantitative Angaben umwandeln zu müssen, tritt regelmäßig auf.

Natürlich haben beide Analysearten ihre jeweiligen Vorteile und Daseinsberechtigung; in gewissen Situationen wäre aber eine umfassende kombinierte Analyse eines Sachverhalts vorteilhaft. Dass weder der eine noch der andere Weg immer der richtige sein muss, wird in [BoSc07] dargestellt. Gerade im Hinblick auf die neueren sicherheitstechnischen Anforderungen einer ISO 26262 oder IEC 61508, welche häufig auf eine quantitative Betrachtung hinauslaufen, werden oft statistische Berechnungen angestellt, die zwar quantitativ betrachtet korrekt erscheinen, qualitativ betrachtet aber nicht als sinnvoll gelten.

Prinzipiell werden auch heute schon verschiedene Möglichkeiten, qualitative Angaben zu quantifizieren oder – vice versa – quantitative Angaben qualitativ zu bewerten, regelmäßig angewandt. Dies geschieht beispielsweise beim Gruppieren oder Klassifizieren [BrKn97]. Oder man denke an die Bewertungszahlen in der FMEA, die anhand eines festen qualitativen Bewertungsschemas ausgewählt werden, siehe **Tabelle 6.1**.

Tabelle 6.1: Bewertungsschema für die Auftretenswahrscheinlichkeit in der FMEA nach [DIN60812]

Auftreten der Ausfallart	O	Häufigkeit	Wahrscheinlichkeit
gering: Ausfall ist unwahrscheinlich	1	≤ 0,01 pro tausend Einheiten	≤ 1·10 ⁻⁵
niedrig: relativ wenige Ausfälle	2	0,1 pro tausend Einheiten	1·10 ⁻⁴
mittelmäßig: gelegentliche Ausfälle	3	0,5 pro tausend Einheiten	5·10 ⁻⁴
	4	1 pro tausend Einheiten	1·10 ⁻³
	5	2 pro tausend Einheiten	2·10 ⁻³
	6	5 pro tausend Einheiten	5·10 ⁻³
hoch: wiederholte Ausfälle	7	10 pro tausend Einheiten	1·10 ⁻²
	8	20 pro tausend Einheiten	2·10 ⁻²
sehr hoch: Ausfall ist fast unvermeidbar	9	50 pro tausend Einheiten	5·10 ⁻²
	10	≥ 100 pro tausend Einheiten	≥ 1·10 ⁻¹

6.2.1 Verknüpfungsansätze in anderen Wissenschaften

Im folgenden Abschnitt werden aufbauend auf [Kop et al. 11a] Verknüpfungsansätze aus verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen dargestellt und diskutiert. Während die Verbindung unterschiedlicher Ansätze bisher im Ingenieurwesen keine große Beachtung fand, wurde in den Sozialwissenschaften intensiv an sog. *Mixed Methods Designs* geforscht. Ebenso wurde in der Medizin und den Wirtschaftswissenschaften versucht, quantitative und qualitative Betrachtungsweisen zu kombinieren.

Verknüpfungsansätze in den Sozialwissenschaften

Zu den Pionieren bei der Integration qualitativer und quantitativer Methoden gehören hierbei die Sozialwissenschaften. Bei der empirischen Sozialforschung geht es

darum, soziale Zusammenhänge mithilfe von Beobachtungen, Experimenten oder Befragungen zu erkennen und zu erklären [May02].

Bei den Sozialwissenschaften gibt es wie auch in der Zuverlässigkeitstechnik die Unterteilung in qualitative und quantitative Methodenforschung. Allerdings wurden diese beiden Ansätze in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts kontrovers diskutiert, was bis zu einem „Krieg der Paradigmen“ [Kel08] führte, da sowohl die qualitativen Studien nicht ernst genommen als auch die quantitativen Studien als zu oberflächlich abgelehnt wurden [Fli06].

Inzwischen ist jedoch ein klarer Trend in Richtung kombinierter Methoden bemerkbar, da zur Lösung der meisten Aufgabenstellungen beide Betrachtungsweisen hilfreich sind [Sch et al. 10, Kro94]. Weil die Grundprinzipien und Vorteile teilweise auf die Zuverlässigkeitstechnik übertragen werden können, werden diese im Folgenden dargestellt.

Vorteile quantitativer Methoden:

- Exakt quantifizierbare Ergebnisse
- Möglichkeit statistischer Zusammenhänge
- Repräsentative Ergebnisse aufgrund großer Stichproben
- Geringe Kosten und geringer Zeitaufwand
- Objektivität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Vorteile qualitativer Methoden:

- Flexible Anwendung, anpassbar an Untersuchungsgegenstand
- Entdeckung noch unbekannter Sachverhalte möglich
- Ganzheitliche Betrachtung des Untersuchungsgegenstands
- Hohe inhaltliche Validität
- Höherer Informationsgehalt

Es existieren viele unterschiedliche Ansätze zur Integration qualitativer und quantitativer Methoden. Nach [KeEr93] bietet die Kombination quantitativer und qualitativer Analysearten in *Mixed Methods Designs* folgende Möglichkeiten:

- Erklärung überraschender statistischer Befunde
- Identifikation von Variablen, die bislang unerklärte statistische Varianzen aufklären können
- Untersuchung der Geltungreichweite qualitativer Forschungsergebnisse
- Steuerung der Fallauswahl in qualitativen Studien
- Aufdeckung und Beschreibung von Methodenartefakten in qualitativen und quantitativen Studien

In [May01] wird bei den Kombinationsmöglichkeiten zwischen fünf verschiedenen Ebenen unterschieden. Diese reichen von der grundlegenden technischen Ebene bis zur Ebene der Forschungslogik oder Metamethodik, siehe **Abbildung 6.10**. Die Ebenen werden im Folgenden nacheinander beschrieben.

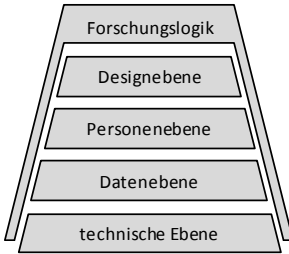


Abbildung 6.10: Unterschiedliche Ebenen zur Verknüpfung quantitativer und qualitativer Methoden

Die unterste Ebene ist die der *technischen Umsetzung*. Dazu gehören zum Beispiel computerbasierte qualitative Analysen, die einen Text auf festgelegte Schlüsselworte durchsuchen und diese zählen, markieren und vergleichen. Damit können beispielsweise Häufigkeitsverteilungen von speziellen Schlüsselwörtern oder eine Zusammenstellung ähnlich kodierter Passagen erstellt werden. Diese Herangehensweisen überlassen die qualitative Analyse immer noch dem Bearbeiter, unterstützen ihn aber mit quantitativen Auswertemöglichkeiten, sodass die qualitativen Eingangsinformationen und damit auch die Analyse etwas transparenter und systematischer werden kann. Übertragen auf das Feld der Zuverlässigkeitstechnik ergibt sich mit einem solchen Ansatz beispielsweise die Möglichkeit, quantitative Analysen von FMEA-Unterlagen, Lastenheften oder auch Werkstattberichten durchzuführen und quantitative Kennwerte zu erstellen.

Die *Datenebene* ist die nächsthöhere Ebene, in welcher bei qualitativen Auswertungen beispielsweise nach charakteristischen Verhaltensmustern gesucht bzw. das vorhandene Material um interpretierende Auswertungen ergänzt wird. Werden dabei ähnliche Auswertungsurteile analysiert, spricht man von axialem und selektivem Kodieren. Bei der Kategorienbildung oder -findung, die auch durch die oben genannte automatisierte Inhaltsanalyse unterstützt werden kann, werden zwei Arten unterschieden: Bei der induktiven Kategorienbildung werden die Kategorien aus dem Ergebnis herauskristallisiert, bei der deduktiven Kategorienanwendung werden vorhandene Kategorien auf das Ergebnis angewandt und ausgewertet.

Damit können ebenfalls einfache Kategoriensysteme (zum Beispiel „hoch“ – „mittel“ – „niedrig“), Häufigkeitsverteilungen und Ranglisten erstellt und zusätzlich statistisch ausgewertet werden. Übertragen auf den Bereich der Zuverlässigkeitstechnik heißt das, dass aus einer FMEA Schlüsselwörter wie zum Beispiel Fehlermechanismen und deren Attribute ausgewertet werden, um die Kritizität von Wechselwirkungen zu erhalten.

Auf der *Personenebene*, die in der Zuverlässigkeitstechnik der Ebene eines technischen Systems entspricht, gibt es die induktive Fallverallgemeinerung und die Typenbildung. In der Soziologie handelt es sich bei qualitativen Analysen meist um Einzelfallstudien, die mit einer ganzheitlichen Sichtweise durchgeführt werden. Dabei lautet die Frage, ob – und wenn ja, wie – einzelne Ereignisse als typisch für alle

Personen verallgemeinert werden können. Ein üblicher Ansatz ist, für den ersten Fall Hypothesen aufzustellen und auf deren Basis weitere Stichproben zu ziehen, bis neue Stichproben keine neuen Erkenntnisse mehr liefern. Durch die Verbindung von qualitativer Analyse und quantitativer Stichprobenermittlung kann der Analyseaufwand deutlich reduziert werden [May01].

Dies ist in der Zuverlässigkeitstechnik vergleichbar mit dem Fall, wenn entweder analoge Komponenten betrachtet werden und von deren Ausfallwahrscheinlichkeit auf neue Komponenten geschlossen wird oder Prototypen befundet und die Ergebnisse auf die gesamte Produktionscharge übertragen werden müssen.

Die vierte und umfangreichste Ebene ist die *Designebene*. Die verschiedenen Kombinationsansätze auf dieser Ebene werden in **Abbildung 6.11** schematisch dargestellt. [Kel99] und [Cre09] beschreiben dabei zwei grundlegende Kombinationsmöglichkeiten:

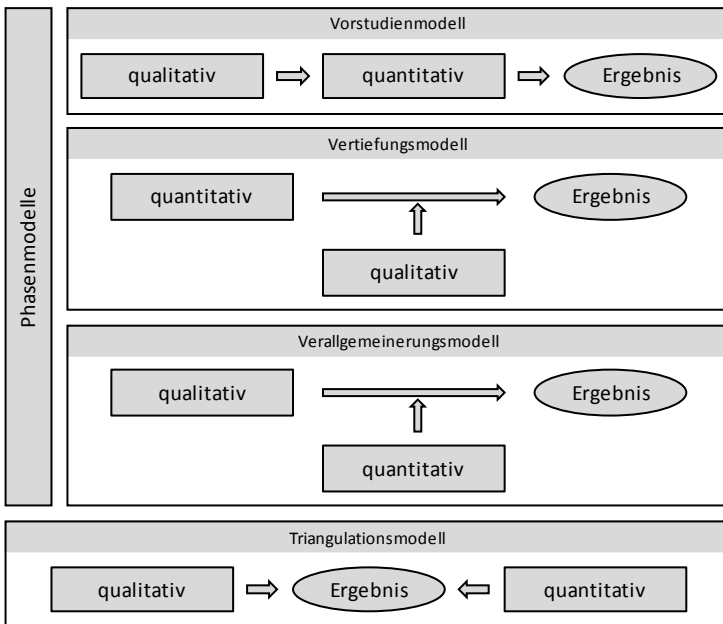


Abbildung 6.11: Grundsätzliche Möglichkeiten zur Kombination quantitativer und qualitativer Analysen, nach [May01]

- *Phasenmodell:* Beide Analysearten werden als hintereinander angeordnete Methoden einer übergeordneten Metamethode kombiniert.
- *Triangulationsmodell:* Beide Analysearten werden parallel angewandt und der Schnittpunkt der Einzelresultate ergibt das Endresultat.

Bei den Phasenmodellen existieren wiederum mehrere Kombinationsmöglichkeiten, die die beiden Ansätze in unterschiedlicher Reihenfolge anordnen. Dabei werden in [TaTe98] folgende Möglichkeiten dargestellt:

- *Vorstudienmodell*: Die mithilfe einer qualitativen Vorstudie ermittelten Hypothesen werden danach durch eine quantitative Betrachtung überprüft. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn in wenigen, offenen Probeninterviews Kategorien für ein quantitatives Testinstrument ermittelt werden.
- *Vertiefungsmodell*: Die in einer quantitativen Studie ermittelten Ergebnisse werden anschließend in einer qualitativen Studie vertieft und interpretiert. Damit können quantitativ ermittelte Zusammenhänge entkräftet oder bestätigt werden.
- *Verallgemeinerungsmodell*: Die in einer qualitativen Studie ermittelten Ergebnisse werden in einer anschließenden quantitativen Studie verallgemeinert. Dies ähnelt prinzipiell dem Vorgehen auf der Personenebene, nur stellen hier die einzelnen Schritte komplette, in sich abgeschlossene Studien dar.

Die Triangulation stellt die komplexeste Möglichkeit dar, führt aber auch zu einem doppelt abgesicherten Resultat [Lam05]. Sie wird auch als Möglichkeit gesehen, die Schwächen einer Methode durch die Stärken einer anderen Methode auszugleichen [Jic79]. Die Triangulation wird bei qualitativen Analysen häufig dann genutzt, wenn mehrere Personen ihre Standpunkte abgleichen und diskutieren. Die Triangulation gilt zwar als die vollkommenste Art der Methodenintegration – bei der Umsetzung zeigt sich aber, dass diese in den Sozialwissenschaften „eher eine vage Metapher mit einem breiten Bedeutungsfeld darstellt“ [Kel08, S. 40].

Die oberste Ebene ist schließlich die der gemeinsamen *Forschungslogik*. Diese ist deshalb schwierig umsetzbar, weil klassische Methodenhandbücher Forderungen aufstellen – wie z. B. eine Hypothesenformulierung zu Beginn oder eine große Stichprobe – welche bei qualitativen Analysen nicht umgesetzt werden können oder sollen. Diese Situation ist direkt auf die Zuverlässigkeitstechnik übertragbar, wo zu Beginn eines Dauerlaufs weder die zu erwartenden Fehler bekannt sind noch aus Kostengründen beliebig große Stückzahlen getestet werden können.

Weil die starren Ablaufpläne der quantitativen Studien nicht für die qualitativen Studien übernommen werden konnten, wurden diese daraufhin oftmals ganz ohne geregelten Ablaufplan durchgeführt. Die Kombination beider Ansätze ergibt nach [May01] einen erweiterten, weniger starren Ablaufplan:

1. Formulierung einer zentralen Fragestellung
2. Klären des Vorverständnisses bzw. Theoriehintergrunds der Bearbeiter
3. Beschreibung des Untersuchungsfelds
4. Auswahl des methodischen Ansatzes
5. Aufbereitung der Ergebnisse
6. Aufstellen der Schlussfolgerung

Dieses Ablaufmodell deckt die Anforderungen beider Ansätze ab und ermöglicht somit ein integriertes und regelgeleitetes Vorgehen, welches trotz des Verzichts auf verschiedene quantitative Zwänge für Dritte nachprüfbar und reproduzierbar ist.

Verknüpfungsansätze in der Medizin

Auch im Fachbereich der Medizin gibt es Verknüpfungsansätze, da es dort häufig notwendig ist, quantitativ kaum messbare Eigenschaften statistisch bewerten zu müssen.

Wie auch in den Sozialwissenschaften geht es meistens darum, qualitative Fragestellungen zu quantifizieren, damit allgemeingültige Aussagen zu medizinischen Sachverhalten getroffen werden können. Unter anderem werden spezielle Fokusgruppen qualitativ beobachtet und aufbauend auf den Ergebnissen quantitative Fragebögen erstellt. Ebenso können quantitativ ermittelte Erkenntnisse helfen, qualitativ untersuchte Phänomene zu verstehen. Dieses Vorgehen wird beispielsweise von Anthropologen gewählt, um ethnografische Detailanalysen richtig bewerten zu können. [Ste et al. 92].

Die genannten Verfahren werden im ingenieurtechnischen Umfeld üblicherweise nicht angewandt. Jedoch ist festzustellen, dass die Verknüpfung qualitativer und quantitativer Ansätze möglich und üblich ist [Mor98]. Es ergeben sich für diese Arbeit aber keine neuen Erkenntnisse aus den Verknüpfungsansätzen in den Medizinwissenschaften, da sich diese mit den bereits aus den Sozialwissenschaften bekannten Ansätzen decken.

6.2.2 Übertragung der Möglichkeiten auf die Zuverlässigkeitsanalyse

Nachdem nun die Verknüpfungsansätze in den anderen Wissenschaftsdisziplinen dargestellt wurden, stellt sich die Frage, wie diese auf die Zuverlässigkeitsabsicherung angewandt werden können. Die wichtigste Erkenntnis hierbei ist, dass die Soziologie den Menschen als Betrachtungsgegenstand sowohl als einzelnes Individuum sieht als auch als eine Gruppe von Menschen untereinander vergleichbarer Lebewesen. Dies entspricht zu großen Teilen der technischen Betrachtungsweise, in der sowohl einzelne technische Systeme als auch ganze Chargen von Systemen betrachtet werden. Wie auch in der Soziologie wird in der Technik von stochastisch streuenden Merkmalen einzelner Objekte innerhalb einer Gruppe ausgegangen, die quantitativ mithilfe statistischer Werkzeuge oder qualitativ durch die Benennung „typischer“ Ausprägungen abgebildet werden.

Bei der Vorstellung der verschiedenen Verknüpfungsebenen in der Soziologie wurden bereits vereinzelt Beispiele aus der Zuverlässigkeitsabsicherung genannt. Diese zeigen, dass auf allen genannten Ebenen mögliche Verknüpfungsansätze übernommen werden können. Besonders hervorgehoben werden soll die Designebene, da diese Ebene mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Modularisierungsansatz korrespondiert. Auf der Designebene gibt es die verschiedenen vorgestellten Phasenmodelle, die sehr gut auf die Zuverlässigkeitsabsicherung angewandt werden können.

Das Vorstudienmodell kann umgesetzt werden, indem beispielsweise bewusst eine FMEA dazu verwendet wird, quantitative Lebensdauertests nur für die kritischsten Komponenten durchzuführen. Ein weiteres Beispiel ist direkt auf die Fehlzu-

standsbaumanalyse anwendbar: Bereits während der qualitativen Erstellung des Fehlerbaums werden kritische Komponenten oder Pfade markiert. Anschließend wird nur für diese Pfade eine Quantifizierung durchgeführt. Generell empfiehlt sich zur Begrenzung des Analyseumfangs, den hohen Aufwand für quantitative Analysen nur nach einer vorherigen qualitativen Vorstudie durchzuführen.

Das Vertiefungsmodell ist ebenfalls gut übertragbar. Oftmals kommt es vor, dass quantitative Felddaten erhoben und auf deren Basis Schlussfolgerungen gezogen werden, ohne jemals einen der Datensätze genauer angeschaut zu haben. Das würde in diesem Fall bedeuten: Quantitative Ergebnisse sollten grundsätzlich nochmals qualitativ hinterfragt werden, bestenfalls direkt am untersuchten Objekt. Eine beispielhafte qualitative Befundung eines technischen Systems hilft oftmals, quantitative Erkenntnisse besser verstehen zu können.

Das Verallgemeinerungsmodell schließlich kann in der Zuverlässigkeitsabsicherung angewandt werden, wenn qualitative Erkenntnisse, beispielsweise das Schadensbild eines Feldrückläufers, vorliegen. Dieser Rückläufer kann nun detailliert auf charakteristische qualitative Schadensmerkmale hin untersucht werden, welche anschließend als Grundlage einer quantitativen Analyse dienen. Damit kann beispielsweise herausgefunden werden, ob es sich bei dem Schaden um einen Einzelfall oder ein Serienproblem handelt.

6.2.3 Weitere Kombinationsmöglichkeiten in der Zuverlässigkeitstechnik

Neben den erläuterten Verknüpfungsansätzen aus den Sozial- und Medizinwissenschaften gibt es weitere allgemein gebräuchliche Techniken, die zur Verknüpfung herangezogen werden können. Allerdings sind diese hauptsächlich nur auf der Daten- oder der Informationsebene nutzbar und stellen keine Vorgehensweise dar.

Neben der Kombination qualitativer und quantitativer Methoden kann auch die Verknüpfung qualitativer und quantitativer Daten wie zum Beispiel Kundeninterviews und Ausfallraten einen deutlichen Mehrwert bieten. Die im Folgenden dargestellten Techniken sollen helfen, subjektive, das heißt qualitative Daten zu objektivieren, damit diese anschließend quantitativ ausgewertet werden können.

Die *Fuzzy-Logik* [Zad65] ermöglicht die mathematische Darstellung unscharfer Beschreibungen. Mit ihrer Hilfe können beispielsweise textuelle Fehlerinformationen *fuzzyfiziert* werden, um diese statistisch auszuwerten. Um für den Menschen verständliche Ergebnisse zu erhalten, könnten diese anschließend wieder *defuzzifiziert* werden.

Dies wurde bereits für die FMEA und die Ermittlung der Risikoprioritätszahl umgesetzt. Da die bei einer FMEA beteiligten Personen oftmals Schwierigkeiten bei der eindeutigen Festlegung der Faktoren *Auftreten*, *Bedeutung* und *Entdeckungswahrscheinlichkeit* haben, wurden mithilfe der *Fuzzy-Logik* eine Möglichkeit geschaffen, mit der die Kennzahlen als Text, das heißt unpräzise, angegeben werden können. Anschließend wird daraus die Risikoprioritätszahl unter Verwendung von dreieckigen Zugehörigkeitsfunktionen berechnet [Tay 2006].

Ebenso stellt die Klassierung eine Möglichkeit zur Verknüpfung dar. Sie korreliert mit der menschlichen Denkweise, die Sachverhalte lieber anhand einer bestehenden Klassifikation (beispielsweise „schlecht“ – „mittel“ – „gut“) anstatt mit einem exakten Wert beschreibt. Ein Spezialfall der Klassierung ist die Taxonomie. Diese stellt eine hierarchische Klassierung dar.

Die nach dem englischen Mathematiker Thomas Bayes benannten *Bayesschen Netze* [Jen01] helfen ebenfalls, unsicheres Wissen zu quantifizieren, indem sie eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Menge von Einflussgrößen repräsentieren. Dazu verwenden sie die Graphen- und Wahrscheinlichkeitstheorie. Sie bestehen aus einer Anzahl verschiedener Variablen und einer Anzahl von Verbindungen zwischen den Variablen. Die Zustände der Variablen sind dabei endlich. Jede Variable, die von anderen Variablen abhängt, besitzt eine Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten, die die Abhängigkeiten modelliert.

Diese Tabellen können sowohl quantitativer als auch qualitativer Art sein. Qualitative Tabellen bedingter Wahrscheinlichkeiten beinhalten beispielsweise Informationen zur Art einer linearen Beziehung (positiv (+) / negativ (-)) zweier Variablen [Wit02]. Aufbauend auf den qualitativen probabilistischen Netzen in [Wel90] werden in [DrGa95] für verschiedene qualitative Beziehungen formale geeignete probabilistische Definitionen angegeben. Diese Definitionen werden anschließend genutzt, um unterschiedliche Wissensarten zur Definition von Wahrscheinlichkeitstabellen in Bayesschen Netzen zu nutzen.

Eine Anwendung Bayesscher Netze in Verbindung mit der Fuzzy-Logik zur Zuverlässigkeitsabsicherung mithilfe eines kombinierten Einsatzes von qualitativen und quantitativen Daten wird in [Ciz et al. 01] beschrieben.

6.3 Zusammenfassung der Verknüpfungsmöglichkeiten

Von den verschiedenen Verknüpfungsmöglichkeiten wurde eine Verknüpfung entlang des Zuverlässigkeitsabsicherungsprozesses sowie zwischen quantitativen und qualitativen Analysearten dargestellt.

Aufgrund der Vielzahl der Aufgaben der Zuverlässigkeitsabsicherung bietet sich für eine Verknüpfung entlang des Produktentwicklungsprozesses eine zweistufige Systematik an: die umfangreichen Fragestellungen auf der obersten Ebene werden mithilfe eines Makrozyklus strukturiert und in eine logische Kausalkette gebracht. Damit ist eine durchgängige und systematische Aneinanderreihung beziehungsweise Verknüpfung derselben sichergestellt.

Auf der darunterliegenden Ebene der Module kommt ein Mikrozyklus zur Anwendung, welcher die einzelnen Module anhand ihrer sechs Basisaktionen sortiert und aneinanderreihet. Dabei kann der Mikrozyklus beliebig häufig und ineinander verschachtelt zur Anwendung kommen – je nach Komplexität der zugrundeliegenden Fragestellung. Ziel ist, jeden Schritt auf die Ebene der Basismodule herunterzubrechen, so dass die anstehenden Tätigkeiten verständlich und überschaubar werden.

Auf der untersten Ebene der Informationen nimmt ein zentrales Zuverlässigkeits-Informationen-Modell die erarbeiteten und bereits vorhandenen Informationen auf.

Die Kombination quantitativer und qualitativer Analysearten ist weniger formal: hierbei wird empfohlen, durch eine geeignete Abfolge quantitativer und qualitativer Module schlanke, und dennoch aussagekräftige Analysen durchzuführen, beispielsweise nach dem Vorstudienmodell. Hierbei würden qualitative Module zur Vorauswahl und quantitative Module zur vertiefenden Analyse kritischer Aspekte verwendet werden.

7 Anwendung der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung

Nachdem in den bisherigen Kapiteln die verschiedenen Konzepte, Ideen und Modelle vorgestellt und erläutert wurden, wird in diesem Kapitel deren Anwendung auf die Zuverlässigkeitsabsicherung dargestellt. Eine vollständige Darstellung der drei vorgestellten Ebenen und der darin enthaltenen Verknüpfungskonzepte zeigt **Abbildung 7.1**.

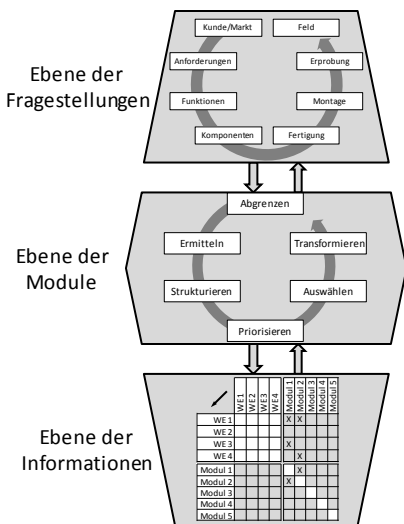


Abbildung 7.1: Die drei Ebenen der Zuverlässigkeitsabsicherung und die korrespondierenden Makro-/Mikrozyklen bzw. Informationsmodelle

Bei der Anwendung der modularisierten Zuverlässigkeitsanalyse stellt sich aufgrund der unzähligen Möglichkeiten die Frage, wie der Bearbeiter oder ein Methodenspezialist die für den aktuellen Fall passenden Methodenmodule auffinden und auswählen kann. Diese Frage wird in den beiden folgenden Abschnitten näher betrachtet.

Zuerst wird geklärt, wie – ausgehend von einer Fragestellung – die möglichen Module identifiziert werden können. Hierbei zeigt sich, dass es meistens nicht nur *eine* passende Modulkette gibt, sondern viele. Daher wird im anschließenden Abschnitt geklärt, wie unter den vielen möglichen Modulkombinationen die passendste herausgefunden werden kann.

Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Automobilindustrie stellt abschließend dar, wie das gezeigte Vorgehen in die Praxis umgesetzt und angewandt werden kann.

7.1 Synthese der identifizierten Module

Es wurde in den vorhergehenden Kapiteln deutlich, dass es unzählige Möglichkeiten zur Erreichung der Zuverlässigkeitsabsicherung gibt. Die bisher nicht beantwortete Frage ist die nach der Ermittlung der relevanten Module, die zur Erreichung eines bestimmten Ziels beziehungsweise zur Beantwortung einer Fragestellung nötig sind.

Als Ziel dieser Arbeit wurde eine schlanke und damit einhergehend eine zielorientierte Möglichkeit der Zuverlässigkeitsabsicherung gefordert. Die Zielorientierung wird in diesem Abschnitt dazu verwendet, die zur Erreichung dieses Ziels notwendigen Module zu ermitteln.

Um so effizient wie möglich ein Ziel zu erreichen, ist der erste Schritt, sich mit der gegebenen Fragestellung genau auseinanderzusetzen und herauszufinden, welche Ergebnisse zur Beantwortung dieser Fragestellung führen können.

Sind diese Ergebnisse gefunden, erfolgt ein Abgleich mit den bereits vorhandenen Informationen. Die Differenz aus erforderlichen und bereits vorhandenen Informationen wird schließlich mit den Ausgabeinformationen der einzelnen Module abgeglichen. Ergebnis dieses Abgleichs sind ein oder mehrere Module, die zu den gewünschten Informationen führen können.

Nachdem das letzte oder die letzten Module identifiziert sind, werden die restlichen notwendigen Module iterativ bestimmt; dieses Vorgehen zeigt **Abbildung 7.2**. Die Eingangsinformationen der identifizierten Module zeigen wiederum den Bedarf an vorhergehenden Modulen bzw. Unternehmensinformationen. Auf diese Weise werden nach und nach alle nötigen Module ermittelt. Durch das iterative Vorgehen ist sichergestellt, dass eine Zielorientierung immer gewährleistet ist. Hilfreich ist dabei auch die Betrachtung der Informationsebene und der darin festgelegten Ein- und Ausgangsinformationen eines Moduls. Dies wurde bereits in **Abbildung 4.13** gezeigt.

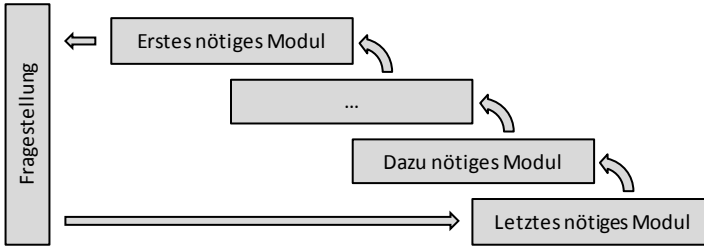


Abbildung 7.2: Iterative Auswahl der benötigten Module

7.2 Auswahl der geeigneten Modulkombinationen

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie aus der Vielzahl der theoretisch möglichen Modulkombinationen eine geeignete Auswahl getroffen werden kann, um mit gerechtfertigtem Aufwand zu annehmbaren Ergebnissen zu kommen. Dabei wird deutlich, dass hierin der Schlüssel zur Skalierbarkeit der Zuverlässigkeitsabsicherung liegt.

Als Grundlage dient das Dreieck aus Qualität, Kosten und Zeit – wobei in diesem Fall Kosten und Zeit direkt voneinander abhängig sind. Jedenfalls ist es nicht schwer, mit beliebig großem Aufwand – ergo Kosten und Zeit – ein sehr genaues bzw. qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erzielen. Die Kunst in der heutigen Industrielandschaft ist jedoch, den Grat zwischen einem exakten Ergebnis und einer aufwandsarmen Vorgehensweise zu finden. Dieser Grat bildet den effizientesten Weg.

Hierbei kann die Modularisierung helfen, zu verschiedenen Zeitpunkten der Zuverlässigkeitsabsicherung bedarfsorientiert mehr oder weniger detaillierte Schritte auszuwählen und durchzuführen. Beispielsweise kann ein Bewertungsschritt durch eine kurze Expertenbefragung erfolgen oder aber durch aufwändig zu generierende Versuchsergebnisse. Beide Varianten haben ihre Berechtigung; diese hängt jedoch von verschiedenen Rahmenbedingungen ab.

Soll nun eine Kette von Modulen zur Beantwortung einer Fragestellung festgelegt werden, ist sowohl – wie in **Abbildung 6.1** dargestellt – ein kontinuierlicher Abgleich der benötigten mit den vorhandenen Informationen durchzuführen als auch Aufwand und Nutzen abzuschätzen. Denn Zielorientierung erfordert, dass der hinsichtlich der Zielerreichung geeignetste Weg ausgewählt werden muss, wenn mehrere zum Ziel führen.

Nähere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bewertung des Aufwands für einen Arbeitsschritt bzw. für ein Modul anhand der benötigten Personenstunden erfolgen kann, da Zeit das wichtigste Maß in der Produktentwicklung darstellt. Zudem ist es auch für das Management wichtig, den Zeitbedarf zur Beantwortung einer zuverlässigkeitsorientierten Fragestellung zu kennen. Demzufolge wird in **Tabelle 7.1** ein Bewertungsschema vorgeschlagen, welches im Zahlenbereich von 1 bis 0 den Zeitbedarf zwischen *kein Aufwand* und *unendlich großer Aufwand* darstellt. Dabei

ist die Bewertungszahl als Übertragungsfaktor zwischen Ein- und Ausgangsgröße zu sehen. Eine Übertragung ohne Aufwand bedeutet eine direkte Übertragung und erhält daher das neutrale Element der Multiplikation, die 1. Eine Übertragungsfunktion mit einer 0 bedeutet hingegen, dass keine Übertragung möglich, der Aufwand also unrealistisch groß ist.

Tabelle 7.1: Bewertungsschema für den Aufwand als Übertragungsfaktor

Bewertungszahl	(Zeit-)Aufwand
1	kein Aufwand/direkte Übertragung/automatisierbar
0,75	Aufwand mehr als ein Personentag (> 8 h)
0,5	Aufwand mehr als eine Personenwoche (> 35 h)
0,25	Aufwand mehr als ein Personenmonat (> 160 h)
0	Aufwand unrealistisch groß

Auch der Nutzen muss bewertet werden, denn bei hochwertigen Ergebnissen kann auch ein hoher Aufwand vertretbar sein. Der Nutzen lässt sich allerdings nicht mit einer einfachen Bewertungszahl quantifizieren, sondern bedarf einer qualitativen Bewertung, die als relativer Vergleich oder mithilfe eines Klassensystems durchgeführt werden kann.

Wichtige Bewertungsmaßstäbe ergeben sich aus den in der Informationstheorie gebräuchlichen Kriterien zur Bewertung einer Informationsgüte, [Sto06]. Die wichtigsten Bewertungsgrößen lauten daher:

- Relevanz
- Verlässlichkeit
- Genauigkeit
- Umfang
- Aktualität
- Klarheit
- Kohärenz
- Zugänglichkeit

7.3 Anwendungsbeispiel Zuverlässigkeitsprognose

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bildet ein Anwendungsbeispiel, welches zur Verdeutlichung der vorgestellten Modularisierung einen Teilabschnitt der Zuverlässigkeitsabsicherung in frühen Phasen darstellt. Gezeigt wird insbesondere die Beantwortung der Fragestellung, welche einzelnen Komponenten eines Systems hinsichtlich der Systemzuverlässigkeit am kritischsten sind. Die Besonderheit dabei ist, dass diese Fragestellung nicht erst kurz vor Ende der Produktentwicklung gestellt wird, wenn der gesamte Makrozyklus durchlaufen ist und alle Details bekannt sind,

sondern bereits in den früheren Phasen, bevor der Makrozyklus-Meilenstein *Komponenten* abgeschlossen ist.

In diesem Anwendungsbeispiel sollen zugleich mehrere vorgestellte Prinzipien angewandt werden: Neben der Informationsdurchgängigkeit und Flexibilität ist dies die Betrachtung aller drei Ebenen *Fragestellung*, *Module* und *Informationen* sowie der Kombination quantitativer und qualitativer Analyseansätze.

Die Informationsdurchgängigkeit wird dadurch gezeigt, dass am Ende eine vollständige MDM mit allen benötigten und betrachteten Informationen dargestellt wird. Die Flexibilität wird anhand zweier unterschiedlicher Konzeptentwürfe dargestellt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Kritizität, Komplexität, ihrem Innovationsgrad und der verfügbaren Daten.

Die drei Ebenen werden ebenso durchlaufen wie das vorgestellte Vorstudienmodell mit einer qualitativen Vorstudie zur Auswahl des Betrachtungsumfangs, gefolgt von einer quantitativen Hauptstudie zur detaillierten Bewertung der Komponenten-Kritizität hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit.

Da sich das Anwendungsbeispiel auf die wichtigsten Aspekte der vorliegenden Arbeit konzentrieren soll, werden nur die beiden Makrozyklus-Meilensteine *Funktionen* und *Komponenten* betrachtet. Die zuvor durchlaufenen Meilensteine *Kunde/Markt* sowie *Anforderungen* liegen primär weniger im Aufgabenbereich der Produktentwicklung als vielmehr bei Marketing und Vertrieb. Sie werden im Beispiel als bereits abgeschlossen betrachtet und dienen als feststehende Eingangsgrößen.

7.3.1 Vorstellung des Beispielsystems

Das gewählte Anwendungsbeispiel eines elektrischen PKW-Fensterhebers ist synthetischer Natur und so gewählt, dass es sowohl genügend komplex als auch überschaubar ist. Zudem handelt es sich um ein mechatronisches System, welches auf [Kop et al. 11b] basiert. Um dem Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf den frühen Entwicklungsphasen gerecht zu werden, wird eine Vorgehensweise zur Zuverlässigkeitsprognose und zur frühzeitigen Bewertung der Komponenten hinsichtlich ihrer zuverlässigkeitsbezogenen Kritizität dargestellt.

Zur Verdeutlichung des flexiblen Modulansatzes werden zwei unterschiedliche Konzepte für den Fensterheber betrachtet, siehe **Abbildung 7.3**. Beim ersten Beispielkonzept soll ein neues Design betrachtet werden, welches auf dem Wirkprinzip eines Seilzugs beruht. Der neue Fensterheber mit Seilzugprinzip ist im Gegensatz zur Scherenkinematik komplexer, da er zum einen für das Unternehmen eine neue Technologie darstellt und zum anderen mehr Komponenten besitzt als die Scherenkinematik. Die Vorteile dieses neuen Prinzips liegen im kleineren Bauraum und im geringeren Gewicht.

Beim zweiten Beispielkonzept handelt es sich um einen bereits aus der Vorgängerbaureihe bekannten Fensterheber, der das Wirkprinzip einer Scherenkinematik anwendet. Dies ist somit eine bereits bekannte und auch erprobte Technologie, für die bereits ein Lastenheft sowie eine System-FMEA vorliegen. Allerdings ist geplant, einen geräuschärmeren Motor als beim Vorgänger einzusetzen.

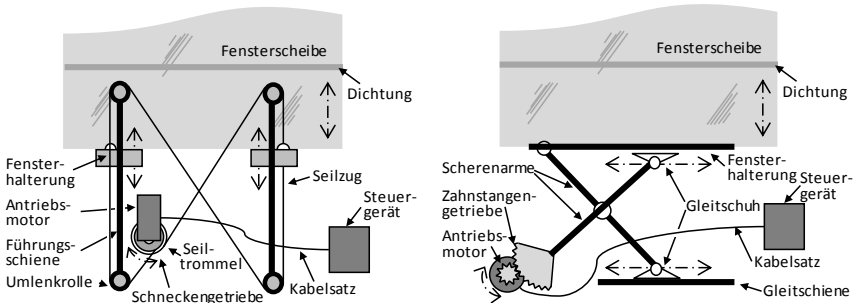


Abbildung 7.3: Schematischer Aufbau des elektrischen Fensterhebers mit Seilzug (Konzept 1, links) und Scherenkinematik (Konzept 2, rechts), vgl. [Hof et al. 09]

7.3.2 Ermittlung der notwendigen Module

Ausgehend von der Fragestellung, welche einzelnen Komponenten eines Systems hinsichtlich der Systemzuverlässigkeit am kritischsten sind, müssen nun die zur Beantwortung nötigen Module anhand der Vorgehensweise aus Abschnitt 7.1 rekursiv ermittelt werden. Als Hilfsmittel wird der Mikrozyklus rückwärts durchlaufen. Zu jeder Basisaktion werden dann die möglichen Basismodule festgelegt.

Es wird die Ermittlung der Module jeweils getrennt für die einzelnen Beispiele erläutert. Das komplexere Beispiel eines Fensterhebers mit neuem Seilzug wird zuerst vorgestellt, um anschließend beim Beispiel des Fensterhebers mit bekannter Scherenkinematik primär nur die Unterschiede aufzuzeigen.

Ermittlung der Module für das Beispielkonzept Seilzug-Fensterheber

Wie bereits erwähnt handelt es sich beim seilzugbasierten Fensterheber um ein neues Konzept, zu welchem noch keine konkreten Informationen vorliegen. Es kann also nicht direkt auf vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden. Die rekursiv zu ermittelnden Module werden im Folgenden anhand des Mikrozyklus nacheinander festgelegt und sind in **Abbildung 7.4** schematisch dargestellt.

Laut Mikrozyklus aus **Abbildung 6.7** wird zuletzt der Schritt *Transformieren* durchgeführt. Da die Fragestellung aber nur die Nennung der kritischsten Komponenten erfordert und nicht auch beispielsweise deren Optimierung, wird dieser Schritt im dargestellten Fall nicht benötigt.

Vor dem Transformieren kommt der Schritt *Auswählen*. Damit wird erreicht, dass nur die relevanten Komponenten genannt werden und die Übersichtlichkeit erhalten bleibt. In diesem Fall sind Wissenselement und Basisaktion bereits durch die Aufgabenstellung festgelegt: *Zuverlässigkeitskritische Komponenten auswählen*. Umgesetzt werden kann die Auswahl mithilfe verschiedener Modelle, beispielsweise dem Pareto-Modell, einer Expertenauswahl oder einer qualitativen Schwerpunktanalyse

zur Identifikation einfach behebbarer Schwachstellen. Im vorliegenden Beispiel wird eine Expertenauswahl getroffen, die die ausgehend von der Priorisierung kritischsten Komponenten nochmals betrachtet und die relevantesten Komponenten auswählt.

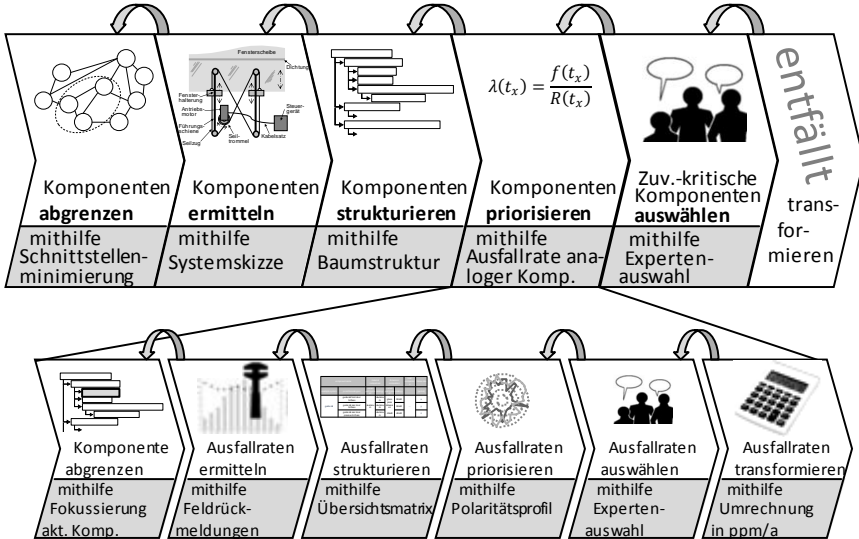


Abbildung 7.4: Basismodule für das Beispielkonzept Seilzug-Fensterheber

Die nächste Frage nach der *Priorisierung* der Komponenten anhand ihrer Kritizität bezüglich der Systemzuverlässigkeit kann ebenfalls auf unterschiedlichste Art und Weise beantwortet werden. Zur Umsetzung des Vorstudienmodells soll dieser Schritt auf jeden Fall quantitativer Art sein. Beispielhaft genannt werden kann hier eine Priorisierung der Komponenten anhand theoretischer Lebensdauermodelle oder eine Priorisierung anhand von Testergebnissen. Zu einer Bewertung von Aufwand und Ertrag – wie in Abschnitt 7.2 vorgeschlagen – kommt es allerdings gar nicht, weil schon ein Abgleich mit den vorhandenen Informationen zeigt, dass die für die beiden Ansätze benötigten Eingangsinformationen fehlen. Die Lebensdauermodelle fehlen aufgrund des dafür nötigen hohen Aufwands und der Zeit; die Testergebnisse fehlen, weil der Zeitpunkt noch zu früh im Entwicklungsprozess liegt.

Aus dieser Bewertung heraus ergibt sich, dass die Komponenten mithilfe einer abgeschätzten Ausfallrate priorisiert werden müssen. Die sich nun ergebende Frage ist, woher die Ausfallrate kommen kann. Auch dafür gibt es wieder vielzählige Antworten. Die einfachste, aber ungenaueste Variante wäre die Expertenmeinung. Das bedeutet, dass die beteiligten Entwickler pro Komponente eine Ausfallrate festlegen. Eine weitere Möglichkeit sind Ausfallratenkataloge, wie sie bereits in Abschnitt 2.2.2

erwähnt wurden. Allerdings scheitern beide Varianten bei der Bewertung der Genauigkeit, letztere auch noch bei der Bewertung des Umfangs.

Daher wird in diesem Beispiel die Verwendung von Ausfallraten analoger, d.h. vergleichbarer Komponenten, die sich bereits im Feld befinden, angestrebt. Diese Ausfallraten können bei einem entsprechenden Informationsmanagement ohne großen Aufwand erhoben werden und besitzen eine hohe Genauigkeit, da Einsatzzweck und Entwicklungsziel früherer Komponenten gut mit denen der aktuellen Komponenten übereinstimmen.

Da eine Abschätzung der Ausfallrate eine komplexere Tätigkeit ist, empfiehlt sich hier – wie mit dem Dekompositionsprinzip in Abschnitt 4.2.2 beschrieben – das Durchlaufen eines weiteren Mikrozyklus auf der nächsttieferen Ebene. Dieser wird im Folgenden ebenfalls in umgekehrter Reihenfolge beschrieben.

Ziel dieses Unterzyklus soll sein, die ungeordnete Liste der Komponenten zu priorisieren. Daher beschreibt das *Transformieren* die Umrechnung der ermittelten Ausfallraten in ein einheitliches Format, z. B. ppm/a, sowie die Übertragung einer Ausfallrate pro Komponente in das Hauptdokument.

Der Schritt zur Ermittlung dieser einen Ausfallrate erfolgt beim *Auswählen*. Hierbei wird aus den verschiedenen Ausfallraten-Vorschlägen, die im vorigen Schritt *Priorisieren* miteinander verglichen werden, der am besten geeignete Wert ausgewählt. Hauptkriterium bei diesen Schritten ist die Vergleichbarkeit der Analogie.

Um die Vergleichbarkeit bewerten zu können, werden im Schritt *Strukturieren* alle verfügbaren Datensätze in einer Übersicht dargestellt, die neben dem reinen Zahlenwert auch Informationen zu den Randbedingungen enthält. Das sind beispielsweise die Datenbasis, die Aktualität, die Einsatzbedingungen der zu vergleichenden Komponenten sowie deren Merkmale wie Fertigungsart, Material oder Dimension.

Vor dieser Übersicht müssen zuerst die möglichen Ausfallraten bzw. die zu Grunde liegenden analogen Komponenten *ermittelt* werden. Wie bereits erläutert, sollen die Ausfallraten anhand vergleichbarer Komponenten und deren Feldrückmeldungen ermittelt werden. Bei einfacheren Produkten reicht vermutlich schon der Vergleich der Sachnummern oder beispielsweise der Abgleich der Leistungsklasse, um vergleichbare Komponenten zu finden. Bei komplexeren und stark variierenden Komponenten bietet sich ein qualitativer Abgleich der im zuvor beschriebenen Schritt genannten Merkmale und Randbedingungen an.

Schließlich noch ein Hinweis zum ersten Schritt des untergeordneten Mikrozyklus: die *Abgrenzung* beschreibt die Fokussierung auf jeweils eine ausgewählte Komponente des zu betrachtenden Systems. Der untergeordnete Zyklus wird dann für jede Komponente separat durchlaufen.

Im Hauptzyklus steht vor der Priorisierung der Komponenten deren *Strukturierung*. Hierbei ist die Forderung an diesen Schritt, die Komponenten derart zu strukturieren, dass von den Komponentenausfallraten schließlich auf die Systemausfallrate geschlossen werden kann. Dazu wird ein Zuverlässigkeitsmodell des Systems erstellt, welches die zuverlässigkeitsrelevanten Beziehungen zwischen den Komponenten aufzeigt. Für die vorliegenden mechatronischen Systeme eignet sich dafür am besten das Fehlzustandsbaummodell.

Vor der Strukturierung erfolgt die *Ermittlung* der Komponenten. Dazu wurden bereits in Abschnitt 5.2.1 mehrere Möglichkeiten gezeigt. Beispielsweise ist dies im Rahmen der qualitativen Vorstudie eine interaktive Ermittlung durch verschiedene Kreativitätstechniken oder aber – wie in diesem Fall zutreffend – die Erstellung einer technischen Skizze.

Der im Mikrozyklus an erster Stelle stehende und demzufolge bei der Ermittlung der Module letzte Punkt umfasst das *Abgrenzen* des betrachteten Systems. Da es sich beim Fensterheber um ein Zuliefersystem handelt, ist dieser Punkt trivial und durch die Betrachtung des Lieferumfangs abgearbeitet.

Damit sind für das erste Beispielkonzept alle Module für die Phase *Komponenten* und die Fragestellung der Identifikation kritischer Komponenten identifiziert.

Ermittlung der Module für das Beispielkonzept Scherenkinematik-Fensterheber

Das zweite Beispielkonzept veranschaulicht einen einfacheren Modulaufbau bzw. eine weniger aufwändige Beantwortung derselben Fragestellung. Eingangs wurde erwähnt, dass der Fensterheber mit Scherenkinematik bereits in der Vorgänger-Baureihe verbaut war und daher direkte Erfahrungen und Messergebnisse zur Zuverlässigkeit vorliegen. Allerdings verhindert der neu einzubauende Motor eine vollständige Datenübernahme.

Werden die Basismodule des zuvor vorgestellten Beispielkonzepts auf deren Eignung für das aktuelle Beispiel hin überprüft, zeigt sich eine gute Übereinstimmung: Auch hier muss nichts transformiert werden, da die Ergebnisse schon in der angefragten Form vorliegen. Die Auswahl der kritischsten Komponenten soll hier auf Basis absoluter Zahlen erfolgen. Gewünscht wird die Betrachtung aller Komponenten, deren Ausfallrate über einer bestimmten Grenze liegt. Die restlichen Module des Hauptzyklus können direkt übernommen werden.

Die Vereinfachung aufgrund des bekannten Systems zeigt sich im Unterzyklus zur Priorisierung anhand von Fehlerraten: Da für die übernommenen Bauteile direkt die bisherige Ausfallrate im Feld bekannt ist, wäre dieser Unterzyklus trivial und kann daher wegfallen. Lediglich beim neuen Antriebsmotor muss der Unterzyklus so durchlaufen werden wie im vorherigen Beispiel, um eine Ausfallrate bestimmen zu können.

Damit sind für beide Beispielkonzepte die Basismodule bekannt und die jeweils individuelle Methode zur Bestimmung der zuverlässigkeitskritischen Komponenten festgelegt. Im Folgenden wird diese Methode nun angewandt und erklärt.

7.3.3 Umsetzung der mithilfe von Basismodulen konfigurierten Methoden

Im vorigen Abschnitt wurde die in dieser Arbeit vorgeschlagene Metamethode verwendet, um spezielle, an die aktuelle Fragestellung und Rahmenbedingungen angepasste Methoden ableiten zu können. Diese werden nun direkt angewandt, um ein besseres Bild der gewählten Methoden zu erhalten. Dazu werden wiederum die ein-

zelen Schritte des Mikrozyklus durchlaufen und – im Gegensatz zum vorigen Abschnitt – beide Beispielkonzepte parallel und vorwärts entlang des Arbeitsablaufs erläutert.

Abgrenzen

Das Abgrenzen des Betrachtungsumfangs, in diesem Fall der Komponenten, erfolgt beim ersten Beispielkonzept mithilfe der Schnittstellenminimierung. Damit wird die Systemgrenze so gelegt, dass das betrachtete System möglichst wenige Schnittstellen mit dem umgebenden System aufweist. Dieser Schritt ist eher qualitativer Natur und beim Beispielsystem sehr einfach umzusetzen: Die Systemgrenze verläuft durch die Anschraubpunkte an der Türe sowie durch den Steckkontakt am Steuergerät. Damit sind Ströme, Datensignale sowie mechanische Kräfte und Momente als Schnittstellen festgelegt. Dahingegen ist die Abgrenzung des zweiten Beispielkonzepts bereits durch das Vorgängerprodukt erledigt und identisch zum ersten Beispielkonzept.

Ermitteln

Für das Ermitteln wurde in der Modulauswahl beim ersten Beispielkonzept die Zeichnung als Grundlage herangezogen. Die Skizze ist in **Abbildung 7.3** dargestellt. Anhand dieser können die Komponenten identifiziert werden. Auch schon in frühen Entwicklungsphasen, wenn der detaillierte Aufbau noch nicht feststeht, ist der Großteil der Komponenten auf diese Art identifizierbar. Dahingegen sind die Komponenten des zweiten Beispielkonzepts bereits durch das Vorgängerprodukt bekannt. In **Abbildung 7.5** ist ein Auszug der identifizierten Komponenten zu sehen.

Fensterheber mit Seilzug	Fensterheber mit Scherenkinematik
Antriebsmotor	Antriebsmotor
Dichtung	Dichtung
Fensterhalterung li. + re.	Fensterhalterung
Fensterscheibe	Fensterscheibe
Führungsschiene li. + re.	Gleitschiene
Kabelsatz	Gleitschuh
Schneckengetriebe	Kabelsatz
Seiltrommel	Scherenarm li + re
Seilzug	Steuergerät
Steuergerät	Zahnstangengetriebe
Umlenkrolle li. + re. o. + u.	...
...	

Abbildung 7.5: Abgegrenzter Systemumfang mit den ermittelten Komponenten beider Beispielkonzepte

Strukturieren

Die Strukturierung der Komponenten ist genau genommen bereits erledigt: Die Komponenten wurden in eine eindimensionale Liste eingetragen und weisen daher

bereits eine Struktur auf. Dennoch wurde in der Modulauswahl entschieden, als Zuverlässigkeitsmodell des Systems einen Fehlzustandsbaum zu erstellen. Wichtigster Nutzen des Fehlzustandsbaumes ist hierbei die Identifikation redundanter Komponenten, die als UND-verknüpfte Elemente dargestellt werden. Da diese bei nicht sicherheitsrelevanten Systemen selten auftreten, sind die meisten Komponenten seriell verschaltet und in der Baumstruktur als ODER-verknüpfte Elemente (siehe Abschnitt 2.4.4) dargestellt. Der somit entstandene Fehlzustandsbaum kann selbstverständlich in anderen Modulen weiterverwendet werden.

In **Abbildung 7.6** ist der Fehlzustandsbaum des ersten Beispielkonzepts mit Seilzug dargestellt. Wie zu sehen ist, wurden die Fensterhalterungen bei diesem Konzept als redundant identifiziert.

Für das zweite Beispielkonzept war dieser Schritt trivial, da in der vom Vorgänger-System vorliegenden FMEA bereits die Systemstruktur dargestellt und ein redundanzfreies System festgestellt wurde.

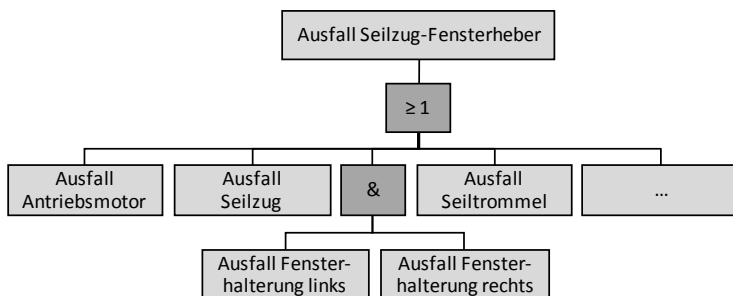


Abbildung 7.6: Auszug aus dem Fehlzustandsbaum des ersten Beispielkonzeptes Seilzug-Fensterheber

Priorisieren

Bereits im vorherigen Abschnitt wurde deutlich, dass der Schritt *Priorisieren* der umfangreichste sein wird – vor allem, weil teilweise ein weiterer Unterzyklus durchlaufen wird. Beim ersten Beispielkonzept muss dieser aufgrund des neuen Wirkprinzips für alle Komponenten durchlaufen werden, beim zweiten Beispielkonzept hingegen nur für die neue Komponente Antriebsmotor.

Unterzyklus: Abgrenzen

In diesem Fall beschreibt das Abgrenzen die Fokussierung auf jeweils eine ausgewählte Komponente.

Unterzyklus: Ermitteln

Im gegebenen Beispielszenario werden aus dem Produktportfolio des Herstellers verschiedene, möglicherweise ähnliche Komponenten zusammengetragen und anschließend deren Vergleichbarkeit bewertet. Dabei kommt es weniger auf die geo-

metrische Ähnlichkeit an – vielmehr müssen die möglichen Ausfallmechanismen übereinstimmen. Eine beispielhafte Aufstellung eines solchen Vergleichs ist in **Tabelle 7.2** zu finden.

Tabelle 7.2: Auflistung der möglicherweise vergleichbaren Komponenten

Komponente	Analogie
Antriebsmotor	Motor Sitzverstellung Motor Spiegelverstellung Motor Scheibenwischer
Führungsschiene li + re	Haltearm Heckdeckelöffnung Führungsschiene Fahrersitz Führungsschiene Beifahrersitz
Schneckengetriebe	Getriebe Sitzlehnenverstellung Fahrersitz Getriebe Sitzlehnenverstellung Beifahrersitz
Kabelsatz	Kabelsatz Außenspiegel Kabelsatz Heckdeckelbeleuchtung Kabelsatz Schiebe-Hebe-Dach Kabelsatz Scheibenwischer
Steuergerät	Steuergerät Reifendruckkontrolle Steuergerät Komfort-Klimatisierungsautomatik Steuergerät/Steuereinheit Sitzeinstellung
Seilzug	...

Sollten bei diesem Schritt keine vergleichbaren Komponenten gefunden werden, hilft es möglicherweise, die Merkmale der Komponenten, z. B. den Werkstoff, nochmals genauer zu betrachten und zu überlegen, ob es nicht doch andere Komponenten mit vergleichbaren Merkmalen gibt. Ansonsten können auch differenzielle Vergleiche durchgeführt werden: Es werden sowohl deutlich einfachere als auch deutlich komplexere Komponenten zum Vergleich herangezogen und argumentiert, dass die betrachtete Komponente aus Sicht der Zuverlässigkeit dazwischen liegen wird.

Unterzyklus: Strukturieren

Um diskutieren zu können, ob die möglicherweise vergleichbaren Komponenten auch sinnvolle Analogien darstellen, hilft eine strukturierte Übersicht. Hierzu werden alle verfügbaren Komponenten in einer Übersicht dargestellt und verschiedenste Merkmale aufgeführt, wie oben bei der Modulauswahl erwähnt. Dabei wird für jedes aufgeführte Merkmal die betrachtete Komponente den vergleichbaren Komponenten gegenübergestellt. **Abbildung 7.7** zeigt dies exemplarisch für zwei Komponenten und je drei Merkmale.

		Betriebsspannung		Drehmoment		Baugröße	
Antriebsmotor	Motor Sitzverstellung	12 V	12 V	2 Nm	3,5 Nm	D = 40 mm	D = 60 mm
	Motor Spiegelverstellung		12 V		0,5 Nm		D = 20 mm
	Motor Scheibenwischer		12 V		1 Nm		D = 65 mm
		Werkstoff		Abmessung		Herstellverfahren	
Führungsschiene li + re	Haltearm Heckdeckelöffnung	Aluminium	Aluminium	20 x 400 mm	15 x 200 mm	Blech-Stanzteil	Strangpressen
	Führungsschiene Fahrersitz		Aluminium		40 x 500 mm		Blech-Stanzteil
	Führungsschiene Beifahrersitz		Aluminium		40 x 500 mm		Blech-Stanzteil

Abbildung 7.7: Strukturierte Übersicht der Merkmale für die beispielhaften Komponenten Antriebsmotor und Führungsschiene

Unterzyklus: Priorisieren

Dieser Schritt umfasst die Benennung einer Ausfallrate pro vergleichbarer Komponente. Das Ergebnis dieses Schrittes ist sehr abhängig von der Datenlage. Üblicherweise ist diese bei größeren und im direkten Kontakt mit dem Endkunden stehenden Herstellern besser. Im vorliegenden Beispiel ist zu jeder vergleichbaren Komponente bekannt, wie viele Komponenten hergestellt wurden und wie viele Fehler in den ersten drei Jahren gemeldet wurden. Unter Annahme zufällig verteilter Ausfallzeiten und mangels genauerer Informationen wird ein exponentiell verteiltes Ausfallverhalten zugrunde gelegt und eine konstante Ausfallrate berechnet, siehe dazu Abschnitt 2.4.2.

Unterzyklus: Auswählen

Nun kommt der Expertenrat hinzu, denn rein formell kann nur schwer entschieden werden, welche Ausfallrate der vergleichbaren Komponenten für die jeweils betrachtete Komponente herangezogen werden sollte. Bei diesem Schritt wird nochmals der Ähnlichkeitsgrad der herangezogenen Vergleichskomponenten diskutiert und die Spreizung der ermittelten Ausfallraten beachtet. Die beteiligten Experten einigen sich nun auf einen Wert, der als Ausfallratenprognose für die betrachtete Komponente bestimmt wird.

Unterzyklus: Transformieren

Die zu jeder betrachteten Komponente bestimmten Ausfallraten werden in die gleiche Einheit ppm/a umgerechnet und in die Komponentenübersicht eingetragen. Damit ist der Unterzyklus abgeschlossen.

Auswählen

Der Schritt *Auswählen* soll den Fokus auf die relevantesten Komponenten lenken. Daher wird der Betrachtungsumfang nun eingeschränkt. Beim ersten Beispielkonzept wurde eine qualitative Expertenauswahl festgelegt, beim zweiten Beispielkonzept eine quantitative Auswahl mittels definiertem Ausfallraten-Grenzwert.

Bei der Expertenauswahl werden neben den besonders ausfallträchtigen auch solche Komponenten in die engere Auswahl genommen, die relativ einfach optimiert werden können, aber vielleicht nicht zu den Hauptausfallursachen zählen.

Bei der quantitativen Schranke gibt es diese Freiheiten nicht, dafür ist sie mit nahezu keinem Aufwand verbunden. Das Ergebnis der beiden Auswahlprozeduren ist in **Abbildung 7.8** dargestellt.



Abbildung 7.8: Gegenüberstellung der Ausfallraten der kritischsten Komponenten beider Beispielkonzepte

Wie bereits erwähnt, entfällt im Praxisbeispiel der Schritt der Transformation, da bereits nach der Auswahl das gewünschte Ergebnis vorliegt. Damit wurde am Praxisbeispiel gezeigt, wie durch die rekursive Modulauswahl letztendlich kein unnötiger Arbeitsschritt durchgeführt wurde und in jeder Situation die passende Umsetzung der Basisfunktionen gewählt werden konnte.

Eine mögliche Fortsetzung der Zuverlässigkeitsabsicherung im Praxisbeispiel könnte im Sinne der Kombination von qualitativen und quantitativen Analysearten die Anwendung des Vertiefungsmodells (siehe Abschnitt 6.2.1) sein. Das würde bedeuten, dass die soeben mit dem Vorstudienmodell erarbeiteten kritischen Komponenten nun in einer qualitativen Vertiefungsstudie näher betrachtet werden könnten. Beispielsweise wären dies die Betrachtung möglicher Fehlerquellen sowie die Ermittlung von Verbesserungsmaßnahmen. Das würde sich deshalb besonders anbieten, da die beteiligten Personen während der Durchführung der vorgestellten Vorgehensweise umfangreiche Erkenntnisse über das gesamte System und damit auch bzgl. der potenziellen Schwachstellen des Systems gewinnen könnten.

7.3.4 Darstellung der Informationsebene

Nachdem nun die beiden ersten Ebenen, die Ebene der Makrozyklen und die Ebene der Mikrozyklen betrachtet wurden, fehlt noch die Darstellung der Informationsebene. In Abschnitt 4.4.1 wurde ein matrixbasiertes Konzept zur Abbildung der Modulschnittstellen und somit auch zur Abbildung der Informationsflüsse vorgestellt. Angewandt auf das erste, umfangreichere Beispielkonzept des Seilzug-Fensterhebers ergibt sich die in **Abbildung 7.9** dargestellte Multiple Domain Matrix.

		Wissenselemente										Basismodule										
		Systemstruktur	Systemgrenze	Systemskizze	Komponentenstruktur	Feldrückmeldungen	Ausfallraten der Analogien	Analogie-Merkmale	Ausfallratenprognose	Kritische Komponenten	Komponenten abgrenzen	Komponenten ermitteln	Komponenten strukturieren	Komponente abgrenzen	Ausfallraten ermitteln	Ausfallraten strukturieren	Ausfallraten priorisieren	Ausfallraten auswählen	Ausfallraten transformieren	Komponenten priorisieren	Komponenten auswählen	
Wissenselemente	Systemstruktur																					
	Systemgrenze												X									
	Systemskizze													X								
	Komponentenstruktur													X								
	Feldrückmeldungen															X						
	Ausfallraten der Analogien																					
	Analogie-Merkmale																					
	Ausfallratenprognose																			X		
	Kritische Komponenten																					X
	Basismodule	Komponenten abgrenzen	X	X																		
Komponenten ermitteln			X	X																		
Komponenten strukturieren				X	X																	
Komponente abgrenzen					X	X																
Ausfallraten ermitteln							X							X								
Ausfallraten strukturieren								X	X													
Ausfallraten priorisieren																X						
Ausfallraten auswählen																	X					
Ausfallraten transformieren																		X				
Komponenten priorisieren																			X			
Komponenten auswählen																					X	

Abbildung 7.9: Multiple Domain Matrix zur Darstellung der Informationsflüsse im Praxisbeispiel Seilzug-Fensterheber

Die Multiple Domain Matrix zeigt unten links, welche Informationen von den einzelnen Basismodulen benötigt werden, und unten rechts, welche Informationen direkt

von anderen Basismodulen übernommen beziehungsweise – je nach Leserichtung – an andere Basismodule übergeben werden.

Oben rechts sind die Informationen dargestellt, die an eine zentrale Informationsablage, z.B. ein Zuverlässigkeits-Informations-Modell, übergeben werden. Nach dem Prinzip schmaler Schnittstellen werden aber nur relevante Informationen zentral abgelegt. Weniger bedeutende Informationen werden direkt an das nachfolgende Modul übergeben, z.B. die Priorisierung der Komponenten.

Mit dieser Darstellung ist sowohl die Verknüpfung der Basismodule als auch die Nachvollziehbarkeit der Informationsflüsse und damit eine reproduzierbare Vorgehensweise sichergestellt.

Damit konnte gezeigt werden, dass die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise anwendbar ist. Es sind sowohl je nach Randbedingungen unterschiedliche Modulkombinationen als auch die entsprechende Abbildung der relevanten Informationsflüsse umsetzbar.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung existieren in großer Menge mit unterschiedlichen, sich teilweise aber überschneidenden Zielsetzungen. Daher kommt es in der Produktentwicklung vor, dass eigentlich wichtige Methoden weggelassen oder andere Themen doppelt bearbeitet werden. Dies wirkt sich nicht nur negativ auf die Effektivität, sondern auch auf die Methodenakzeptanz der Entwickler aus.

Demzufolge befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem Grundgedanken, dass nicht die Methoden an sich, sondern deren zugrunde liegende Fragestellungen mehr in den Vordergrund gerückt werden müssen. Auf dieser Basis kann auch eine bessere Kombination der Methoden stattfinden. Die weitergehende Idee war, ob nicht sogar eine Systematik in den grundlegenden Fragestellungen der Methoden erkannt werden kann, die zu einem neuen Verständnis der Zuverlässigkeitsabsicherung führen könnte.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Vielzahl bestehender Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung zu hinterfragen und deren Inhaltsebene mehr in den Vordergrund zu stellen. Als Hilfsmittel wurde der Ansatz der Modularisierung aufgegriffen. Dieser erlaubt sowohl eine vermehrte Standardisierung durch kleine vorgegebene Module als auch eine stärkere Flexibilisierung durch die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten der Module.

Dazu wurden zu Beginn Zuverlässigkeitsmethoden im Speziellen und Entwicklungsmethoden im Allgemeinen betrachtet und auf deren wesentliche Funktionen heruntergebrochen. Im Anschluss daran wurden die Anforderungen an eine Modularisierung festgelegt und bestehende Methoden zur Zuverlässigkeitsabsicherung daraufhin untersucht, ob sich diese mit dem Modularisierungsansatz darstellen ließen.

Den Kernpunkt dieser Arbeit bildete schließlich die Entwicklung einer Systematik zum modularen Aufbau einer vollständigen Zuverlässigkeitsabsicherung. Diese Systematik basiert auf einem Makrozyklus als Wegweiser entlang des Produktentwicklungsprozesses und einem Mikrozyklus zur Anpassung der Arbeitsschritte an die menschliche Denkweise.

In einem Exkurs wurde zudem gezeigt, dass eine durchgängige Zuverlässigkeitsabsicherung nicht nur entlang des Produktentwicklungsprozesses, sondern auch quer über quantitative und qualitative Ansätze hinweg auf verschiedenen Ebenen möglich ist.

Für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet gibt es durch die Offenheit des vorgestellten Ansatzes eine Vielzahl weiterer Fragestellungen, die bearbeitet werden können. Besonders bietet es sich an, den Ansatz von [BaCl00] näher zu verfolgen. Dieser

sieht vor, aus der Fülle der möglichen Modulkombinationen ein Standardvorgehen als Mindeststandard festzulegen und bedarfsgerecht um weitere Module zu ergänzen. Dies entspricht auch der Beobachtung in [Cor02], wonach das Zusammenwirken modularer und integraler Bestandteile als ideal geeignete Prozessstruktur angesehen wird.

Weitere Potenziale liegen in der Unterstützung zur Anwendung der modularisierten Zuverlässigkeitsabsicherung. Dies könnte beispielsweise mithilfe eines Handlungsleitfadens geschehen, der die möglichen Modulkombinationen enthält und den Anwender durch die Modulauswahl leitet. Dabei wäre auch eine Softwareunterstützung empfehlenswert.

Schließlich sei noch erwähnt, dass einem umfassenden Informationsmanagement in der Produktentwicklung in der Zukunft eine immer größere Bedeutung zukommen wird und damit auch bei der Zuverlässigkeitsabsicherung bedarfsgerecht bereitgestellte Zuverlässigkeitsinformationen eine immer größere Rolle spielen werden.

9 Literaturverzeichnis

- [Aka92] Akao, Y.: QFD. Quality function deployment. Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 1992.
- [All85] Allen, E. T.: Die Straße der Zuverlässigkeit. Eine Übersicht zur Zuverlässigkeitstechnik im Zusammenhang mit Kraftfahrzeugen. Wolfsburg, 1985.
- [Amb97] Ambrosy, S.: Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung. Aachen: Shaker, 1997.
- [BaBe94] Bandemer, H.; Bellmann, A.: Statistische Versuchsplanung. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- [Bac et al. 11] Backhaus, K.; Erichson B.; Plinke W.; Weiber R.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [BaCl00] Baldwin, C. Y.; Clark, K. B.: Design Rules. The Power of Modularity, Volume 1. Cambridge: MIT Press, 2000.
- [Bae01] Baer, D. (Hrsg.): Duden, Fremdwörterbuch. Mannheim, Leipzig: Dudenverlag, 2001.
- [Bal09a] Balzert, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [Bal09b] Balzer, W.: Die Wissenschaft und ihre Methoden – Grundsätze der Wissenschaftstheorie – ein Lehrbuch. Freiburg: Alber, 2, 2009.
- [Bal88] Balzer, W.: Empirische Theorien: Modelle, Strukturen, Beispiele. Die Grundzüge der neuen Wissenschaftstheorie: Vieweg Friedr. + Sohn Verlag, 1988.
- [Bar et al. 82] Barlow, R. E.; Fussell, J. B.; Singpurwalla, N. D.; Birnbaum, Z.: Reliability and Fault Tree Analysis. Theoretical and Applied Aspects of System Reliability and Safety Assessment. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.

-
- [Ber06] Bernards, M.: Modulare Prüfplanung. Aachen: Shaker, 2006.
- [Ber89] Bertsche, B.: Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre, 1989.
- [Ber08] Bertsche, B.: Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Determination of Component and System Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer, 3, 2008.
- [Ber et al. 09] Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [Bir et al. 01] Birkhofer, H.; Lindemann, U.; Albers, A.; Meier, M.: Product Development as a structured and interactive Network of Knowledge – a revolutionary approach. In: Cully, S.; Duffy, A.; McMahon, C.; Wallace, K. (Hrsg.): Design Applications in Industry and Education. 13. International Conference on Engineering Design, Glasgow. London: Professional Engineering, 2001; S. 457–464.
- [Bir10] Birolini, A.: Reliability engineering. Theory and practice. Berlin, New York: Springer, 6, 2010.
- [Bla01] Blackenfelt, M.: Managing Complexity by Product Modularisation. Balancing the Aspects of Technology and Business During the Design Process. Stockholm, 2001.
- [Bog09] Bogner, A. (Hrsg.): Experteninterviews. Theorien, Methoden, Anwendungsfelder. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- [Boo01] Boole, G.: The Mathematical Analysis of Logic, being an Essay Towards a Calculus of Deductive Reasoning. Die mathematische Analyse der Logik. Der Versuch eines Kalküls des deduktiven Schließens: Hallescher Verlag, 2001.
- [Boo54] Boole, G.: An investigation of the laws of thought. London: Macmillan, 1854.
- [BoSc07] Bork, T.; Schaefer, M.: Aus Aktivität wird Vorsicht. Sinn und Unsinn der Quantifizierung. In: Ölhydraulik und Pneumatik (O+P) Mainz: Vereinigte Fachverlage, Jahrgang 2007, Vol. 3; S. 78–85.
- [Bri97] Brinkmann, R. B.: Modellierung des Zuverlässigkeitswachstums komplexer, reparierbarer Systeme. Zürich: ETH, Mikrofiche-Ausgabe, 1997.

- [BrKn97] Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin: Springer, 1997.
- [Ciz et al. 01] Cizelj, R. J.; Mavko, B.; Kljenak, I.: Component Reliability Assessment Using Quantitative and Qualitative Data. In: Reliability Engineering and System Safety, Jahrgang 71, Vol. 1, 2001; S. 81–95.
- [Cor02] Cornet, A.: Plattformkonzepte in der Automobilentwicklung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2002.
- [Cor et al. 08] Corsten, H.; Dresch, K.-M.; Gössinger, R.: Problemspezifische Modifikation der Design Structure Matrix im Kontext der Modularisierung von Dienstleistungen. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Produktionswirtschaft, 2008.
- [Cre09] Creswell, J. W.: Research Design. Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Los Angeles: Sage, 3, 2009.
- [Dhi07] Dhillon, B. S.: Applied Reliability and Quality. Fundamentals, Methods and Procedures. London: Springer, 2007.
- [DIN25424] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 25424 – Fehlerbaumanalyse. Berlin: Beuth-Verlag, 1981.
- [DIN40041] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 40041 – Zuverlässigkeit – Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag, 1990.
- [DIN60300a] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN IEC 60300-3-1 – Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-1: Anwendungsleitfaden – Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit – Leitfaden zur Methodik. Berlin: Beuth-Verlag, 2005.
- [DIN60300b] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN IEC 60300-2 – Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 2: Leitfaden zum Zuverlässigkeitsmanagement. Berlin: Beuth-Verlag, 2004.
- [DIN60812] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN IEC 60812 – Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Berlin: Beuth-Verlag, 2006.
- [DIN61025] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN IEC 61025 – Fehlzustandsbaumanalyse. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [DIN61078] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN IEC 61078 – Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit – Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren. Berlin: Beuth-Verlag, 2006.

-
- [DIN 61508] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 61508-4 – Funktionale Sicherheit elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer sicherheitsbezogener Systeme – Teil 4: Begriffe und Abkürzungen. Berlin: Beuth-Verlag, 2002.
- [DIN8402] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 8402 – Qualitätsmanagement – Anmerkungen zu Begriffen. Berlin: Beuth-Verlag, 1995.
- [Dör94] Dörner, D.: Gedächtnis und Konstruieren. In: Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische u. pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren – Ergebnisse des Ladenburger Diskurses von Mai 1992 bis Oktober 1993. Köln: TÜV Rheinland, 1994; S. 150–160.
- [Dow97] Dowson, M.: The Ariane 5 Software Failure. In: ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, Jahrgang 22, Vol. 2, 1997; S. 84.
- [Dre09] Dresch, K.-M.: Wettbewerbsstrategien für Dienstleistungsunternehmen. Modularisierung als Grundlage wettbewerbsstrategischer Optionen. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 1, 2009.
- [DrGa95] Druzdzel, M.; van der Gaag, L.: Elicitation of Probabilities for Belief Networks: Combining Qualitative and Quantitative Information. In: Proceedings of the Eleventh Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-95), Montreal, 18.-20.08.1995, 1995; S. 141–148.
- [Ehr09] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München, Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag, 4, 2009.
- [Eig03] Eigler, H.: Die Zuverlässigkeit von Elektronik- und Mikrosystemen. Renningen: Expert-Verlag, 2003.
- [ElH05] El-Haik, B.: Axiomatic Quality. Integrating Axiomatic Design with Six-Sigma, Reliability, and Quality Engineering. Hoboken: John Wiley, 2005.
- [Ell07] Ellouze, W.: Entwicklung eines Modells für ein ganzheitliches Fehlermanagement. Ein prozessorientiertes Referenzmodell zum effizienten Fehlermanagement. Aachen: Shaker, 2007.
- [EvSc05] Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [Fli06] Flick, U.: An Introduction to Qualitative Research. London, Thousand Oaks: Sage Publications, 3, 2006.
- [Fod83] Fodor, J. A.: The Modularity of Mind. An Essay on Faculty Psychology. Cambridge, Mass, London: MIT Press, 1983.

- [Gän12] Gäng, J.: Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2012.
- [Ger02] Gerst, M.: Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung. München: Techn. Universität, 2002.
- [Gom81] Gomez, P.: Modelle und Methoden des systemorientierten Managements. Eine Einführung. Bern, Stuttgart: Haupt, 1981.
- [GoMa57] Goode, H. H.; Machol, R. E.: System Engineering. New York: McGraw-Hill, 1957.
- [Göp98] Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1998.
- [Gra97] Grabowski, H. (Hrsg.): Neue Wege zur Produktentwicklung. Stuttgart, Heidelberg: Raabe, 1997.
- [Hab et al. 02] Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.: Systems Engineering: Verlag Industrielle Organisation, 11, 2002.
- [Hac73] Hacker, W.: Allgemeine Arbeits- und Ingenieurspsychologie. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1973.
- [Hac92] Hacker, W.: Expertenkönnen – Erkennen und Vermitteln. Göttingen: Hogrefe, 1992.
- [Hai02] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Berlin: Springer, 2002.
- [Hei03] Heiliger, S.: Rapid Quality Deployment. Qualitätsorientierte Produktentstehung durch modularisierte Qualitätsmanagementmethoden. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- [Her et al. 99] Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P. (Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999.
- [Hna03] Hnatek, E. R.: Practical reliability of electronic equipment and products. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [Hof97] Hoffmann, J.: Entwicklung eines QFD-gestützten Verfahrens zur Produktplanung und -entwicklung für kleine und mittlere Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [Hof et al. 09] Hofmann, D.; Kopp, M.; Bertsche, B.; Wedel, M.; Göhner, P.; Mannhart, A.; Fritz, O.: Early Reliability Prediction of Mechatronic Systems in Automotive Industry. In: 15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, 6.-8.8.2009; S. 10-15.

-
- [Hof et al. 10] Hofmann, D.; Kopp, M.; Bertsche, B.: Integrated Use of Reliability-Relevant Information and Knowledge in Product Development of Mechatronics. In: 16. ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Washington DC, 5.-7.8.2010; S. 163–168.
- [Hof13] Hofmann, D.: Informationen in der zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung mechatronischer Systeme. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 2012.
- [Hut05] Hutterer, P.: Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung. München: Verlag Dr. Hut, 1, 2005.
- [IEC61025] International Electrotechnical Commission: IEC 61025 – Fault Tree Analysis (FTA). Genf, 2006.
- [IEC61882] International Electrotechnical Commission: IEC 61882 – Hazard and Operability Studies (HAZOP studies)—Application guide. Genf, 2001.
- [ISO9000] International Standardization Organization: ISO 9000:2000 – Quality Management Systems – Fundamentals and Vocabulary, 2000.
- [Jäg07] Jäger, P.: Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 2007.
- [Jen01] Jensen, F.: Bayesian Networks and Decision Graphs. New York: Springer, 2001.
- [Jic79] Jick, T. D.: Mixing Qualitative and Quantitative Methods: Triangulation in Action. In: Administrative Science Quarterly, Jahrgang 24, Vol. 4, 1979; S. 602–611.
- [Kec05] Kececioglu, D.: Reliability Engineering Handbook. Its Quantification and Optimization. Norwood: DEStech Publications, 2005.
- [KeEr93] Kelle, U.; Erzberger, C.: Qualitative und quantitative Methoden: kein Gegensatz. In: Flick, U.; v. Kardoff, E.; Steinke, I. (Hrsg.): Qualitative Forschung. Reinbeck: Rowohlt, 1993; S. 299–309.
- [Kel08] Kelle, U.: Die Integration qualitativer und quantitativer Methoden in der empirischen Sozialforschung. Theoretische Grundlagen und methodologische Konzepte. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, 2, 2008.
- [Kel99] Kelle, U.: Integration qualitativer und quantitativer Methoden. In: CAQD 1999 – Computergestützte Analyse qualitativer Daten, 1999.
- [Kin89] King, B.: Better Designs in Half the Time. Implementing QFD Quality Function Deployment in America. Methuen: GOAL/QPC, 1989.

- [KoKa98] Koller, R.; Kastrup, N.: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [Kop et al. 11a] Kopp, M.; Hofmann, D.; Bertsche, B.: Synergieeffekte durch die Verknüpfung qualitativer und quantitativer Zuverlässigkeitsanalysen. 25. Tagung Technische Zuverlässigkeit 2011, 11.-12.05.2011, Leonberg. In: VDI-Berichte 2146, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011; S. 343–354.
- [Kop et al. 11b] Kopp, M.; Hofmann, D.; Bertsche, B.; Heß, C. & Fritz O.: Early Reliability Estimation In Automotive Industry. In: Culley, S.J.; Hicks, B.J.; McAloone, T.C.; Howard, T.J. & Dong, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED11*. Copenhagen: The Design Society, 2011 10, S. 209–220.
- [Kro94] Kromrey, H.: Strategien des Informationsmanagements in der Sozialforschung. Ein Vergleich quantitativer und qualitativer Ansätze. In: *Angewandte Sozialforschung*, Jahrgang 18, Vol. 3, 1994; S. 163–184.
- [LaGö99] Lauber, R.; Göhner, P. (Hrsg.): *Prozessautomatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999.
- [Lam05] Lamnek, S.: *Qualitative Sozialforschung*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag, 4, 2005.
- [Les01] Lesmeister, F.: *Verbesserte Produktplanung durch den problemorientierten Einsatz präventiver Qualitätsmanagementmethoden*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- [Lev06] Levinson, M.: *The Box. How the Shipping Container made the World Smaller and the World Economy Bigger*. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2006.
- [Lin et al. 09] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: *Structural Complexity Management. An Approach for the Field of Product Design*. Berlin: Springer, 2009.
- [Lin09] Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin: Springer, 3, 2009.
- [Man et al. 07] Mannhart, A.; Bilgic, A.; Bertsche, B.: Function Orientated Approach for Reliability Modeling of Mechatronic Systems in Early Design Stages. In: Aven, T.; Vinnem, J. E. (Hrsg.): *Proc. of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2007*, Stavanger, Norway. London: Taylor & Francis, 2007; S. 2165–2172.
- [May01] Mayring, P.: Kombination und Integration qualitativer und quantitativer Analysen. In: *Forum Qualitative Sozialforschung*, Jahrgang 2, Vol. 1, 2001.

-
- [May02] Mayring, P.: Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken. München: Psychologie-Verlags-Union, 5, 2002.
- [Mey90] Meyer, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung. München: Hanser, 1990.
- [Mey10] Meyna, A.: Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren. München, Wien: Hanser, 2, 2010.
- [MIL95] MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment. Washington, DC: Department of Defense, Notice 2, 1995.
- [Mor98] Morgan, D. L.: Practical Strategies for Combining Qualitative and Quantitative Methods: Applications to Health Research. In: Qualitative Health Research, Jahrgang 8, Vol. 3, 1998; S. 362–376.
- [Mus et al. 90] Musa, J. D.; Iannino, A.; Okumoto, K.: Software Reliability. Measurement – Prediction – Application. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [Nie50] Niemann, G.: Maschinenelemente: Entwerfen, Berechnen und Gestalten im Maschinenbau: ein Lehr- und Arbeitsbuch. Berlin: Springer, 1950.
- [O’C06] O’Connor, P. D. T.: Practical Reliability Engineering. Chichester: Wiley, 4, 2006.
- [Pah et al. 06] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Berlin: Springer, 2006.
- [Par72] Parnas, D. L.: On the Criteria to be used in Decomposing Systems into Modules. In: Communications of the ACM, New York, Jahrgang 15, Vol. 12, 1972; S. 1053–1058.
- [Pau97] Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug. Modellbildungen und deren praktische Anwendung. Wuppertal, 1997.
- [Pha03] Pham, H. (Hrsg.): Handbook of Reliability Engineering. London, Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [Pic09] Pickard, K.: Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 2009.
- [Pul04] Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. München: Dr. Hut, 2004.
- [RaHø04] Rausand, M.; Høyland, A.: System Reliability Theory. Models, statistical Methods, and Applications. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004.

- [Rak01] Rakowsky, U. K.: Wörterbuch der Zuverlässigkeit. Hagen LiLoLe, 2001.
- [Rak02] Rakowsky, U. K.: System-Zuverlässigkeit. Terminologie, Methoden, Konzepte. Hagen: LiLoLe, 2002.
- [Rod76] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Berlin: Springer, 1976.
- [Rot00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band I: Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 2000.
- [Rup02] Ruppert, H.: CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 2002.
- [Sar08] Sarshar, K.: Domänenspezifische Methodenkonstruktion. Konzeption einer Metamethode zur Konstruktion von Methoden der Prozessmodellierung. Berlin: Logos, 2008.
- [Sch et al. 10] Schmidt, P.; Herrmann, J.; Kelle, U.: Introduction. In: Quality & Quantity, Springer, 2010; S. 1–6.
- [Sch00] Schilling, M. A.: Toward a General Modular Systems Theory and Its Application to Interfirm Product Modularity. In: The Academy of Management Review, Jahrgang 25, Vol. 2, 2000; S. 312–334.
- [Sch99] Schneeweiss, W. G.: Die Fehlerbaum-Methode: Aus dem Themenkreis Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Hagen: LiLoLe, 1999.
- [ScSc02] Schlottmann, D.; Schnegas, H.: Auslegung von Konstruktionselementen. Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Berlin: Springer, 2002.
- [Sei82] Seiffert, H.: Information über die Information. München: C. H. Beck, 1982.
- [Ses04] Sesma Vitrián, E.: Beitrag zur Ermittlung von Kosten und Nutzen der präventiven Qualitätsmethoden QFD und FMEA. Berlin: Technische Universität, 2004.
- [Sho84] Shooman, M.: Software Reliability: A historical Perspective. In: IEEE Transactions on Reliability, Jahrgang 33, Vol. 1, 1984; S. 48–55.
- [SmRe91] Smith, P. G.; Reinertsen, D. G.: Developing Products in half the Time. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [SN29500] Siemens AG, CT SR Corporate Standardization & Regulation: SN 29500 – Ausfallraten Bauelemente. München, Erlangen: Siemens AG, 2005.

-
- [Sos et al. 03] Sosa, M. E.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. M.: Identifying Modular and Integrative Systems and their Impact on Design Team Interactions. In: Transactions of the ASME, Vol. 125, 2003; S. 240–252.
- [Sta73] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer, 1973.
- [Ste et al. 92] Steckler, A.; McLeroy, K. R.; Goodman, R. M.; Bird, S. T.; McCormick, L.: Toward Integrating Qualitative and Quantitative Methods: An Introduction. In: Health Education & Behavior, Jahrgang 19, Vol. 1, 1992; S. 1–8.
- [Ste81] Steward, D. v.: The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Jahrgang 28, Vol. 3, 1981; S. 71–74.
- [Sto06] Stock, W.: Information Retrieval: Informationen suchen und finden: Oldenbourg, 2006.
- [Str96] Strobel, H.: Präventive Zuverlässigkeitsanalyse von mechanischen Systemen im Frühstadium von Entwicklung und Konstruktion. Dissertation. Hamburg, 1996.
- [TaTe98] Tashakkori, A.; Teddlie, C.: Mixed Methodology. Combining qualitative and quantitative Approaches. Thousand Oaks: SAGE Publications, 1998.
- [VDA3-1] Verband der Automobilindustrie e.V.: VDA 3-1 – Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten – Zuverlässigkeitsmanagement. Frankfurt am Main, 2000.
- [VDA4-2] Verband der Automobilindustrie e.V.: VDA 4-2 – Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz – System FMEA. Frankfurt am Main, 1996.
- [VDI2206] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth-Verlag, 2004.
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 1993.
- [VDI2222] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2222, Blatt 1 – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth-Verlag, 1997.
- [VDI4001] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4001, Blatt 2 – Terminologie der Zuverlässigkeit. Berlin: Beuth-Verlag, 2006.
- [VDI4003] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4003 – Zuverlässigkeitsmanagement. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.

- [VDI4008a] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI, Vol. 4008, 2 – Boolesches Modell. Berlin: Beuth-Verlag, 1998.
- [VDI4008b] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI, Vol. 4008, 7 – Strukturfunktion und ihre Anwendung. Berlin: Beuth-Verlag, 1986.
- [Vei99] Veil, A.: Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß. Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 1999.
- [Ves81] Vesely, W.E. (Hrsg.): Fault Tree Handbook. Washington: United States Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [VoBu04] Voß, W.; Buttler, G. (Hrsg.): Taschenbuch der Statistik. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004.
- [Wed11] Wedel, M.: Bewertung der Zuverlässigkeit von Automatisierungssystemen in frühen Entwicklungsphasen. Aachen: Shaker, 2011.
- [Wei51] Weibull, W.: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. In: ASME, Journal of Applied Mechanics, Jahrgang 18, Vol. 3, 1951; S. 293–297.
- [Wel90] Wellman, M. P.: Fundamental Concepts of Qualitative Probabilistic Networks. In: Artificial Intelligence, Jahrgang 44, Vol. 3, 1990; S. 257–303.
- [Wit02] Wittig, F.: Maschinelles Lernen Bayes'scher Netze für benutzeradaptive Systeme. Dissertation, Universität Saarbrücken, 2002.
- [Wul02] Wulf, J. E.: Elementarmethoden zur Lösungssuche. München: Dr. Hut, 2002.
- [YaEl03] Yang, K.; El-Haik, B.: Design for Six Sigma. A Roadmap for Product Development. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [Yan07] Yang, G.: Life cycle Reliability Engineering. Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [Zad65] Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. In: Information and Control, Jahrgang 8, Vol. 3, June 1965; S. 338–353.
- [Zim95] Zimmermann, V.: Quality Function Deployment (QFD) im Entwicklungsprozeß – Konzepte, Modelle, Methoden und Hilfsmittel. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 1995.

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
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: 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 Radialwellendichtungen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elasto-hydrodynamischen 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-Wellendichtungen
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 Mehrkoordinaten-tasters
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 Wälzlagereinheiten 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. Nauthheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnradern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung 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 Außenzahnradpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnradpumpen 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 Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zellmann	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 Wälzfräserherstellung 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 Außenzahnradpumpen 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 Loseilgeräusche 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. Haier	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 Getriebebelastkollektive 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 Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenbauer	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-Wellendichting, Gegenauflfläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Loseilen 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 Spirallrille - 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 Dichtungsgegenauflflächen

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 Gegenläufigen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell 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. Klaiber	Betriebs- und Benetzungseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle