

Karsten Pickard

**Erweiterte qualitative
Zuverlässigkeitsanalyse mit
Ausfallprognose von Systemen**

D 93
ISBN 3-936100-31-4

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

Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen

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. Karsten Pickard
geboren in Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h.
Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Tag der Einreichung: 16. April 2008
Tag der mündlichen Prüfung: 05. Mai 2009

Institut für Maschinenelemente

2009

Diese Arbeit ist meinen Eltern gewidmet
und
zur Erinnerung und zum Gedenken an meinen Bruder Dirk
* 21. August 1971 bis † 11. Oktober 1994

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Möglichkeit und die Förderung dieser Arbeit, für die vielen wertvollen Anregungen und Ratschläge sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper, Leiter des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm, stellvertretender Direktor des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

An dieser Stelle bedanke ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Maschinenelemente für ihre Unterstützung, ihre Kollegialität und die vielen gemeinsamen Aktivitäten. Ein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Alicia Schauz, Frau Dipl.-Ing. (FH) Andrea Dieter und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller für die interessanten Diskussionen und ihre Hilfsbereitschaft, die damit zum Gelingen dieser Arbeit mit beigetragen haben.

Stuttgart, im Juni 2009

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.2	Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise.....	3
2	Stand der Forschung und Technik	5
2.1	Methoden der Entscheidungsfindung	6
2.1.1	Grundlagen zu Methoden der Entscheidungsfindung.....	6
2.1.2	Methoden zum Konzeptvergleich und zur Bewertung	7
2.2	Qualitative Zuverlässigkeitsanalysen.....	13
2.2.1	FMEA.....	13
2.2.2	FTA	16
2.3	Quantitative Zuverlässigkeitsanalysen.....	16
2.3.1	Begriffe und Definitionen	16
2.3.2	Statistische Verteilungen.....	20
2.3.3	Systemberechnungen	22
3	Allgemeiner Lösungsansatz.....	25
3.1	Grundlagen zur Methodenauswahl	26
3.2	Methodischer Lösungsansatz	29
4	Qualitativer Konzeptvergleich und –bewertung.....	33
4.1	Systemfestlegung	34
4.1.1	Systembenennung	35
4.1.2	Definition der Systemfunktionen	35
4.1.3	Beschreibung der Systemfehlfunktionen	35
4.2	Konzeptfestlegung	36
4.2.1	Benennung der Konzepte	36
4.2.2	Definition der Konzeptfunktionen	36
4.2.3	Beschreibung der Konzeptfehlfunktionen	37
4.3	Bewertung	37
4.3.1	Systemspezifische Bewertung.....	38
4.3.2	Konzeptspezifische Bewertung.....	40
4.4	Ergebnisanalyse	43
4.4.1	Kennzahlengestützte Ergebnisanalyse	46
4.4.2	Grafische Ergebnisanalyse.....	47
4.5	Verifikation der Methode.....	50

4.6	Fazit.....	51
5	Koppelung zur FMEA im Produktentwicklungsprozess	52
5.1	Vorgehensweise	52
5.2	Verifikation der Methode.....	55
5.3	Fazit.....	56
6	Verteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen	57
6.1	Ermittlung der Verteilungsparameter.....	59
6.1.1	Ermittlung des Formparameters b	60
6.1.2	Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T	63
6.2	Verifikation der Methode.....	65
6.2.1	Sudden Death Testing	65
6.2.2	Verifikation mit Sudden Death Testing	68
6.3	Fazit.....	70
7	Integration der Mehrfachfehlerbetrachtung	71
7.1	Grundlagen	72
7.2	Ermittlung der Bewertung für Auftreten und Entdeckung.....	74
7.3	Verifikation der Methode.....	79
7.4	Fazit.....	79
8	Beispielhafte Anwendung.....	80
8.1	Grundlagen Beispielsysteme.....	80
8.2	Konzeptvergleich und –bewertung	84
8.2.1	Systemfestlegung	85
8.2.2	Konzeptfestlegung.....	86
8.2.3	Bewertung	89
8.2.4	Ergebnisanalyse.....	93
8.3	FMEA.....	94
8.4	Verteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen	100
8.4.1	Ermittlung der Verteilungsparameter.....	100
8.4.2	Ermittlung der Lebensdauerverteilungen für Bauteil und System....	103
8.5	Mehrfachfehlerbetrachtung	105
8.6	Fazit.....	107
9	Zusammenfassung und Ausblick	108

Bezeichnungen und Formelzeichen

$\lambda(t)$	Ausfallrate
-	Bewertungssymbol im Rangfolgeverfahren
0	Bewertungssymbol im Rangfolgeverfahren
+	Bewertungssymbol im Rangfolgeverfahren
- m	Untere Intervallgrenze der Bedeutungsprofile
+ m	Obere Intervallgrenze der Bedeutungsprofile
&	UND-Verknüpfung
$\geq I$	ODER-Verknüpfung
A	Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache in der FMEA
b	Formparameter
$b_{(2)}$	Formparameter der zweiparametrischen Weibullverteilung
$b_{(3)}$	Formparameter der dreiparametrischen Weibullverteilung
B	Bedeutung der Fehlerfolge in der FMEA
B_i	Bewertungskriterium des Rangfolgeverfahrens
B_x	Ausfallwahrscheinlichkeit von $x\%$ zum angegebenen Zeitpunkt
B_{10}	Ausfallwahrscheinlichkeit von 10% zum angegebenen Zeitpunkt
$C.I.$	Konsistenz-Index
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache in der FMEA
$E_{Ges,j}$	Gesamtentwicklungsfähigkeit des j -ten Konzepts
$E_{Ges,norm,j}$	Normierte Gesamtentwicklungsfähigkeit des j -ten Konzepts
$E_{i,j}$	Entwicklungsfähigkeit der i -ten Anforderung des j -ten Konzepts
EM	Entdeckungsmaßnahme in der FMEA
$f(t)$	Dichtefunktion
$f^*(t)$	empirische Dichtefunktion
f_A	Verschiebungsfaktor
f_{iB}	Verhältnis zwischen ausfallfreier Zeit und B_{10} -Lebensdauer
$F(t)$	Verteilungsfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit
$F^*(t)$	empirische Ausfallwahrscheinlichkeit
F	Fehler in der FMEA

<i>FF</i>	Fehlerfolge in der FMEA
<i>FU</i>	Fehlerursache in der FMEA
<i>FMEA</i>	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse, engl.: Failure Mode and Effects Analysis
<i>FTA</i>	Fehlerbaumanalyse, engl.: Fault Tree Analysis
g_i	Gewichtungseinheit des Rangfolgeverfahrens
G_i	Gewichtung der i -ten Anforderung
H	Herstellkosten einer Variante in der VDI 2225 Methode
H_0	Vergleichsherstellkosten in der VDI 2225 Methode
i	Laufvariable
i	Übersetzungsverhältnis
j	Rangzahl
j	Laufvariable
k	Teilmenge
k_S	Komplexität des Produkts
$K_{i,j}$	Kosten-Zeit-Faktor der i -ten Anforderung des j -ten Konzepts
$L(t)$	Laufstreckenverteilung bzw. Laufleistungsverteilung
n	Anzahl der Teile; Laufvariable
n_k	Anzahl der Klassen
n_{LW}	Anzahl der Lastwechsel
$n_f(t)$	Anzahl der Ausfälle zum Zeitpunkt t
$N(t)$	Zuwachs
p_i	Einzelbewertung in der VDI 2225 Methode
<i>ppm</i>	parts per million
q	Ausfallquote (Ausfälle bezogen auf Anfangsstand)
$R(t)$	Verteilungsfunktion der Zuverlässigkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit
$R_{Bi}(t)$	Zuverlässigkeit des i -ten Bauteils
$R_S(t)$	Zuverlässigkeit des Systems
$R_{est,i,j}$	abgeschätzte Zuverlässigkeit der i -ten Anforderung des j -ten Konzepts
<i>RPZ</i>	Risikoprioritätszahl
t	statistische Variable
t_0	ausfallfreie Zeit
t_{Bezug}	Bezugszeitpunkt

t_f	Zeitpunkt der Fehlerentstehung
T	charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung
$T_{i,j}$	Technische Umsetzbarkeit der i -ten Anforderung des j -ten Konzepts
VM	Vermeidungsmaßnahme in der FMEA
W_t	technische Wertigkeit in der VDI 2225 Methode
W_w	wirtschaftliche Wertigkeit in der VDI 2225 Methode

Kurzfassung

Heutige Produktentwicklungen sind durch zunehmend kürzere Entwicklungszeiten geprägt, in denen immer komplexer werdende Baugruppen und Systeme serienreif gemacht werden. Verschärfend kommen hier die steigenden Anforderungen und Kundenwünsche nach qualitativ noch hochwertigeren und zuverlässigeren Produkten hinzu. Zur Lösung dieses Zielkonflikts versuchen die Entwickler heute, besonders bei mechatronischen Systemelementen, ihre Produkte bereits während der Entstehung mit Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden bestmöglich abzusichern.

Unter dem Druck von kurzen Entwicklungszeiten und unter Einhaltung von vorgegebenen Kostenbudgets hat sich die Forschung im Bereich der quantitativen Zuverlässigkeit in Form der Testplanung mit dem Ziel einer Reduktion der zu prüfenden Teile beschäftigt. Die dabei eingesetzten Verfahren versuchen, Vorkenntnisse und Erfahrungen mit Vorgängerprodukten für Neuentwicklungen übertragbar zu machen, um damit dann eine Verringerung des Testaufwands bei gleich bleibender bzw. verbesserter Aussagegüte und Zuverlässigkeitsvorgabe zu erreichen. Dabei besteht aber das Problem, dass bereits in der Konzeptphase von Produktentwicklungen die Grundsteine für die spätere Zuverlässigkeit und Qualität dieser Produkte gelegt werden müssen. Obwohl zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussagen über das spätere Ausfallverhalten gemacht werden können, beeinflusst die Wahl des Entwicklungskonzepts dieses ganz entscheidend.

Um den beschriebenen Problemen besser entgegen zu wirken, wird in dieser Arbeit eine für den Produktentwicklungsprozess übergreifende Methode entwickelt, die einen qualitativen Konzeptvergleich erlaubt und eine sichere Konzeptauswahl ermöglicht. Darüber hinaus wird es möglich, die Informationen, die in dieser frühen Entwicklungsphase generiert werden, für das ausgewählte Konzept in eine System-FMEA zu überführen. Basierend auf den Inhalten und Vernetzungen der FMEA - hier auch um die Mehrfachfehlerbetrachtung erweitert - wird eine Lebensdauervorhersage mit Hilfe der Lebensdauerverteilungen und der FMEA-Bewertungen gemacht. Der integrative qualitative Ansatz zur Qualitätsabsicherung und Lebensdauervorhersage unterteilt sich in drei Methodenbausteine:

- den Konzeptvergleich,
- die FMEA mit Einfachfehler- und Mehrfachfehlerbetrachtung und
- die Lebensdauervorhersage.

Abstract

The development processes of today are stamped by shorter and shorter development times, in which more complex products have to be designed. The situation intensifies under consideration of the increasing customers' requirements and demand for qualitatively high-class and reliable products. In this conflict of interests today's designer of mechatronic products tries to fortify his products as good as possible with quality and reliability methods. Especially under consideration of shorter development times and cost budgets, which are already planned before a development begins, research has been conducted in the field of quantitative reliability engineering, i.e. test planning, which deals with the reduction of parts to be tested. These procedures try to consider prior information of former products and make them useful and/or transferable, in order to enable a reduction in the tests by keeping the demands on the same level of confidence and reliability. In the development itself, the problem is that the basis of the later product reliability and quality are already laid in the concept phase. At this point in time no statement in regard to the later failure behaviour or the best possible and developable concept can be made.

In order to counteract the described problems, a product design cycle accompanying concept was developed, that enables a qualitative concept comparison and selection. Furthermore, the information, which is generated in this early design stage for the concept is transferable into a system FMEA. Based on the further adaptations and actualizations of the FMEA throughout the entire subsequent product design cycle, which now also allows a multiple failure consideration, a conservative lifetime prediction with lifetime distributions based on the FMEA assessment values is enabled. The integrative qualitative approach for quality assurance and lifetime predictions is subdivided into three method modules:

- concept comparison,
- FMEA with single and multiple failure consideration and
- lifetime prediction.

1 Einleitung

The problem is that we all make mistakes, but the result of these mistakes varies drastically depending on the environment in which we make them [1].

J. Clarkson

Technische Systeme im Bereich des Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbaus zeichnen sich in der heutigen Zeit durch immer höhere Komplexität, zunehmende Vernetzung von Mechanik, Elektronik, Sensorik und Software sowie steigende Funktionalität der Systemkomponenten aus [2]. Im Gegenzug verschärfen sich das Umfeld (u.a. Wettbewerb, Produktpiraterie) und die Rahmenbedingungen (u.a. Kosten, Zeit, Entwicklungskapazität), unter denen diese Systeme entwickelt und in Betrieb genommen werden. Bild 1.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Rahmenbedingungen, die die Entwicklung von Produkten heute ganz entscheidend beeinflussen.

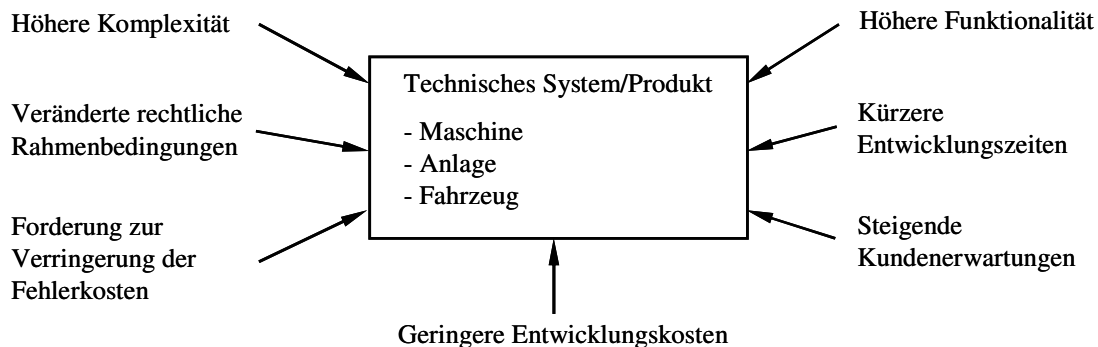


Bild 1.1: Allgemeine Einflüsse auf die Zuverlässigkeit eines technischen Systems

Die Kriterien „Kostendruck“ und „Kundenzufriedenheit“ haben dabei eine besondere Bedeutung für die Hersteller, denn diese Merkmale werden von den Kunden direkt über Preis und Qualität wahrgenommen:

Ist das Produkt teuer? Ist das Produkt zuverlässig bzw. ist das Produkt ein Qualitätsprodukt?

Um diesen sich in Zukunft noch weiter verschärfenden Rahmenbedingungen Rechnung zu tragen, ist es besonders wichtig, Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden, die im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden sollen, kosten- und zeitneutral mit maximalem Nutzen zu integrieren. Damit wird bereits schon in den frühesten Entwicklungsphasen die Zuverlässigkeit berücksichtigt und das entwicklungsfähigste Konzept auch tatsächlich erfolgreich in dem weiteren Entwicklungsprozess verfolgt. Dabei sind besonders auch der Stand der Technik und die Produkthaftung [3], die einen gewissen Einfluss auf die qualitative Zuverlässigkeitsabsicherung haben, zu berücksichtigen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Für die zuverlässigkeits- und qualitätsorientierte Absicherung eines Produkts im Produktentwicklungsprozess ist es von entscheidender Bedeutung, dass diese Absicherung und die Einbeziehung der Ergebnisse in den Entscheidungsprozess für die Freigabe in weitere Entwicklungsstufen berücksichtigt werden. Probleme ergeben sich dabei oft durch die nicht einheitliche und durchgängige Dokumentation der Absicherungsverfahren und in vielen Fällen durch zu viele unterschiedliche Bewertungszahlen und nicht aussagekräftige Daten, die nur von Experten gelesen, beurteilt und verarbeitet werden können.

Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines integrativen Ansatzes zur qualitativen Lebensdauerabsicherung von komplexen Systemen. Der Ansatz setzt bereits in der Konzeptphase bei der Auswahl des entwicklungsfähigsten Konzepts ein und begleitet den weiteren Produktentwicklungsprozess auf der Basis von allen Informationen aus den frühen Entwicklungsprozessphasen. Die Konzeptauswahl geschieht dabei auf Basis einer aussagekräftigen Bewertungszahl. Die dabei gewonnenen Daten werden in eine FMEA übertragen. Mit Hilfe der FMEA wird eine Ausfallwahrscheinlichkeitsprognose unter Berücksichtigung von mathematischen Verteilungen erstellt, um die sich daraus ergebenden Kosten- und Zeiteinsparpotentiale weiter auszuschöpfen. Zum Abschluss wird noch die Eignung dieses methodischen Ansatzes zur Erweiterung der FMEA auf Mehrfachfehlerbetrachtungen untersucht. Dadurch wird den sich verändernden Anforderungen laut Bild 1.1 und der qualitativen Mehrfachfehlerabsicherung Rechnung getragen.

Für den integrativen Methodenansatz zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse besteht die Forderung, dass alle neuen Methodenschritte auf der FMEA aufbauen, da sie die umfassendste und am meist verbreitete Methode zur qualitativen Absicherung ist und eine Vielzahl von Vorteilen aufweist. Die FMEA wird bei der Absicherung von Produkten und Systemen im Bereich des Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbaus als Stand der Technik angesehen und ist in dieser Funktion nicht wegzudenken. Ein wichtiger Grund für obige Forderung besteht auch darin, dass heutige Entwicklungen im Sinne der Produkthaftung nach [4], [5], [6] und [7] dem Stand der Technik entsprechen müssen und im Falle einer Zertifizierung nach DIN ISO 16949, siehe [8], eine qualitative Absicherung mittels FMEA vorgeschrieben ist. Daher wird bei allen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit der Bezug zur FMEA als grundlegende Aufgabe und Anforderung berücksichtigt.

1.2 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich entsprechend Bild 1.2 in neun Kapitel.

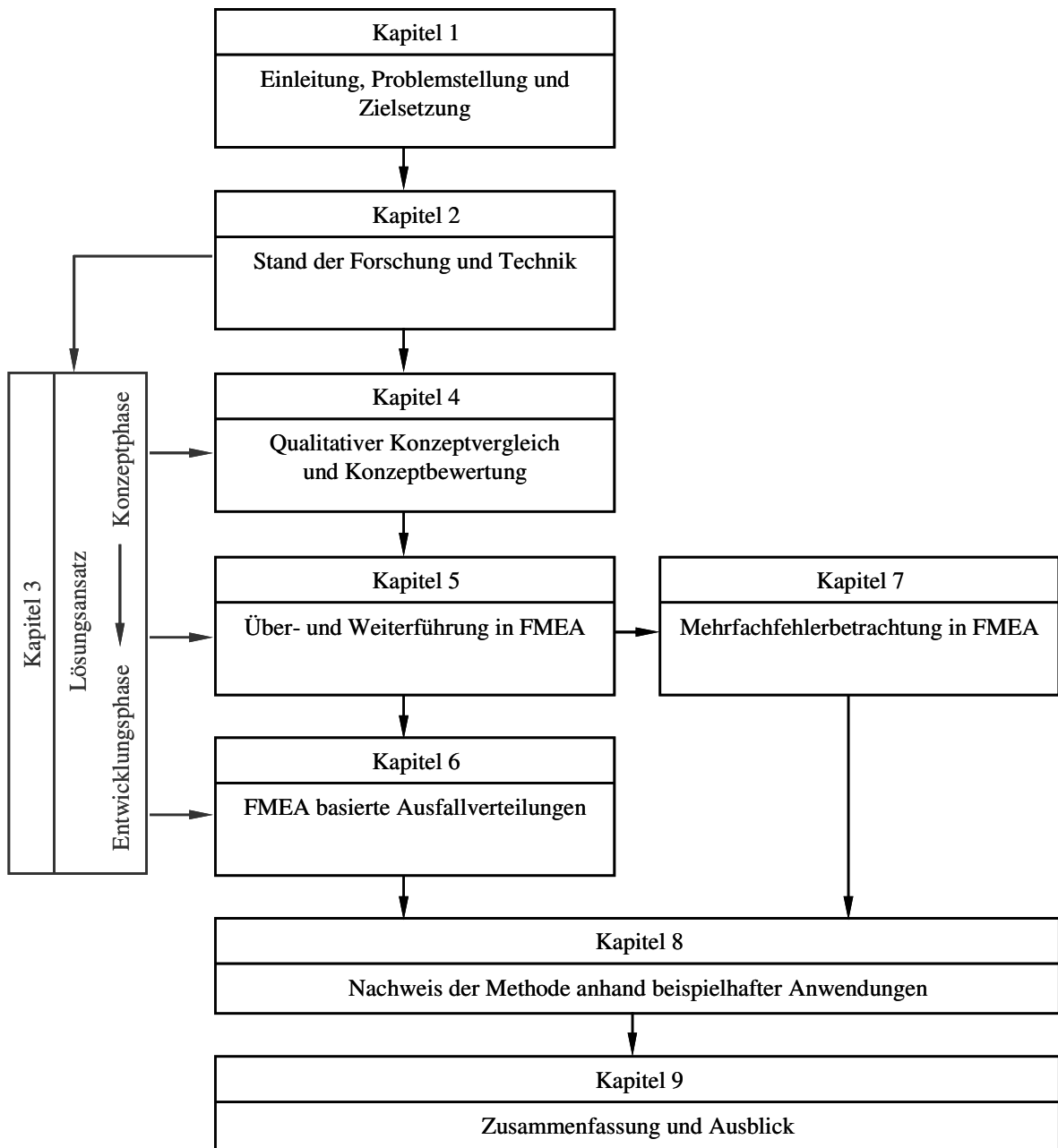


Bild 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Nach der „Einleitung“ in Kapitel 1 mit einer Beschreibung der Problemstellung und Zielsetzung wird in Kapitel 2 „Stand der Forschung und Technik“ ein Überblick über die bisherigen Arbeiten und Erkenntnisse auf dem Gebiet der Konzeptbewertung und –auswahl für die Konzeptphase einer Produktentwicklung gegeben. Die qualitative Zuverlässigkeitsabsicherung über den gesamten Entwicklungsprozess wird ebenso behandelt.

In Kapitel 3 „Lösungsansatz“ wird ein allgemeiner Überblick über den Aufbau des integrativen Methodenansatzes zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen für den gesamten Produktentwicklungszyklus gegeben.

In Kapitel 4 „Qualitativer Konzeptvergleich und -bewertung“ werden die Grundlagen und der Ablauf für die neu entwickelte Vorgehensweise zur Identifizierung der entwicklungsfähigsten Produktidee, unter gezielter Berücksichtigung von Zuverlässigkeitsaspekten in der Konzeptphase, beschrieben.

In Kapitel 5 „Überführung und Weiternutzung“ wird aufgezeigt, wie die Daten und Informationen, die in der Konzeptphase der Produktentwicklung erarbeitet wurden, in weiterführende Methoden, hier speziell in die FMEA, übertragen und genutzt werden.

In Kapitel 6 „FMEA basierte Ausfallverteilungen“ werden die Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen, basierend auf FMEA-Bewertungen, zur frühzeitigen Prognose des Systemausfallverhaltens ermittelt. Es wird detailliert auf die Vorgehensweise und deren Verifikation eingegangen.

In Kapitel 7 „Integration der Mehrfachfehlerbetrachtung“ wird, basierend auf Grundlagenuntersuchungen, den Erfahrungen aus der Praxis und der Notwendigkeit der geänderten Rahmenbedingungen, auf die später detaillierter eingegangen wird, Rechnung getragen, um die bekannte Vorgehensweise der FMEA auch für Mehrfachfehlerbetrachtungen zu ermöglichen bzw. zu nutzen.

In Kapitel 8 „Nachweis“ wird anhand von zwei Beispielen die gesamte integrative Methode zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen durchgeführt.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet das Kapitel 9 mit „Zusammenfassung und Ausblick“.

2 Stand der Forschung und Technik

Einleitend werden die wichtigsten Begriffe und Definitionen aus der qualitativen Zuverlässigkeitstechnik und der quantitativen Wahrscheinlichkeitstheorie zusammengestellt. Diese Grundlagen führen in die Thematik ein und sind später für die Zusammenhänge und das Verständnis der hier vorgelegten Arbeit notwendig.

Zuerst wird in Kapitel 2.1 auf die Grundlagen und Methoden bzw. die methodischen Ansätze zur Entscheidungsfindung in frühen Entwicklungsphasen eingegangen. Dieser methodische Entscheidungsprozess ist im gesamten Produktentwicklungsprozess ein wesentlicher Schritt zur Lösung technischer Aufgaben, denn in dieser Phase werden bereits die Grundlagen für die spätere Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen gelegt. Daneben sollen aber auch Kriterien wie Güte der technischen Lösung, Kosten, Entwicklungskapazitäten, usw. bei der Beschreibung der Grundlagen der verschiedenen Methoden zur Konzeptauswahl mit berücksichtigt werden.

Im Anschluss an diese Beschreibung wird auf die Schwerpunkte der Zuverlässigkeitsmethoden eingegangen. In Bild 2.1 sind diese Schwerpunkte mit ihren Zielsetzungen bezüglich der qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeit für den gesamten Entwicklungsprozess dargestellt.

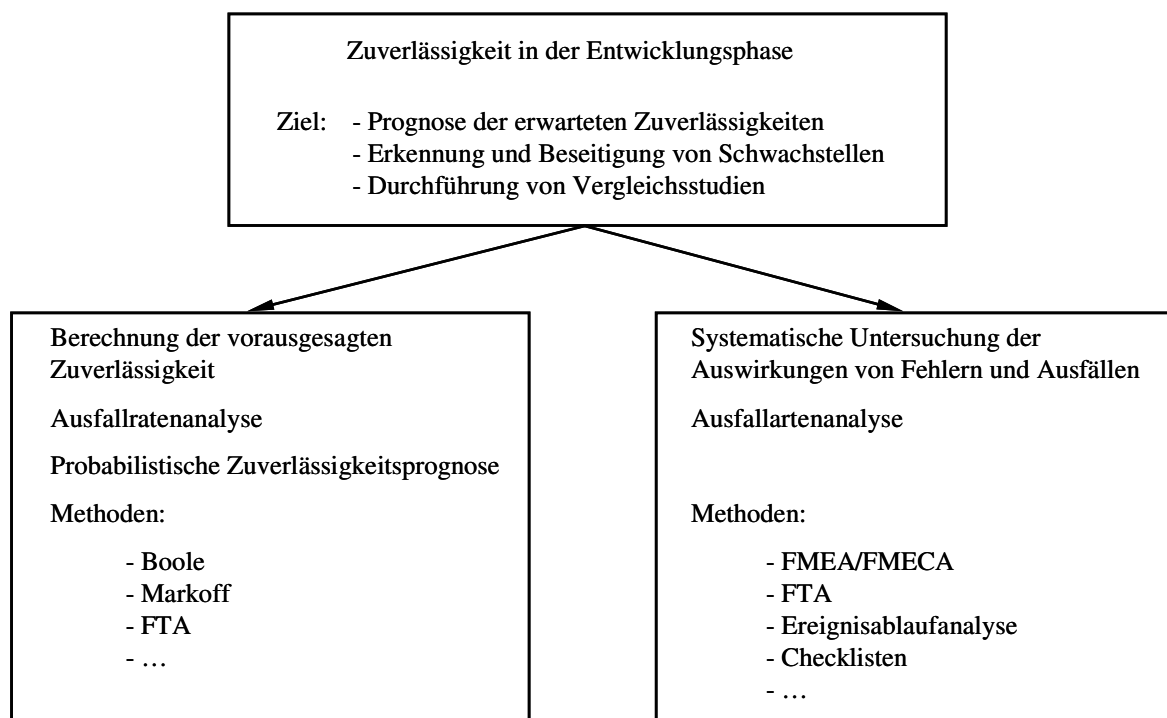


Bild 2.1: Zuverlässigkeitsmethoden im Produktentwicklungsprozess

Im Bereich der qualitativen Zuverlässigkeit wird im nachfolgenden Kapitel 2.2 auf die Methode der FMEA verstärkt eingegangen. Sie bildet im Rahmen dieser Grundlagenbetrachtung den Schwerpunkt. Sie ist die am meisten verbreitete Methode und deckt nach [9], [10] und [11] viele Teilbereiche, Inhalte und Ergebnisse anderer Methoden zur Qualitätssicherung mit ab.

Im Bereich der quantitativen Zuverlässigkeit wird in Kapitel 2.3 auf die Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie eingegangen. Die zuverlässigkeitsspezifischen Begriffe werden detailliert beschrieben.

2.1 Methoden der Entscheidungsfindung

2.1.1 Grundlagen zu Methoden der Entscheidungsfindung

Bei allen Bewertungsverfahren in einem Entscheidungsfindungsprozess in frühen Entwicklungsphasen ist ein gewisser Formalismus oder Ablauf notwendig, damit die Bewertungsansätze und die Ergebnisse nachvollziehbar dokumentiert werden können. Die in der Fachliteratur vorgestellten Bewertungsmethoden lassen sich im Allgemeinen mehr oder weniger in die folgenden grundlegenden Schritte aufteilen [12]:

- Zusammenstellung eines Teams, das die Bewertung durchführt,
- Auswahl und/oder Festlegung der zu bewertenden Lösungen, die auf einem vergleichbaren Aussageniveau sind bzw. dahin gebracht werden müssen,
- Ableitung bzw. Definition der Bewertungskriterien aus den expliziten und impliziten Anforderungen,
- Ermittlung bzw. Festlegung der quantitativ erfassbaren Werte bzw. der qualitativ vergleichbaren Eigenschaften der zu bewertenden Varianten für jedes Beurteilungs- bzw. Bewertungskriterium,
- Bestimmung bzw. Beschreibung von Maßzahlen für die quantitativen Werte bzw. qualitativen Eigenschaften der Varianten entsprechend ihrer Charakteristik für jedes Bewertungskriterium,
- Gewichtung der Bewertungskriterien und Ermittlung bzw. Festschreibung der Gewichtungsfaktoren,
- Berechnung bzw. Ermittlung der Bewertungszahlen und Wertigkeiten für jede Variante aus Gewichtungsfaktoren und Maßzahlen,
- Darstellung aller Bewertungsergebnisse.

In der Literatur [13] und [14] finden sich ähnliche Grundprinzipien von Bewertungsmethoden. Bei einer genaueren Betrachtung stellt man fest, dass die Abläufe und Anforderungen, die in [12], [13] und [14] aufgezeigt werden, viele gemeinsame grundlegende und vergleichbare Elemente, die zu einem Entscheidungsprozess gehören, aufweisen. Für alle diese grundlegenden Methodenschritte gilt, dass die Bewertungen dem subjektiven Einfluss der einzelnen Teammitglieder unterliegen. Die Erfahrung zeigt, dass Teams von 4-6 Mitgliedern optimal sind [2]. Bei einem Team aus weniger als 3 Mitgliedern besteht die Gefahr, dass wichtige Kriterien vergessen oder ungenügend behandelt werden. Bei mehr als 8 Teammitgliedern leidet die Gruppendynamik. Bei unregelmäßiger Teilnahme der einzelnen Teammitglieder sind die Bewertungsqualität und das -ergebnis nicht optimal.

2.1.2 Methoden zum Konzeptvergleich und zur Bewertung

Im Folgenden werden die gängigsten und wichtigsten Bewertungsverfahren kurz beschrieben und nach ihrem Bewertungs- und Erstellungsaufwand aufsteigend sortiert.

2.1.2.1 Rangfolgeverfahren

Im Rangfolgeverfahren wird ein paarweiser Vergleich zwischen den einzelnen Bewertungskriterien durchgeführt. Dabei erstellt man durch ein pauschalisiertes Urteil eine Rangfolge der wichtigsten Kriterien. Diese werden in einer Gewichtungstabelle zusammengefasst. Anschließend wird die Beziehung zweier zu vergleichender Konzepte mit 3 Symbolen gegeneinander beschrieben, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Bewertungskriterien des Rangfolgeverfahrens

Symbol	Erläuterung
+	Bewertungskriterium B_i ist wichtiger als Bewertungskriterium B_{i+1}
0	Bewertungskriterium B_i ist gleich wichtig wie Bewertungskriterium B_{i+1}
-	Bewertungskriterium B_i ist weniger wichtig als Bewertungskriterium B_{i+1}

Bei unklaren Zusammenhängen bzw. wenn keine Entscheidung gefällt werden kann, werden die Felder mit einem „?“ gekennzeichnet, bis eine Klärung erzielt werden kann. Nach Abschluss der Bewertung werden alle „+“ in einer Zeile für ein Bewertungskriterium zusammengezählt und in der Gewichtungstabelle eingetragen. Die Rangfolge, die mit dieser Methode erzielt werden kann, entspricht der Häufigkeit (Addition) der „+“-Symbole. Aus der Rangfolge können nun auch Gewichtungseinheiten abgeleitet werden. Dies erfolgt über die Formel (2.1).

$$g_i = \frac{100\%}{\sum g_{(+)}} \cdot \sum_{i=1}^n (+) \quad (2.1)$$

Diese Gewichtungseinheiten werden mit der Anzahl der „+“ jedes einzelnen Kriteriums multipliziert, um zu dem entsprechenden Gewichtungsfaktor zu gelangen. Bei der Vergabe der Maßzahlen in der späteren Bewertung werden die zugeordneten Maßzahlen, die den Erfüllungsgrad einer Variante oder eines Konzepts bzgl. eines Bewertungskriteriums widerspiegeln, mit dem Gewichtungsfaktor des Bewertungskriteriums multipliziert. So werden die gewichteten Wertigkeiten der einzelnen Varianten ermittelt. Allerdings erlauben diese Wertigkeiten keine absolute Aussage. Diese Methode ist daher nur bei einfachen technischen Systemen anzuwenden und wird zudem nach [15] und [16] auch nur für eine erste Orientierung bzw. Abschätzung herangezogen.

2.1.2.2 Argumentenbilanz

Mit dieser Bewertungsmethode werden Vor- und Nachteile einzelner Varianten gegenübergestellt. Die Vor- und Nachteile werden verbal bzw. schriftlich formuliert. Mit dieser Vorgehensweise werden die Konzepte nicht mit objektiven Bewertungskriterien verglichen und dagegen abgeprüft. Diese Methode verfügt über keine Gewichtungskriterien und eignet sich nicht als Grundlage oder Hilfe bei wichtigen Entscheidungsfindungsprozessen, siehe [17]. Ein Vorteil der Argumentenbilanz ist, dass sie nur einen sehr niedrigen Erstellungs- und Bewertungsaufwand hat.

2.1.2.3 Präferenzmatrix

Die Präferenzmatrix funktioniert ähnlich wie das Rangfolgeverfahren. Das Ergebnis ist wiederum die Ermittlung von Gewichtungsfaktoren bzw. einer Rangfolge von Bewertungskriterien. Jedes Bewertungskriterium wird z.B. mit einem Buchstaben versehen. Bei dem Vergleich zwischen zwei Kriterien wird der Buchstabe des wichtigeren Kriteriums in die Matrix eingetragen. Der Unterschied zum Rangfolgeverfahren besteht darin, dass sich die Aussage „gleich wichtig“ nicht symbolisch darstellen lässt. Es muss ein Kriterium dem anderen vorgezogen werden. Auch diese Methode eignet sich nur für einfache technische Systeme, siehe [18].

2.1.2.4 Bedeutungsprofile

Bedeutungsprofile haben weniger die Aufgabe, eine Entscheidung für ein Konzept, das weiterentwickelt werden soll, zu ermöglichen, sondern vielmehr die Aufgabe, eine grafische Abbildung des subjektiven Empfindens der Kunden gegenüber einem Produkt, das auf den Markt kommen soll, darzustellen. Diese Methode behandelt hauptsächlich die Einschätzung der ganzheitlichen Produktgestaltung. Für jedes einzelne Beurteilungskriterium wird die subjektiv empfundene Erfüllung der Erwartungen als

Punkt aus einer Werteskala in ein zweiachsiges Diagramm eingetragen. Horizontal ist die Werteskala der Bedeutung bzw. Empfindung abgebildet, deren Werte im Intervall von $(-m)$ bis $(+m)$ liegen. Vertikal werden die verschiedenen Bewertungskriterien abgebildet. Die einzelnen Punkte, die für eine Variante bzw. ein Konzept für jedes einzelne Bewertungskriterium vergeben werden, werden miteinander verbunden. Der resultierende Linienverlauf ist das so genannte „Bedeutungsprofil“. Mit diesem Profil kann man anhand der Lage und Größe der „Gebirgsgipfel“ die Erfüllung bzw. die Nichterfüllung der Bewertungskriterien sowie die Ausgewogenheit einer Variante erkennen, siehe Bild 2.2.

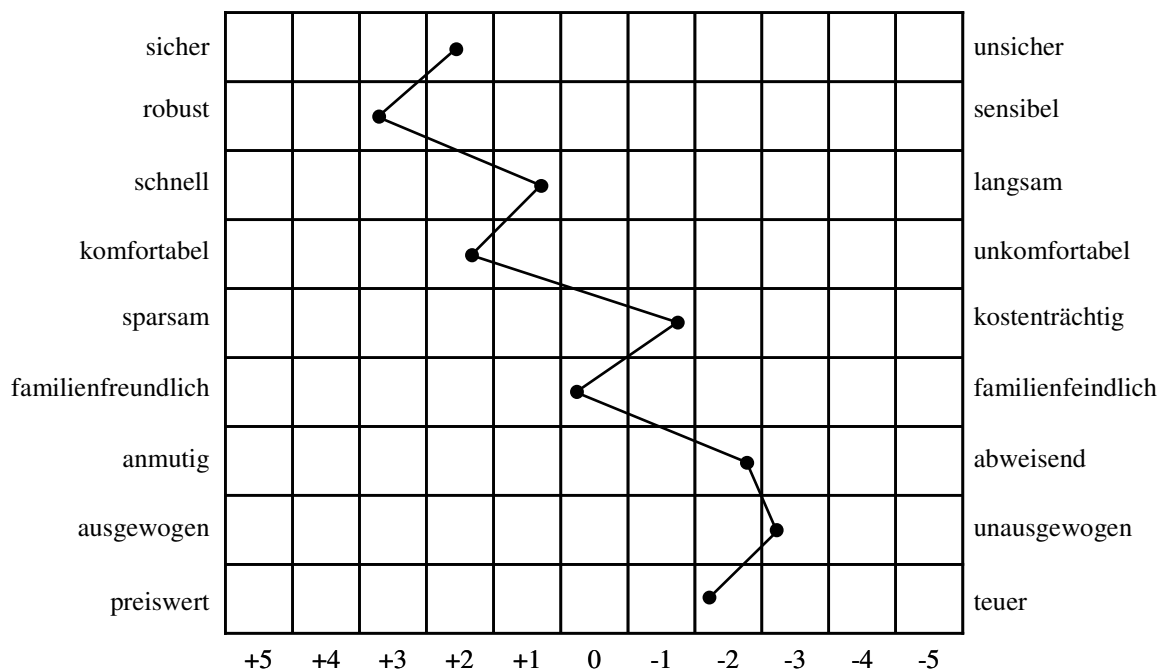


Bild 2.2: Bedeutungsprofil

Da diese Methode sich hauptsächlich mit den subjektiven bzw. persönlichen Urteilen von Kunden befasst, ist sie als Basis für eine objektive Auswahl zwischen mehreren Varianten im Produktentstehungsprozess nur eingeschränkt brauchbar. Die Methode eignet sich besonders für die Einschätzung von „Marktchancen“ bei einer Akzeptanzbewertung, wenn dieses Kriterium als entscheidungsrelevant angesehen wird, siehe [15]. Dort wird diese Methode auch überwiegend eingesetzt.

2.1.2.5 Technisch-wirtschaftliche Bewertung (VDI 2225)

Diese Bewertungsmethode ist sehr bekannt. Sie wurde bereits 1942 von F. Kesselring vorgestellt und wird heute unter der Richtlinie VDI 2225 verstanden. Diese Methode unterteilt die Bewertungskriterien in technische und wirtschaftliche Kriterien, siehe [13], [14], [19] und [20]. Durch diese Trennung ergeben sich für jede Produktvariante ganz spezielle, diesen beiden Kategorien zugeordnete Wertigkeiten. Ziel dieser Me-

thode ist es, den idealen Mittelweg aus hoher technischer und kostengünstiger Wertigkeit für das jeweilige Konzept zu identifizieren. Damit können die beiden besonders wichtigen Kenngrößen „Funktionaler Inhalt“ und „Produktkosten“ bei der Findung einer entwicklungsfähigen Lösung in den Entscheidungsprozess mit einbezogen und berücksichtigt werden. Die hierfür notwendigen Bewertungskriterien werden aus den Mindestanforderungen und Wünschen sowie aus allgemeinen technischen Eigenschaften anhand einer Liste abgeleitet. Diese Bewertungsmethode versucht, in einem ersten Schritt ohne eine Gewichtung der Kriterien auszukommen und damit die Bewertungskriterien unverändert mit einzubeziehen. Die Bewertungen können in einem weiteren Schritt, wenn es erforderlich ist, auch gewichtet werden. Das ist allerdings mit erheblichem Zusatzaufwand für die Bewertung verbunden. Bei dieser Methode gibt es keine Zusammenstellung der Eigenschaftsgrößen bzw. keine nähere Beschreibung der Bedingungen zur Erfüllung der einzelnen Kriterien. Die Bewertungsskala geht von 0 bis 4 Punkte. Bei der Ermittlung der Wertigkeit werden die beiden Betrachtungsschwerpunkte dieser Analyse, der technische und der wirtschaftliche Aspekt, getrennt voneinander berechnet.

Bei der Berechnung der technischen Wertigkeit ist es wichtig, dass diese auf einen bestimmten Idealwert, und zwar den der Ideallösung, bezogen wird. Die Punkte werden entsprechend ihrer Erfüllung dieser Ideallösung vergeben. Ohne eine Gewichtung berechnet sich die technische Wertigkeit aus der Gleichung (2.2).

$$W_t = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n \cdot p_{\max}} = \frac{1}{n \cdot p_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^n p_i \quad (2.2)$$

Die wirtschaftliche Wertigkeit wird anders berechnet. Sie wird nicht auf eine Ideallösung bezogen, sondern auf Vergleichsherstellkosten H_0 , die sich aus den Material- und den Fertigungskosten zusammensetzen. In der Regel stellt sie eine aufgrund einer Marktanalyse vertretbare und mit der Firmenstrategie vereinbarte und abgestimmte Größe dar. Die wirtschaftliche Wertigkeit wird für jede Variante nur ein einziges Mal ermittelt und muss deshalb nicht gewichtet werden. Sie errechnet sich nach der Gleichung (2.3):

$$W_w = \frac{H_0}{H} \quad (2.3)$$

Die Variable H steht dabei für die geschätzten Herstellkosten der untersuchten Variante. Um Herstellkosten überhaupt abschätzen zu können, müssen die weiter zu verfolgenden bzw. zur Auswahl stehenden Lösungsvarianten zunächst einmal grundsätzlich erfasst werden. Das ist meistens erst in der Entwurfsphase des Produktentstehungsprozesses möglich.

Die Ergebnisse werden in einem zweidimensionalen Diagramm, dem so genannten „Stärke-Diagramm“ veranschaulicht, siehe Bild 2.3.

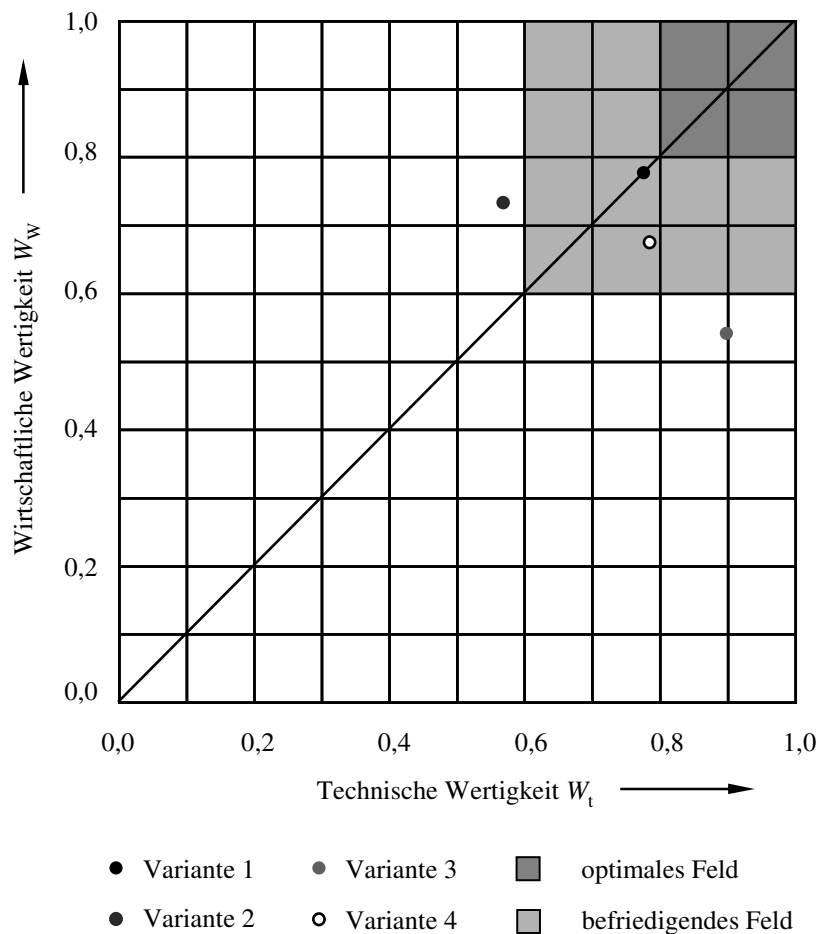


Bild 2.3: Stärke-Diagramm der Methode zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach [13]

2.1.2.6 Kosten-Wirksamkeit- und Kosten-Nutzen-Analyse

Bei der Kosten-Wirksamkeit-Analyse [21] wird aus wirtschaftlich orientierter Sicht die am besten geeignete Lösungsvariante ausgewählt, d.h. das Konzept mit den geringsten Kosten pro Wirksamkeitspunkt, entsprechend folgender Formel (2.4):

$$\text{Kosten pro Wirksamkeitspunkt} = \frac{\text{Gesamtkosten}}{\text{Wirksamkeitskennzahl}} \quad (2.4)$$

Die Wirksamkeitskennzahl, im Nenner der Gleichung, entspricht der Gesamtwertigkeit aller Einzelkriterien und die Gesamtkosten, im Zähler der Gleichung, entsprechen den ermittelten Kosten für die Erfüllung der vorgegebenen wirtschaftlichen Kriterien.

Die Kosten-Nutzen-Analyse [21] bewertet direkte und indirekte Kosten. Zu den direkten Kosten gehören diejenigen, die von der Planung über den gesamten Lebenslauf bis

hin zur Entsorgung eines technischen Systems anfallen. Zu den indirekten Kosten gehören diejenigen, die bei unbeteiligten Dritten entstehen (z.B. Bergschäden, Umwelteinflüsse wie Abgase, Staub, Lärm, Schadstoffe). Der Nutzen, der in dieser Analyse-methode betrachtet wird, wird auch in direkten und in indirekten Nutzen unterteilt. Der direkte Nutzen ist durch den Betrieb technischer Systeme definiert. Der indirekte Nutzen ergibt sich z.B. aus vermehrten Arbeitsplätzen, anderen verbesserten Arbeitsbedingungen oder auch aus Auswirkungen bei Zinssenkungen. Diese Methode wird meistens für Entscheidungen mit politisch großer Tragweite angewendet. Die Ergebnisse werden immer in Form von Geldgrößen angegeben.

2.1.2.7 Vorranganalyse

In der Vorranganalyse wird versucht, die Subjektivität einer Bewertung zu eliminieren. Dazu werden die Ergebnisse, die sich aus einem paarweisen Vergleich zweier Varianten ergeben, bzgl. ihrer Konsistenz (keine Widersprüchlichkeit der Bewertungskriterien) mittels eines mathematisch ermittelten Konsistenz-Indexes C.I. geprüft. Dieser Index, 1980 vorgestellt von T. L. Saaty [22], ist ein Maß dafür, ob die aus der Matrix ermittelten Bewertungszahlen zu einer Entscheidung herangezogen werden dürfen oder nicht. Der Nutzen dieser Methode liegt vor allem in den frei abgeschätzten Maßzahlen, die anhand eines Pauschalurteils vergeben werden. Der Index C.I. berechnet sich über den maximalen Eigenwert der Matrix und der Anzahl der paarweise verglichenen Varianten. Für eine absolut konsistente Matrix wird der Konsistenz-Index $C.I. = 0$. Die Matrix eines untersuchten Produktkonzepts kann auch dann noch zur Entscheidungsfindung herangezogen werden, wenn das Konsistenzverhältnis $\leq 0,1$ beträgt, siehe [13], [22].

2.1.2.8 Weitere Methoden zum Konzeptvergleich und zur Entscheidungsfindung

Die objektivierte gewichtete Bewertung nach [23] und [24] arbeitet mit dem Begriff der Zugehörigkeit und Werten zwischen 0 und 1. Diese Methode bedarf einer sehr hohen Einarbeitungs- und Ausarbeitungszeit. Die Darstellung der Ergebnisse ist für eine schnelle Entscheidung ungeeignet.

Eine weitere Methode ist die anforderungsorientierte gewichtete Bewertung nach [25]. Sie lehnt sich sehr stark an die zuvor allgemein beschriebenen Schritte einer Vorgehensweise nach Kapitel 2.1.1 an. Mit dieser Methode ist eine Gewichtung der einzelnen Bewertungskategorien, eine Berechnung einer Gesamtbewertung sowie eine geeignete Ergebnisdarstellung möglich.

Die Nutzwertanalyse ist eine weitere Methode zur Konzeptauswahl, auf die wegen ihres sehr hohen Zeitaufwands hier nicht näher eingegangen werden soll. Es wird auf die sehr detaillierte Beschreibung dieser Methode in [13] und [26] verwiesen.

Alle Methoden zur Konzeptfindung im Entwicklungsprozess, die in diesem Kapitel kurz behandelt werden, sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Methodenübersicht zur Entscheidungsfindung

Methode	Kurzbeschreibung	Aufwand
Rangfolgeverfahren	Ermittlung von Wertigkeit durch Wichtigkeit der Kriterien	sehr gering
Argumentenbilanz	Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen	gering
Präferenzmatrix	Vergleichende Gegenüberstellung entsprechend der Präferenzen	gering
Bedeutungsprofile	Bewertung aufgrund geschätzter Erkennungsinhalte	mittel
Technisch-wirtschaftliche Bewertung	Getrennte Betrachtung technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit und Stärkediagramm	mittel bis hoch
Kosten-Wirksamkeit- und Kosten-Nutzen-Analyse	Bewertung wirtschaftlicher Belange und Wechselwirkungen einzelner Konzepte auf Gesamtlage	mittel bis hoch
Vorranganalyse	Ermittlung von Präferenzen auf Basis eines paarweisen Vergleichs	sehr hoch
Objektivierte gewichtete Bewertung	Bewertung von inkonsistenten Bewertungsgrößen	sehr hoch
Anforderungsorientierte gewichtete Bewertung	Gewichtete Bewertung von konsistenten Bewertungsgrößen	hoch bis sehr hoch
Nutzwertanalyse	Gewichtete Gegenüberstellung von Zielerfüllungen	sehr hoch

2.2 Qualitative Zuverlässigkeitsanalysen

Die qualitativen Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse werden in erster Linie eingesetzt, um Schwachstellen in der Entwicklung zu erkennen und zu beseitigen. Für diese Zwecke haben sich in der Industrie besonders die FMEA (in engl.: Failure Mode and Effects Analysis; Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss- Analyse) und die FTA (in engl.: Fault Tree Analysis; Fehlerbaumanalyse) durchgesetzt. Die FMEA ist dabei die am häufigsten verwendete Methode und insbesondere in der Automobilindustrie ein in den Gesamtentwicklungsprozess integrierter Methodenbaustein, der im Rahmen von Entwicklungsstandards unbedingt eingehalten werden muss. Im Folgenden werden die Grundlagen der FMEA zusammenfassend beschrieben.

2.2.1 FMEA

Die FMEA nach [2] und [27] bis [47] ist eine teamorientierte Methode zur Risikominimierung der Entwicklungs- und Planungsprozesse. Ziel ist die Ermittlung aller möglichen Fehler bzw. möglicher Ausfälle und die Aufdeckung der Ursachen sowie der

möglichen Folgen. Die ermittelten Fehler werden entsprechend ihrem Risiko priorisiert. Für kritische Fehler werden geeignete Abhilfemaßnahmen definiert.

Die FMEA kann in verschiedenen Bereichen (Konstruktion, Produktion) beziehungsweise in verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (Vor-, Serienentwicklung, Produktionsplanung, Produktionsanlauf, Fertigung und Serienbetreuung) eingesetzt werden. Dabei werden die FMEAs in verschiedene Typen eingeteilt:

- System-FMEA,
- System-FMEA Produkt und
- System-FMEA Prozess.

Die System-FMEA untersucht das Zusammenwirken von Teilsystemen in einem übergeordneten Systemverbund bzw. das Zusammenwirken mehrerer Komponenten in einem komplexen System. Sie zielt dabei auf die Identifikation potentieller Schwachstellen ab, die durch das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten, insbesondere an den Schnittstellen von Komponenten und Teilsystemen, entstehen können.

Die System-FMEA Produkt wird in der Regel am Beginn eines Entwicklungsprozesses angewendet. Ihre Aufgabe ist es, das Produkt auf Erfüllung der im Pflichtenheft festgelegten und im weiteren Verlauf der Entwicklung dazukommenden Funktionen hin zu untersuchen. Dabei sind für alle risikobehafteten Teile eines Produktes geeignete Maßnahmen zur Vermeidung und Entdeckung der potentiellen Fehler zu planen. Die System-FMEA Produkt dient zur Analyse aller Bauteilmerkmale, die zur Erfüllung der geforderten Bauteilfunktionen notwendig sind.

Die System-FMEA Prozess wird gezielt im Produktionsplanungsprozess und in der Fertigung angewandt. Dabei wird ein Fehler der System-FMEA Produkt, dessen Ursache im Herstellungsprozess liegt, folgerichtig als Fehler in die System-FMEA Prozess übernommen. Aufgabe der System-FMEA Prozess ist es, den gesamten Herstellungsprozess eines Produktes auf die Eignung zur Herstellung des Produktes hin zu untersuchen. Dabei sind für alle Fehler, die bei der Herstellung des Produktes auftreten können, geeignete Maßnahmen zu deren Vermeidung und Entdeckung zu planen.

Im Folgenden wird auf die detaillierte Vorgehensweise nach VDA 4.2 eingegangen. Der Vorteil dieser Methodik ist eine systematische und den gesamten Produktentwicklungsprozess begleitende Vorgehensweise. Diese unterteilt sich in fünf Arbeitsschritte.

Im 1. Schritt erfolgt die Definition der Systemelemente und der Systemstruktur. Diese dient zur Beschreibung der strukturellen Zusammenhänge des betrachteten Gesamtsystems. Dazu werden alle Systemelemente des Systems in einer hierarchisch angeordneten Baumstruktur, der Systemstruktur, dargestellt.

Im 2. Schritt, der Funktionsanalyse und Funktionsstruktur, werden die Funktionen der einzelnen Systemelemente definiert und logisch (ODER-Verknüpfung) miteinander verknüpft. Das so erstellte Funktionsnetz zeigt die Darstellung der funktionalen Abhängigkeiten und der beteiligten Systemelemente in einer Baumstruktur.

Im 3. Schritt, anschließend an die Funktionsdefinition, wird die Fehleranalyse durchgeführt. Die potentiellen bzw. möglichen Fehlfunktionen der einzelnen Systemelemente werden ermittelt und logisch (ODER-Verknüpfung) miteinander verknüpft; es entsteht eine Fehlfunktionsstruktur. Damit lassen sich dann die Zusammenhänge zwischen Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursachen ebenso wieder in einer Baumstruktur, dem so genannten Fehlernetz, darstellen.

Im 4. Schritt wird die Risikoanalyse in einem Formblatt durchgeführt. Es wird für die definierten möglichen Fehlerursachen unter Berücksichtigung bereits vorhandener Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen eine Risikobewertung durchgeführt. Bewertet werden die Fehlerschwere (*B*), die Auftretenswahrscheinlichkeit (*A*) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (*E*). Der Bewertungskatalog der Bewertungszahlen ist in Tabelle 2.3 und im Anhang A 1 dargestellt.

Tabelle 2.3: Auszug aus dem Bewertungskatalog nach VDA 4.2

	Bedeutung / Fehlerschwere <i>B</i>	Auftretenswahrscheinlichkeit <i>A</i>	Entdeckungswahrscheinlichkeit <i>E</i>
10	Sehr hoch	Sehr hoch 500.000 – 100.000 ppm	Sehr gering 90 %
9			
8	Hoch	Hoch 50.000 – 10.000 ppm	Gering 98 %
7			
6	Mittel	Mittel 5.000 – 1.000 – 500 ppm	Mittel 99,7%
5			
4			
3	Gering	Gering 100 – 50 ppm	Hoch 99,9 %
2			
1	Sehr gering	Sehr gering 1 ppm	Sehr hoch 99,99 %

Durch Multiplikation der drei Bewertungszahlen wird die Risikoprioritätszahl der Fehlerursache (*RPZ*) gebildet.

Der 5. Schritt der FMEA-Vorgehensweise nach VDA 4.2 ist der Arbeitsschritt „Optimierung“. Hierzu werden die *RPZs* aus der Risikobewertung analysiert und für die Fehlerursachen, die in der Risikobewertung als kritisch eingestuft sind, werden weitere Maßnahmen (Vermeidungs- und/oder Entdeckungsmaßnahmen) zur Absenkung des Risikos definiert. Die Absenkung des Risikos ergibt sich durch eine erneute Bewertung der zusätzlich eingeführten Maßnahmen. Die Verbesserung bzw. die erzielte Optimierung des Fehlerverhaltens kann dann anhand der neuen *RPZ* bewertet werden. Verbesserungen lassen sich somit umfassend dokumentieren und die zusätzlich eingeführten Maßnahmen gezielter für weitere Entwicklungsschritte nutzen.

2.2.2 FTA

Die FTA nach [78] bis [83] ist ebenfalls eine teamorientierte Methode zur Ermittlung von Fehlerzusammenhängen und -wechselwirkungen mit UND- und ODER-Verknüpfungen. Sie bietet im Vergleich zur FMEA nicht die Möglichkeit, Maßnahmen zu den ermittelten Fehlern zu definieren. Die Besonderheit der FTA liegt darin, dass sie auch quantitativ genutzt werden kann. Dabei werden die logischen Verknüpfungen (nach Boole) zur Berechnung von z.B. Systemverfügbarkeiten genutzt. In diesem Kapitel soll nicht weiter auf diese Methode eingegangen werden.

2.3 Quantitative Zuverlässigkeitsanalysen

Die quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden werden für die Prognose von Ausfallverhalten bzw. von zu erwartenden Zuverlässigkeitswerten einzelner Komponenten oder Systeme verwendet. Um ein einheitliches Verständnis bzgl. der Begriffe und Definitionen dieser Methoden zu gewährleisten, werden diese zunächst erläutert. Danach werden statistische Verteilungen, und hier ganz speziell die Weibullverteilung, behandelt und die Grundlagen der Systemberechnung zusammengestellt.

2.3.1 Begriffe und Definitionen

Quantitative Aussagen über die Zuverlässigkeit beziehungsweise das Verhalten von Produkten über die Einsatzzeit/Lebensdauer werden mit Hilfe von Methoden der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie gemacht. Die im Folgenden aufgeführten Erläuterungen der Begriffe und Definitionen basieren auf den Angaben in den Standardwerken [48] - [53], beziehungsweise sind weitgehend an diese angelehnt.

2.3.1.1 Histogramm und Dichtefunktion

Das Histogramm der Ausfallhäufigkeiten ist die grafische Darstellung des Ausfallverhaltens von Bauteilen, Baugruppen oder Systemen. Die in Versuchen ermittelten Aus-

fallzeiten werden dabei in Zeitbereiche zusammengefasst und in einem Balkendiagramm dargestellt. Dabei wird die Größe beziehungsweise die Höhe des Balkens durch die Anzahl der Ausfälle, die in diesem Zeitbereich eingetreten sind, bestimmt. Damit ist es möglich, eine prozentuale Angabe bezogen auf die Gesamtmenge der ausgefallenen Versuchsteile zu machen. Aus einem solchen Histogramm kann dann abgelesen werden, wie häufig ein Ausfall zukünftig bei vergleichbarer Anwendung zu einem bestimmten Zeitpunkt auftreten wird, siehe Bild 2.4.

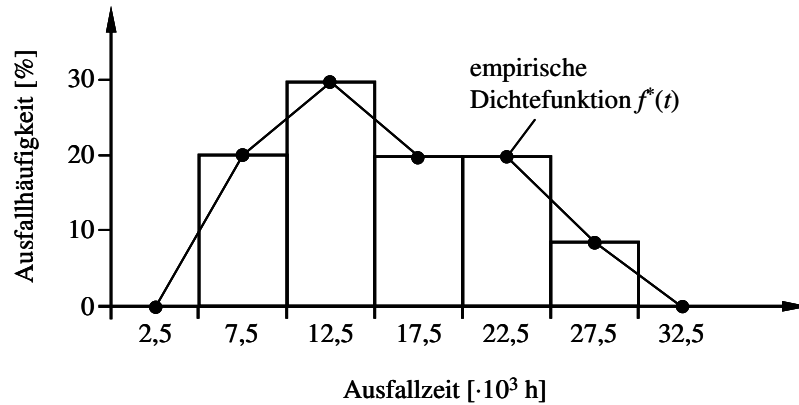


Bild 2.4: Histogramm der Häufigkeiten nach [2]

Werden die Balkenmitten des Histogramms durch Geraden verbunden, so entsteht die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ entsprechend Bild 2.4. Als Anhaltswert zur Bestimmung der Anzahl der Klassen bei n Ausfällen dient die Formel (2.5).

$$n_k \approx \sqrt{n} \quad (2.5)$$

Die eigentliche Dichtefunktion $f(t)$ ergibt sich, wenn der Grenzübergang der Balkenbreite zu null durchgeführt wird; d.h. die Anzahl der Prüfteile wird deutlich erhöht und dadurch die Klassenbreite verringert, siehe Bild 2.5.

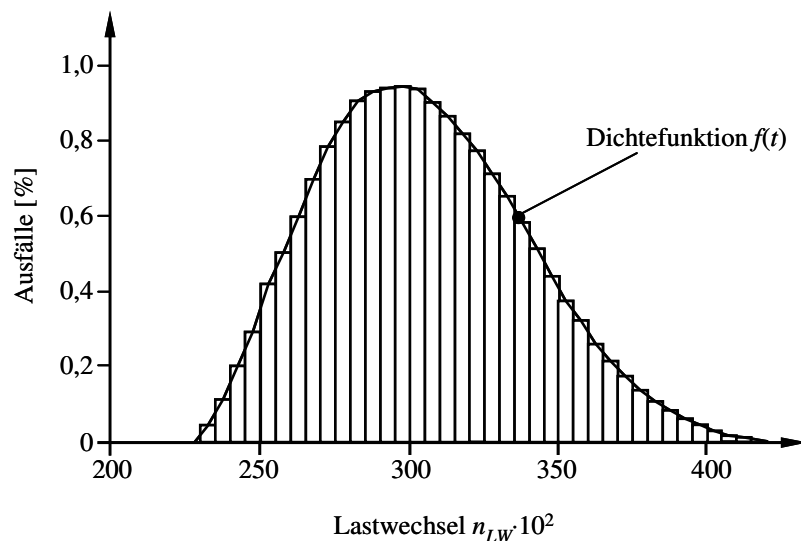


Bild 2.5: Histogramm der Häufigkeiten und Dichtefunktion mit $n = \infty$ nach [2]

2.3.1.2 Verteilungsfunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Verteilungsfunktion gibt an, wie viele Teile bis zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgefallen sind, siehe Bild 2.6. Dabei werden alle Ausfälle aufaddiert, die bis zu diesem Zeitpunkt aufgetreten sind. Die empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$ ergibt sich, wie bei der Dichtefunktion, durch Verbinden der Balkenmitten des Histogramms mit Geraden.

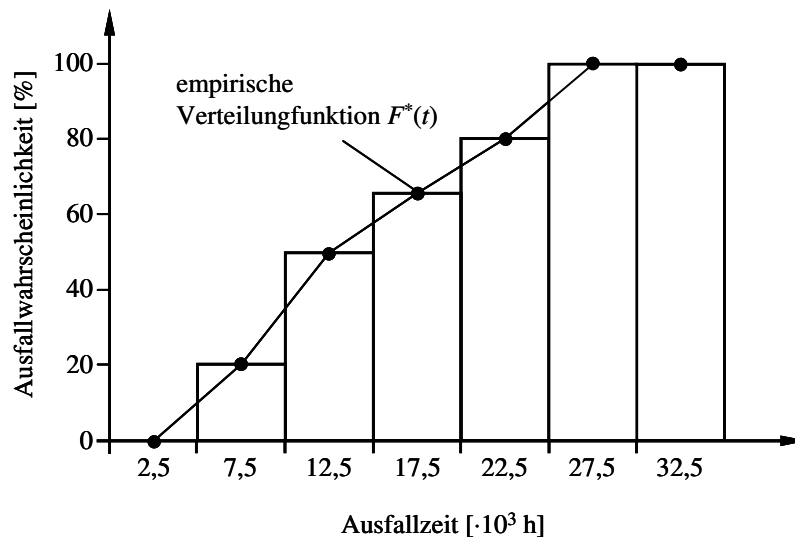


Bild 2.6: Histogramm der Summenhäufigkeit mit empirischer Verteilungsfunktion nach [2]

Unter Berücksichtigung des Grenzübergangs $n \rightarrow \infty$ ergibt sich die Verteilungsfunktion $F(t)$ als Integral der Dichtefunktion $f(t)$, siehe Gleichung (2.6).

$$F(t) = \int f(t)dt \quad (2.6)$$

Die Verteilungsfunktion zeigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ausfalls im Zeitintervall $[0, t]$ an bzw. gibt an, wieviele Teile bis zu einem bestimmten Zeitpunkt, bei bekannter Grundgesamtheit, ausgefallen sind. Die Verteilungsfunktion $F(t)$ wird daher als Ausfallwahrscheinlichkeit bezeichnet. Sie ist streng monoton wachsend und beginnt in der Regel bei Null „es sind noch keine Teile ausgefallen“ und endet bei 100% „alle Teile sind ausgefallen“.

2.3.1.3 Überlebenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit

Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ (engl.: reliability) macht eine Angabe darüber, wie viele Teile bis zu einem Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen sind bzw. überlebt haben, siehe Bild 2.7. Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist also die Differenz der tatsächlichen Ausfallwahrscheinlichkeit zu 100% der Teile, siehe Gleichung (2.7).

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.7)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird in der Zuverlässigkeitstechnik kurz als Zuverlässigkeit bezeichnet. Sie gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Teil die Zeit t (Betrachtungszeitpunkt) ohne Defekt erreicht.

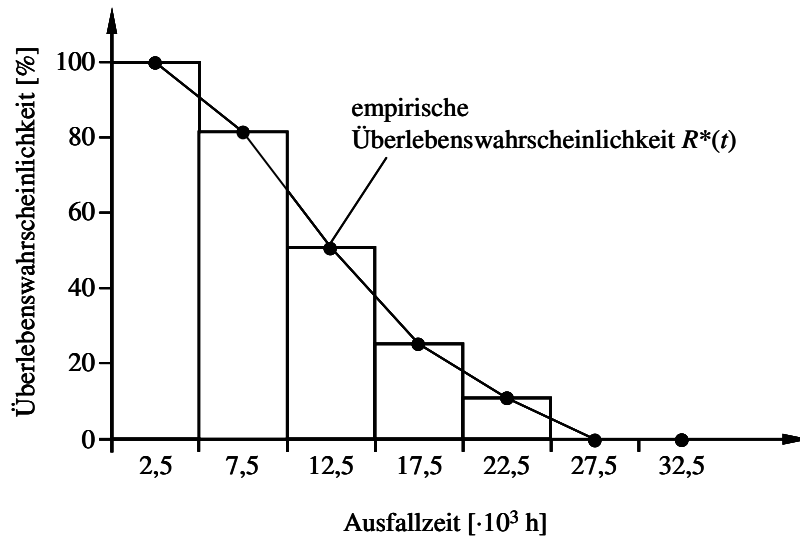


Bild 2.7: Histogramm der Überlebenshäufigkeit mit der empirisch ermittelten Überlebenswahrscheinlichkeit nach [2]

2.3.1.4 Ausfallrate und Ausfallquote

Bei der Ausfallrate $\lambda(t)$ werden die Ausfälle nicht wie bei der Dichtefunktion auf die Anzahl der gesamten Ausfälle bezogen, sondern auf die Summe der noch intakten Teile. Am Ende eines Versuchs sind alle Teile ausgefallen, somit geht die Ausfallrate gegen Unendlich. In Bild 2.8 ist die Beziehung zwischen der Ausfallrate $\lambda(t)$, der Dichtefunktion $f(t)$ und der Zuverlässigkeit $R(t)$ zu erkennen. Die Ausfallrate beschreibt somit das Risiko eines Bauteils auszufallen, wenn es bis zu diesem Bezugszeitpunkt t überlebt hat.

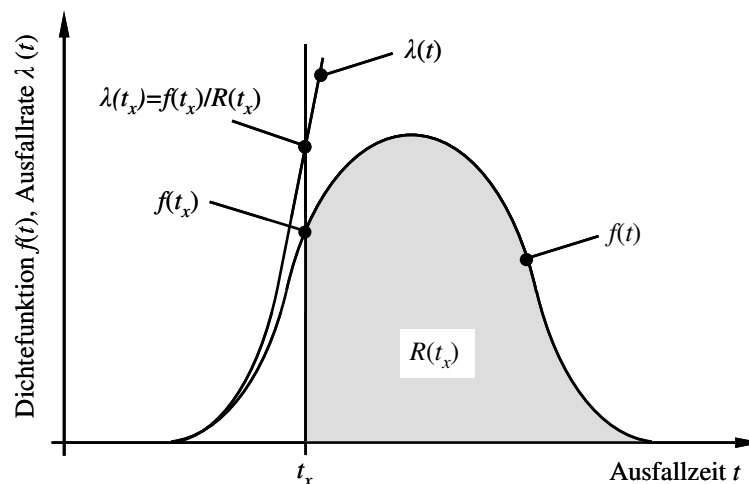


Bild 2.8: Ausfallrate aus der Dichtefunktion und der Zuverlässigkeit nach [2]

Die Ausfallrate ergibt sich aus dem Quotienten der Dichtefunktion und der Zuverlässigkeit entsprechend der folgenden Gleichung (2.8).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.8)$$

Die Ausfallquote q gibt die relative Bestandsänderung in einem Zeitintervall dt an, siehe Gleichung (2.9), d.h. beispielsweise, wieviel Prozent der Teile in einer Stunde ausfallen.

$$q = \frac{\text{Ausfälle im Zeitintervall}}{\text{Anfangsbestand} \cdot \text{Intervallgröße}} \quad (2.9)$$

2.3.2 Statistische Verteilungen

In der quantitativen Zuverlässigkeitstechnik werden Lebensdauerverteilungen zur Beschreibung des Zuverlässigkeitsverhaltens und der Zuverlässigkeitsprognose verwendet, siehe [34], [54] bis [60]. Die bekannteste dieser Lebensdauerverteilungen ist die Normalverteilung, die jedoch in der Zuverlässigkeitstheorie nur sehr selten angewendet wird, denn mit ihr kann im Wesentlichen nur eine Art von Ausfallverhalten beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass die meisten Ausfälle um den Mittelwert auftreten und dann vollkommen symmetrisch zu diesem Mittelwert abnehmen.

Die Exponentialverteilung wird häufig in der Elektrotechnik angewendet, da sie mit ihrer konstanten Ausfallrate geeignet ist, Zufallsausfälle zu beschreiben.

Die im Maschinenbau am häufigsten verwendete Lebensdauerverteilung ist die Weibullverteilung. Mit Hilfe der Weibullverteilung können die unterschiedlichsten Ausfallverhalten sehr gut beschrieben werden. Dabei unterscheidet man Früh-, Zufalls- und Verschleißausfälle. Diese lassen sich dann in Abhängigkeit von dem Formparameter b gut beschreiben.

Für kleine b -Werte ($b < 1$) können Frühausfälle, z.B. Bruch aufgrund von Fertigungsfehlern, beschrieben werden, die zu Beginn eine hohe Ausfallwahrscheinlichkeit haben, die dann aber kontinuierlich über der Zeit abnimmt.

Zufallsausfälle können beschrieben werden, wenn der Formparameter $b = 1$ ist. In diesem Fall ergibt sich exakt eine Exponentialverteilung.

Für große b -Werte ($b > 1$) lassen sich Verschleißausfälle beschreiben. Verschleißausfälle weisen zu Beginn ein geringes Ausfallverhalten auf, das mit zunehmender Lebensdauer ein Maximum erreicht und schließlich wieder flach abfällt.

Die Weibullverteilung lässt sich zudem noch in einer zweiparametrischen und einer dreiparametrischen Verteilung darstellen. Die dreiparametrische Verteilung gibt neben den

beiden Parametern b (= Formparameter) und T (= charakteristische Lebensdauer), wie bei der zweiparametrischen, zusätzlich noch die ausfallfreie Zeit t_0 an. Mit Hilfe der ausfallfreien Zeiten können Ausfallverhalten beschrieben werden, die erst nach einer gewissen Laufleistung bzw. Einsatzzeit auftreten und wichtig für Garantie- und Kulanzkostenabschätzungen sind.

Um die Formparameter der zwei- und dreiparametrischen Weibullverteilung in dieser Arbeit genauer differenzieren zu können, werden an die b -Werte Indizes angehängt, die über die Anzahl der Parameter Auskunft geben, z.B. $b_{(2)}$ für die zweiparametrische Verteilung.

Für die weiteren Betrachtungen erfolgt zunächst eine Beschränkung auf die zweiparametrische Weibullverteilung. Das Lebensdauerverhalten lässt sich für diese mit den Gleichungen (2.10) bis (2.13) beschreiben.

Überlebenswahrscheinlichkeit/Zuverlässigkeit $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}}} \quad (2.10)$$

Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}}} \quad (2.11)$$

Dichtefunktion $f(t)$:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b_{(2)}}{t} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}}} \quad (2.12)$$

Ausfallrate $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b_{(2)}}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}-1} \quad (2.13)$$

Bei $t = T$ ist die Ausfallwahrscheinlichkeit immer 63,2%. Diesen Zusammenhang kann man in Gleichung (2.14) sehen.

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T}\right)^{b_{(2)}}} = 1 - e^{-1^{b_{(2)}}} = 1 - e^{-1} = 1 - 0,368 = 0,632 \quad (2.14)$$

Im Bild 2.9 a bis d sind unterschiedliche Funktionen der Weibullverteilung für verschiedene Formparameter $b_{(2)}$ dargestellt.

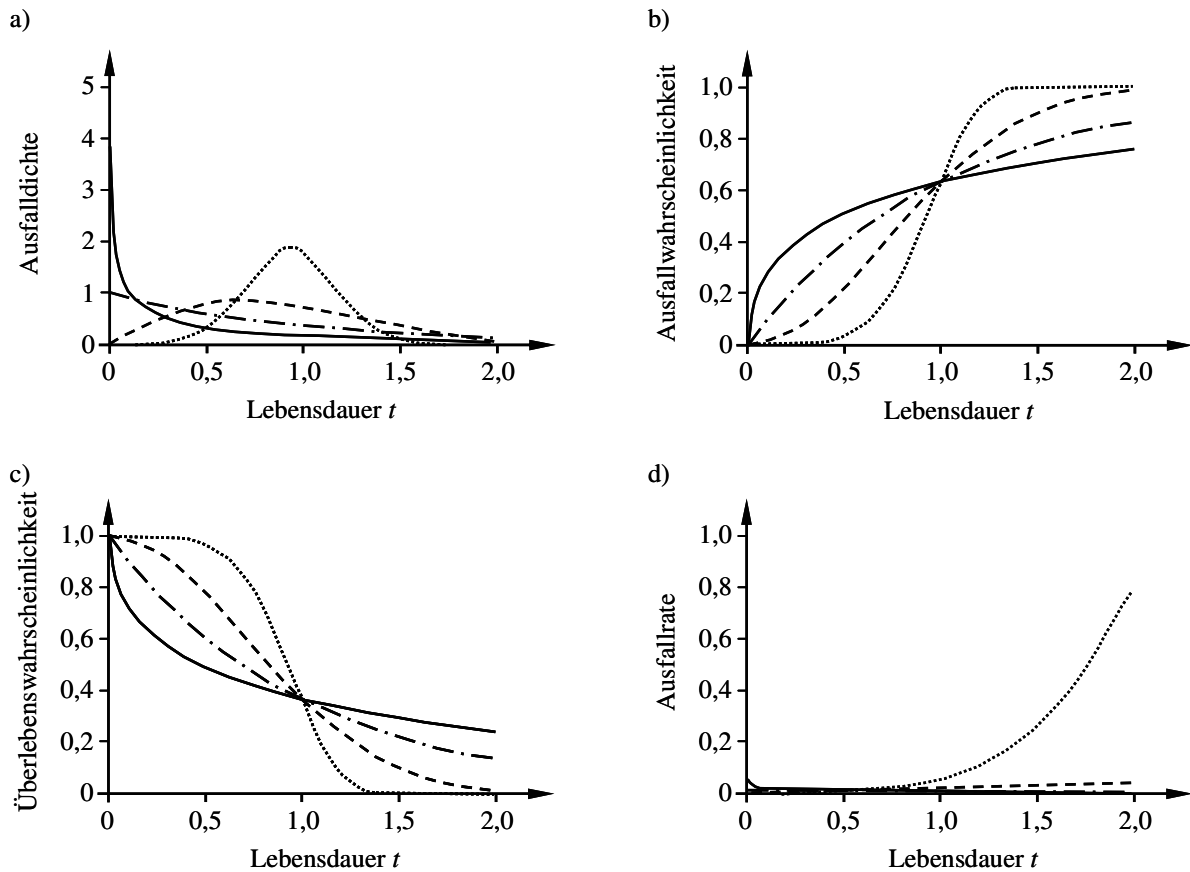


Bild 2.9a – d: Funktionen der Weibullverteilung für unterschiedliche Formparameter nach [2]

Die verwendeten Parameter für die in Bild 2.9 a bis d dargestellten Grafen sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Parameterübersicht der zweiparametrischen Weibullverteilung aus Bild 2.9

Verteilung	Charakteristische Lebensdauer T	Formparameter $b_{(2)}$
Volllinie	1,0	0,5 (Frühausfall)
Strichpunktlinie	1,0	1,0 (Zufallsausfall)
Strichlinie	1,0	2,0 (Verschleißausfall)
Punktlinie	1,0	5,0 (Verschleißausfall)

2.3.3 Systemberechnungen

In einem System weist jede Komponente, jedes Einzelteil bzw. jede Baugruppe ein charakteristisches Ausfallverhalten auf. Das Systemausfallverhalten ergibt sich aus dem Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten bzw. Baugruppen, die das System beinhaltet. Mit Hilfe der Boole'schen Theorie [2] und [55] kann das Systemausfallverhalten ermittelt werden. Dazu müssen aber einige Voraussetzungen erfüllt sein.

In der Boole'schen Theorie wird, wenn sie zur Anwendung kommt, festgelegt, dass das System nicht reparierbar ist. Ferner können die Systemelemente nur die Zustände „intakt“ oder „defekt“ aufweisen und das Ausfallverhalten der einzelnen Elemente hat keinen Einfluss auf die anderen Systemelemente.

Von besonderer Bedeutung für die Berechnung des Systemverhaltens ist das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Funktions- und Fehlerfall. Es gibt dabei grundsätzlich zwei Möglichkeiten, wie die einzelnen Komponenten zusammenwirken können, die „Serienschaltung“ und die „Parallelschaltung“. Beide Schaltungsarten können in einem System auch kombiniert auftreten.

Stellt man funktionale Zusammenhänge der einzelnen Komponenten zueinander im System dar, dann entsteht ein Zuverlässigkeitsschaltbild, das die Auswirkungen des Ausfalls einer Komponente auf das gesamte System zeigt. Nach der Definition in [2] ist ein System auch dann immer noch funktionsfähig, wenn zwischen Eingang und Ausgang eine Verbindung besteht, bei der keine der beteiligten Komponenten defekt ist.

Die Serienschaltung von Komponenten ist in Bild 2.10 dargestellt. Das System ist dann nicht mehr funktionsfähig, wenn eine der Komponenten ausfällt.

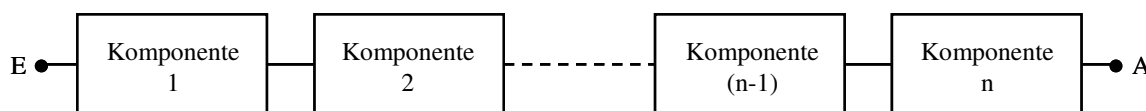


Bild 2.10: Serienschaltung von Komponenten nach [2]

Bei der Serienschaltung oder Serienstruktur lässt sich die Zuverlässigkeit mit der Formel (2.15) berechnen. Die Serienstruktur stellt eine UND-Verknüpfung der Komponenten dar.

$$R_S(t) = R_{B_1}(t) \cdot R_{B_2}(t) \cdot \dots \cdot R_{B_{(n-1)}}(t) \cdot R_{B_n}(t) = \prod_{i=1}^n R_{B_i}(t) \quad (2.15)$$

Die Parallelschaltung von Komponenten ist in Bild 2.11 dargestellt. Das System ist dann nicht mehr funktionsfähig, wenn alle Komponenten ausfallen.

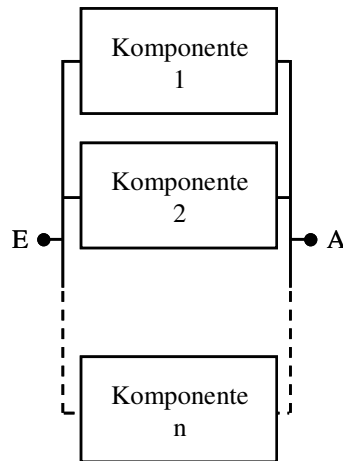


Bild 2.11: Parallelschaltung von Komponenten nach [2]

Die Zuverlässigkeit lässt sich mit der Formel (2.16) berechnen. Die Parallelstruktur stellt eine ODER-Verknüpfung der Komponenten dar.

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_{B_1}(t)) \cdot (1 - R_{B_2}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_{B_n}(t)) = 1 - \prod_{i=1}^n R_{B_i}(t) \quad (2.16)$$

Die in diesem Kapitel dargestellten Grundlagen dienen dem allgemeinem Verständnis und sollen dazu beitragen, die Zusammenhänge, die Begründungen und die Rechenschritte in den nächsten Kapiteln besser verstehen und nachvollziehen zu können.

Im Folgenden werden zunächst der allgemeine Ansatz der integrativen qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse und dann die einzelnen methodischen Arbeitsschritte und die praxisorientierte Vorgehensweise ausführlich beschrieben.

3 Allgemeiner Lösungsansatz

Um der Aufgabe und dem Ziel dieser Arbeit, eine integrative Methode zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse zu entwickeln (vgl. Kap. 1.1 „Problemstellung und Zielsetzung“), systematisch näher zu kommen, werden zunächst die aktuell in den jeweiligen Entwicklungsphasen angewendeten Methoden detailliert untersucht und verglichen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse bewertet. Bei diesen Untersuchungen wird der Fokus besonders auf die Weiterverwendung der Methodeninhalte sowie der gewonnenen Informationen und Abhängigkeiten für die nachfolgenden entwicklungsbegleitenden Betrachtungen gelegt. Dabei ist zu klären, ob die gewonnenen Ergebnisse für weitere Qualitätsabsicherungen und Zuverlässigkeitsabschätzungen tatsächlich nutzbar bzw. übertragbar sind oder ob sie zwingende Anforderungen an den integrativen Methodenansatz nicht erfüllen. Ein weiterer wichtiger Untersuchungsschwerpunkt bei den qualitativen Qualitätsabsicherungsmethoden besteht darin, ob neben der Einfachfehlerbetrachtung auch die Möglichkeit einer Mehrfachfehlerbetrachtung gegeben ist, da diese bei der Entwicklung der heute ständig komplexer werdenden Baugruppen und Systemen zunehmend an Bedeutung gewinnt, zumal der Vernetzungsgrad zwischen Mechanik, Elektronik, Sensorik und Software zunehmend ansteigt.

Für eine grundlegende und systematische Untersuchung der bestehenden Methoden eignet sich der in Tabelle 3.1 erarbeitete Anforderungskatalog. Damit lassen sich die Wirksamkeit und die Aussagefähigkeit der einzelnen Methoden in ihrem jeweiligen Einsatzbereich und -zeitraum überprüfen. Basierend auf diesen Ergebnissen wird die Eignung zur Integration in die geplante Zuverlässigkeitsanalyse über den gesamten Produktentwicklungsprozess geprüft. Wenn bei dieser Prüfung der Methoden, z.B. bei den Methoden der Entscheidungsfindung in der Konzeptphase, keine ausreichende Eignung festgestellt wird, dann wird eine „neue Methode“ entwickelt, die einen deutlich höheren Erfüllungsgrad der Anforderungen aus Tabelle 3.1 aufweist.

Das Vorgehen für die Entwicklung der Methode zur integrativen Zuverlässigkeitsanalyse untergliedert sich damit in die folgenden Arbeitsschritte:

- Untersuchung der bestehenden Methoden,
- Analyse und Bewertung der Ergebnisse,
- Definition einer Methode zur Konzeptauswahl,
- Definition einer Methode zur Qualitätsabsicherung,

- Darstellung der Schnittstellen zwischen diesen beiden Methoden,
- Darstellung der Schnittstelle zur Zuverlässigkeitsprognose mittels Verteilungen,
- Darstellung der Mehrfachfehlerbetrachtung.

3.1 Grundlagen zur Methodenauswahl

Im Folgenden wird auf die Untersuchung der bestehenden Methoden zur Entscheidungsfindung und zur Qualitätsabsicherung näher eingegangen. Diese wird anhand des in Tabelle 3.1 dargestellten Anforderungskatalogs durchgeführt. Dieser Anforderungskatalog orientiert sich besonders an den funktionalen Aspekten und Zusammenhängen von Produkten und Systemen, denn diese sind es, die die wesentlichen Eingangsinformationen in die gängigen Methoden zur Zuverlässigkeitsbetrachtung darstellen. Dieser funktionsorientierte Ansatz kommt der eigentlichen Produktentwicklung sehr entgegen. Dabei werden Produktanforderungen und Produktgestaltung über funktionale Zusammenhänge verknüpft. Durch die Fokussierung auf eine gleiche Bezugsbasis, z.B. eine Funktion, entsprechend dem realen Entwicklungsablauf, wird sichergestellt, dass die Methode, die bei dieser Untersuchung gut abschneidet, auch gut geeignet ist für die Begleitung des Produkts bzw. des Systems im Entwicklungsprozess.

Tabelle 3.1: Anforderungskatalog der Methodenauswahlmatrix

Anforderungen	Methoden zur Konzeptfindung	Methoden zur qualitativen Zuverlässigkeitsabsicherung
Komponentenbeschreibung/-vernetzung	X	X
Funktionsbeschreibung/-vernetzung	X	X
Fehlerbeschreibung/-vernetzung	X	X
Mehrfachfehlerbetrachtung	-	X
Gewichtung/Bewertung	X	X
Technik- und/oder Kostenbetrachtung	X	-
Maßnahmenbeschreibung	-	X
Aufwand für die Durchführung	X	X
Begleitet den Produktentwicklungsprozess	-	X

Für die mit „X“ gekennzeichneten Punkte werden die jeweiligen Methoden gegen diese Anforderungen abgeprüft. Die mit „-“ gekennzeichneten Punkte werden nicht betrachtet.

Bei den Methoden zur Konzeptfindung ist neben den funktionsorientierten Anforderungen auch der wirtschaftliche Aspekt von Bedeutung; dieser ist deswegen im Anforderungskatalog nach Tabelle 3.1 berücksichtigt. Bei einer falschen Konzeptauswahl können im weiteren Entwicklungsprozess zusätzliche Entwicklungs- und Versuchskosten sowie ggf. höhere Produktionskosten entstehen, die das unternehmerische Risiko erhöhen.

Für die Festlegung, mit welchen Methoden in den Lösungsansatz gestartet wird, werden die Auswertungsergebnisse der Überprüfung mit dem Anforderungskatalog in Tabelle 3.2 für die Methoden zur Entscheidungsfindung in der Konzeptphase (vgl. Kapitel 2.1) und in Tabelle 3.3 für die Methoden zur qualitativen Zuverlässigkeitsabsicherung in der Entwicklungsphase dargestellt.

Tabelle 3.2: Auswahlmatrix für Methoden in der Konzeptphase

	Komponentenbeschreibung/-vernetzung	Funktionsbeschreibung/-vernetzung	Fehlerbeschreibung/-vernetzung	Gewichtung/Bewertung	Technik- und/oder Kostenbetrachtung	Aufwand für die Durchführung	Erfüllungsgrad [%]
Rangfolgeverfahren	1	1	0	1	1	3	38
Argumentenbilanz	1	1	1	0	1	3	38
Präferenzmatrix	1	1	0	1	1	3	38
Bedeutungsprofile	1	1	1	2	1	2	44
Technisch-wirtschaftliche Bewertung (nach VDI 2225)	0	1	0	1	2	2	33
Kosten-Wirksamkeit- und Kosten-Nutzen-Analyse	0	1	0	1	3	2	38
Vorranganalyse	0	1	0	1	0	1	22
Objektivierte gewichtete Bewertung	0	1	0	2	1	1	33
Anforderungsorientierte gewichtete Bewertung	0	1	0	2	1	1	33
Nutzwertanalyse	0	1	0	2	1	1	33

Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass bei der Auswahlmatrix in Tabelle 3.2 auf die Weiterverwendung der Methoden zur Entscheidungsfindung in der Konzeptphase im weiteren Entwicklungsprozess nicht eingegangen wird, da diese Methoden nicht unter diesem Gesichtspunkt entwickelt wurden.

Bei den weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit hat sich aber gezeigt, dass einige der Methoden - nach Modifikation und Anpassung - doch ein gewisses Potential zur Weiternutzung haben. Darauf wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.

Bei der Betrachtung der qualitativen Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse werden nur die bekanntesten und gängigsten Methoden behandelt. Zu diesen Methoden gehören neben der FMEA und FTA, die bereits im Stand der Technik dieser Arbeit beschrieben wurden (vgl. Kapitel 2.2), die Quality Function Deployment (QFD) nach [61] bis [65] und [68], die Gefährdungsanalyse (auch HAZARD-Analyse) nach [66], das Ishikawa Diagramm nach [67] bis [69] und die Robustness Analyse nach [66]. In der Literatur [11] und [66] werden ähnliche Betrachtungen und Untersuchungen durchgeführt.

Tabelle 3.3: Auswahlmatrix für Methoden in der Entwicklungsphase

	Komponentenbeschreibung/-vernetzung	Funktionsbeschreibung/-vernetzung	Fehlerbeschreibung/-vernetzung	Mehrfachfehlerbetrachtung	Maßnahmenbeschreibung	Gewichtung/Bewertung	Aufwand für die Durchführung	Entwicklungsprozess begleitend	Erfüllungsgrad [%]
Fehler- Möglichkeits- und Einfluss-Analyse	3	3	3	0	3	2	1	3	75,0
Quality Function Deployment	2	2	1	0	2	2	1	3	54,2
Fehlerbaumanalyse	2	0	3	3	0	1	1	2	50,0
Gefährdungsanalyse	1	2	2	0	2	2	2	1	50,0
Ishikawa-Diagramm	1	0	2	0	0	0	3	1	29,2
Robustness Analyse	1	1	2	0	0	2	2	2	41,7

Für die Bewertung werden Bewertungszahlen von „0“ bis „3“ verwendet. Die Bewertungszahl „0“ steht für „keine Erfüllung“ und hebt diesen Sachverhalt in der Auswahlmatrix optisch besonders hervor. Die Bewertungszahl „3“ steht für „vollständige Erfüllung“. Damit werden eine klare Gewichtung und eine differenzierte Ergebnisdarstellung ermöglicht, nachdem bei einer Vorabbetrachtung der Methoden festgestellt wurde, dass die einzelnen Methoden die definierten Kataloganforderungen sehr unterschiedlich erfüllen. Beispielsweise gibt es Methoden, bei denen einzelne Fehler definiert, diese aber nicht miteinander verknüpft werden können. Mit einer Verknüpfung ergeben sich aber deutlich bessere Aussagen über die Zusammenhänge bzw. die Abhängigkeiten der Fehler und deren Auswirkungen.

Für jede untersuchte Methode wird ein prozentualer Wert ermittelt, der die Abdeckung bzw. die Erfüllung der definierten Anforderungen in einer Gesamtzahl zusammenfasst. Dieser sogenannte Erfüllungsgrad ist das Verhältnis zwischen den über die untersuchten Kategorien erreichten und den maximal möglichen Bewertungszahlen.

3.2 Methodischer Lösungsansatz

Bei der Betrachtung der verschiedenen Methoden zur Qualitätsabsicherung, die über den gesamten Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden, zeigt sich, wie in Kapitel 3.1 dargelegt, dass diese Methoden keine Durchgängigkeit aufweisen und die Ergebnisse nicht für Zuverlässigkeitsprognosen genutzt werden können. Betrachtet man die verschiedenen Verfahren zur Bewertung und Auswahl von Produktentwicklungskonzepten genauer, dann stellt man fest, dass diese Methoden, mit ihren unterschiedlichsten Vorgehensweisen sowie mit ihrem mehr oder weniger großen Bewertungsaufwand und unterschiedlich gewichteten Bewertungsschwerpunkten alle einen beträchtlichen Mangel aufweisen. Dieser besteht darin, dass die methodenspezifischen Informationen zur Ermittlung des besten Konzepts in der Konzeptphase, je nach Methode verbunden mit erheblichem zeitlichen und fachspezifischen Aufwand, im anschließenden Produktentwicklungsprozess nicht weiter verwendet werden können. Die Analyse der Konzeptvergleichsmethoden zeigt auch, dass einige Methoden von Grund auf überhaupt nicht für einen solchen Informationstransfer geeignet sind. Eine dieser Methoden ist z.B. die Argumentenbilanz. Ferner gibt es Methoden, bei denen nur die entscheidungsnotwendigen Bewertungskriterien für einzelne Konzepte ermittelt werden. Zu diesen Methoden gehören unter anderem die Präferenzmatrix, das Rangfolgeverfahren oder die Nutzwertanalyse. Es gibt auch Methoden, die überwiegend marketing- und kundenorientiert ausgerichtet sind, wie z.B. die Kosten-Wirksamkeit- und Kosten-Nutzen-Analyse oder die Nutzwertanalyse, und bei denen ebenfalls keine Weiterverwendung der erhaltenen Informationen und erarbeiteten Zusammenhänge gegeben ist.

Um die Informationen, die während einer ersten Konzeptbewertung und -auswahl ermittelt werden, weiter im Produktentstehungsprozess nutzen zu können, müssen diese schon während des Bewertungsprozesses so aufbereitet werden, dass eine wenig aufwändige Übernahme in spätere Entwicklungsphasen und in die dabei verwendeten Methoden möglich ist. Die Vorrangmethode und die Methode der anforderungsorientierten gewichteten Bewertung sind hier als denkbare Methoden zu nennen. Mit ihnen ist es möglich, die gewonnenen Informationen anhand einer detaillierten Aufbereitung und Berechnung in eine nutzbare Form zu bringen. Nachteil dieser Verfahren ist der zusätzliche Aufwand für die Erstellung einer absolut konsistenten Matrix, die zur Entscheidung herangezogen werden kann. Erst mit diesem zusätzlichen Aufwand lassen sich die Informationen im späteren Entwicklungsprozess weiterverwenden.

Die beiden folgenden Bewertungsmethoden, die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 [20] und die objektivierte gewichtete Bewertung nach [23] und [24] besitzen den Vorteil, dass sie die Anforderungen an einen Bewertungsprozess qualitativ erfüllen. Es wird dabei aber in erster Linie versucht, ohne eine Gewichtung der Kriterien auszukommen. Die Darstellung der Ergebnisse ist relativ flexibel. Eine spätere Verwendung der erarbeiteten Informationen in einer weiterführenden Methode ist möglich, aber die Ableitung einer Bewertung, wie sie z.B. für eine erste Priorisierung in einer FMEA gewünscht wird, ist nicht möglich.

Die Aufgabe besteht nun darin, eine Methode für frühe Entwicklungsphasen, z.B. für die Konzeptphase oder die Vorentwicklungsphase, zu entwickeln, die die Anforderungen, die an einen Bewertungs- und Entscheidungsprozess gestellt werden, erfüllt und die es ermöglicht, die Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt gewinnbringend in den Produktentstehungsprozess einbringen zu können. Bei der Entwicklung einer derartigen Methode bzw. Vorgehensweise stellt sich ganz besonders die Frage, gegen welche Eigenschaften ein technisches System über den gesamten Produktentstehungsprozess laufend geprüft werden soll bzw. muss. Wichtig bei der Erarbeitung einer solchen Methode ist, auch den weiteren Entwicklungsprozess im Blickfeld zu haben.

Die Methode, die sich in der Entwicklungsphase am häufigsten und am weitverbreitetsten durchgesetzt hat, ist die FMEA. Daher ist es notwendig, zu dieser Methode eine Schnittstelle zu generieren, um den Informationsfluss ohne großen Mehraufwand zwischen den Methoden zu ermöglichen. Ziel dieser Methodenentwicklung muss es somit sein, die beiden geeignetsten Methoden, bei denen bisher eine Weiternutzung der Daten möglich wäre, und zwar die Methode nach VDI 2225 und die objektivierte gewichtete Methode, deutlich zu übertreffen. Das gilt insbesondere für den zeitlichen Aufwand, für die Informationssammlung und -aufbereitung, für die Ergebnisdarstellung und für die optimale Integration und Weiterverwendung der Inhalte in einer FMEA.

Die FMEA ist die entscheidende „Grundmethode“ für die weiteren Untersuchungen, vgl. Tabelle 3.3. Der in dieser Arbeit entwickelte Lösungsansatz ermöglicht es, die Informationen, die mit Hilfe der FMEA gesammelt und dokumentiert werden, für eine Zuverlässigkeitsprognose nutzbar zu machen. Die FMEA wird derzeit nur zur Absicherung von Komponenten, Baugruppen und Systemen sowie Prozessen genutzt. Durch die konsequente Einbindung in den gesamten Entwicklungsprozess wird es möglich, alle gesammelten Daten nicht nur zur Priorisierung von möglichen Fehlern bzw. Fehlerursachen, sondern auch zu deren dargestellten Abhängigkeiten im Gesamtsystem zu nutzen. Über die derzeitige Priorisierung alleine bzw. durch die Darstellung der Ergebnisse in einer *RPZ*-Verteilung ist es nicht möglich, eine Zuverlässigkeitsaussage zu treffen, d.h. man ist nicht in der Lage, auf Grund der gesamten gesammelten Fehler und Fehlerabhängigkeiten eine Abschätzung und eine Aussage über deren Auswirkung auf das spätere Feldverhalten von Bauteilen, Komponenten und Systemen zu machen. Diese Aussagen basieren zurzeit nur auf qualitativen Daten in Form von Felddausfällen oder Testergebnissen.

Der Wunsch, die FMEA für Prognosen nutzbar zu machen, wird genau damit begründet, dass in vielen Fällen Tests erst in späteren Entwicklungsstadien durchgeführt werden und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das endgültige Produkt sehr begrenzt ist. Eine Einschränkung ist auch durch den gezielten Aufbau der Prototypen begründet, die u.U. nur begrenzt der späteren Serienausführung entsprechen. Darüber hinaus gilt, dass die Aussage der qualitativen Methoden stark von der Anzahl der untersuchten Komponenten oder Systeme abhängt. Gewonnene Felddaten bergen die Gefahr, dass sie von Vorgängerprodukten sind und die Übertragbarkeit auf das neu zu entwickelnde Produkt eingeschränkt bis gar nicht möglich ist.

Die FMEA dagegen bezieht sich immer auf das Zielprodukt mit den vorgesehenen Fertigungsverfahren und geplanten Ausführungsvarianten. Diese Informationen gilt es im erarbeiteten Lösungsansatz so nutzbar zu machen, dass die Prognosegüte besonders hoch ist und sehr frühzeitig Aussagen für Entwicklungsänderungen und Trends abgeleitet werden können. Ziel ist es auch, Prognosen in Form von Zuverlässigkeitsverteilungen, entsprechend der Weibullverteilung, zu ermöglichen. Die Weibullverteilung wird deshalb gewählt, weil sie eine der gängigsten Verteilungen ist, die mit einer überschaubaren Anzahl an Parametern die unterschiedlichsten Ausfallverhalten beschreiben kann, vgl. Kapitel 2.3.2.

Später werden auch die Erweiterungsmöglichkeiten der heutigen FMEA hinsichtlich der Mehrfachfehlerbetrachtung untersucht. Diese Untersuchung ist sinnvoll, um dem immer weiter ansteigenden Vernetzungsgrad der heutigen Entwicklungen und der zunehmenden Integration der Elektronik in die Gesamtsysteme Rechnung zu tragen.

Im Bereich mechatronischer Produkte ist die Absicherung von Mehrfachfehlern, d.h. mindestens von Doppelfehlern, empfehlenswert.

Die FMEA ist heute nicht in der Lage, Mehrfachfehler zu betrachten, da die Vernetzungen, die bei der Erzeugung von Fehlernetzen durchgeführt werden, immer ODER-Verknüpfungen sind. Um eine Mehrfachfehlerbetrachtung zu ermöglichen, müssen die Optionen einer Verknüpfungsänderung untersucht werden, um mit Hilfe bereits bewerteter Einfachfehler sinnvolle und nachvollziehbare Mehrfachfehlerbewertungen abzuleiten. Es soll damit erreicht werden, dass eine zusätzliche Durchführung einer FTA (Fehlerbaumanalyse) nach [70] bis [84], die weitere Kapazitäten in zeitlich eng begrenzten Entwicklungsprozessen bindet, nicht mehr erforderlich ist. Durch diese Integration und Methodenerweiterung wird es möglich, Doppeluntersuchungen und unnötige Mehrfachdokumentationen zu vermeiden.

Mit dem hier dargestellten methodischen Lösungsansatz für die neue integrative Methode, die zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse und Ausfallverhaltensprognose von Bauteilen, Baugruppen und Systemen dient und den Entwicklungsprozess von der Konzeptdefinition über die Konstruktion und die Erprobung bis hin zum Produktionsprozess begleitet, ergibt sich der die drei folgenden Schritte umfassende Aufbau:

- der Konzeptvergleich,
- die FMEA mit Einfachfehler- und Mehrfachfehlerbetrachtung und
- die Lebensdauervorhersage.

4 Qualitativer Konzeptvergleich und –bewertung

Aus den in Kapitel 3 dargestellten Ergebnissen wird ersichtlich, dass es einige Methoden gibt, die wichtige Teilbereiche der Konzeptauswahl abdecken, die aber gleichzeitig bei der Überführung in den weiteren Entwicklungsprozess deutliche Defizite aufweisen. Das gilt besonders bei der Forderung nach einer aussagekräftigen Bewertungszahl, mit deren Hilfe eine eindeutige Konzeptentscheidung getroffen werden kann und die neben technischen auch wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt. Um den Erfüllungsgrad der definierten Anforderungen bestmöglich abklären zu können, wird als neue Methode bzw. Vorgehensweise der „qualitative Konzeptvergleich“ entwickelt.

Der qualitative Konzeptvergleich, siehe [85] und [86], kann prinzipiell in vier Arbeitsschritte unterteilt werden:

- die Systemfestlegung,
- die Konzeptfestlegung,
- die Bewertung und
- die Ergebnisanalyse.

Die Methode bzw. die Vorgehensweise ist so aufgebaut, dass alle Informationen, Inhalte und Bewertungen übertragen, weiter verwendet oder umgerechnet werden können. Bezieht man diesen Schritt der „Informationsverarbeitung“ auch noch in den Methodenablauf mit ein, so umfasst die Vorgehensweise eigentlich 5 Arbeitsschritte. Die „Informationsverarbeitung“ wird in Kapitel 5 ausführlich behandelt.

Eine wichtige Voraussetzung für die systematische Durchführung des qualitativen Konzeptvergleichs, insbesondere in einer frühen Entwicklungsphase, ist die richtige Zusammensetzung des Arbeitsteams, vergleichbar mit dem für eine FMEA. Die Zusammensetzung des Teams ist deshalb von besonderer Bedeutung für das Arbeitsergebnis, weil es dringend erforderlich ist, die richtige Informationstiefe zu erlangen, ohne die gruppendynamischen Effekte entweder durch eine zu große oder durch eine zu kleine Anzahl von Teammitgliedern zu gefährden. Benötigt werden Fachspezialisten aus den Bereichen Entwicklung, Produktion, Qualität und Marketing/Service, um den Entstehungsprozess des Konzeptvergleichs von Anfang an mit zu gestalten und später auch eine umfassende Bewertung sicherzustellen.

Das methodische und zielgerichtete Arbeiten im Team muss durch einen Moderator aktiv vorangetrieben werden. Dazu sollte der Moderator eine umfassende Methodenkenntnis über den Konzeptvergleichsablauf und - im Idealfall - auch eine sehr gute Fachkenntnis über das zu untersuchende System besitzen. Neben der Ablaufsteuerung sollte der Moderator auch in der Lage sein, das Bewertungsverfahren und die Bewertung so zu gestalten, dass diese nicht mit Bewertungstabellen, sondern mit gezieltem Nachfragen durchgeführt werden. Zu den weiteren Aufgaben des Moderators gehören die Planung und die Koordination der Sitzungen und die regelmäßige Aktualisierung der Dokumentation. Der schematische Ablauf des qualitativen Konzeptvergleichs ist in Bild 4.1 dargestellt.

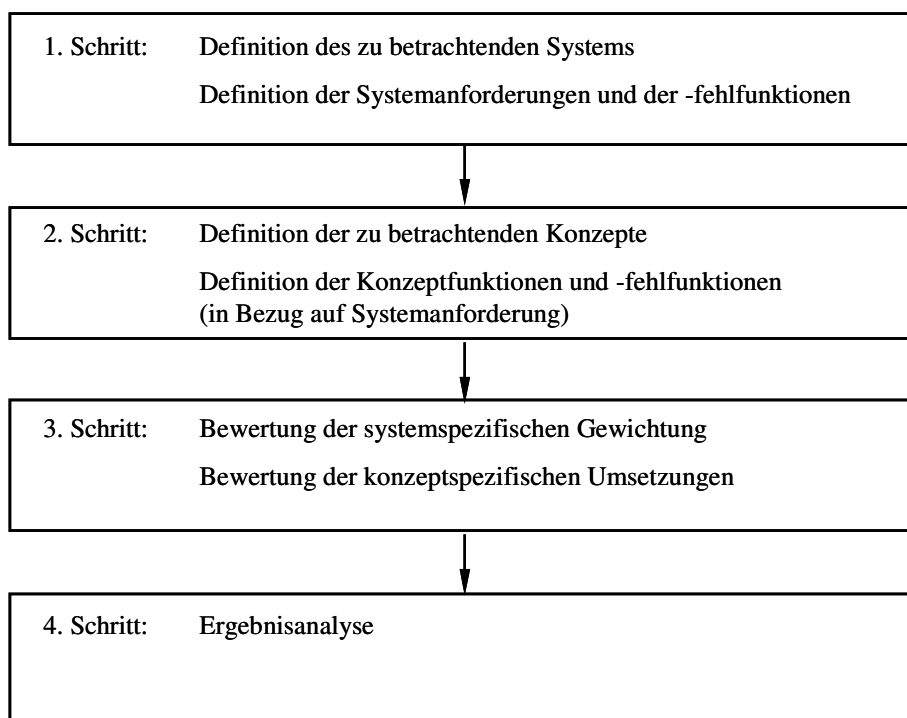


Bild 4.1: Schematisches Ablaufdiagramm des qualitativen Konzeptvergleichs

4.1 Systemfestlegung

Der erste Arbeitsschritt des qualitativen Konzeptvergleichs beschäftigt sich mit dem System selbst, das die Grundlage für die weiteren Betrachtungen auf Konzeptebene bildet. Der Arbeitsblock für die Systembeschreibung unterteilt sich in drei Teilaufgaben:

- Systembenennung,
- Definition der Systemfunktionen und
- Beschreibung der Systemfehlfunktionen.

4.1.1 Systembenennung

Zu Beginn des Konzeptvergleichs ist es notwendig, das System, d. h. die Betrachtungseinheit, zu benennen bzw. zu betiteln. Die Benennung des Systems ist eine allgemeine Bezeichnung, die als Überschrift für die diversen Realisierungsmöglichkeiten bzw. Konzepte angesehen werden kann. Es ist also darauf zu achten, dass keine konzeptspezifischen Bezeichnungen und somit Einschränkungen benutzt werden. Für das nun festgelegte System, das auch für die weiteren Untersuchungen bzw. Analysen den Bezugspunkt darstellt, werden anschließend die Systemfunktionen und Fehlfunktionen definiert.

4.1.2 Definition der Systemfunktionen

Bei der Definition bzw. Festlegung der Systemfunktionen ist darauf zu achten, dass alle zugeordneten und auch alle übergeordneten Funktionen berücksichtigt werden. Übergeordnete Funktionen sind diejenigen, die das System bezüglich eines übergeordneten Gesamtsystems erfüllen muss. Zugeordnete Funktionen sind Funktionen innerhalb des Systems zur Erfüllung der eigentlichen Systemfunktion. Bei der Definition der Systemfunktionen müssen alle Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Es kann bei der Festlegung sinnvoll sein, dass eine Systemanforderung in mehrere Teilfunktionen bzw. Teilfunktionsabläufe unterteilt wird. Beim Definieren der Systemfunktionen ist besonders darauf zu achten, dass alle Anforderungen aus dem Lastenheft bzw. Konzeptheft, alle zusätzlichen Anforderungen wie z. B. die Farbgestaltung eines Bauteils, die Vollständigkeit der Systemfunktionen und die Wechselwirkungen mit anderen, nicht betrachteten Systemfunktionen berücksichtigt werden.

Es ist wichtig, dass in diesem Schritt keine konzeptspezifischen Funktionen, sondern nur generelle und übergreifende Anforderungen berücksichtigt werden. Bei allgemeinen Systemfunktionen, wie z. B. „Lebensdauer gewährleisten“, ist die Angabe der Laufleistung, der Zahl der Betätigungen, der Einsatzstunden oder der Lastwechselzahl sinnvoll.

4.1.3 Beschreibung der Systemfehlfunktionen

Im Rahmen der dritten Teilaufgabe, der Beschreibung der Systemfehlfunktionen, werden die möglichen Systemfehler der jeweils benannten Systemfunktion beschrieben. Die Systemfehlfunktionen können in einem ersten Ansatz durch Negation der entsprechenden Funktion festgelegt werden. Weiterhin sind dabei auch Einflussgrößen aus dem übergeordneten System und Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Es ist zulässig, für eine Systemfunktion mehrere Fehlfunktionen festzulegen. Die konzeptspezifischen Fehlfunktionen sind in diesem Schritt nicht zu berücksichtigen.

4.2 Konzeptfestlegung

Der zweite Arbeitsschritt innerhalb der Gesamtmethode „qualitativer Konzeptvergleich“ beschäftigt sich im Wesentlichen mit den Konzepten bzw. mit den Realisierungsmöglichkeiten für die im ersten Arbeitsschritt zuvor beschriebenen Systemanforderungen. Dieser konzeptspezifische Arbeitsschritt unterteilt sich ebenfalls in drei Teilaufgaben:

- Benennung der Konzepte,
- Definition der Konzeptfunktionen und
- Beschreibung der Konzeptfehlfunktionen.

Die Besonderheit in diesem Schritt liegt darin, dass die Lösungen, die ein Wettbewerbsanbieter auf den Markt gebracht hat bzw. auf den Markt bringen will, ebenso als mögliche Konzepte mit in die Untersuchungen einbezogen werden können (Benchmarkuntersuchung) und sich genauso wie alle anderen internen Konzepte betrachten und analysieren lassen.

4.2.1 Benennung der Konzepte

Bei der Benennung der jeweiligen Konzepte geht es, wie bei der Benennung der Systeme, um die Vergabe eines Titels oder einer Bezeichnung zur besseren Unterscheidung und Abgrenzung. Dabei kann man sich auf das physikalische Grundprinzip (z. B. pneumatisches Antriebskonzept), auf die mechanische Ausprägung (z. B. Zahnriemenantrieb) oder auf interne Bezeichnungen (z. B. firmenspezifische Baugruppenbezeichnungen) beziehen.

4.2.2 Definition der Konzeptfunktionen

Unter der Definition der Konzeptfunktionen, die für jedes Konzept umfassend und ausführlich durchgeführt wird, ist die Festlegung der Funktionsweise als funktionale Beschreibung zu verstehen. Die Definition der geforderten Funktionsweise bezieht sich immer auf die jeweils festgelegte übergeordnete Systemfunktion. Hierbei müssen die in der Systemfunktion betrachteten Umgebungsbedingungen und Wechselwirkungen immer mit berücksichtigt werden und aus der Beschreibung der konzeptspezifischen Umsetzung ersichtlich sein.

Liegt ein höherer Konzeptausarbeitungsgrad vor, so können Funktionsabläufe in ihrer logischen Ablauffolge detailliert beschrieben werden, z. B. mit Hilfe von Wenn-dann-Bedingungen oder ähnlichen Abfragen.

Bei allgemeinen Systemfunktionen, wie z. B. „Lebensdauer gewährleisten“, bei denen kein direkter Bezug zu identifizierten Bauteilen/Komponenten oder Systemelementen hergestellt werden kann, ist es möglich, die Beschreibung direkt aus der Systemfunktion zu übernehmen, d.h. es wird eine so genannte Dummy-Funktionsbeschreibung erstellt. Die Bewertungsgrundlage wird hier nicht durch die Funktionsweise, sondern über die Fehlerbeschreibung ermöglicht.

4.2.3 Beschreibung der Konzeptfehlfunktionen

Im dritten Teilschritt werden die möglichen Konzeptfehler der jeweils benannten System- und Konzeptfunktionen beschrieben. Bei dieser Betrachtung sind die vorgegebenen Rahmen- und Umgebungsbedingungen der Funktion mit zu berücksichtigen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die möglichen Konzeptfehler bzw. Versagensarten haben. Bei allgemeinen Systemfehlfunktionen, wie z. B. „Lebensdauer nicht gewährleisten“, können hier alle möglichen konzeptspezifischen Fehler, die zu der definierten Systemfehlfunktion führen, aufgelistet werden, wie z. B. „Bauteilbruch“, „Härtefehler“, „falsche Werkstoffwahl“.

4.3 Bewertung

Um die methodisch erarbeiteten Anforderungen erfüllen zu können, ist die Erstellung eines spezifischen Bewertungskatalogs notwendig. Dieser enthält die wichtigsten Entscheidungskriterien, die für die Konzeptauswahl und den weiteren Entwicklungsprozess berücksichtigt werden müssen. Dabei sei angemerkt, dass der qualitative Konzeptvergleich mit zwei unterschiedlichen Ausprägungen oder Betrachtungsschwerpunkten durchgeführt werden kann: zum einen qualitäts- und zuverlässigkeitsorientiert an der „technischen Umsetzbarkeit“ und dem „Kosten-Zeit-Faktor“ sowie zum anderen ebenfalls qualitäts- und zuverlässigkeitsorientiert, aber zeitaufwändiger durch Berücksichtigung der „abgeschätzten Zuverlässigkeit“. Um diesen unterschiedlichen Interessen in den frühen Entwicklungsphasen gerecht zu werden, wird der Standardbewertungskatalog, der eine systemspezifische und zwei konzeptspezifische Bewertungszahlen beinhaltet, für die verstärkt zuverlässigkeitsgetriebene Entwicklung durch die zusätzliche konzeptspezifische Bewertungszahl „abgeschätzte Zuverlässigkeit“ erweitert.

Die system- und konzeptspezifischen Bewertungen erfolgen mit Bewertungszahlen von „0“ bis „1“. Die Bewertung ist in 0,25 Schritte unterteilt. Die niedrige Bewertungszahl „0“ entspricht einer schlechten/negativen Bewertung; die hohe Bewertungszahl „1“ entspricht einer guten/positiven Bewertung.

Nur diese so festgelegte zahlenmäßige Abstufung der hier relevanten Bewertungszahlen erlaubt es, im weiteren Verlauf des Konzeptvergleichs eindeutige Ergebniszahlen zu generieren und klar interpretierbare Aussagen zu machen.

Die Bewertungszahlen haben damit gegenüber der FMEA eine andere Wertigkeit. Bei der FMEA ist die niedrige Bewertung von „1“ eine positive Bewertung/keine Bedeutung für die Fehlerschwere und die hohe Bewertung „10“ eine schlechte Bewertung/sehr große Bedeutung für die Fehlerschwere.

Daraus folgt, dass sowohl für den Konzeptvergleich als auch für die FMEA, allerdings basierend auf unterschiedlichen Zahlenzuordnungen, ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der jeweiligen Bewertungszahl und der entsprechenden inhaltlichen Aussage gegeben ist.

Die Verwendung der Bewertungszahlen zwischen „0“ und „1“ im Konzeptvergleich hat einen deutlichen Vorteil. Die Problematik der Mehrdeutigkeit, vgl. hierzu [87], die sich bei der FMEA-Bewertung durch die Multiplikation der einzelnen Bewertungszahlen zur Ermittlung der *RPZ* ergibt, wird beseitigt. Die Verwendung von Bewertungszahlen im Bereich zwischen „0“ und „1“ hat zudem den Vorteil, dass Dezimalzahlen, die sich der „0“ annähern, bei Multiplikation einen höheren Einfluss auf das Endergebnis haben. Damit wird eine „negative“ Bewertung in das Gesamtergebnis richtig mit einbezogen und dem deutlich höheren bzw. ansteigenden Risiko Rechnung getragen.

Auf die Vorgehensweise der Berechnung der Entwicklungsfähigkeit mit den oben beschriebenen Bewertungszahlen und der zugehörigen Stufung wird detailliert in Kapitel 4.4 eingegangen. Mit dieser Berechnung wird eine eindeutige und aussagekräftige Bewertungszahl für das jeweilige untersuchte Konzept generiert und die Mehrdeutigkeitsproblematik ausgeschlossen. Die einzelnen Bewertungsklassen werden im Folgenden erläutert.

4.3.1 Systemspezifische Bewertung

Die Systemfunktion wird mit der Bewertungszahl der Gewichtung G bewertet. Die Gewichtung erfasst die Schwere bzw. Bedeutung der Systemfunktion, d.h. sie gibt an, ob es sich z.B. um Gesetzesanforderungen, Funktionsanforderungen oder Komfortanforderungen handelt. Die Bewertung wird für eine Systemfunktion nur einmal vergeben. Diese Bewertungszahl bezieht sich ausschließlich auf den Betrachtungshorizont des Systems. Die Systemfunktion stellt eine funktionale Anforderung an alle Konzepte dar, die jedes Konzept für sich erfüllen muss. Wie das jeweilige Konzept diese Systemfunktion erfüllt, wird im Weiteren erläutert und mit der konzeptspezifischen Bewertungszahl berücksichtigt.

Die Bewertungszahl der Gewichtung G geht von 0 (= gesetzliche Anforderung/Systemfunktion) bis 1 (= keine Anforderung/Systemfunktion). Die einzelnen Bewertungsklassen können dem Bewertungskatalog in Tabelle 4.1 bzw. dem Gesamtbewertungskatalog im Anhang entnommen werden.

Tabelle 4.1: Bewertungskatalog für die Gewichtung G im Konzeptvergleich

Bewertung	Beschreibung
1,00	Keine Anforderung, keine Gewichtung
0,75	Komfortanforderung
0,50	Lebensdaueranforderung
0,25	Funktionsanforderung
0,00	Gesetzliche Vorschrift bzw. Anforderung, sicherheitsrelevante Anforderung

Hier soll noch einmal kurz auf die Bewertungsweise und die Zuordnung der Bewertungszahlen eingegangen werden. Der gesetzlichen Anforderung ist die Bewertung „0“ zugeordnet. Die Bewertung „0“ bedeutet nicht, dass gesetzliche Vorschriften und Anforderungen keine bzw. null Bedeutung haben, sondern die Bewertung „0“ ist durch die Berechnungslogik der Gleichung (4.1) begründet, in die bei der Ermittlung der Ergebniszahl eben dieser Wert eingesetzt werden muss.

Im ersten Moment mag besonders bei der Gewichtung G die Zuordnung der Bewertungszahl zur Aussage verwirrend sein, vgl. Kap 4.3. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber untersucht, ob die gleiche Zuordnung wie bei der FMEA (kleine Bewertungszahl = gut/positiv/geringe Bedeutung; hohe Bewertungszahl = schlecht/negativ/hohe Bedeutung) anwendbar und umsetzbar ist. Es zeigt sich, dass die bei der FMEA umgesetzte Zuordnung gegenüber der im Konzeptvergleich angewendeten Zuordnung den Nachteil hat, dass die Anforderungen, die an die Berechnungslogik gestellt werden, nicht mit einfachen mathematischen Mitteln gelöst werden können. Eine eventuell mögliche komplexe Berechnung hat den Nachteil, dass der Konzeptvergleich nicht „einfach mal schnell“ zur Entscheidungsfindung durchgeführt werden kann. Mit der in dieser Arbeit beschriebenen Vorgehensweise und Berechnungslogik wird sichergestellt, dass jederzeit, ggf. auch mit einfachen mathematischen Hilfsmitteln, wie z.B. Taschenrechner, eine eindeutige Aussage zur Entscheidungsfindung erzielt wird.

Bei den praktischen Anwendungen in der Industrie hat sich auch gezeigt, dass die im Konzeptvergleich festgelegte Zuordnung von Bewertungszahl und Beschreibung, besonders bei der Zuordnung der Bewertungszahl Gewichtung G , den Teammitgliedern keine Probleme bereitet hat.

4.3.2 Konzeptspezifische Bewertung

Wie bereits im Einleitungskapitel zur Bewertung erwähnt, ist die konzeptspezifische Bewertung in zwei unterschiedlichen Ausprägungen durchführbar. Die zuverlässigkeitsorientierte konzeptspezifische Bewertung beinhaltet die beiden Bewertungszahlen „technische Umsetzbarkeit“ und „Kosten-Zeit-Faktor“ und wird in der zweiten Ausprägung noch durch eine weitere Bewertungszahl, die „abgeschätzte Zuverlässigkeit“, ergänzt. Zunächst soll aber erst auf den so genannten Standardbewertungskatalog des qualitativen Konzeptvergleichs eingegangen werden. Anschließend wird dann die weitere Bewertungszahl „abgeschätzte Zuverlässigkeit“ mit ihrem Einfluss auf das Gesamtergebnis, mit ihrer Aussagebedeutung und mit den sich durch sie ergebenden zusätzlichen Ergebnisanalysemöglichkeiten erläutert und näher untersucht.

Der Standardbewertungskatalog beinhaltet zwei konzeptspezifische Bewertungszahlen. Diese beiden Bewertungszahlen sind die technische Umsetzbarkeit $T_{i,j}$ und der Kosten-Zeit-Faktor $K_{i,j}$.

Die erste Bewertungszahl, die technische Umsetzbarkeit $T_{i,j}$, macht eine Aussage über die konzeptspezifische Realisierbarkeit der jeweils verlangten Systemanforderung i . Ziel ist es, mit dieser Bewertungszahl die technischen und funktionalen Zusammenhänge in ihrer Komplexität und Umsetzung, bezogen auf die Rahmenbedingungen der Systemanforderung, zu beschreiben. In der Bewertungsnote der technischen Umsetzbarkeit können die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Bewertungskriterien mit berücksichtigt werden, um die Bewertungszahl für die Projektteilnehmer verständlicher und nachvollziehbarer zu machen. Diese Tabelle kann als Richtlinie für die erste Bewertungszahl gelten.

Tabelle 4.2: Richtlinie für die „Technische Umsetzbarkeit“

Hauptkategorie	Unterkategorie
Technische Anforderung	funktions-, beanspruchungs-, betriebsgerecht, ...
Funktionsanforderung	belastungs-, funktions-, wirkungsgradgerecht, ...
Betriebsanforderung	dauergerecht, wartungsgerecht, sicherheitsgerecht, ...
Konstruktionsanforderung	optisch, akustisch, olfaktorisch, sicherheitstechnisch, ...
Herstellungsanforderung	herstellbar, verarbeitbar, materialgerecht, ...
Umweltanforderung	chemisch, thermisch, elektrisch, elektronisch, ...
Prüfanforderung	verfahrensgerecht, mittelgerecht, ...

Mit der zweiten Bewertungszahl, dem Kosten-Zeit-Faktor $K_{i,j}$, wird der Kosten-Zeit-Aufwand für die Umsetzung der Systemfunktion i durch das geplante Konzept j beur-

teilt; d.h. die zu erwartenden Produktkosten in der Entwicklung und/oder Produktion werden mit einbezogen. Diese Unterscheidung ist hier bewusst optional ausgeführt, da die Methode auch für den Aufbau und den Vergleich von verschiedenen Teil- und Prozessschritten in der Fertigung sowie für Komplettanlagen verwendet werden kann. Zur Hilfestellung bei der Bewertung kann die Tabelle 4.3 als Richtlinie für die Bewertungszahl Kosten-Zeit-Faktor verwendet werden.

Tabelle 4.3: Richtlinie für den „Kosten-Zeit-Faktor“

Hauptkategorie	Unterkategorie
Wirtschaftliche Anforderung	fertigungs-, wartungs-, instandsetzungs-, energieverbrauchs- betriebsmittelverbrauchs-, entsorgungsgerecht
Kostenanforderung	Vorleistungen, Investitionen, Herstellkosten, Materialkosten, Betriebskosten, Entwicklungskosten, ...
Marktanforderung	Inbetriebnahmeaufwand, Serviceleistungen, Betriebsaufwand, ...

Diese Bewertungszahl bildet darüber hinaus eine gute Schnittstelle zu projekt- und konzeptspezifischen Kosten-/Zeitplanungen bzw. -einschätzungen.

Tabelle 4.4: Bewertungskatalog für die technische Umsetzbarkeit T und den Kosten-Zeit-Faktor K im Konzeptvergleich

	Umsetzbarkeit	Kosten-Zeit
Bewertung	Beschreibung	
1,00	Funktion kann sehr einfach oder intuitiv umgesetzt werden	Funktion kann mit sehr geringem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um mehr als x % unterschritten
0,75	Funktion kann einfach umgesetzt werden	Funktion kann mit geringem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um ca. y % unterschritten
0,50	Funktion kann durchschnittlich umgesetzt werden	Funktion kann mit durchschnittlichem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden eingehalten
0,25	Funktion kann schlecht umgesetzt werden	Funktion kann mit hohem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um ca. y % überschritten
0,00	Funktion kann sehr schlecht oder nicht intuitiv umgesetzt werden	Funktion kann mit sehr hohem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um mehr als x % überschritten

Die beiden konzeptspezifischen Bewertungszahlen bzw. Bewertungen können ggf. durch Integration vorhandener Daten (z. B. Vorgängerprojekte oder Vergleichsdaten) unterstützt werden. Die Bewertungsskala reicht jeweils von 0 bis 1 und der Bewertungskatalog kann der Tabelle 4.4 bzw. dem Anhang entnommen werden.

Ist insbesondere der Zuverlässigkeitsaspekt in frühen Entwicklungsphasen relevant bzw. steht er gezielt im Blickpunkt der Untersuchungen, z.B. aufgrund der technischen Herausforderung oder Bedeutung der Entwicklung, so ist es möglich, eine weitere dritte Bewertungszahl in den qualitativen Konzeptvergleich einzuführen. Diese dritte Bewertungszahl ist die abgeschätzte Zuverlässigkeit $R_{est,i,j}$. Sie bewertet die erwartete Zuverlässigkeit der jeweiligen Konzeptfunktion bis zu einem festgelegten bzw. noch zu definierenden Zeitpunkt (z.B. 150.000 km). Dieser Bezugspunkt ist wichtig für eine sinnvolle Aussage dieser Bewertungszahl, insbesondere auch unter dem Aspekt, dass sich mit diesem Bezugspunkt anschließend weitere Möglichkeiten für grafische Ergebnisanalysen ergeben. Der Bezugspunkt soll hierbei das Auslegungsziel der Entwicklung bzw. der Konstruktion/Berechnung darstellen. Der Bezugspunkt kann z.B. auch die B_{10} -Lebensdauer sein, auf die die Bauteile und Komponenten rechnerisch ausgelegt werden. Die Bewertungsskala dieser Bewertungszahl reicht ebenso von 0 bis 1 und kann Tabelle 4.5 bzw. dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 4.5: Bewertungskatalog für die abgeschätzte Zuverlässigkeit R_{est} im Konzeptvergleich

Bewertung	Beschreibung
1,00	Funktion erreicht sehr hohe Zuverlässigkeit; $0,999 > R(t) > 0,996$
0,75	Funktion erreicht hohe Zuverlässigkeit; $0,995 > R(t) > 0,992$
0,50	Funktion erreicht durchschnittliche Zuverlässigkeit; $0,991 > R(t) > 0,988$
0,25	Funktion erreicht niedrige Zuverlässigkeit; $0,987 > R(t) > 0,984$
0,00	Funktion erreicht sehr niedrige Zuverlässigkeit; $0,983 > R(t) > 0,970$

Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang noch zu erwähnen, dass den Bewertungszahlen, vergleichbar mit den Bewertungszahlen in der FMEA, Vergleichswerte zugewiesen werden können. Am Beispiel des Kosten-Zeit-Faktors bzw. der abgeschätzten Zuverlässigkeit lässt sich das gut aufzeigen. Den einzelnen Bewertungszahlen werden zum Beispiel %-Werte für die Überziehung oder Unterschreitung der Kostenvorgaben bzw. im Fall der abgeschätzten Zuverlässigkeit Bereiche mit einer Ober- und Untergrenze, in der sich das Konzept wahrscheinlich im Feldbetrieb bewegen wird, zugeordnet. Diese Zuordnung bzw. Zuweisung erfolgt projekt- und firmenspezifisch und ist an die jeweiligen Anforderungen und Ziele des Konzeptvergleichs indivi-

duell anzupassen. Das bedeutet, dass der im Anhang befindliche Bewertungskatalog als Standardbewertungskatalog und als Grundlage für weitere Anpassungen verwendet werden kann, aber nicht unbedingt verwendet werden muss.

Das Formblatt des qualitativen Konzeptvergleichs ist in Bild 4.2 dargestellt und zeigt den prinzipiellen Aufbau in Form einer Blockdarstellung, die einerseits die Systemanforderungen beinhaltet und andererseits die konzeptspezifischen Angaben auflistet. Der Konzeptblock kann in Abhängigkeit von den zu betrachtenden Konzepten entsprechend häufig nach rechts fortgeschrieben werden.

System:			Konzept:				Gesamtentwicklungsfähigkeit:		
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E	Konzeptbeschreibung			
1	Systemanforderung:					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente		
	Systemfehler:					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%	

Bild 4.2: Formblatt des qualitativen Konzeptvergleichs

Der Anhang A 2 enthält ein Formblatt mit einer detaillierten Anleitung und Zuordnung sowie Angaben, wie die einzelnen Spalten und Reihen auszufüllen sind.

4.4 Ergebnisanalyse

Nach Durchführung der Hauptarbeitsschritte des qualitativen Konzeptvergleichs werden in diesem Abschnitt die Grundlagen für die Ergebnisbildung und Ergebnisberechnung dargestellt und die sich daran anschließende Ergebnisanalyse mit ihren unterschiedlichen Ergebnisbildern erläutert. Mit Hilfe der Bewertungszahlen lassen sich verschiedene Aussagen aus dem Konzeptvergleich machen. Die unterschiedlichen Ergebnisse sind so, dass sie sich in ihren Aussagen gegenseitig unterstützen und eine umfassende Analyse der betrachteten Konzepte ermöglichen. Der qualitative Konzeptvergleich liefert im Detail Aussagen zur Konzepttauglichkeit für jede einzelne betrachtete Systemfunktion, zur Einzelentwicklungsfähigkeit $E_{i,j}$ einer konzeptspezifischen Realisierung in Bezug auf eine betrachtete Systemfunktion i und zur Gesamtentwicklungsfähigkeit $E_{Ges,j}$ eines Konzepts für alle betrachteten Systemfunktionen. Die Ge-

samentwicklungsfähigkeit kann auch in normierter Form ($E_{Ges,norm,j}$) angegeben werden.

Die Konzepttauglichkeit ist eine wichtige Grundvoraussetzung, die sicherstellen soll, dass ein Mindestmaß an technischer Machbarkeit in einem definierten Kosten-Zeit-Budget eingehalten wird. Wird dieses Mindestmaß nicht erfüllt, z.B. dann, wenn eine der drei Einzelbewertungen (technische Umsetzbarkeit, Kosten-Zeit-Faktor und/oder abgeschätzte Zuverlässigkeit) gleich null ist, dann ist die Konzepttauglichkeit nicht erfüllt. Zum besseren Erkennen dieser Schwachstelle, ist es möglich, diese „0“ als Bewertung optisch hervorzuheben. Die Kennzeichnung, dass ein Konzept die prinzipielle Konzepttauglichkeit erreicht hat, kann als notwendige Voraussetzung und Bedingung für die Analyse der weiteren Bewertungskriterien gesetzt werden.

Aus den verschiedenen Bewertungszahlen lässt sich die Einzelentwicklungsfähigkeit eines Konzepts berechnen, die Auskunft darüber gibt, ob eine bestimmte Systemfunktion gerade mit diesem Konzept bzgl. der gestellten Anforderungen grundsätzlich machbar ist. Für die Ermittlung der Entwicklungsfähigkeit gibt es zwei unterschiedliche Berechnungsansätze.

Der erste Berechnungsansatz nach [91] und [88] zeigt bei sehr hohen Einzelbewertungen der technischer Umsetzbarkeit T und des Kosten-Zeit-Faktors K sowie beliebiger Bewertung der Gewichtung G ($T = K = 1$ und $G = \text{bel.}$) die Eigenschaft, dass die Entwicklungsfähigkeit immer zu $E = 1$ wird. Dieses Verhalten ist von Nachteil, da die Bewertung der Gewichtung G keinen Einfluss auf die Entwicklungsfähigkeit hat. In der Industrie muss bei obigen Randbedingungen aber auch der Faktor der Gewichtung G bei einer Aussage über die Entwicklungsfähigkeit berücksichtigt werden.

Der zweite Berechnungsansatz, in dieser Arbeit entwickelt und in Gleichung (4.1) für drei Bewertungszahlen bzw. in Gleichung (4.2) für vier Bewertungszahlen dargestellt, behebt den oben beschriebenen Nachteil. Der Einfluss der Bewertungszahlen auf die Entwicklungsfähigkeit aus Gleichung (4.1) ist dreidimensional in Bild 4.3 dargestellt. Die Einzelentwicklungsfähigkeit berechnet sich mit der folgenden Gleichung (4.1).

$$E_{i,j} = \frac{1}{3} \left(\left(\frac{1 + G_i}{2} \right) \cdot T_{i,j} \cdot K_{i,j} + G_i (T_{i,j} + K_{i,j}) \right) \quad (4.1)$$

mit

$i = [1, \dots, n]$ Systemanforderung,

$j = [1, \dots, m]$ Konzept

$E_{i,j}$: Einzelentwicklungsfähigkeit der Systemanforderung i durch das Konzept j .

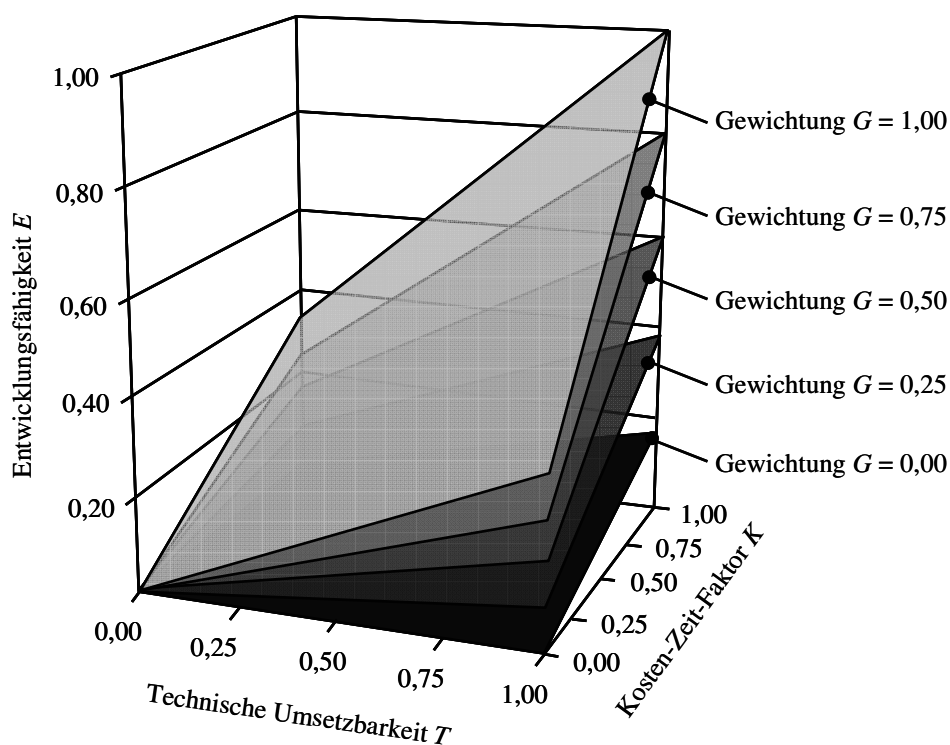


Bild 4.3: Einfluss der Bewertungszahlen Gewichtung G , Technische Umsetzbarkeit T , und Kosten-Zeit-Faktor K auf die Einzelentwicklungsfähigkeit E

Ist die Auswertung bzw. ist der qualitative Konzeptvergleich unter Berücksichtigung der abgeschätzten Zuverlässigkeit durchgeführt worden, so wird das bei der Ermittlung der Einzelentwicklungsfähigkeit mit berücksichtigt. Die dritte Bewertungszahl wird ebenfalls wie die anderen beiden konzeptspezifischen Bewertungszahlen in die Gleichung integriert. Es ergibt sich für diese Variation dann die Entwicklungsfähigkeit nach Gleichung (4.2).

$$E_{i,j} = \frac{1}{4} \left(\left(\frac{1+G_i}{2} \right) \cdot T_{i,j} \cdot K_{i,j} \cdot R_{est,i,j} + G_i (T_{i,j} + K_{i,j} + R_{est,i,j}) \right) \quad (4.2)$$

Zur Erläuterung der Gleichungen (4.1) und (4.2) sollen die folgenden Ausführungen dienen. Die Gleichungen sind prinzipiell aus zwei Termen aufgebaut.

Der erste Term, in dem die einzelnen Bewertungszahlen miteinander multipliziert werden, dient dazu, dass auch kritische Einzelbewertungen der konzeptspezifischen Bewertungszahlen, d.h. Bewertungen gleich null, berücksichtigt werden. Die Entwicklungsfähigkeit ergibt sich in diesem Fall durch den zweiten Term.

Der zweite Term ist so aufgebaut, dass für den Fall, dass eine gesetzliche Anforderung ($G_i = 0$) betrachtet wird, dieser Term zu null wird, damit die konzeptspezifischen Bewertungen aus dem ersten Teil der Gleichung voll berücksichtigt werden können. Sollte zudem bei einer gesetzlichen Anforderung eine weitere Bewertung gleich null sein,

dann liegt ein Killerkriterium für das Konzept vor. Ferner wird die Gleichung bei allen anderen Systemanforderungen ($G_i \neq 0$) zu null und damit zu einem Killerkriterium, insbesondere dann, wenn alle konzeptspezifischen Bewertungszahlen gleich null sind.

Basierend auf den Ergebnissen der berechneten Einzelentwicklungsfähigkeiten ergibt sich die Gesamtentwicklungsfähigkeit ($E_{Ges,j}$) von Konzepten nach Gleichung (4.3).

$$E_{Ges,j} = \prod_{i=1}^n E_{i,j} \quad (4.3)$$

Die normierte Gesamtentwicklungsfähigkeit $E_{Ges,Norm,j}$ ist eine Zahl, die einen einfacheren und besseren Vergleich zwischen den verschiedenen Konzepten zulässt. Das beste Konzept wird auf 1 normiert, alle weiteren Konzepte werden entsprechend angeglichen, d. h. der Wert für die Gesamtentwicklungsfähigkeit eines jeden Konzepts wird durch den Wert für die Gesamtentwicklungsfähigkeit des besten Konzepts dividiert, siehe Gleichung (4.4).

$$E_{Ges,Norm,j} = \frac{E_{Ges,j}}{E_{Ges,max}} \quad (4.4)$$

Nach der Ermittlung der unterschiedlichen Kennzahlen, die aus dem qualitativen Konzeptvergleich abgeleitet werden können, ist anschließend eine systematische Auswertung der Berechnungsergebnisse notwendig, um alle Informationen und Aussagen dieser methodischen Vorgehensweise richtig und eindeutig interpretieren zu können.

Für die Ergebnisanalyse ergeben sich zwei Möglichkeiten – eine kennzahlengestützte und eine grafischgestützte Ergebnisanalyse. Die zu wählende Analysemöglichkeit ist ganz wesentlich an die Art des Konzeptvergleichs gebunden, d.h. ob der qualitative Konzeptvergleich mit oder ohne Zuverlässigkeitsschwerpunkt durchgeführt wurde.

Die grafischgestützte Ergebnisanalyse ist nur für den Konzeptvergleich unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit möglich und kann daher auch nur in diesem Fall durchgeführt werden. Im Folgenden werden die beiden Möglichkeiten mit ihren Ergebnissen beschrieben.

4.4.1 Kennzahlengestützte Ergebnisanalyse

Zunächst werden die errechneten Gesamtentwicklungsfähigkeiten der einzelnen untersuchten Konzepte miteinander verglichen.

Hierbei können drei Fälle unterschieden werden:

$$\text{Fall 1:} \quad E_{Ges,x} \gg E_{Ges,y} > (>)E_{Ges,z}$$

$$\text{Fall 2:} \quad E_{Ges,x} \cong E_{Ges,y} > (>)E_{Ges,z}$$

$$\text{Fall 3:} \quad E_{Ges,x} = E_{Ges,y} = E_{Ges,z} = 0$$

Der Fall 1 beschreibt eine deutliche Überlegenheit des Konzepts x gegenüber den anderen beiden Konzepten y und z . Für den weiteren Entwicklungszyklus sollte demnach das Konzept x ausgewählt werden.

Im Fall 2 liegt eine Überlegenheit der beiden Konzepte x und y vor. In diesem Fall ist es möglich, die einzelnen Entwicklungsfähigkeiten miteinander zu vergleichen, um die Konzeptunterschiede detailliert zu ermitteln. So können die Vor- und Nachteile der beiden Konzepte, wie z.B. Machbarkeit, vorgegebene Kostenziele oder abgeschätzte Zuverlässigkeit, herausgearbeitet werden, um schließlich zu einer Konzeptentscheidung zu gelangen.

Der Fall 3 beschreibt drei Konzepte, bei denen mindestens eine gesetzliche Systemanforderung nicht erfüllt werden kann. Diese Nichterfüllung kann hervorgerufen werden durch keine technische Umsetzbarkeit ($T_{i,j} = 0$), durch zu hohe Produktkosten ($K_{i,j} = 0$) und/oder durch zu gering geschätzte Zuverlässigkeit ($R_{est,i,j} = 0$). In diesem Fall ist eine Analyse der einzelnen Konzepte zur Ermittlung der nicht erfüllten Systemanforderung(en) durchzuführen. Ergibt diese Analyse, dass ein Konzept diese Nichterfüllung bzgl. einer Anforderung aufweist, für die ein oder mehrere andere Konzepte aber Lösungen bereitstellen, so ist eine Abschätzung bzgl. einer Kombination aus den beiden Lösungsmöglichkeiten anzustreben.

Für den Fall, dass eine Kombination möglich ist, dann ist für dieses kombinierte Konzept der gesamte Konzeptvergleich erneut durchzuführen, in dem das neue Konzept bzgl. der definierten Systemanforderungen beschrieben und bewertet wird und damit dann ein entwicklungsfähiges Konzept darstellt. Für den Fall, dass mehrere Kombinationen möglich sind, können auch diese wiederum miteinander verglichen werden, um zu einer optimalen „Kompromisslösung“ zu kommen.

4.4.2 Grafische Ergebnisanalyse

Die kennzahlengestützte Ergebnisanalyse kann durch eine grafische Aufbereitung der Bewertungsergebnisse unterstützt werden. Diese zusätzliche Datenaufbereitung bietet sich besonders für den Fall 2 aus dem Kapitel 4.4.1 an.

Durch die Verknüpfung der Zuverlässigkeitsbenotungen mit Zuverlässigkeitswahrscheinlichkeiten im Bewertungskatalog können für das jeweilige Konzept die Zuver-

lässigkeitswahrscheinlichkeiten über alle betrachteten Systemfunktionen zusammengesetzt werden. Somit erhält man für jedes Konzept zunächst sowohl eine Obergrenze als auch eine Untergrenze der abgeschätzten Zuverlässigkeiten über alle Systemfunktionen zum Bewertungszeitpunkt (z.B. x -tausend km, Umdrehungen, ...). Um auf die übliche Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit zu kommen, wird die Zuverlässigkeit mit Hilfe der Gleichung (4.5) in die Ausfallwahrscheinlichkeit umgerechnet.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4.5)$$

Zum grafischen Verlauf der Ober- und Untergrenze der Ausfallwahrscheinlichkeit kommt man, wenn die berechneten Ausfallwahrscheinlichkeiten in die Gleichung der Weibullverteilung eingesetzt werden, um die charakteristische Lebensdauer T zu bestimmen, siehe Gleichung (4.6).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{b_{(2)}}} \quad (4.6)$$

Der Formparameter $b_{(2)}$ wird in dieser frühen Phase der Konzeptbewertung gleich 1 gesetzt; das entspricht Zufallsausfällen. Durch die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen der Ober- und Untergrenze für jedes Konzept ist nun ein Bereich grafisch beschrieben, der den zu erwartenden Ausfallbereich veranschaulicht.

Bei der Festlegung des Formparameters $b_{(2)} = 1$ wird in einem ersten Ansatz von einem mittleren Formparameter ausgegangen. Dabei beschränkt man sich auf Zufallsausfälle; eventuell auftretender Verschleiß bzw. potentielle Frühausfälle werden vernachlässigt.

Wenn man den Betrachtungsfokus bei der Ergebnisanalyse ändert und zum Beispiel den Betrachtungsschwerpunkt von den Zufallsausfällen auf Verschleißausfälle verändert, dann weicht man damit von der „klassischen“ grafischen Ergebnisanalyse ab.

Verschiebt man die Formparameter $b_{(2)}$ in Richtung < 1 , dann ergibt sich eine pessimistischere Betrachtungsweise, besonders für klassische Verschleißteile.

Verschiebt man die Formparameter $b_{(2)}$ in Richtung > 1 , dann ergibt sich eine positivere Betrachtungsweise, insbesondere für die Bauteile, für die ein klassisches Frühausfallverhalten realistisch ist.

Wird bei einem neuen Konzept auf Erfahrungswerte von bekannten Umfängen bzw. konstruktiven Ausführungen von Vorgängerprodukten zurückgegriffen, dann kann von $b_{(2)} = 1$ abgewichen und die tatsächlichen bzw. die angepassten Formparameter können in die Gleichung eingesetzt werden.

Um den Einfluss der technischen Umsetzbarkeit auf die Ausfallwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen, dient diese technische Umsetzbarkeit als Grundlage einer Trendlinie.

Für die Ermittlung der Trendlinie, die für jedes Konzept getrennt bestimmt werden muss, werden den einzelnen technischen Umsetzbarkeiten der untersuchten Konzepte ppm Werte zugeordnet, die sich an dem Bewertungskatalog der FMEA orientieren, siehe Anhang A 1. Werden diese ppm-Werte nun auf den Bezugspunkt, der dem Bezugswert der abgeschätzten Zuverlässigkeit entspricht, bezogen, so entsprechen dann die ppm-Werte den Ausfallwahrscheinlichkeiten zum Bezugszeitpunkt t_{Bezug} . Mit der nun gegebenen Ausfallwahrscheinlichkeit zu einem definierten Zeitpunkt t (hier t_{Bezug}) kann die charakteristische Lebensdauer T der Weibullverteilung mit Gleichung (4.6) berechnet werden, siehe Beispiel Gleichung (4.7).

$$T = \frac{t_{\text{Bezug}}}{\left(-\ln \left(1 - \frac{\text{Ausfälle}}{\text{Anfangsbestand}} \right) \right)^{\frac{1}{b(2)}}} \quad (4.7)$$

Für die Trendlinien gibt es fünf verschiedene prinzipielle Verläufe, die in Bild 4.4 dargestellt sind, vgl. [88].

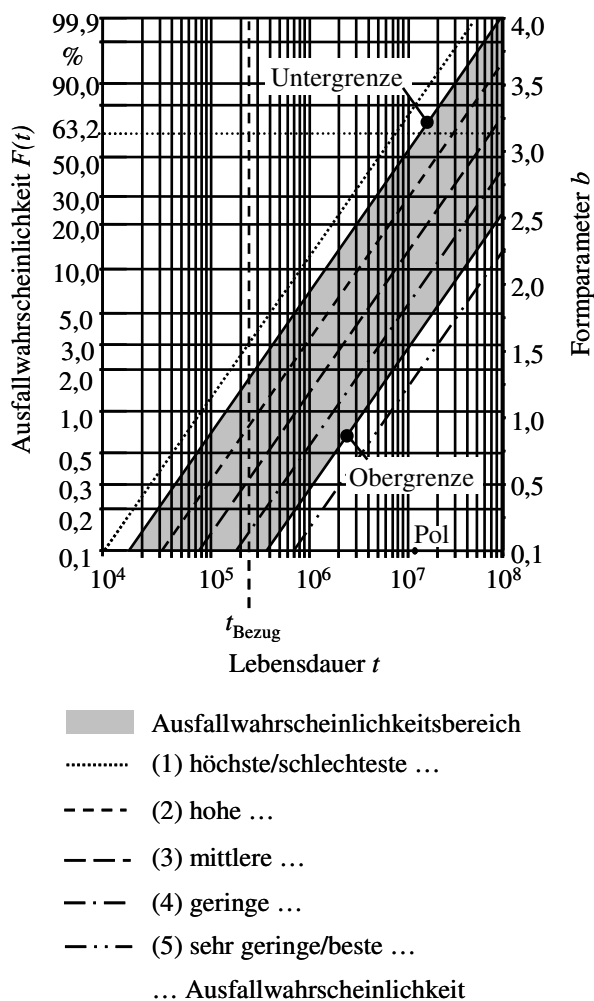


Bild 4.4: Mögliche Trendlinien im konzeptspezifisch ermittelten Zuverlässigkeitsfeld

Die Trendlinie 1 beschreibt den Fall eines technisch schwierig umsetzbaren Konzepts, mit dem die abgeschätzte Ausfallwahrscheinlichkeit (= Obergrenze) nicht bzw. nur sehr schwer erreicht wird. Die tatsächlich zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit liegt zwischen Trendlinie 1 und der Obergrenze der abgeschätzten Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die Trendlinien 2 und 4, die jeweils in direkter Umgebung der Obergrenze bzw. Untergrenze liegen, bestätigen die jeweilige Grenzkurve der abgeschätzten Ausfallwahrscheinlichkeit.

Da sich die Trendlinie 3 zwischen der Ober- und Untergrenze des Ausfallwahrscheinlichkeitsfelds befindet, stellt sie die tatsächlich zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit eines untersuchten Konzepts mit mittlerem Realisierungsschwierigkeitsgrad dar.

Die Trendlinie 5 beschreibt den Fall eines technisch einfach umsetzbaren Konzepts, mit dem die abgeschätzte Ausfallwahrscheinlichkeit (= Untergrenze) sehr leicht erreicht wird. Die tatsächlich zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit liegt dabei zwischen der Trendlinie 5 und der Untergrenze der abgeschätzten Ausfallwahrscheinlichkeit.

4.5 Verifikation der Methode

Die Methode des qualitativen Konzeptvergleichs, einschließlich dem ergänzenden Schritt der Überführung in eine System-FMEA, wurde zur ersten Absicherung in mehreren Projekten am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart und gemeinsam mit verschiedenen Industriepartnern in der Praxis durchgeführt und anhand dieser Beispiele verifiziert.

Bei der Anwendung des qualitativen Konzeptvergleichs wurde besonders bei den Industrieprojekten darauf geachtet, dass die Vorgehensweise und die anschließende Ergebnisanalyse allen Teammitgliedern, die in den Ausarbeitungsprozess eingebunden waren, systematisch und nachvollziehbar vermittelt wurden. Zur Absicherung erfolgten Auswertungen von Evaluationsbögen und zusätzliche Befragungen der Beteiligten nach Projektende.

Die Auswertung hat ergeben, dass bzgl. der Bewertungszahlen eine Anregung bzw. ein Änderungswunsch bestand, der im Weiteren untersucht wurde. Dabei handelte es sich um die Erweiterung der Bewertungsskala. Es wurde vorgeschlagen, die Skala einmal in zehn und ein anderes Mal in nur drei Klassen zu unterteilen. Damit sollte erreicht werden, bei den verschiedenen zur Bewertung anstehenden Konzepten entweder eine detaillierte Differenzierung möglich zu machen (Zehnerskala) oder bei einem geringen Konzeptausarbeitungsgrad einer genaueren Differenzierung und den dabei entstehen-

den Bewertungsschwierigkeiten zu entgehen (Dreierskala). Bei der Untersuchung der Erweiterung bzw. der Begrenzung der Bewertungsmerkmalskala wurden auch die Erfahrungen aus den abgewickelten Projekten berücksichtigt.

Auch die menschlichen Fähigkeiten, eine Entscheidung aufgrund der zur Verfügung stehenden Zahlen und des Detaillierungsgrads der Konzeptausarbeitung in frühen Entwicklungsphasen zu treffen, wurden mit berücksichtigt. Menschen können nach [89] eine Entscheidung, die nicht linear abhängig ist, auf Basis von Bewertungszahlen, nur dann nachvollziehbar treffen, wenn die Anzahl der Bewertungen von 7 ± 2 nicht über- bzw. unterschritten wird.

Unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus den Projekten und der Literatur [89] wird der Bewertungskatalog nicht verändert und die Fünfeinteilung beibehalten. Dazu kommt auch noch die Erkenntnis bzw. die projektspezifische Erfahrung, dass die Ergebnisanalyse gut veranschaulichen konnte, dass es die Kombination der einzelnen Bewertungszahlen ist, die eine detaillierte, aber auch systematische und nachvollziehbare Differenzierung ermöglicht. Die Ergebnisse erfüllten in allen Verifikationsprojekten die an die Methode gestellten Anforderungen und Erwartungen.

4.6 Fazit

Mit Hilfe des neuen Ansatzes zum qualitativen Konzeptvergleich ist es durch den methodischen Ablauf und die Berechnungslogik für die Einzelentwicklungsfähigkeit gelungen, die im Kapitel 3 beschriebenen notwendigen Bedingungen (z.B. Bereitstellung einer schnellen und einfachen Methode zur Konzeptauswahl, Darstellung einer aussagefähigen Ergebniszahl, ...) vollständig zu erfüllen. Mit der Berechnungslogik wird es möglich, konzeptspezifische Entwicklungsfähigkeiten zu berechnen. Dabei werden die definierten Bewertungszahlen Gewichtung, technische Umsetzbarkeit, Kosten-Zeit-Faktor und ggf. abgeschätzte Zuverlässigkeit entsprechend ihrem individuellen Einfluss auf diese Ergebniszahl berücksichtigt. Aus den Einzelentwicklungsfähigkeiten wird eine Bewertungszahl zur Gesamtbeurteilung eines Konzepts ohne Vernachlässigung von Informationen abgeleitet. Mit diesen Kennzahlen kann ein sinnvoller Variantenvergleich und ein Entscheidungsfindungsprozess zielgerichtet gestaltet werden. Mit einer umfassenden Verifikation in zahlreichen Projekten konnten Anwenderfreundlichkeit und Praxistauglichkeit nachgewiesen werden.

5 Koppelung zur FMEA im Produktentwicklungsprozess

Um dem Ziel der Weiterverwendung der Informationen, Daten und Inhalte über den gesamten Produktentwicklungsprozess gerecht zu werden, wird in diesem Kapitel die Möglichkeit der Überführung der Inhalte und der Ergebnisse des qualitativen Konzeptvergleichs in im Produktentwicklungsprozess eingesetzte weiterführende Methoden, wie zum Beispiel in eine Risikoanalyse bzw. in eine FMEA, beschrieben. Die prinzipielle Vorgehensweise wird anhand der Überführung in eine FMEA aufgezeigt. Diese wurde ausgewählt, da es sich bei der FMEA um die Methode handelt, die eine sehr weite Verbreitung und eine sehr große Akzeptanz in der Industrie aufweist.

5.1 Vorgehensweise

Auf der Basis der Inhalte, die im Konzeptvergleich erarbeitet wurden (siehe Beispiel Bild 4.2 oder Anhang A 2), können aus den Funktionsbeschreibungen die beteiligten Bauteile, Komponenten und Systeme abgeleitet und in die entsprechende Spalte im Konzeptvergleichsformblatt eingetragen werden. Durch die Beschreibung des konzeptspezifischen Verhaltens im Fehlerfall können auch die möglichen Fehler, die zu diesem Zeitpunkt bereits erkennbar sind, separat erfasst und in die dafür vorgesehene Tabellenspalte eingetragen werden. Basierend auf den identifizierten Elementen lässt sich die Systemstruktur der FMEA aufbauen. Dabei ist besonders anzumerken, dass durch die Einbeziehung der Systemschnittstellen und Umgebungsbedingungen auch sämtliche Schnittstellen zu benachbarten Bauteilen und Baugruppen in der Struktur bereits abgebildet werden können. Mit Hilfe der Systemanforderungen, die im ersten Schritt des qualitativen Konzeptvergleichs definiert worden sind, lassen sich die Topfunktionen und Topfehlfunktionen des Wurzelements (oberstes Systemelement in der Systemstruktur der FMEA) direkt ableiten. Es sei noch erwähnt, dass das Wurzelement die Bezeichnung der Systembenennung bekommt.

Aufgrund der Zusammenhänge, die sich durch die Zuordnung der jeweiligen konzeptspezifischen Fehlerbeschreibungen ergeben, kann auch die Vernetzung zwischen Fehlerfolge, Fehler und Fehlerursache einfach durchgeführt werden.

Im nächsten Schritt geht es um die Ableitung sinnvoller Bewertungszahlen für die Bedeutung B , die Auftretenswahrscheinlichkeit A und die Entdeckungswahrscheinlichkeit E , siehe [85], [86] und [88]. Um die Bewertungszahl für die Bedeutung B zu erhalten,

wird eine Umrechnung der Gewichtung G_i nach der Gleichung (5.1) durchgeführt.

$$B = G_i \cdot (-8) + 10 \quad (5.1)$$

Mit Hilfe dieser Umrechnungsformel erhält man eindeutige und klar zuordenbare Werte für die Bedeutung B , siehe Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Zuordnung der Bewertungsnote Gewichtung G des qualitativen Konzeptvergleichs zur Bedeutungsnote B der FMEA

Gewichtung		Bedeutung	
0,00	Gesetzesanforderung	10	Sicherheits- und Gesetzesanforderung
0,25	Funktionsanforderung	8 (9)	starke Funktionseinschränkung
0,50	Lebensdauernanforderung	6	Geräuscheinschränkung, Lebensdauer
0,75	Komfortanforderung	4	geringfügige Benutzungseinschränkungen
1,00	keine Anforderung	2	Einschränkung nur mit Fachwissen erkennbar

Eine Besonderheit ergibt sich bei der Umrechnung für $G_i = 0,25$. Dabei kann es sich möglicherweise auch um einen kompletten Systemausfall bzw. einen Liegenbleiber handeln. Im Konzeptvergleich ist eine derartige Differenzierung zunächst nicht notwendig und sinnvoll, da es bei dem Konzeptvergleich in der frühen Entwicklungsphase nicht um die Differenzierung möglicher Fehler, sondern um die prinzipielle Erfassung der Funktionalität geht. Diese lässt sich aber nachträglich einfach durch eine manuelle Anpassung korrigieren, da die Definition für einen Liegenbleiber eindeutig ist.

Im nächsten Schritt gilt es, die Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit A des Fehlers abzuleiten. Prinzipiell ist eine vergleichbare Vorgehensweise wie bei der Ermittlung der Bewertungszahl B möglich. Ziel sollte es aber sein, für die ermittelten Fehler eine optimale Differenzierung in frühen Entwicklungsphasen zu ermöglichen. Daher wird bei der Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit A und zur Erzielung einer Differenzierung mit einer Vergabe von %-Anteilen, bezogen auf die technische Umsetzbarkeit und die Art des speziellen Fehlers, gearbeitet. Vor der Differenzierung wird nach dem gleichen Schema wie für die Bedeutung B die Umrechnung der technischen Umsetzbarkeit in eine systemanforderungszugeordnete $A_{(i,j)}$ -Note durchgeführt, siehe Gleichung (5.2).

$$A_{i,j} = T_{i,j} \cdot (-8) + 10 \quad (5.2)$$

Im nächsten Schritt erfolgt eine Umrechnung in ppm-Werte aus dem hinterlegten Bewertungskatalog, siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: VDA Bewertungskatalog der Auftretenswahrscheinlichkeit A in der FMEA

	Bedeutung B	Auftreten A	Entdeckung E
10	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr gering
9		500.000 – 100.000 ppm	90 %
8	Hoch	Hoch	Gering
7		50.000 – 10.000 ppm	98 %
6	Mittel	Mittel	Mittel
5		5.000 – 1.000 – 500 ppm	99,7%
4			
3	Gering	Gering	Hoch
2		100 – 50 ppm	99,9 %
1	Sehr gering	Sehr gering 1 ppm	Sehr hoch 99,99 %

Durch die zuvor durchgeführte %-Verteilung ist es möglich, die ermittelten ppm-Werte auf die definierten %-Werte aufzuteilen und die Rücktransformation in eine A-Note durchzuführen. Zum besseren Verständnis soll die Ermittlung der einzelnen Auftretenswahrscheinlichkeiten anhand eines kleinen Beispiels aufgezeigt werden.

Aus einer konzeptspezifischen Fehlerbeschreibung konnten drei unterschiedliche Teilfehler ermittelt werden. Die beiden Teilfehler x und y tragen nach Einschätzung der Experten jeweils nur zu 20% zu dem in diesem Beispiel beschriebenen konzeptspezifischen Fehler bei. Der Teilfehler z hingegen hat einen Anteil von 60% am konzeptspezifischen Fehler. Die technische Umsetzbarkeit der betrachteten Funktionen wurde mit $T = 0,75$ bewertet. Mit Gleichung (5.2) ergibt sich somit $A_{i,j} = 4$ für die systemanforderungsbezogene Bewertung. Diese A-Note entspricht 500 ppm. Mit den %-Werten kann nun für die beiden Fehler x und y eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $A = 3$ (20% von 500 ppm ist gleich 100 ppm) und für den Fehler z von $A = 4$ (60% von 500 ppm ist gleich 300 ppm) berechnet werden.

Zur Begründung der Vergabe einer Bewertungszahl ungleich $A_{i,j} = 10$ kann, da die prozentuale Unterteilung der Fehler durch Fachverantwortliche und Experten durchgeführt wird, die Vermeidungsmaßnahme „Erfahrung der Mitarbeiter“ eingefügt werden. Für die Entdeckungsmaßnahmen ist das nicht möglich. Hier kann keine sinnvolle und nachvollziehbare Entdeckungsmaßnahme eingetragen werden und so ergibt sich automatisch die Bewertung für die Entdeckung mit $E = 10$.

Damit ist die Überführung der ersten Informationen mit dem gleichen Detaillierungsgrad, den der qualitative Konzeptvergleich bietet, in eine System-FMEA nachgewiesen, siehe Bild 5.1.

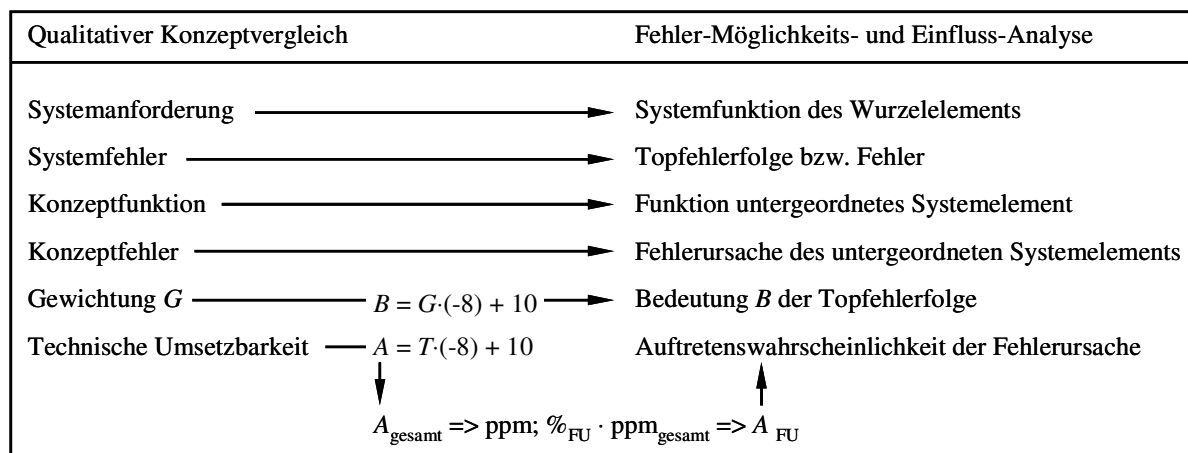


Bild 5.1: Überführung der wichtigsten Inhalte des qualitativen Konzeptvergleichs in die FMEA

Mit Hilfe dieser ersten System-FMEA ist es möglich, und das nach den bisherigen Erfahrungen in der Praxis weit vor dem normal üblichen Start einer FMEA, eine optimale Differenzierung und Priorisierung der Fehler zu ermöglichen. Sie bietet die ideale Basis für die weitere Aktualisierung und stetige Anpassung der FMEA, die hinsichtlich dem weiter fortschreitenden Detaillierungsgrad der Bauteile/Komponenten, der Funktionen und Fehlerfunktionen sowie deren Zusammenhänge durchgeführt werden muss. Ferner kann die aus dem Konzeptvergleich abgeleitete erste System-FMEA dazu genutzt werden, für die in ihr als kritisch identifizierten Bauteile und Baugruppen gezielt in frühen Entwicklungsphasen, mit einer Weiterbetrachtung in einer System-FMEA Produkt zur Komponentenabsicherung zu beginnen.

5.2 Verifikation der Methode

Mit den Konzeptvergleichen in der Verifikationsphase erfolgte auch die Überführung in die FMEA und die Überprüfung auf ihre Übertragung und Anwendbarkeit im weiteren Produktentwicklungsprozess. Im Rahmen der Verifikation wurden unterschiedlichste Konzepte mit unterschiedlichsten Ausarbeitungsgraden untersucht. Um das Verifikationsergebnis nicht zu verfälschen, wurden einige Maßnahmen zur Sicherstellung der Ergebnisse getroffen.

Zum einen wurde in der Verifikationsphase den Projektteilnehmern nur gesagt, dass die Inhalte in eine weiterführende Methode eingearbeitet werden können, um so das Bewertungsverhalten bei der Prozentvergabe nicht zu beeinflussen. Zum anderen wurden die Teilnehmer nicht über die Art und Weise der Ableitung informiert, so dass

auch keine system- und anforderungsübergreifende Vorabpriorisierung durch die Teilnehmer möglich war.

Bei den Projekten, in denen eine umfassende Datenlage gegeben war, konnte ein Abgleich bzgl. der Aussagen durchgeführt werden, der eine sehr gute Übereinstimmung mit den derzeitigen Problemen in der Konzeptphase und der ersten Priorisierung der abgeleiteten System-FMEA ergab. Der qualitative Konzeptvergleich in Kombination mit der Überführung in eine weiterführende FMEA bzw. Risikoanalyse wird von den Anwendern als sehr positiv und gegenüber den anderen Methoden, die bisher eingesetzt werden, siehe Kap. 2, als wesentlicher Vorteil angesehen. Die Ableitung in eine weiterführende Methode, hier speziell in eine System-FMEA, erfüllte in allen Verifikationsprojekten die an die „neue Methode“ gestellten Anforderungen und Erwartungen.

5.3 Fazit

Mit Hilfe der Überführung des qualitativen Konzeptvergleichs in die FMEA ist es gelungen, den in Kapitel 3 beschriebenen Hauptnachteil, dass die erarbeiteten Untersuchungsergebnisse für den nachfolgenden Produktentwicklungsprozess bisher nicht weiter verwendet werden können, zu eliminieren und die generierten Informationen, Daten und Ergebnisse systematisch nachvollziehbar und jetzt in einer FMEA weiterverwendbar zu machen. Dadurch ergibt sich ein erheblicher zeitlicher Nutzen und damit einhergehend auch ein ökonomischer Mehrgewinn. Mit der erweiterten und verbesserten Methode wird eine einheitliche und durchgängige Formulierung erzielt.

6 Verteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen

Aufbauend auf den Ergebnissen einer aus dem qualitativen Konzeptvergleich abgeleiteten und über den gesamten Produktentwicklungszyklus erweiterten bzw. einer neu durchgeführten FMEA wird in diesem Kapitel die Möglichkeit der Nutzung der Fehleranalyse, der Fehlervernetzungen und der Fehlerbewertung als Eingangsinformationen für Lebensdauerverteilungen überprüft und eine sinnvolle Anwendung nachgewiesen. Bei diesen Untersuchungen werden die Eingangsdaten einer System-FMEA bzw. einer System-FMEA Produkt als Ausgangsbasis genutzt. Dabei ergeben sich aber, je nach ausgewähltem FMEA-Typ, Vor- und Nachteile.

Bei einer System-FMEA kann die Fehlerursachenebene, an der die Bewertung direkt angehängt ist, als unmittelbare Eingangsdatenbasis dann genutzt werden, wenn die Fehlerursachen die physikalischen Ausfälle der Bauteile oder Baugruppen beschreiben.

Bei einer System-FMEA Produkt stellt die Fehlerartenebene die gewünschte Information für die Verteilungen zur Verfügung mit dem Nachteil, dass erst über die genauere Betrachtung der Fehlerursachen die relevanten Bewertungen „hochgerechnet“ werden können bzw. müssen. Die physikalischen Ausfälle sind wichtig, da diese in der Beschreibung und der Einbeziehung in die Lebensdauerverteilung die relevanten und greifbaren Ausfälle darstellen, die z.B. in Versuchen oder in Feldausfällen erfassbar sind. Bei der System-FMEA Produkt werden die weitergehenden Ursachen für den physikalischen Ausfall beschrieben und bewertet, wie z.B. die falsche Materialwahl, die fehlerhafte Dimensionierung, usw.. Diese so genannten Merkmale sind nicht direkt aus den Versuchs- und Feldauswertungen von schadhaften Systemen abzulesen, sondern nur über zusätzliche Untersuchungen oder Zuordnungen für eine weitere Nutzung als Eingangsdaten für Verteilungen verwendbar. Da diese Zuordnung in der Regel nicht durchgeführt wird, ist der oben beschriebene Schritt der „Hochrechnung“ auf den physikalischen Fehler notwendig. Für die „Hochrechnung“ werden die ermittelten Fehlerursachen mit ihren Auftretenswahrscheinlichkeitsbewertungen A in die hinterlegten ppm-Werte des Bewertungskatalogs umgerechnet und nach der Boole'schen Logik zusammengefasst. Dabei handelt es sich um ODER-Verknüpfungen und die Fehlerursachen werden addiert.

Bei einer System-FMEA hingegen können durch die Einordnung und die damit ver-

bundene Zuordnung der Bewertungen auf einem höheren Systemlevel keine feineren Abstufungen bei der Ermittlung der Fehlerursachenbewertung generiert werden. Das heißt aber auch, dass die Bewertungen bezogen auf einen physikalischen Ausfall nur den Bewertungsspielraum, der im Bewertungskatalog hinterlegt ist, nutzen können. Dadurch besteht die Gefahr, dass sich eine größere Abweichung in der Prognose zum tatsächlichen Feldverhalten ergeben kann, siehe auch [86], [90], [91] und [92].

Die Vorgehensweise zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsverteilungen für die Prognose des Ausfallverhaltens auf Basis von FMEA-Bewertungen untergliedert sich in folgende Schritte:

- Definition eines Bezugspunkts für die Bewertungsnote Auftretenswahrscheinlichkeit (A-Note) der FMEA,
- Definition des Betrachtungsschwerpunkts in Abhängigkeit von der Bewertungsnote Bedeutung (B-Note) der FMEA,
- Zusammenfassung der A-Noten (je nach FMEA-Typ),
- Überführung der A-Noten in ppm-Werte,
- Ermittlung der Gleichungsparameter eines Bauteils:
 - Formparameter $b_{(2)}$ der Weibullverteilung und
 - charakteristische Lebensdauer T der Weibullverteilung,
- Ermittlung der Gleichungsparameter des Gesamtsystems.

Der wichtigste und grundlegendste Schritt bei dieser Vorgehensweise ist die Ermittlung der Parameter der Verteilung, die in Kapitel 6.1 beschrieben wird. Die Parameter sind für die Überführung in die Weibullverteilung erforderlich. Diese Verteilung bietet, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, für die Anwendung im klassischen Maschinenbau zahlreiche Vorteile. Mit ihr lassen sich über die Variation des Formparameters b die unterschiedlichsten Ausfallverhalten (Früh-, Zufalls- und Verschleißausfälle) beschreiben, die bei einer sinnvollen und vor allem nutzbaren Prognose auf Basis der FMEA zwingend notwendig sind. Wenn diese Parameter nicht berücksichtigt werden, dann ist eine starke Beeinflussung der Prognose und keine Übertragbarkeit bzw. keine Verifikation mit tatsächlichen Daten möglich. Ferner ist bei der Auswahl der Verteilung wichtig, dass eine sehr universelle Verteilung gewählt wird, die es über die Variation nur weniger Parameter ermöglicht, das Ausfallverhalten ziemlich genau abzubilden. Das ist besonders dann wichtig, wenn für die Ermittlung der Parameter nur auf die aus der FMEA zur Verfügung stehenden Informationen zurückgegriffen werden kann und diese nutzbaren Informationen auch noch sehr begrenzt sind. Die Ausfallhäufigkeit und die Zuordnung des Fehlereintritts können damit abgeleitet werden.

Nach der Ermittlung der Ausfallverteilungen bildet eine ausführliche Verifikation den Abschluss dieser Untersuchungen, vgl. die Beschreibungen in Kapitel 6.3. Im Rahmen der Verifikation werden die Aussagen, die aus den FMEA-Ergebnissen generiert werden können, mit tatsächlichen Felddaten verglichen. Die sich ergebenden Abhängigkeiten zwischen FMEA und Felddaten, zwischen Systemkomplexität und Anpassung sowie der Veränderung über den Entwicklungsprozess werden detailliert betrachtet und bewertet.

6.1 Ermittlung der Verteilungsparameter

Im Folgenden wird die Vorgehensweise beschrieben, mit deren Hilfe eine Prognose des Systemausfallverhaltens möglich wird. Die Grundlage dafür ist in diesem Fall die oben beschriebene System-FMEA bzw. die System-FMEA Produkt, die nach Kapitel 2 bzw. beispielhaft in [27] bis [29] erstellt wird.

Um die gewünschte Prognose zu ermöglichen, ist eine kleine Ergänzung bei der Erstellung und Bewertung der FMEA notwendig und zu berücksichtigen. Bei der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit A ist darauf zu achten, dass die Bewertung einen Bezugspunkt bekommt, um aus der qualitativen Bewertung eine Wahrscheinlichkeit zu erzeugen. Mit Hilfe dieses Bezugspunkts, z.B. Laufleistung, Lastwechselzahl oder Laufzeit, wird dies möglich. Der im Bewertungskatalog hinterlegte ppm-Wert wird auf einen Bezugswert bezogen und kann dann einer Wahrscheinlichkeit eindeutig zugeordnet werden. Bei der Festlegung des Bezugspunkts ist sorgfältig darauf zu achten, dass dieser für alle Systemelemente möglichst der gleiche ist. Das ist aber keine unbedingte Muss-Forderung.

Der Vorteil eines einheitlichen Bezugspunkts besteht darin, dass sich die weiteren Untersuchungen und die Berechnung des Systemverhaltens einfacher gestalten. Der Bezugspunkt spiegelt in der Regel das Auslegungsziel der Konstruktion/Berechnung wider; zum Beispiel für ein Getriebe, einen Motor oder ein Fahrzeug können das $t_{\text{Bezug}} = 200.000$ km Laufleistung sein. Mit der Einführung dieses Bezugspunkts ist es möglich, die Bewertungszahlen der Ausfallwahrscheinlichkeit A der FMEA mit den hinterlegten ppm-Werten mit den Werten für die Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t)$ zu diesem definierten Zeitpunkt gleich zu setzen. Mit dieser Vorgehensweise wird bereits der erste Punkt der Verteilung zur Beschreibung des Systemverhaltens eindeutig festgelegt.

Mit Hilfe der FMEA werden mehrere verschiedene Fehlerfolgen betrachtet und bewertet. Es ist daher notwendig festzulegen, welche Art von Auswertung durchgeführt werden soll, d.h. welche verschiedenen Fehlerfolgen und Bedeutungsbewertungen in die weiteren Betrachtungen mit einbezogen werden sollen. Durch diese Festlegung

wird es auch möglich, dass Fehler, die als Fehlerfolge z.B. „Komfort wird nicht gewährleistet“ oder „geräusch- und vibrationsarmer Betrieb ist nicht gewährleistet“ haben, als Ausfall definiert werden. Wird eine solche Festlegung getroffen, dann spiegelt die sich ergebende Verteilung eine Prognose der auftretenden Beanstandungen wieder.

Im Folgenden wird eine Beschränkung auf die tatsächlichen Ausfälle vorgenommen, d.h. die Bauteile werden im Betrieb beschädigt und führen zur vollständigen Nichtfunktion des Bauteils bzw. des betrachteten Systems. Diese Ausfälle lassen sich aus der FMEA einfach und eindeutig herauslesen, indem man die Topfehlfunktionen (Fehler am Wurzelement) mit einer Bewertungszahl von $B = 9$ (wenn $B = 9$ als Liegenbleiber definiert ist) betrachtet. Über die logische Vernetzung von der Fehlerfolge bis hin zur Fehlerursache im Fehlernetz der FMEA können dann die Zusammenhänge ausgewertet werden. Für die so ermittelten Fehlerursachen werden Auftretenswahrscheinlichkeitsbewertungen A in die hinterlegten ppm-Werte umgerechnet und komponentenweise sowie fehlerbezogen zusammengefasst. Der Begriff „fehlerbezogen“ greift hier die vorherige Beschreibung auf und bedeutet, dass alle Fehlerursachen auf physikalische Fehler zusammengefasst werden. Mit den fehlerbezogenen ppm-Werten kann nun in die Gleichung (2.11) gegangen werden. Das soll an einem Zahlenbeispiel nochmals aufgezeigt werden.

$$\text{Mit } 1000 \text{ ppm bei } t_{\text{Bezug}} = \frac{1000 \text{ Ausfälle}}{1000000 \text{ Teile}} = 0,001$$

$$\text{wird } F(t_{\text{Bezug}}) = 0,001 = 1 - e^{-\left(\frac{t_{\text{Bezug}}}{T}\right)^{b(2)}}$$

Das Zahlenbeispiel zeigt detailliert, dass der Gleichung (2.11) der Weibullverteilung für die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ die mit Hilfe des Bezugspunkts berechneten Werte, die sich aus den umgerechneten ppm-Werten der FMEA ergeben, zugewiesen werden können. Das Zahlenbeispiel zeigt auch, dass die beiden Parameter $b_{(2)}$ und T der Weibullverteilung die einzigen Unbekannten der Verteilung darstellen. Es ist aber nicht möglich, eine weitere Grundgleichung aus den FMEA-Ergebnissen abzuleiten, um daraus dann ein Gleichungssystem aufzubauen, mit dem die beiden Parameter rechnerisch bestimmt werden können. Daher wird im Folgenden detailliert auf die Bestimmung der beiden Parameter, des Formparameters b und der charakteristischen Lebensdauer T , sowie der Rahmenbedingungen eingegangen.

6.1.1 Ermittlung des Formparameters b

Aufgrund der Eigenschaften, die der Formparameter b in der Weibullverteilung einnimmt, wird zuerst auf diesen Parameter eingegangen. Der Formparameter b gibt den prinzipiellen Verlauf der Weibullverteilung vor und definiert das jeweilige Ausfallver-

halten. Für $b < 1$ können Frühausfälle, für $b = 1$ können Zufallsausfälle und für $b > 1$ können Verschleißausfälle beschrieben werden. Diese grundlegenden Eigenschaften werden bei der Auswahl des Formparameters aus der FMEA berücksichtigt. Aufgrund von verbalen Beschreibungen ist es möglich, eine erste Zuordnung der Systemelemente und ihrer Fehlerursachen in diese drei Hauptunterteilungen vorzunehmen. Der Formparameter ist ein Parameter, der sich in diesen Fällen leicht abschätzen lässt. Diese Abschätzungen werden auch im Falle der Auswertungen des tatsächlichen Ausfallverhaltens gemacht. Wichtig ist, dass für einige Maschinenelemente bereits aussagekräftige Anhaltswerte für den Formparameter b in der Literatur [2], [93] angegeben sind, die zeigen, in welchen Bereichen diese in der Regel liegen. Dabei sind einige Werte, die in der Literatur aufgeführt und in [2] beschrieben werden, durch zahlreiche Versuche für verschiedene Maschinenkomponenten abgesichert und als Anhaltspunkte für den Formparameter $b_{(3)}$ der dreiparametrischen Weibullverteilung bekannt, siehe auch [94] und Bild 6.1.

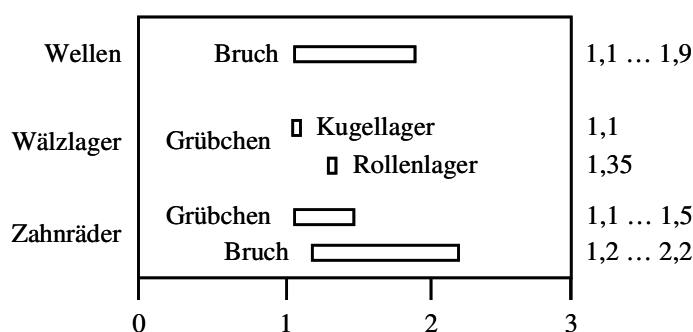


Bild 6.1: Formparameter $b_{(3)}$ der dreiparametrischen Weibullverteilung für einige ausgewählte Maschinenelemente nach [2]

Bei genauer Betrachtung von Bild 6.1 sieht man, dass z.B. bei Zahnrädern der Formparameter der dreiparametrischen Weibullverteilung für Grübchenbildung zwischen 1,1 bis 1,5 je nach Höhe der Belastung liegt. Bei geringer Belastung wäre $b = 1,1$ und bei hoher Belastung wäre $b = 1,5$ zutreffend. Dieser grundsätzliche Zusammenhang zwischen Belastungshöhe und Größe des Formparameters gilt auch für die anderen Bauteile und ist prinzipiell auch auf die Formparameter der zweiparametrischen Weibullverteilung übertragbar.

Wird nun eine zweiparametrische Verteilung gewählt, wie es für die Vorgehensweise der Ableitung von Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen notwendig ist, dann ist der Wert des Formparameter $b_{(2)}$ höher als der der dreiparametrischen. Die Formparameter der dreiparametrischen Verteilung lassen sich also nicht direkt in die zweiparametrische Weibullverteilung einsetzen. Sie müssen vorher auf die zweiparametrische Verteilung umgerechnet werden.

Für die Umrechnung, siehe [92], macht man sich den prinzipiellen Zusammenhang des Faktors f_{tB} zu Nutze, der das Verhältnis von ausfallfreier Zeit t_0 zur B_{10} -Lebensdauer darstellt. Die B_{10} -Lebensdauer ist die Lebensdauer, bei der 10% der Teile ausgefallen sind. Es gilt:

$$f_{tB} = \frac{t_0}{B_{10}} \quad (6.1)$$

Der Faktor f_{tB} wird herangezogen, weil die Absolutwerte von T (charakteristische Lebensdauer) und t_0 (ausfallfreie Zeit) unterschiedlich sein können, siehe Bild 6.2.

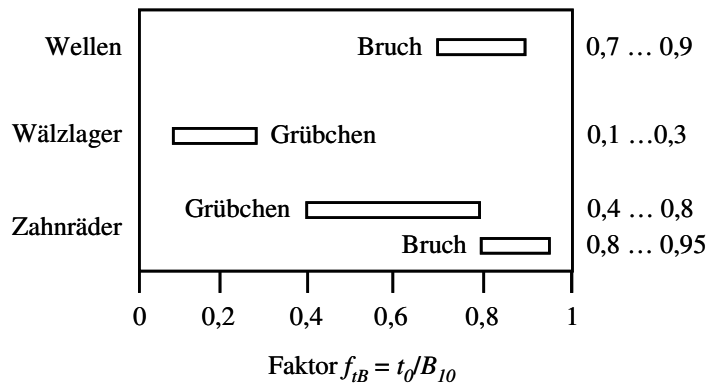


Bild 6.2: Faktor f_{tB} der dreiparametrischen Weibullverteilung für einige ausgewählte Maschinenelemente nach [2]

Mit den Ergebnissen der FMEA ist man in der Lage, einen definierten Punkt der Weibullverteilung zu bestimmen. Dieser Punkt entspricht dann einer B_x Lebensdauer, d.h. zu einem definierten Zeitpunkt t (hier t_{Bezug}) ist die dazugehörige Ausfallwahrscheinlichkeit x . Mit diesem Zusammenhang lässt sich dann die B_{10} -Lebensdauer berechnen, siehe Gleichung (6.2).

$$B_{10} = \frac{B_x}{(1 - f_{tB}) \cdot \sqrt[3]{\frac{\ln(1-x)}{\ln(0,9)}} + f_{tB}} \quad (6.2)$$

mit

$$B_x \equiv t_{\text{Bezug}} \quad \text{und}$$

$$x = \frac{y}{1.000.000} \quad (\equiv y \text{ ppm})$$

Die charakteristische Lebensdauer T sowie die B_{10} -Lebensdauer der dreiparametrischen Weibullverteilung müssen zudem Punkte der zweiparametrischen Weibullverteilung sein.

In diesem Fall entspricht die Kurve der zweiparametrischen Weibullverteilung annähernd der Kurve der dreiparametrischen Verteilung. Die charakteristische Lebensdauer T kann dabei mit der Gleichung (6.3) bestimmt werden.

$$T = \frac{t - f_{tB} \cdot B_{10}}{\left(-\ln \left(1 - \frac{\text{Ausfälle}}{\text{Anfangsbestand}} \right) \right)^{\frac{1}{b_{(3)}}}} + f_{tB} \cdot B_{10} \quad (6.3)$$

Durch Einsetzen der charakteristischen Lebensdauer T aus Gleichung (6.3) und der B_{10} -Lebensdauer aus Gleichung (6.2) der dreiparametrischen Weibullverteilung ergibt sich der Formparameter $b_{(2)}$ der zweiparametrischen Verteilung nach Gleichung (6.4), siehe [92].

$$b_{(2)} = \frac{\ln(-\ln(0,9))}{\ln\left(\frac{B_{10}}{T}\right)} \quad (6.4)$$

Mit Hilfe der Umrechnung des Formparameters für die dreiparametrische Verteilung in den Formparameter für die zweiparametrische Verteilung und aufgrund von Anwendererfahrungen sowie Literaturangaben, u.a. [2], ist es möglich, unter Berücksichtigung der Fehler- bzw. Fehlerursachenbeschreibung in der FMEA, eine Aussage über den Formparameter $b_{(2)}$ der zweiparametrischen Weibullverteilung zu machen.

6.1.2 Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T

Nach Bestimmung des Formparameters $b_{(2)}$ der zweiparametrischen Weibullverteilung ist noch der Parameter der charakteristischen Lebensdauer T zu ermitteln. Werden die aus der FMEA bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit für den festgelegten Bezugszeitpunkt zusammen mit dem abgeschätzten Formparameter $b_{(2)}$ in die Gleichung (2.11) eingesetzt, dann ist es mathematisch möglich, durch Umstellung der Gleichung die charakteristische Lebensdauer T zu bestimmen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass aus der unendlichen Menge an Verteilungen, die durch den Punkt gehen, der durch die Angaben aus der FMEA und dem gewählten Bezugszeitpunkt festgelegt ist, die Verteilung beschrieben werden kann, die das in der FMEA angezogene Fehlerbild oder den physikalischen Fehler realitätsnah abbildet. Damit wird vermieden, dass eine zufällige Verteilung zur Beschreibung des Sachverhalts herangezogen wird.

Die nach der charakteristischen Lebensdauer T aufgelöste Verteilung der zweiparametrischen Weibullverteilung ist in Gleichung (6.5) angegeben.

$$T = \frac{t}{(-\ln(1 - F(t)))^{\frac{1}{b_{(2)}}}} \quad (6.5)$$

mit

$$F(t) = \frac{\text{Ausfälle}}{\text{Anfangsbestand}} \quad \text{und} \quad t = t_{\text{Bezug}}$$

Zur Verdeutlichung sei nochmals darauf hingewiesen, dass $F(t)$ hier speziell aus den ppm-Werten der FMEA-Bewertung abgeleitet wird, d.h. der Anteil von fehlerhaften Teilen auf eine Million bezogen wird und dabei der Anteil der fehlerhaften Teile den Ausfällen und die eine Million Teile dem Anfangsstand entsprechen.

Auf diese Art und Weise lassen sich für jedes Bauteil, jede Baugruppe und jedes Subsystem, für die die möglichen physikalischen Fehler mit den dazugehörigen Bewertungen untersucht werden, die entsprechenden Weibullverteilungen ermitteln. Für das Gesamtsystem lässt sich die Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit nach der Boole'schen Theorie berechnen.

Da bei einem in der FMEA aufgeführten Fehler bzw. den Fehlerursachen davon ausgegangen werden muss, dass dieser zum Hauptevent der Topfehlerfolgen führt, liegt eine Serienstruktur der Bauteile bzw. der Systemkomponenten vor. Dabei handelt es sich um eine ODER-Verknüpfung. Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems erfolgt dann mit der Gleichung (2.15). Für die Weibullverteilung ist es sinnvoll, die Gleichung (2.15) für die Systemberechnung zu logarithmieren, da die Exponenten dann nur noch addiert werden müssen, siehe Gleichung (6.6):

$$-\ln R_s(t) = \left(\frac{t}{T_1}\right)^{b_{(2)1}} + \left(\frac{t}{T_2}\right)^{b_{(2)2}} + \dots + \left(\frac{t}{T_{n-1}}\right)^{b_{(2)n-1}} + \left(\frac{t}{T_n}\right)^{b_{(2)n}} \quad (6.6)$$

Diese Gleichung lässt sich nur numerisch lösen. Für das System entsteht dabei nur in Ausnahmefällen wieder eine Weibullverteilung.

Bei den weiteren Untersuchungen wird die Kurve für das Systemausfallverhalten einfachheitshalber, ohne wesentliche Beeinflussung der Ergebnisse, wieder durch eine Weibullverteilung angenähert. Die Verteilungsparameter werden für die so angenäherte Systemverteilung bestimmt und angegeben.

6.2 Verifikation der Methode

Das oben beschriebene methodische Vorgehen wurde ausführlich anhand mehrerer FMEAs und den dazugehörigen Felddaten verifiziert. Dabei wurden die zur Verfügung stehenden Felddaten mit Hilfe des Sudden Death Verfahrens ausgewertet.

Für die Auswertung von Versuchsdaten ist es wichtig, eine Unterscheidung zwischen vollständigen und unvollständigen Daten durchzuführen. Bei den vollständigen Daten sind zu allen im Test befindlichen Bauteilen die Ausfallzeiten bzw. Laufzeiten bekannt. Bei den unvollständigen Daten sind nur die Daten zu den ausgefallenen Bauteilen bekannt. Über die nicht ausgefallenen Bauteile sind keine lebensdauerrelevanten Informationen vorhanden.

Hier wird nur auf die Auswertung von unvollständigen Daten eingegangen, da Felddaten, die zum Abgleich bzw. zum Vergleich der Ergebnisse verwendet werden sollen, meist unvollständige Daten sind. Im Folgenden wird daher kurz auf die Grundlagen der Sudden Death Testing-Methode, die häufig zur Auswertung von unvollständigen Daten verwendet wird, eingegangen.

6.2.1 Sudden Death Testing

Bei der Sudden Death Testing-Methode, siehe [2] und [95], werden alle zu untersuchenden Teile in Prüflose mit gleicher Teilezahl aufgeteilt. Die einzelnen Prüflose werden dann unter gleichen Bedingungen so lange getestet, bis in jedem Prüflos jeweils das erste Testteil ausfällt. Damit sind die Laufzeiten bis zum jeweils ersten Ausfall bekannt. Die Ergebnisse werden danach grafisch oder rechnerisch ausgewertet. Ferner ist es so auch möglich, eine Laufleistung zu berücksichtigen. Das Verfahren kann auch zur Auswertung von Felddaten eingesetzt werden.

6.2.1.1 Grafische Auswertung

Bei der Auswertung von Felddaten muss zu den jeweiligen Ausfällen $n_f(t)$ und den zugehörigen Ausfallzeiten t_f auch die in einem bestimmten Zeitraum produzierte Teilezahl n bekannt sein. Mit diesen Angaben kann die Teilemenge k , die der Prüflosgröße entspricht, nach Gleichung (6.7) bestimmt werden.

$$k = \frac{n - n_f(t)}{n_f(t) + 1} + 1 \quad (6.7)$$

Mit der Tabelle für Medianwerte bei vorgegebenem Stichprobenumfang (vgl. Anhang A 4) entsteht nach [2] die Gerade der ersten Ausfälle im Weibullwahrscheinlichkeitspapier.

Alternativ können die Werte auch mit der folgenden Gleichung (6.8) berechnet werden.

$$F(t_i) = \frac{i - 0,3}{n_f + 0,4} \cdot 100\% \quad (6.8)$$

Der Formparameter b der Weibullgeraden für die Teilmenge einer Stichprobe ist gleich dem Formparameter b der Weibullgeraden für die gesamten Stichproben. Deshalb ist die Gerade der Grundgesamtheit parallel verschoben zu der Geraden der ersten Ausfälle. Die Verschiebung ergibt sich dadurch, dass dem ersten Ausfall des Prüfloses eine Ausfallwahrscheinlichkeit nach Gleichung (6.9) zugeordnet ist. Als repräsentativer Zeitwert für diesen Ausfall wird der Median, also der 50% Wert, der ersten Ausfälle genommen. Durch diese beiden Bedingungen wird ein erster Punkt der Geraden der Grundgesamtheit definiert und die Gerade kann parallel verschoben werden. Es gilt:

$$F_1^* = \frac{1 - 0,3}{k + 0,4} \quad (6.9)$$

Die Vorgehensweise ist schematisch in Bild 6.3 dargestellt.

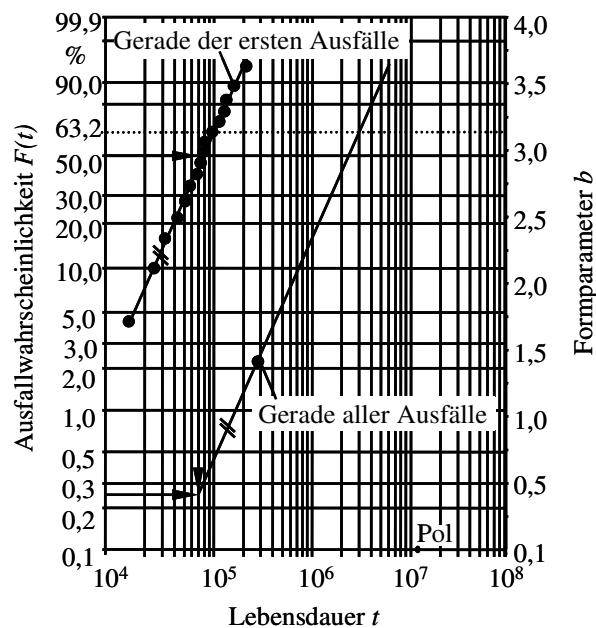


Bild 6.3: Sudden Death Verfahren nach [2]

6.2.1.2 Rechnerische Auswertung

Über die rechnerische Auswertung kann die Ausfallwahrscheinlichkeit genauer bestimmt werden. Dabei werden zu den Ausfällen nach [2] die hypothetischen Rangzahlen gebildet. Eine Definition für Rangzahlen und weitere Erklärungen können [2] entnommen werden.

Die hypothetischen Rangzahlen ergeben sich aus den Formeln (6.10) und (6.11). Dabei wird die neue Rangzahl aus der Rangzahl der vorherigen plus Zuwachs mathematisch wie folgt gebildet.

$$j(t_j) = j(t_{j-1}) + N(t_j) \quad (6.10)$$

$$N(t_j) = \frac{n + 1 - j(t_{j-1})}{1 + n - \text{davorliegende Teile}} \quad (6.11)$$

Zur Ermittlung der ersten Rangzahl ist die nullte Rangzahl $j(0) = 0$ erforderlich. Mit den Rangzahlen können die Ausfallwahrscheinlichkeiten nach Gleichung (6.12) bestimmt werden.

$$F(t_j) = \frac{j(t_j) - 0,3}{n + 0,4} \quad (6.12)$$

6.2.1.3 Sudden Death Testing mit Laufleistungsverteilung

In den vorangegangenen Kapiteln 6.2.1.1 und 6.2.1.2 wurden die nicht ausgefallenen Teile gleichmäßig vor, zwischen und nach den Ausfällen verteilt. Bei Fahrzeugen beispielsweise gilt diese gleichmäßige Verteilung nicht. Hier ist von einer Normalverteilung der Laufleistung auszugehen. Dabei haben nur wenige Fahrzeuge eine geringe Laufleistung, viele Fahrzeuge eine mittlere und wiederum nur wenige Fahrzeuge eine hohe Laufleistung. Bei der Auswertung von Felddaten und besonders bei der hier durchgeführten Verifikation mit Felddaten von Fahrzeugen wird dieser Umstand mit berücksichtigt. Die nicht ausgefallenen Fahrzeuge werden über die Laufleistungsverteilung vor, zwischen und nach den ausgefallenen Fahrzeugen nach einem Verfahren nach [2] verteilt. Die Fahrstrecke wird dazu in Klassen aufgeteilt. Die Laufleistungsverteilung $L(t)$ ist eine Summenhäufigkeitsverteilung und es kann der prozentuale Anteil der Fahrzeuge als Klassenobergrenze ermittelt werden. Dazu wird die Differenz vom Wert der Obergrenze der Klasse zum Wert der Obergrenze der vorherigen Klasse $j-1$ gebildet. Es ergibt sich die jeweilige Klassenaufteilung nach Gleichung (6.13) wie folgt:

$$l(t_j) = L(t_j) - L(t_{j-1}) \quad (6.13)$$

Mit der Summenhäufigkeit $L(0) = 0$ ergibt sich ein kleiner, aber vernachlässigbarer Fehler. Die so entstehende Einzelhäufigkeit, multipliziert mit der Anzahl der nicht schadhafte Teile ergibt die Anzahl der nicht schadhafte Teile in der jeweiligen Klasse. Zusätzlich wird die Anzahl der schadhafte Teile in dieser Klasse über die zur Verfügung stehenden Daten ermittelt. Mit den Gleichungen (6.10), (6.11) und (6.12) kann wieder die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden.

6.2.2 Verifikation mit Sudden Death Testing

Die Verifikation mit Hilfe der Sudden Death Testing-Methode mit Laufleistungsverteilung und der Abgleich mit den aus den FMEAs abgeleiteten Verteilungen liefert den Nachweis, dass diese prinzipielle Vorgehensweise es ermöglicht, eine sichere Prognose bezüglich des Feldausfallverhaltens auf Basis der Fehlerzusammenhänge und Fehlerbewertungen, die in der FMEA im Vorfeld durchgeführt wurden, zu erstellen. Bei der Auswertung der Felddaten und der FMEA ist ein jeweils eindeutiger Trend zu erkennen. Die Analyse der Trends zeigt, dass das jeweilige Ausfallverhalten, das sich aus der FMEA ableitet, für den betrachteten Anwendungsfall (Branche) und das untersuchte System gegenüber dem tatsächlichen Feldverhalten deutlich positiver ausfällt. Dieser prinzipielle Zusammenhang ist in Bild 6.4 dargestellt.

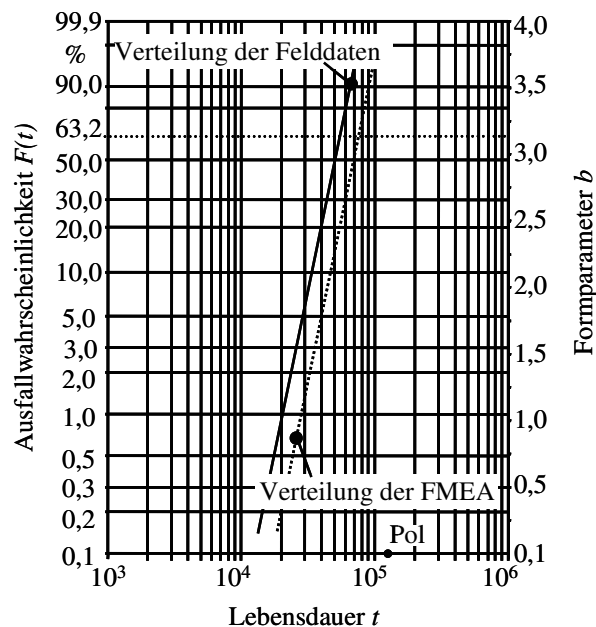


Bild 6.4: Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen auf Basis von Felddaten und FMEAs

Der hier dargestellte Zusammenhang verändert sich mit den unterschiedlichen Bearbeitungsständen, die es in der FMEA gibt, vom Prinzip her nicht und ist bei den zahlreichen unterschiedlichen Systemen, die bearbeitet wurden, grundlegend immer vorhanden. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass zwischen dem tatsächlichen Feldausfallverhalten und den FMEA basierten Systemverteilungen ein Zusammenhang besteht, dass aber je nach Systemkomplexität auch Abweichungen zwischen den beiden Verteilungen auftreten können. Der Zusammenhang zwischen Komplexität (k_S) und Abweichung wird benutzt, um einen Anpassungsfaktor (f_A) auf die endgültige Systemverteilung, die auf der Basis der FMEA-Ergebnisse errechnet wurde, zu ermitteln, siehe [86], [90] und [92].

Der Anpassungsfaktor, in Bild 6.5 dargestellt, ist so ausgeführt, dass mit einer gewissen Sicherheit eine konservative Prognose bezüglich der Lebensdauervorhersage möglich wird.

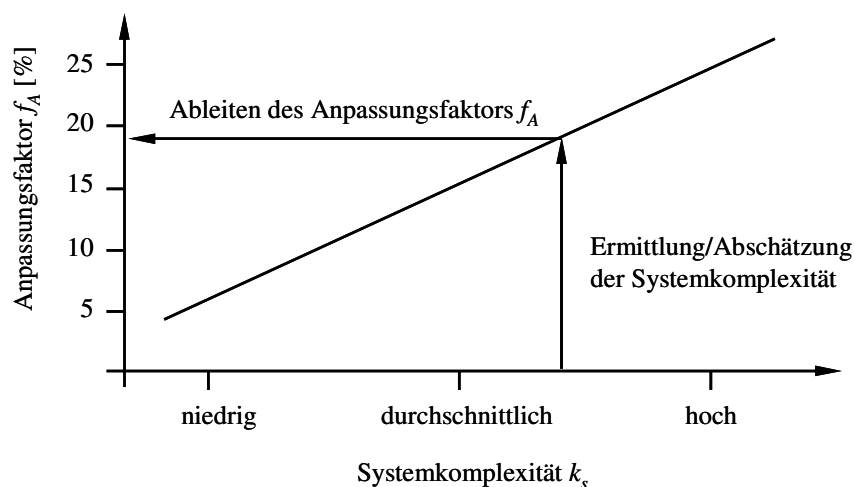


Bild 6.5: Zusammenhang zwischen Systemkomplexität k_s und Anpassungskorrektur f_A

Dazu wird die Kurve des Ausfallverhaltens so weit verschoben, dass die Systemkurve der FMEA basierten Verteilung rechts neben der Verteilung der Felddaten verläuft. In Bild 6.6 ist die aus Bild 6.4 bekannte Verteilung der FMEA, verrechnet mit dem entsprechenden Anpassungsfaktor, eingezeichnet.

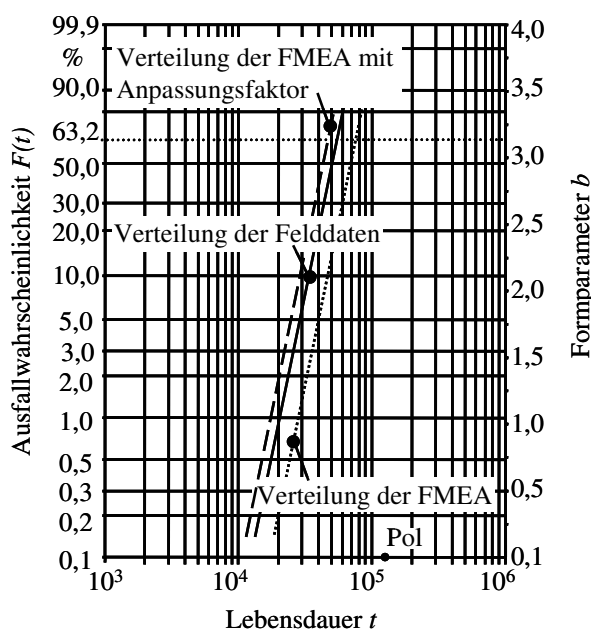


Bild 6.6: Angepasste Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen auf Basis von Felddaten und FMEAs

Mit der Anpassungskorrektur gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung, dass die Veränderungen bei geringen Verbesserungen bei den Auftretenswahrscheinlichkeitsbewertungen A über dem gesamten Aktualisierungsprozess sich auf die Aussage-

genauigkeit so gut wie nicht auswirken. Werden aber Bewertungssprünge von mehr als drei bis vier Bewertungszahlen erforderlich, dann ergibt sich ein deutlicher Einfluss auf die Prognosegenauigkeit. Die Festlegung der Bewertungssprünge ist abhängig von den hinterlegten ppm-Werten. Die Prognosegenauigkeit wird dadurch beeinflusst. Der oben dargestellte Zusammenhang führt immer zu einer etwas konservativeren Prognose und kann folglich als unkritisch angesehen werden.

6.3 Fazit

Mit Hilfe der Prognosemöglichkeiten auf Basis von FMEA-Ergebnissen ist es gelungen, die in Kapitel 3 beschriebenen Nachteile (Ergebnisse erhält man erst sehr spät im Entwicklungsprozess nach Abschluss von Tests) zu eliminieren und die Informationen sowie die dargestellten Fehlerzusammenhänge systematisch und nachvollziehbar nutzbar zu machen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, frühzeitig Prognosen über das Ausfallverhalten zu machen und in Iterationsschleifen das Systemverhalten bereits vor der Durchführung teurerer Tests zu optimieren.

7 Integration der Mehrfachfehlerbetrachtung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die qualitative Zuverlässigkeitsabsicherung über den gesamten Produktentwicklungsprozess beschrieben. In diesem Kapitel wird eine Ergänzung der zuvor beschriebenen methodischen Vorgehensweise und der dazu gehörigen Arbeitsschritte aufgezeigt, die den sich ändernden Rahmenbedingungen und dem zunehmenden Vernetzungsgrad bei Neuentwicklungen, besonders im Bereich der Mechatronik, Rechnung trägt. Bei mechatronischen Entwicklungen, die eine Verbindung aus mechanischen und elektronischen Bauteilen sowie einer programmierbaren Steuereinheit darstellen, muss deren Interaktion in einer Risikoabsicherung mit einbezogen und berücksichtigt werden. Dies geschieht nicht nur beschränkt auf die funktionalen Bereiche, sondern wird auch ausgedehnt auf die potentiellen Fehlfunktionen. Bei früheren Produktentwicklungen waren diese Interaktionen noch nicht so ausgeprägt und man konnte sich daher auf Einfachfehlerbetrachtungen beschränken. Diese Vorgehensweise ist auch heute noch in den meisten Fällen absolut ausreichend. Es gibt aber zunehmend mögliche Fehlerkombinationen, die in Verbindung oder in Wechselwirkung mit der Software detaillierter untersucht und betrachtet werden müssen. Da die FMEA-Methode eine Kombination von Fehlern nicht behandeln kann, ist in der Industrie daher verstärkt ein Trend zu beobachten, die Fehlerbaumanalyse insbesondere zur Untersuchung von Mehrfachfehlern einzusetzen, siehe Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Auszug Auswahlmatrix Methoden in der Entwicklungsphase

	Komponentenbeschreibung/-vernetzung	Funktionsbeschreibung/-vernetzung	Fehlerbeschreibung/-vernetzung	Mehrfachfehlerbetrachtung	Maßnahmenbeschreibung	Gewichtung/Bewertung	Aufwand für die Durchführung	Entwicklungsprozess begleitend	Erfüllungsgrad [%]
Fehler-Möglichkeit- und Einfluss-Analyse	3	3	3	0	3	2	1	3	75,0
Fehlerbaumanalyse	2	0	3	3	0	1	1	2	50,0
Mehrfachfehlerbertrachtung in der FMEA	3	3	3	3	3	2	1	3	87,5

Die Auswirkungen auf die ursprünglichen Betrachtungen zur Ermittlung der Methodeneigenschaften, die in den Grundlagen dieser Arbeit durchgeführt wurden, sind in Tabelle 7.1 zusammenfassend dargestellt. Der Erfüllungsgrad der FMEA mit Mehrfachfehlerbetrachtung ist wesentlich höher und liegt bei 87,5%.

Zur Absicherung der Einfachfehler wird weiterhin die FMEA genutzt, da sie den entscheidenden Vorteil bietet, alle Risiken eindeutig zu identifizieren und durch Festlegung geeigneter Abhilfemaßnahmen (Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen) das Ausfallrisiko zu minimieren. Wird die Methode „Fehlerbaumanalyse“ für sich allein durchgeführt, dann hat man das Problem, dass die separaten Fehlfunktionen bzw. Ausfälle nicht mehr direkt bzgl. ihres Risikopotentials identifiziert und priorisiert werden können. Damit können die Fehlfunktionen bzw. Ausfälle bei der Fehlerbaumanalyse auch nicht mehr mit definierten Maßnahmen zur Risikominimierung versehen werden.

Grundlegende Vergleiche zwischen den unterschiedlichsten qualitativen Methoden und umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen sind unter anderem in Kapitel 3 („Allgemeiner Lösungsansatz“) oder in der Literatur [9], [10] und [11] zu finden. Bei der Auswertung dieser Betrachtungen wird ersichtlich, dass die FMEA trotz des oben angeführten Nachteils, dass nur Einfachfehler betrachtet werden können, sehr viele deutliche Vorteile hat und mit gezielter Methodenerweiterung (Integration der FTA Logik in die FMEA) auch ein Potential besitzt, den Systemnachteil systematisch und nachvollziehbar zu umgehen, siehe [96]. Ein weiterer Ansatz, wie mit Mehrfachfehlern in vorselektierter Form umzugehen ist, wird in [97] dargestellt.

7.1 Grundlagen

Die Methoden-Vergleichsanalyse zeigt, dass die FMEA nur Einfachfehler betrachtet und folglich daraus nur die entstehenden Systemfolgen bzw. Topereignisse ableitet. Werden Mehrfachfehler betrachtet, dann können völlig neue, bisher nicht berücksichtigte Systemfehlerfolgen bzw. Topfehlerfolgen entstehen. Diese können bis jetzt nur mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse abgedeckt werden, siehe z.B. [78] und [79]. Ziel ist es, die Potentiale der ähnlichen Vorgehensweisen der beiden Methoden FTA und FMEA, wie sie in der Praxis durchgeführt werden, so zu analysieren und gegebenenfalls so zu kombinieren, dass sich entweder eine sinnvolle Schnittstelle zwischen den beiden Methoden oder eine Mehrfachfehlerbetrachtung in der FMEA ergibt. Das Ziel ist auch in diesem Fall wieder, durch leichte Modifikationen die Basisergebnisse und -daten der FMEA zu nutzen.

Die Analyse der Literaturstellen [9] bis [11] zeigt, dass die FMEA die am umfangreichsten und den Produktentwicklungszyklus am besten begleitende Methode darstellt. Mit der FMEA können Fehler priorisiert und Abhilfemaßnahmen generiert werden. Darüber hinaus wird mit den vorangegangenen Untersuchungen und Ergebnissen dieser Arbeit die Möglichkeit geschaffen, auch eine Prognose bezüglich des System- und Bauteilverhaltens abzuleiten. Die Probleme, die dabei gelöst werden müssen, sind in Bild 7.1 dargestellt. Die aufgezeigten Zusammenhänge wiederum stellen auch höhere Anforderungen an die Bewertung sowie an die Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der „neuen“ Methode dar. Auf diese Punkte wird im Nachfolgenden eingegangen und eine Lösung erarbeitet.

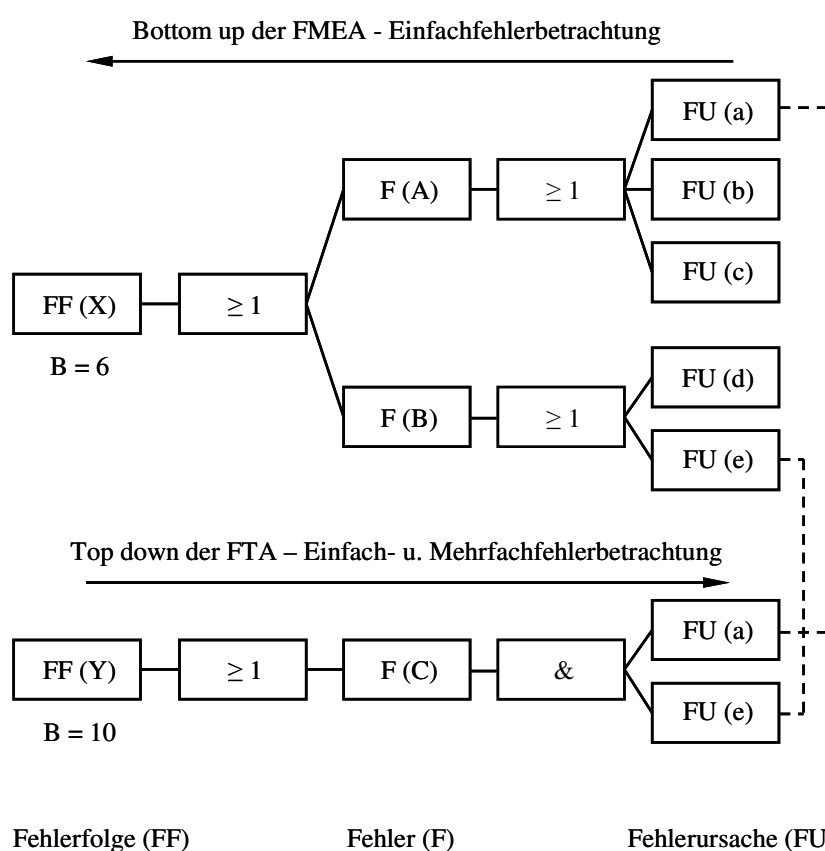


Bild 7.1: Fehlernetz von Einfachfehlern und Mehrfachfehlern nach [96]

Die Einfachfehlerbetrachtung, so wie sie in der FMEA üblich ist, erfolgt bottom up, d.h. man entwickelt von ermittelten bzw. definierten Fehlerursachen ausgehend die potentiellen Systemfolgen. Die unterschiedlichen Folgenebenen sind hierbei ODER verknüpft. Die Ursachen *a*, *b* und *c* aus Bild 7.1 können jeweils zum Fehler *A* und somit zum Topevent *X* führen. Das Gleiche gilt für die Fehlerursachen *d* und *e*. Bei der bottom up Betrachtung und der ODER-Vernetzung der FMEA ist das Topevent *Y* nicht zu entdecken bzw. nicht ermittelbar, da es mit der FMEA-Logik nicht greifbar ist. Nimmt man das Topevent *Y* an, so wird man aufgrund der FMEA-Logik jedoch keine einzelnen potentiellen Fehlerursachen hierzu finden.

Die FTA ist eine Methode, die top down vorgeht. Wird das ermittelte Ereignis auf Systemebene angenommen, so werden alle möglichen Ursachen, die hierbei einzeln bzw. in Kombination miteinander, d.h. über UND-Vernetzungen, auftreten können, ermittelt. Hier ergibt sich der erste Ansatzpunkt, um die Vorgehensweisen der FTA und der FMEA zu vereinen. Die Erfahrungen in der Praxis zeigen, dass in vielen Fällen diese bottom up Vorgehensweise nicht konsequent durchgeführt wird, da die Teilnehmer an der FMEA mit einer Denkweise in abstrakten Ebenen, die Fehlerursachen sind in einer solchen dargestellt, mit ihrer Nichterfüllung von Eigenschaften (z.B. fehlerhafte Materialwahl, fehlerhafte Tolerierung, ...), nicht so leicht zu Recht kommen. Daher wird versucht, der Denkweise der FMEA-Teilnehmer dadurch entgegen zu kommen, dass man vom obersten Event, dem Topfehler ausgeht bzw. von einzelnen Fehlern ausgehend in beide Richtungen untersucht. Damit ist es für den Moderator möglich, die Kombinationen aus Mehrfachfehlern bzw. die UND-Verknüpfungen mit abzufragen. Dabei müssen die Fehlerbewertung und die FMEA-Dokumentation sorgfältig geklärt und bestimmt werden. Im Folgenden wird daher gezielt auf die Ermittlung der Bewertungszahlen der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit A und E eingegangen.

7.2 Ermittlung der Bewertung für Auftreten und Entdeckung

Die Anforderungen, die mit der hier erarbeiteten neuen Vorgehensweise gelöst werden sollen, ergeben sich aus den oben beschriebenen Problemen. Es ist anzustreben, dass die bisher gängigen Vorgehensweisen der FMEA und der FTA berücksichtigt werden und nicht eine komplizierte, unpragmatische und unübersichtliche Vorgehensweise entsteht. Deshalb wird die bisher gängige Vorgehensweise, die bei der Erstellung einer FMEA zu Grunde gelegt ist und sich bewährt hat, genutzt.

Der Einstieg in die Mehrfachfehlerbetrachtung entspricht hierbei dem dritten Schritt der FMEA-Vorgehensweise, und zwar der Fehlerdefinition und Fehlerverknüpfung. In diesem Schritt ist es nun notwendig, den Standardschritt nach VDA 4.2 um den Punkt Verknüpfungsänderung zu erweitern, d.h. dass auch UND-Verknüpfungen (kombinatorische Fehler) mit abgefragt werden müssen bzw. können. Das muss dann bei der Erstellung der Fehlernetze berücksichtigt werden. Daraus ergeben sich Kombinationsmöglichkeiten, die von der klassischen Verknüpfungsmöglichkeit ODER abweichen bzw. beide Verknüpfungsarten UND bzw. ODER verwenden. Einfach möglich wird das durch die bereits in der Praxis angewendete Vorgehensweise zur Mehrfachfehlerberücksichtigung, vgl. [96] oder [97].

Bei den weiteren Betrachtungen wird nun wieder auf die klassische FMEA-Vorgehensweise zurückgegangen, d.h. dass sich an den oben beschriebenen dritten Schritt die Risikobewertung anschließt.

Bisher waren die Änderungen, die eingeführt wurden, relativ leicht umzusetzen. Bei der Risikobewertung haben die erforderlichen Änderungen stärkere Auswirkungen. Bei der Risikobewertung muss den geänderten Fehlerkombinationen, d.h. den Doppel- bzw. Mehrfachfehlern, die im Fehlernetz bzw. im Fehlerbaum durch eine UND-Verknüpfung dargestellt sind, Rechnung getragen werden. Das bedeutet, dass bei der Betrachtung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit eine praktikable Vorgehensweise entwickelt werden muss, um die richtige, korrekte Relation zwischen Einfach- und Mehrfachfehlern zu erhalten. Dafür werden wieder die Berechnungsregeln nach Boole zugrunde gelegt, die es ermöglichen, die Auftretenswahrscheinlichkeit der Mehrfachfehler aufgrund der Bewertungen der Einfachfehler zu berechnen. Das stellt sicher, dass mit dieser geforderten Relation, die sich aufgrund der Wahrscheinlichkeiten ergibt, sich richtige bzw. tatsächliche Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten ermitteln lassen. Dabei ist zu beachten, dass die klassische FMEA-Bewertung nur für Einfachfehler ausgelegt und nicht, wie in der FTA, zur weiteren Nutzung geeignet ist. Hierbei ergeben sich Probleme, die in [96] detaillierter beschrieben werden, denn bei der Berechnung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit liegen UND-Verknüpfungen vor, d.h. nach Boole werden die einzelnen Wahrscheinlichkeiten miteinander multipliziert.

Um diesem Problem entgegenzuwirken und die klassischen Bewertungszahlen der FMEA von 1..10 weiter nutzen zu können, werden die Bewertungszahlen der bereits bewerteten Einfachfehler in die hinterlegten ppm-Werte umgerechnet, diese dann miteinander verrechnet und schließlich rücktransformiert in die klassischen Bewertungszahlen. Durch diese Vorgehensweise wird eine Bewertungsmatrix für Doppelfehler erzeugt, in der die einzelnen Bewertungskombinationen dargestellt werden können, siehe Bild 7.2.

		Auftrittswahrscheinlichkeit A des ersten Fehlers									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Auftrittswahrscheinlichkeit A des zweiten Fehlers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	4	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4
	5	1	1	1	1	1	2	2	2	3	4
	6	1	1	1	2	2	2	2	4	4	6
	7	1	1	1	2	2	2	3	4	5	6
	8	1	2	2	2	2	4	4	6	6	8
	9	1	2	2	2	3	4	5	6	7	8
	10	2	2	2	4	4	6	6	8	8	9
		Auftrittswahrscheinlichkeit A des Doppelfehlers									

Bild 7.2: Bewertungsmatrix für die Auftretenswahrscheinlichkeit für Doppelfehler

Zu der in Bild 7.2 dargestellten Matrix muss noch erwähnt werden, dass die Bewertung der kritischeren Bewertungszahl zuzuordnen ist, sobald die berechneten Wahrscheinlichkeiten größer als die im Bewertungskatalog angegebenen sind. Zum Beispiel berechnete 2 ppm (Doppelfehler mit jeweils Einzelfehlerbewertung von $A = 1$) werden als $A = 2 \equiv 50$ ppm definiert, obwohl in Relation die Bewertung von $A = 1 \equiv 1$ ppm näher liegt. Dadurch ergibt sich in manchen Punkten eine kritischere Bewertung eines Doppelfehlers bezüglich seiner Auftretenswahrscheinlichkeit. Man befindet sich aber in diesem Fall auf der sicheren Seite. Es ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass ein möglicher Doppelfehler immer seltener auftritt als ein möglicher Einfachfehler.

Mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit E wurde in gleicher Weise verfahren. Die sich ergebende Bewertungsmatrix für Doppelfehler ist in Bild 7.3 dargestellt.

		Entdeckungswahrscheinlichkeit E des ersten Fehlers									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entdeckungswahrscheinlichkeit E des zweiten Fehlers	1	3	4	4	6	6	6	9	9	10	10
	2	4	5	5	7	7	7	9	9	10	10
	3	4	5	5	7	7	7	9	9	10	10
	4	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10
	5	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10
	6	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10
	7	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10
	8	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10
	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Entdeckungswahrscheinlichkeit E des Doppelfehlers									

Bild 7.3: Bewertungsmatrix für die Entdeckungswahrscheinlichkeit für Doppelfehler

Diese Matrix ist ein Spiegelbild der Realität. Es ist immer schwieriger, einen Doppelfehler zu entdecken als einen Einfachfehler. Für die in Bild 7.3 dargestellte Matrix gilt die gleiche Vorgehensweise bei der Festlegung der Entdeckungswahrscheinlichkeiten wie bei der Auftretenswahrscheinlichkeit nach Bild 7.2. Mit der kritischeren Bewertung eines Doppelfehlers in seiner Entdeckungswahrscheinlichkeit befindet man sich, analog zur Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit, immer auf der sicheren Seite.

Diese Bewertungsmethode mit der Berechnung über die ppm-Werte und deren Rücktransformation bietet den Vorteil, dass alle bisherigen Ansätze bzgl. der Analyse und Auswertung der FMEA weiter bestehen bleiben können. Es gilt weiter, dass eine Optimierung ab einer $RPZ = 120$ (125) bzw. nach dem Pareto Prinzip (schlechtesten 30%) durchgeführt werden muss und Einzelbewertungen von $B, A, E = 8$ speziell betrachtet werden müssen. Dies wird nun durch die Empfehlung bzw. vielmehr noch durch die Forderung ergänzt, Mehrfachfehler speziell zu betrachten, da diese zwar in ihrem Auftreten geringer sind, aber in ihrer Entdeckung und ihren Fehlerfolgen bzw. Auswirkungen kritischer sind.

Die beschriebenen Schritte und Überlegungen sind auch auf Dreifachfehlerkombinationen und größer anwendbar. Die Darstellung (z.B. der Bewertungsmatrix, ...) und die Beschreibung werden aber so komplex, dass sie hier nicht weiter behandelt werden. Eine Betrachtung von Vierfachfehlern oder mehr bzgl. einer Analyse von technischen Systemen ist nicht sinnvoll bzw. nicht mehr relevant. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit fällt nach der vorher beschriebenen Theorie wesentlich geringer aus, ist aber noch zu bewältigen. Die Auftretenswahrscheinlichkeit nimmt im gleichen Zuge wesentlich stärker ab und bewegt sich in Bereichen, die weit über heutigen Produktionszeiträumen liegen, bis ein Ausfall überhaupt theoretisch eintreten würde. Somit wäre es zwar möglich, z.B. einen Vierfachfehler zu entdecken, sein zeitliches Auftreten geht jedoch sehr stark gegen null.

Im Allgemeinen gilt für die so ermittelten Bewertungen für das Auftreten und die Entdeckung eine realitätsnahe erste Einschätzung eines Einfach- bzw. eines Mehrfachfehlers. Durch Definition zusätzlicher Maßnahmen, egal ob es sich um Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahmen handelt, kann die Bewertung weiter optimiert bzw. unter Bezug auf die errechnete Ausgangsbewertung auch abgesenkt werden.

Das Formblatt ist in den einzelnen Fehlerebenen um die logischen Verknüpfungen und um die beschriebene Mehrfachfehlerbehandlung erweitert worden. Ein mögliches Lösungsbeispiel ist in Bild 7.4 dargestellt.

Fehlerfolge	B	≥ 1 &	Fehler	≥ 1 &	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
Fehlerfolge X	6	≥ 1	Fehler A	≥ 1	Fehlerursache a	VM a.1 VM a.2	3	EM a.1	3	54
					Fehlerursache b	VM b.1 VM b.2	2	EM b.1	4	48
					Fehlerursache c	VM c.1	4	EM c.1 EM c.2	3	72
			Fehler B	≥ 1	Fehlerursache d	VM d.1	3	EM d.1 EM d.2	2	36
					Fehlerursache e	VM e.1 VM e.2	2	EM e.1 EM e.2	2	24
Fehlerfolge Y	10	≥ 1	Fehler C	&	Fehlerursache a	VM a.1 VM a.2	1	EM a.1 EM e.1 EM e.2	5	50
Fehlerursache e	VM e.1 VM e.2									

Bild 7.4: Angepasstes FMEA-Formblatt zur Behandlung von Mehrfachfehlern nach [96]

7.3 Verifikation der Methode

Für die Verifikation dieser Mehrfachfehlerbetrachtung in der FMEA wurden verschiedene kleinere FMEA Versuchsbetrachtungen unternommen und mit entsprechenden Fehlerbäumen verglichen. Dieser Vergleich hat ergeben, dass die veränderte Fragestellung bei der FMEA-Durchführung den wenigsten FMEA-Teammitgliedern Schwierigkeiten bereitet hat. Es war aber zu beobachten, dass die Bewertung von Fehlern, die als Doppelfehler in die FMEA eingingen, schwieriger durchzuführen war als die Bewertung von Einfachfehlern. Die Einfachfehler sind erfahrungsgemäß für die Bewerter leichter zu verstehen und einfacher zu begreifen. In diesen Fällen wurden zum besseren Verständnis und zur einfacheren Handhabung die Doppelfehler in ihre Einfachfehler zerlegt, danach diese eingeschätzt und über die in Bild 7.2 und Bild 7.3 dargestellten Bewertungsmatrizen auf die entsprechende Bewertung des Doppelfehlers umgerechnet. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse und die dabei durchgeführten Mehrfachfehlerbetrachtungen auch tatsächlich mit den Ergebnissen der klassischen FTA vergleichbar sind, bzw. nur sehr geringe Abweichungen auftreten. Die Berücksichtigung der Mehrfachfehlerbetrachtung bei der Ausfallprognose auf Basis von FMEA-Ergebnissen wurde bisher in der Praxis noch nicht durchgeführt.

Die Untersuchungen und Erfahrungen aus der Praxis lassen aber die Vermutung zu, dass der Einfluss der Doppelfehler, auch besonders mit zunehmender Kombination, immer geringer wird und den Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeitskurve und den Anpassungsfaktor kaum beeinflussen. Allgemein gilt, dass bei sehr komplexen Systemen weitere Fehler hinzukommen und der Verlauf, der in Bild 6.5 dargestellt ist, sich deshalb verändern würde. Der Verlauf der Trendlinie, die den Zusammenhang zwischen Komplexität und Anpassungsfaktor beschreibt, würde durch die Zunahme an betrachteten Fehlern in diesem Fall flacher verlaufen. Der Einfluss, den Mehrfachfehler auf den Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung haben, ist jedoch sehr gering. Daher wird sich auch, wie bei der Einfachfehlerbetrachtung, vgl. Bild 6.5, ein linearer Verlauf des Verhältnisses Komplexität zu Anpassungsfaktor einstellen.

7.4 Fazit

Mit Hilfe der Mehrfachfehlerbetrachtung in der FMEA und im zugehörigen Formblatt ist es gelungen, die in Kapitel 3 beschriebenen Nachteile, die eine Vielzahl der qualitativen Untersuchungsmethoden über den Produktentwicklungsprozess hat (z.B. keine Vergabe von Maßnahmen bei der FTA, ...), zu eliminieren. Die Mehrfachfehlerbetrachtung wurde systematisch und nachvollziehbar in die FMEA integriert und ermöglicht zukünftig auch komplexe Fehlerbetrachtungen und Maßnahmendefinitionen. Mit diesem Methodenbaustein wird eine deutliche Entwicklungszeiteinsparung erreicht.

8 Beispielhafte Anwendung

Zum besseren Verständnis und zur Verdeutlichung wird die gesamte Vorgehensweise bei der integrativen Methode zur qualitativen Zuverlässigkeitsbetrachtung anhand von zwei Beispielen durchgeführt und beschrieben. Dazu werden jeweils zunächst die beiden zur Wahl stehenden technischen Systeme und die an sie gestellten Anforderungen behandelt. Nach der Beschreibung dieser Grundlagen wird zur Identifizierung des geeignetsten Konzepts für den weiteren Produktentwicklungsprozess der qualitative Konzeptvergleich durchgeführt. Nach der anschließenden Ergebnisanalyse wird an diesen beiden ausgewählten Beispielen der Transfer der Informationen in die weiterführende FMEA aufgezeigt und die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen zur Prognose des jeweils ausgewählten Konzepts durchgeführt. Abschluss dieser Untersuchungen bildet eine zusammenfassende Bewertung von Einsatz und Anwendung der Gesamtmethodik des integrativen Ansatzes zur qualitativen Zuverlässigkeitsabsicherung anhand der dargestellten Beispiele.

8.1 Grundlagen Beispielsysteme

In einem ersten Schritt wird im Produktentwicklungsprozess das System, das für die Entwicklung vorgesehen ist, definiert. Dazu werden in erster Linie die Eigenschaften und die Anforderungen, die das System erfüllen muss, festgelegt und in einer Anforderungsliste zusammengefasst. In einem weiteren Schritt werden die verschiedenen Auslegungsmöglichkeiten und Varianten, die zur Realisierung der Hauptanforderungen (auch mit Must / Want / Nice gekennzeichnet) in Betracht gezogen werden können, skizziert und überschlägig ausgelegt. Als Beispielsysteme werden

- ein Anpassungsgetriebe und
- ein Anfahrlement für ein Automatikgetriebe

gewählt. Das Anpassungsgetriebe, vgl. auch [2], hat eine Übersetzung ins Langsame ohne Drehrichtungsumkehr; das Anfahrlement, vgl. auch [99], arbeitet hydraulisch und ist ein Beispiel für die Anwendung der Vorgehensweise auf ein komplexeres System.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Die Anforderungen, die an das Anpassungsgetriebe gestellt werden, sind in Tabelle 8.1 aufgelistet.

Tabelle 8.1: Anforderungsliste mit Must/Want/Nice Merkmalen für ein Anpassungsgetriebe

Lfd. Nr.	Must / Want / Nice	Anforderung
1	M	Drehmoment übertragen
2	M	Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)
3	W	Dichtheit nach außen gewährleisten
4	M	Keine Drehrichtungsumkehr
5	M	Eingangs- und Ausgangswelle auf gleicher Ebene
6	W	Geringer Bauraumbedarf
7	W	Geräuscharmen Betrieb gewährleisten
n	M / W / N	....

Anhand der in Tabelle 8.1 zusammengestellten Anforderungen werden im Folgenden die technisch denkbaren Varianten zur Realisierung der vorgegebenen Antriebsaufgabe ausgearbeitet. Zur Erfüllung der Must-Anforderungen werden zwei unterschiedliche Konzepte, die im Weiteren detaillierter untersucht werden sollen, ermittelt.

Die erste Lösungsvariante ist ein Stirnradgetriebe. Das Getriebe benötigt zwei Zahnradstufen, um die Forderungen

- gewünschte Übersetzung ins Langsame,
- keine Drehrichtungsumkehr und
- koaxialer An- und Abtrieb

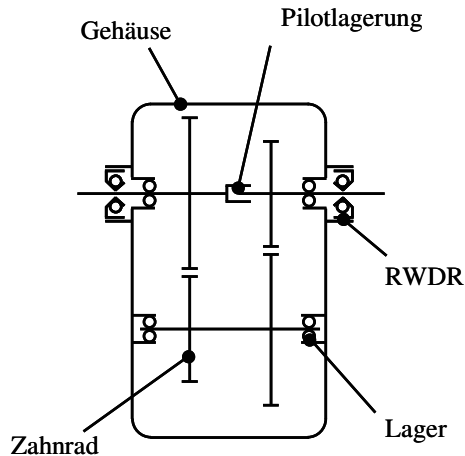
zu erfüllen. Beim Konzept des Stirnradgetriebes als Anpassungsgetriebe wird zur besseren Lagerung der Eingangs- und Ausgangswelle eine Pilotlagerung vorgesehen. Die Abdichtung erfolgt in dieser Konzeptausarbeitung mit Radialwellendichtringen (RWDR).

Die zweite Lösungsvariante, die die gestellten Anforderungen erfüllt, ist ein Planetenradgetriebe, siehe [98] und [99]. Bei Planetenradgetrieben liegen Eingangs- und Ausgangswelle koaxial. Die geforderte Übersetzung kann mit einem Planetenradgetriebe mit Einfachplanetenrädern erzielt werden. Bei dem Planetenradgetriebe erfolgt der

Antrieb über das Sonnenrad, der Abtrieb über den Planetenträger. Das Hohlrads steht still, ist gehäusefest angebunden und dient als Drehmomentabstützung. Nach außen wird das Planetenradgetriebe auch mit RWDR abgedichtet.

Der schematische Aufbau der beiden Radsatzkonzepte zur Realisierung der Aufgaben eines Anpassungsgetriebes ist in Bild 8.1 dargestellt.

Stirnradgetriebe



Planetenradgetriebe

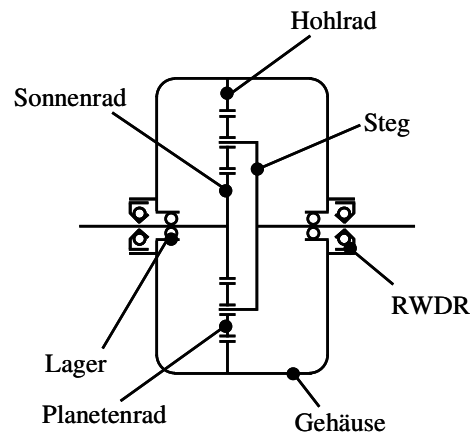


Bild 8.1: Schematische Darstellung der Radsätze der beiden Beispielkonzepte

Beispielsystem 2: Anfahrlement

Die Anforderungen, die an das Anfahrlement gestellt werden, sind in Tabelle 8.2 aufgelistet.

Tabelle 8.2: Anforderungsliste mit Must/Want/Nice Merkmalen für ein Anfahrlement

Lfd. Nr.	Must / Want / Nice	Anforderung
1	M	Drehmoment übertragen
2	M	Anfahren gewährleisten
3	W	Fahrzeugkriechen gewährleisten (Leistungsübertragung bei Schlupf)
4	M	Hoher Wirkungsgrad
5	W	Geringer Bauraumbedarf
n	M / W / N	....

Anhand der in Tabelle 8.2 zusammengestellten Anforderungen werden im Folgenden die technisch denkbaren Varianten zur Realisierung der vorgegebenen Anfahr- und

Verbindungsaufgabe zwischen Motor und Getriebe ausgearbeitet. Zur Erfüllung der Must-Anforderungen werden zwei unterschiedliche Konzepte, die im Weiteren detaillierter untersucht werden, ermittelt.

Die erste Lösungsvariante ist ein hydrodynamischer Drehmomentwandler mit Wandlerüberbrückungskupplung, siehe [99] bis [103]. Der Drehmomentwandler benötigt in dem dargestellten Beispiel eine 3-kanalige Ölversorgung aus dem Hauptgetriebe, um die Forderungen

- Drehmoment übertragen,
- Anfahren gewährleisten und
- hoher Wirkungsgrad

zu erfüllen. Der Drehmomentwandler wird nach dem Anfahren mit der Wandlerüberbrückungskupplung überbrückt, um den Wirkungsgrad zu verbessern. Dabei wird der schlechte hydrodynamische Wirkungsgrad des Drehmomentwandlers durch den sehr hohen Wirkungsgrad der mechanischen Überbrückungskupplung ersetzt, siehe [99] und [101].

Die zweite Lösungsvariante, die die gestellten Anforderungen erfüllt, ist eine nasse Anfahrkupplung. Der Begriff „nass“ kommt daher, dass die Lamellenkupplung auch aus Kühlungsgründen in Öl läuft und dass die Zu- und Abschaltung der Kupplung Öldruck betätigt erfolgt. Eine Gemeinsamkeit der beiden Lösungskonzepte besteht darin, dass die Ölversorgung vom Basisgetriebe aus erfolgt.

Der schematische Aufbau beider Anfarelementkonzepte ist in Bild 8.2 dargestellt.

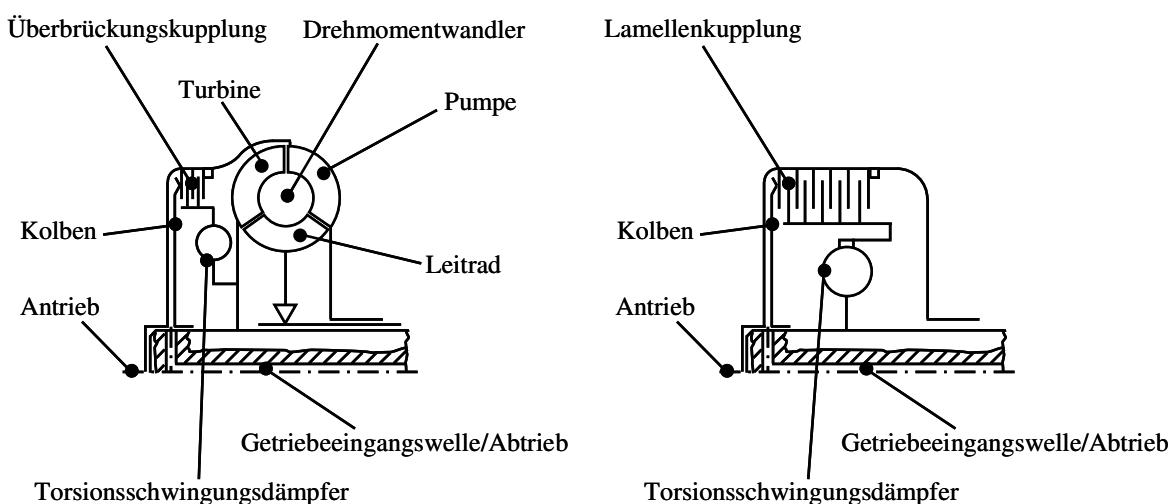


Bild 8.2: Schematische Darstellung der beiden Lösungskonzepte für das Anfarelement

Im Folgenden wird nun das entwicklungsfähigste Konzept zur Erfüllung der Übersetzungsaufgabe und der anderen technischen Anforderungen (Beispielsystem 1) bzw. zur Erfüllung des Anfahrvorgangs und der weiteren Drehmomentübertragung während der Fahrt (Beispielsystem 2) ermittelt. Dazu wird der Konzeptvergleich entsprechend Kapitel 4 durchgeführt.

Nach der Identifizierung des jeweils geeignetsten Konzepts, mit dem der weitere Produktentwicklungsprozess durchgeführt werden soll, wird die Überführung in die System-FMEA anhand eines Auszugs aufgezeigt, siehe Kapitel 8.3. Parallel dazu wird auch die weitere Aktualisierung der FMEA behandelt.

Anschließend wird die Überführung der FMEA in Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen anhand von ausgewählten Bauteilen des Anpassungsgetriebes bzw. des Anfahrlements erklärt.

8.2 Konzeptvergleich und –bewertung

Zum besseren Verständnis und um eindeutig nachvollziehen zu können, in welche Spalte bzw. in welche Reihe der jeweilige Inhalt eingetragen werden muss, ist in Bild 8.3 (siehe A 2) das Formblatt des Konzeptvergleichs erneut dargestellt.

Die einzelnen Felder sind zur eindeutigen Zuordnung und Übersichtlichkeit nummeriert und werden in den weiteren Erläuterungen als Bezug herangezogen.

System: ①		Konzept: ④				Gesamtentwicklungsfähigkeit: ⑪	
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E	Konzeptbeschreibung	
1	Systemanforderung: ②	⑦	⑧	⑨	⑩	Funktionsweise: ⑤	Komponenten/Elemente ⑫
	Systemfehler: ③					Fehlerbeschreibung: ⑥	Fehler ⑬	% ⑭

Bild 8.3: Formblatt des qualitativen Konzeptvergleichs

8.2.1 Systemfestlegung

Zunächst wird das zu untersuchende System definiert. Dabei wird es eindeutig benannt, ohne jedoch Konzeptlösungsansätze mit einzubeziehen.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Für die erste ausgewählte Beispielanwendung wird das System „Anpassungsgetriebe“ festgelegt. Der Begriff Anpassungsgetriebe wird im Bild 8.3 in Feld 1 eingetragen.

System: Anpassungsgetriebe			Konzept: Stirnradgetriebe				Gesamtentwicklungsfähigkeit:	
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E	Konzeptbeschreibung		
1	Systemanforderung: Drehmoment übertragen					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: Drehmoment wird nicht übertragen					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
	Systemfehler: Drehmoment wird eingeschränkt übertragen					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
2	Systemanforderung: Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: Drehzahl wird nicht mit der geforderten Untersetzung übertragen					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
3	Systemanforderung: Dichtheit nach außen gewährleisten					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: Dichtheit nach außen ist nicht gewährleistet					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
n	...							

Bild 8.4: Auszug aus dem qualitativen Konzeptvergleich für die Systemfestlegung

Dann werden die einzelnen Systemanforderungen, vgl. Anforderungskatalog Tabelle 8.1, die für die Auswahl des Konzepts relevant sind, definiert und unter der laufenden Nummer in das Feld 2 in Bild 8.3 eingetragen und die möglichen Systemfehler, die zu

diesem frühen Entwicklungszeitpunkt auftreten können, festgelegt. Die Systemfehlfunktionen werden zu der jeweiligen Systemfunktion in das Feld 3 eingetragen.

In diesem Schritt ist, wie in den Grundlagen bereits beschrieben, darauf zu achten, dass alle möglichen Systemfehler berücksichtigt werden. Zu einer Systemfunktion können daher auch mehrere mögliche Systemfehler definiert werden.

In Bild 8.4 sind die wichtigsten Funktionen aus der Anforderungsliste in die Systemfunktions- und Systemfehlfunktionsfelder des Konzeptvergleichs eingetragen.

Beispielsystem 2: Anfahrelement

Für die zweite ausgewählte Beispielanwendung wird das System „Anfahrelement“ festgelegt. Der Begriff Anfahrelement wird im Bild 8.3 in Feld 1 eingetragen. Für das zweite Beispielsystem werden die Systemanforderungen, vgl. Anforderungskatalog Tabelle 8.2, definiert und unter der laufenden Nummer im Feld 2 in Bild 8.3 festgehalten. Die möglichen Systemfehler werden im Feld 3 zu der jeweiligen Systemfunktion zugeordnet eingetragen.

Zur Verdeutlichung werden hier die drei Must-Anforderungen für das System Anfahrelement mit den dazugehörigen möglichen Systemfehlern dargestellt. Tabelle 8.3 zeigt diese Zusammenstellung.

Tabelle 8.3: Systemanforderungen und Systemfehler des zweiten Beispielsystems (für die Must-Anforderungen des Anforderungskatalogs)

Systemanforderung	Systemfehler
Drehmoment übertragen	Drehmoment wird nicht übertragen - Liegenbleiber
Anfahren gewährleisten	Anfahren ist nicht gewährleistet - Liegenbleiber
	Anfahren ist eingeschränkt gewährleistet - Kraft/Drehmoment kann nicht vollständig übertragen werden
hoher Wirkungsgrad	hoher Wirkungsgrad ist nicht gewährleistet

8.2.2 Konzeptfestlegung

Im Rahmen der Konzeptfestlegung werden zuerst die zur Wahl stehenden Konzepte benannt und jeweils in Feld 4 des Formblatts nach Bild 8.3 eingetragen. In diesem Schritt werden weiterhin die konzeptspezifischen Inhalte der beiden Beispielsysteme auszugsweise in den qualitativen Konzeptvergleich eingebracht.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Für die Beispielanwendung Anpassungsgetriebe sind das zum einen das „Stirnradgetriebe“ und zum anderen das „Planetenradgetriebe“. Danach werden für die definierten Systemanforderungen aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt die konzeptspezifischen Funktionsweisen beschrieben.

Am Beispiel des Stirnradgetriebes wird das im Folgenden für die Systemanforderung „Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)“ durchgeführt.

Das Stirnradgetriebe wird von außen mit einer Drehzahl angetrieben. Die Getriebeeingangswelle dreht dabei das Getriebeeingangszahnrad. Dieses Getriebeeingangszahnrad treibt ein Zahnrad auf der Vorgelegewelle an. Ein weiteres Zahnrad auf der Vorgelegewelle treibt ein Zahnrad auf der Getriebeausgangswelle mit der gewünschten Getriebeausgangsdrehzahl und -drehrichtung an.

In vergleichbarer Weise wird die Funktion für das Planetenradgetriebe beschrieben. Daran schließt sich die Beschreibung der Konzeptfehlfunktionen an. Anhand unseres Beispiels sieht das im Einzelnen wie folgt aus:

Erstens: Das Konzept „Stirnradgetriebe“ überträgt die Drehzahl nicht mit der geforderten Untersetzung, da aufgrund der Abstimmung von Achsabstand und Zähnezahlverhältnis diese nicht erzielt werden kann.

Zweitens: Die Drehzahlübertragung kann nicht gewährleistet werden, wenn die Lager fressen, eines der Zahnräder bricht oder die Welle versagt.

Für die in Bild 8.4 dargestellten Systemanforderungen werden die durchgeführten Konzeptfunktionsdefinitionen und Konzeptfehlfunktionsdefinitionen in Bild 8.5 dargestellt.

System: Anpassungsgetriebe			Konzept: Stirnradgetriebe				Gesamtentwicklungsfähigkeit:	
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E	Konzeptbeschreibung		
1	Systemanforderung: ..					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: ...					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
2	Systemanforderung: Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)					Funktionsweise: Wird von außen angetrieben. Die Getriebe-EW dreht dabei das Eingangs- zahnrad. Dies treibt ein Zahnrad auf der Vorgelegewelle an. Über eine weitere Zahnradstufe wird die Getriebe-AW mit der gewünschten Getr.-ausgangsdreh- zahl angetrieben.	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: Drehzahl wird nicht mit der geforderten Untersetzung übertragen					Fehlerbeschreibung: Drehzahl wird nicht mit der geforderten Untersetzung übertragen, da Abstimmung Achs- abstand und Zähne- zahlverhältnis, die geforderte Über- setzung nicht erzielt. Drehzahlübertragung nicht gewährleistet, wenn die Lager fressen, eines der Zahnräder bricht oder die Welle versagt.	Fehler	%
3	Systemanforderung: ..					Funktionsweise:	Komponenten/Elemente	
	Systemfehler: ...					Fehlerbeschreibung:	Fehler	%
n	...							

*Bild 8.5: Auszug der Konzeptfestlegung
(Benennung, Konzeptfunktionen und -fehlfunktionen)*

Beispielsystem 2: Anfahrlement

Für das zweite Beispielsystem sind das zum einen der „Drehmomentwandler mit Überbrückungskupplung“ und zum anderen die „nasse Anfahrkupplung“. Die konzept-

spezifische Umsetzung und Beschreibung der Systemanforderung „Drehmoment übertragen“ wird beispielhaft für das Konzept Drehmomentwandler gewählt. Die dazugehörige mögliche Fehlerbeschreibung wird im Folgenden dargestellt.

Für die Drehmomentübertragung wird der Ölkreislauf durch den Wandler so eingestellt, dass der Wandler einerseits mit Öl gefüllt ist und andererseits die volle Übertragungsfähigkeit mit dem eingestellten Öldurchflussvolumenstrom beeinflusst wird. Die Überbrückungskupplung wird über den Kolben angesteuert und in einen schlupfenden bzw. in einen geschlossenen Zustand versetzt. Die Schlupfregelung ist so auszuführen, dass das Ansprechverhalten beim Beschleunigen gut, d.h. direkt, ist und gleichzeitig die Motorschwingungen ausreichend gedämpft werden.

Die Drehmomentübertragung ist dann nicht gewährleistet, wenn der Wandler oder die Überbrückungskupplung nicht ausreichend mit Öl versorgt werden, d.h. wenn die Ölpumpe defekt ist, wenn Ventile klemmen, wenn der Reibbelag der Überbrückungskupplung verschlissen oder ausgebröckelt ist oder wenn einzelne Schaufeln sich im Wandler gelöst haben.

8.2.3 Bewertung

Für die Beispielanwendungen wird in diesem Kapitel der Arbeitsschritt der Bewertung durchgeführt, siehe Bewertungskataloge in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.4. Dabei werden zuerst die Systemanforderungen, unter Berücksichtigung der Systemfehlfunktionen, mit der Gewichtung G bewertet (Feld 7). Im Anschluss an die systemspezifische Bewertung wird die konzeptspezifische Bewertung (Feld 8 und Feld 9) durchgeführt.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Wie in der allgemeinen Beschreibung der Vorgehensweise (siehe Kapitel 4) erwähnt, ist es besonders wichtig, dass die Systemfehlfunktionen bei der Bewertung der Systemanforderungen mit einbezogen werden, da diese in den meisten Fällen die Bewertung durch die möglichen Systemauswirkungen mit beeinflussen. Auf diese Thematik wird in diesem Beispiel noch einmal genauer eingegangen.

Speziell im Fall der Dichtheit werden die Zusammenhänge und Zuordnungen von Gewichtung G zur Systemanforderungsbeschreibung ersichtlich, denn durch die Betrachtung der Systemfehlfunktion wird klar, dass bei einer Nichterfüllung der Dichtheit gesetzliche Vorgaben nicht erfüllt werden. Damit erklärt sich in diesem Fall die Gewichtung von $G = 0$.

Als weiteres Teilbeispiel wird die Drehmomentübertragung betrachtet. Diese Anforderung ist eindeutig eine Funktionsanforderung. Das wird auch deutlich durch die Betrachtung der Systemfehlfunktion und ist mit $G = 0,25$ zu bewerten. Die gesamte Be-

wertung der Gewichtung ist in Tabelle 8.4 zusammengestellt.

Tabelle 8.4: Bewertungsübersicht der Systemanforderungen für das Beispielsystem Anpassungsgetriebe

Lfd. Nr.	Anforderung	Gewichtung G
1	Drehmoment übertragen	0,25
2	Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)	0,25
3	Dichtheit nach außen gewährleisten	0,00
4	Keine Drehrichtungsumkehr	0,25
5	Eingangs- und Ausgangswelle auf gleicher Ebene	0,25
6	Geringer Bauraumbedarf	0,75
7	Geräuscharmen Betrieb gewährleisten	0,75
n	....

Für die Bewertung der technischen Umsetzbarkeit wird in diesem Beispiel $T = 0,75$ (Feld 8 von Bild 8.3) angesetzt. Die technische Ausführung der Stirnradverzahnung ist einfach umzusetzen und rechtfertigt diese Bewertung. Die Einbeziehung der Fehlerbeschreibung bestätigt diese Bewertung. Vergleicht man dagegen die konstruktive Gestaltung eines Planetenradgetriebes, so fällt auf, dass Planetenradgetriebe deutlich komplexer in der Anordnung und im Aufbau sind und für die Realisierung der Übersetzungsfunktion in einem Gesamttriebessystem auch mehr Bauteile benötigt werden. Dadurch wird die Bewertung des Planetenradtriebekonzepts einen schlechteren Bewertungswert erhalten.

Der Kosten-Zeit-Faktor für die Auslegung des Stirnradgetriebes zur Drehzahlübertragung mit der vorgegebenen Untersetzung wird mit $K = 0,75$ (Feld 9 von Bild 8.3) bewertet. Die Auslegung ist relativ einfach. Sie wird zwar grundlegend vom Achsabstand und den zugehörigen Zahnradpaarungen bestimmt, doch ist die Variationsbreite zur Darstellung der gewünschten Übersetzung deutlich größer. Beim zweiten Konzept (Planetenradgetriebe) ergeben sich Einschränkungen für mögliche Übersetzungsänderungen, die prinzipiell mit einem Planetenradsatz erzeugt werden können, unter anderem durch die Hohlradzähnezahl, die Größe der Kleinräder und nicht zuletzt durch die Erfüllung von Montierbarkeitskriterien, siehe auch [98] und [99]. Daher ist der zeitliche und kostenbezogene Aufwand für die Auslegung des Stirnradgetriebes deutlich geringer zu bewerten als für die Auslegung des Planetenradgetriebes.

Die gesamte Bewertung für die in Tabelle 8.1 aufgelisteten Anforderungen ist in Bild 8.6 in einem vereinfachten Formblatt des Konzeptvergleichs zusammengefasst. In die-

ser vereinfachten Darstellung sind nur die Systemanforderungen und die konzeptspezifischen Bewertungsspalten für beiden Varianten aufgeführt.

System: Anpassungsgetriebe			Konzept: Stirnradgetriebe				Konzept: Planetenradgetriebe			
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E		T	K	E	
1	Drehmoment übertragen	0,25	0,50	0,50			0,50	0,50		
2	Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)	0,25	0,75	0,75			0,50	0,50		
3	Dichtheit nach außen gewährleisten	0,00	0,75	0,75			0,75	0,75		
4	Keine Drehrichtungsumkehr	0,25	1,00	0,75			1,00	0,50		
5	Eingangs- und Ausgangswelle auf gleicher Ebene	0,25	1,00	0,50			1,00	0,50		
6	Geringer Bauraumbedarf	0,75	0,25	0,50			0,50	0,50		
7	Geräuscharmen Betrieb gewährleisten	0,75	0,50	0,50			0,75	0,50		
n	...	...	...	...			...	...

Bild 8.6: Übersicht über die Bewertungen des Beispielsystems Anpassungsgetriebe

Beispielsystem 2: Anfahrlement

Die Bewertungen für die systemspezifischen Anforderungen für das zweite Beispielsystem sind in Tabelle 8.5 dargestellt. In der Zusammenstellung werden alle definierten Anforderungen aus dem Katalog (siehe Tabelle 8.2) betrachtet.

Tabelle 8.5: Bewertungsübersicht der Systemanforderungen für das Beispielsystem Anfahrlement

Lfd. Nr.	Anforderung	Gewichtung G
1	Drehmoment übertragen	0,25
2	Anfahren gewährleisten	0,25
3	Fahrzeugkriechen gewährleisten (Leistungsübertragung bei Schlupf)	0,75
4	Hoher Wirkungsgrad	0,25
5	Geringer Bauraumbedarf	0,75
n	....

Zur Festlegung der Bewertung sollen hier beispielhaft zwei Anforderungen herausgezogen und erläutert werden.

Die Anforderung 3 (Fahrzeugkriechen gewährleisten) ist mit $G = 0,75$ bewertet. Diese Funktionalität ist bei hydrodynamischen Anfahrerelementen systembedingt gegeben. Dieses Verhalten wird von den Kunden, in dem Fall den Fahrzeugbetreibern, als sehr angenehm empfunden. Bei anderen Anfahrssystemen, die anstelle von Drehmomentwandlern verbaut werden, wird versucht, dieses Verhalten so zu applizieren, d.h. nachzustellen, dass der Fahrer beim Umstieg auf ein anderes Automatikgetriebesystem den gleichen gewohnten Komfort hat.

Die Anforderung 4 (hoher Wirkungsgrad) ist mit $G = 0,25$ bewertet. Dabei handelt es sich um eine grundlegende Anforderung an Fahrzeuggetriebesysteme und deren Unterbaugruppen, zumal über den Gesamtwirkungsgrad der Kraftstoffverbrauch und die Abgaswerte stark beeinflusst werden.

Die konzeptspezifische Bewertung wird im Folgenden auszugsweise dargestellt. Als Beispiel für die konzeptspezifische Funktionsweise und die Fehlerbeschreibung wird die Anforderung 3 (Fahrzeugkriechen gewährleisten) gewählt. Mit der obigen Beschreibung lassen sich die konzeptspezifischen Bewertungen (technische Umsetzbarkeit T und Kosten-Zeit-Faktor K) gut erläutern. Diese Bewertungen sind in Tabelle 8.6 zusammengefasst.

Tabelle 8.6: Bewertungsbeispiel der konzeptspezifischen Bewertung für das Beispielsystem Anfahrerelement

Systemanforderung	Drehmomentwandler		Nasse Anfahrkupplung	
	T	K	T	K
Fahrzeugkriechen gewährleisten	0,75	0,75	0,25	0,50

Die Anforderung 3 (Fahrzeugkriechen gewährleisten) ist zwar beim Drehmomentwandler systembedingt gegeben, wird aber in Kombination mit einer gesteuerten Überbrückungskupplung in der technischen Umsetzbarkeit mit $T = 0,75$ bewertet, da zur Vermeidung von möglichen Fehlfunktionen der Überbrückungskupplung erhöhter technischer Aufwand (z.B. Kupplungsansteuerung, Belagauswahl und Schwingungsdämpfer) betrieben werden muss.

Bei der nassen Anfahrkupplung gibt es systembedingt kein „Kriechen“. Dieses Verhalten muss mit entsprechend konstruktivem und steuerungstechnischem Aufwand dargestellt werden. Dazu wird in der Steuerung ein Algorithmus integriert, mit dem bei der nassen Anfahrkupplung durch leichtes Anlegen des Kolbens ein Schlupfzustand

erreicht wird und dadurch eine „kriechende“ Fahrzeugbewegung eintritt. Diese Algorhythmuserwicklung ist sehr versuchs- und kostenintensiv. Darüber hinaus erfordert die Abstimmung des Übertragungsmoments ein hohes technisches Know-how, damit einerseits die Fahrzeugbewegung nicht „abgewürgt“ und andererseits der Belagverschleiß in der Anfahrkupplung nicht zu groß wird. Diese Auslegung und Abstimmung der Anfahrkupplung ist mit deutlichem technischem Aufwand verbunden. Die beiden Bewertungen T und K haben daher nur die Werte 0,25.

8.2.4 Ergebnisanalyse

Auf der Basis dieser Bewertungen ist es möglich, die Entwicklungsfähigkeit $E_{i,j}$ mit der Gleichung (4.1) zu berechnen. Die Gesamtentwicklungsfähigkeit $E_{Ges,j}$ ergibt sich dann nach Gleichung (4.3) als Produkt der Einzelentwicklungsfähigkeiten.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die zur Wahl stehenden Lösungskonzepte grundlegend zunächst einmal entwicklungsfähig sind. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich aber, dass sich die Gesamtentwicklungsfähigkeiten der beiden Konzepte

- Stirnradgetriebes mit $E_{Ges,1} = 0,00001539$ und
- Planetenradgetriebe mit $E_{Ges,2} = 0,00001229$

deutlich unterscheiden. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse des Konzeptvergleichs zeigt Tabelle 8.7.

Tabelle 8.7: Ergebnisübersicht des qualitativen Konzeptvergleichs

Konzept	Gesamtentwicklungsfähigkeit	Normierte Gesamtentwicklungsfähigkeit
Stirnradgetriebe	0,00001539	1,000000
Planetenradgetriebe	0,00001229	0,799902

Aufgrund des deutlichen Unterschieds in der Gesamtentwicklungsfähigkeit ist das Konzept mit den Stirnradverzahnungen zur Lösung der gestellten Anforderungen an das Anpassungsgetriebe für die weitere Entwicklung auszuwählen.

Beispielsystem 2: Anfahrelement

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die beiden zur Wahl stehenden Lösungskonzepte grundlegend zunächst einmal entwicklungsfähig sind. Bezüglich der Anforderung „Fahrzeugkriechen gewährleisten“ ergeben sich für die Entwicklungsfähigkeit und die normierte Entwicklungsfähigkeit die in Tabelle 8.8 zusammengefassten Werte.

Tabelle 8.8: Ergebnisübersicht Einzelentwicklungsfähigkeit

Konzept	Entwicklungsfähigkeit	Normierte Entwicklungsfähigkeit
Drehmomentwandler	0,539062	1,000000
nasse Anfahrkupplung	0,223958	0,415458

Der Drehmomentwandler hat eine höhere Entwicklungsfähigkeit als das Vergleichskonzept. Der Drehmomentwandler mit Überbrückungskupplung hat sich in der Großserie bestens bewährt. Mit dem heutigen Entwicklungsstand und modernsten Produktionsprozessen ist dieses Konzept in fast allen Anforderungspunkten überlegen. Einziger Nachteil ist der Wirkungsgrad. Hier sind mechanische Getriebeelemente den hydrodynamischen Getrieben überlegen. Über die Kosten lassen sich nur schwer Aussagen machen, weil bei der Anfahrkupplung der deutlich erhöhte Aufwand für den Schwingungsdämpfer und eine entsprechende Lamellenauswahl für Schlupfbetrieb nur schwer zu bewerten sind.

8.3 FMEA

In diesem Kapitel werden die Informationen des Konzeptvergleichs für das für den weiteren Produktentwicklungsprozess ausgewählte Anpassungsgetriebe bzw. Anfahrelement in eine System-FMEA überführt. Dazu werden die Felder 12, 13 und 14 des Formblatts nach Bild 8.3 benützt.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Im Feld 12, das mit „Komponenten/Elemente“ überschrieben ist, werden die Bauteile, die aus der verbalen Beschreibung der Konzeptfunktionsweise erkennbar werden, zusammengestellt. Aus der Beschreibung der jeweiligen Konzeptfunktionsweise für jede betrachtete Systemanforderung ergibt sich eine umfassende Zusammenstellung bzw. eine nach dem aktuellen Konzeptausarbeitungsstand angepasste vollständige Liste aller Getriebebauteile des Konzeptgetriebes. Anhand unseres Beispiels ist die Funktionsweise „Übertragung der Drehzahl“ exemplarisch in Bild 8.7 dargestellt.

Funktionsweise	Komponenten/Elemente
Wird von außen angetrieben. Die Getriebe-EW ¹⁾ dreht dabei das Eingangszahnrad ²⁾ . Dies treibt ein Zahnrad ³⁾ auf der Vorgelegewelle ⁴⁾ an. Über eine weitere Zahnradstufe ^{3,5)} wird die Getriebe-AW ⁶⁾ mit der gewünschten Getriebeausgangsdrehzahl angetrieben.	1. Getriebeeingangswelle 2. Eingangszahnrad 3. Zahnrad 1 und 2 (auf Vorgelegewelle) 4. Vorgelegewelle 5. Ausgangszahnrad 6. Getriebeausgangswelle

Bild 8.7: Zusammenhang zwischen Funktionsbeschreibung und Komponenten

Dabei sollte auch immer ein zusätzlicher Abgleich mit der jeweiligen Fehlerbeschreibung durchgeführt werden, da unter Umständen einzelnen Bauteilen hier fälschlicherweise Fehler zugeordnet bzw. Bauteile zur Nichterfüllung der betrachteten Systemanforderung aufgenommen werden.

Fasst man alle ermittelten Komponenten, die zur Realisierung des Stirnradanpassungsgetriebes identifiziert wurden, zusammen, dann kann eine Systemstruktur der FMEA nach Bild 8.8 erstellt werden.

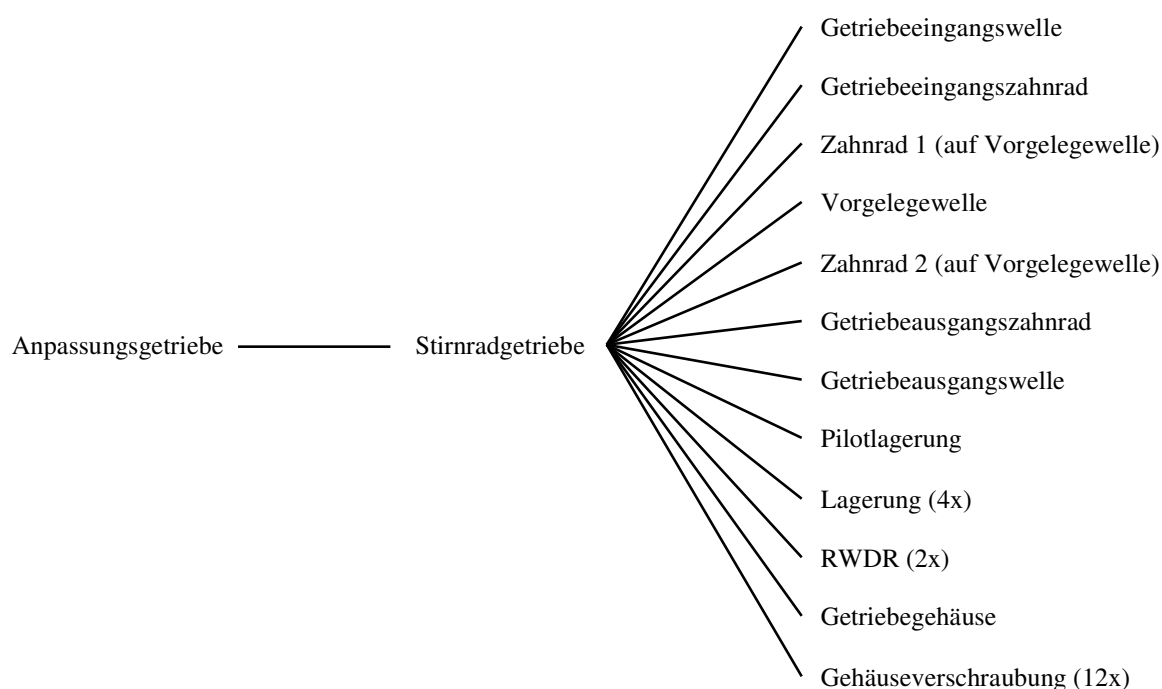


Bild 8.8: Systemstruktur des Stirnradgetriebes

Damit ist der erste Schritt zur Erstellung einer System-FMEA, z.B. nach [27], erfolgreich durchgeführt.

Der zweite Schritt, die Definition der Funktionen, kann aus den Systemanforderungen abgeleitet werden. Die jeweilige betrachtete Funktion wird den in der Struktur untergeordneten Systemelementen, die aufgrund der Konzeptfunktionsbeschreibung identifiziert worden sind, zugeordnet.

Im dritten Schritt der FMEA-Vorgehensweise werden die Systemfehler und die Fehlerbeschreibungen verwendet. Die Systemfehler werden in die Topfehlfunktionen (Fehlerfolgen des Systemelements Anpassungsgetriebe aus Bild 8.8) unterteilt und die Fehlerarten des Systemelements Stirnradgetriebe strukturiert aufgelistet.

Um die Fehler in die FMEA mit der gewünschten Differenzierung überführen zu können, werden, vergleichbar mit der Ermittlung der Bauteile, hier die Fehlerbeschreibungen verwendet. Den identifizierten Fehlern werden dann %-Werte zugeordnet. Die identifizierten Fehler gehen in die FMEA als Fehlerursachen ein und die %-Werte stellen eine Abschätzung deren Anteile am Eintreten des Systemfehlers dar.

Bild 8.9 zeigt das Ergebnis beispielhaft anhand des ausgearbeiteten Systemfehlers „Drehzahl wird nicht mit der geforderten Übersetzung übertragen“.

Drehzahl wird nicht mit geforderter Übersetzung übertragen, da mit Abstimmung von Achsabstand und Zähnezahsverhältnis geforderte Übersetzung nicht erzielt werden kann. Drehzahlübertragung nicht gewährleistet, wenn die Lager fressen, eines der Zahnräder bricht oder die Welle versagt.	Fehlerhafter Achsabstand	4 %
	Fehlerhaftes Zähnezahsverhältnis	5 %
	Lagerfresser (4x)	25 %
	Bruch Zahnrad 1	15 %
	Bruch Zahnrad 2	15 %
	Bruch Eingangszahnrad	15 %
	Bruch Ausgangszahnrad	15 %
	Wellenbruch	6 %

Bild 8.9: Übersicht der Fehler und %-Werte für den betrachteten Systemfehler „Drehzahl wird nicht mit der geforderten Übersetzung übertragen“

Nachdem nun die Fehlerfolgen identifiziert und die Fehlerursachen mit ihrem Einfluss am Systemfehler ermittelt wurden, müssen die Bewertungen der Fehlerfolgen (Bedeutung B) und der Fehlerursachen (Auftrittswahrscheinlichkeit A) abgeleitet werden.

Die Ergebnisse dieser Herleitungen, die nach Gleichung (5.1) und (5.2) erfolgen, sind in Tabelle 8.9 und Tabelle 8.10 dargestellt.

Tabelle 8.9: Zuordnung Gewichtung zu Bedeutung

Fehlerfolge	Gewichtung	Bedeutung
Drehmoment übertragen	0,25	8
Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen ($i \approx 2,31$)	0,25	8
Dichtheit nach außen gewährleisten	0,00	10
Keine Drehrichtungsumkehr	0,25	8
Eingangs- und Ausgangswelle auf gleicher Ebene	0,25	8
Geringer Bauraumbedarf	0,75	4
Geräuscharmen Betrieb gewährleisten	0,75	4

Tabelle 8.10: Zuordnung Technische Umsetzbarkeit zur Auftretenswahrscheinlichkeit

Berechnete Auftretenswahrscheinlichkeit (gesamt) des betrachteten Systemfehlers: $A = 4$ (500 ppm)			
Fehlerursache	%-Anteil	ppm	A
Fehlerhafter Achsabstand	4 %	20	2
Fehlerhaftes Zähnezahlnverhältnis	5 %	25	2
Lagerfresser (4x)	25 %	125	4
Bruch Zahnrad 1 (auf Vorgelegewelle)	15 %	75	3
Bruch Zahnrad 2 (auf Vorgelegewelle)	15 %	75	3
Bruch Eingangszahnrad	15 %	75	3
Bruch Ausgangszahnrad	15 %	75	3
Wellenbruch	6 %	30	2

Alle Ergebnisse werden anschließend in ein FMEA-Formblatt übertragen. Im weiteren Verlauf der Produktentwicklung kann bzw. wird die FMEA mit neuen Entwicklungserkenntnissen und Untersuchungsergebnissen erweitert und aktualisiert werden.

Das gilt besonders für den Bereich der Entdeckungswahrscheinlichkeit. Diese ist mit $E = 10$ für alle Fehlerursachen beurteilt worden, da über Maßnahmen wie z.B. Tests, Versuche, usw. noch keine Aussage getroffen bzw. abgeleitet werden kann. Ferner ist im Modellbeispiel der Lagerfresser als kritisch identifiziert worden. Für diese Fehlerursache müssen weitere Vermeidungsmaßnahmen definiert werden.

Im Produktentwicklungsprozess ergab sich eine konstruktive Änderung an der Lagerung. Die Lager werden in der Serienlösung einstellbar ausgeführt. Dazu werden Deckel, Schrauben und andere Dichtelemente benötigt und in der FMEA weiterbetrachtet.

Auszugsweise werden diese Veränderungen in der FMEA im entsprechenden Formblatt in Bild 8.10 dargestellt.

Alle Ergänzungen, die über den Produktentwicklungsprozess in die FMEA aufgenommen wurden, werden immer unter Berücksichtigung des im Laufe der Entwicklung genauer definierten Auslegungsziels durchgeführt. Als Entwicklungsziel für das Anpassungsgetriebe wurde $t_{Bezug} = 30.000$ km festgelegt. Dieser vergleichsweise geringe Wert ergibt sich aus dem gewünschten Einsatzprofil des Anpassungsgetriebes, das nur bei Bedarf in den Leistungsfluss eingeschaltet wird. Das heißt, dass das zuschaltbare Stirnradgetriebe nicht für die gesamte Lebensdauer von Triebstrang und Gesamtfahrzeug, sondern nur auf Zeitfestigkeit ausgelegt ist.

Fehlerfolge	B	Fehler	Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahme	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ			
Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen (i » 2,31)	8	Drehzahl übertragen und dabei ins Langsame übersetzen (i » 2,31) Fehler B	...	...	...	...	...	...
			Bruch Zahnrad 1	Erfahrung der Mitarbeiter	3	keine	10	240			
				Optimierungsstand				3	Test	3	72
				Erfahrung der Mitarbeiter	4	keine	10	320			
			Lagerfresser (4x)	Optimierungsstand				4	Test	4	128
				Optimierungsstand				3		4	96
				Berechnung	2	Test	4	64			
				Abstimmung mit Lagerhersteller							
			

Bild 8.10: FMEA-Formblatt des Lösungsbeispiels Stirnradgetriebe

Beispielsystem 2: Anfahrlement

Fasst man alle ermittelten Komponenten und Baugruppen, die zur Realisierung des Drehmomentwandlers mit Überbrückungskupplung identifiziert wurden, zusammen, dann kann eine Systemstruktur der FMEA nach Bild 8.11 für das entwicklungsfähigste Konzept eines Anfahrlements erstellt werden.

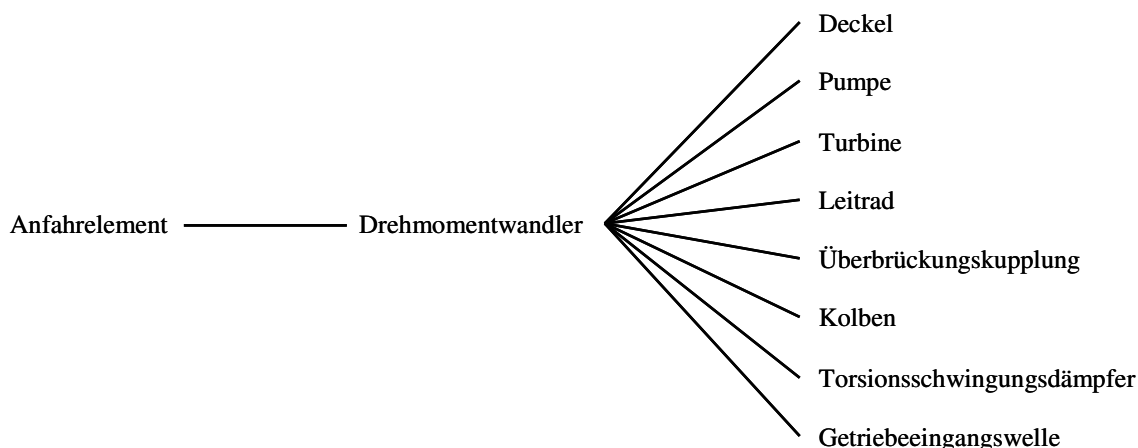


Bild 8.11: Systemstruktur des Drehmomentwandler mit Überbrückungskupplung

Damit ist der erste Schritt zur Erstellung einer System-FMEA erfolgreich durchgeführt. Die weiteren Arbeitsschritte, um alle Informationen für das FMEA-Formblatt zu generieren, werden auszugsweise in Tabelle 8.11 zusammengestellt.

Dabei soll die Systemanforderung „Fahrzeugkriechen gewährleisten“ betrachtet werden. Die konzeptspezifischen Beschreibungen für die Funktionsweise und die Fehlerbeschreibung ermöglichen es, die folgenden Fehlerursachen mit den abgeleiteten Auftretenswahrscheinlichkeitsbewertungen zu generieren. Die technische Umsetzbarkeit wurde in der Tabelle 8.6 mit $T = 0,75$ ermittelt. Mit der Gleichung (5.2) ergibt sich rechnerisch eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $A = 4$. Aus den prozentualen Anteilen lassen sich die einzelnen Auftretenswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Fehlerursachen bestimmen, siehe Tabelle 8.11.

Tabelle 8.11: Zuordnung Technische Umsetzbarkeit zur Auftretenswahrscheinlichkeit

Berechnete Auftretenswahrscheinlichkeit (gesamt) des betrachteten Systemfehlers: $A = 4$ (500 ppm)			
Fehlerursache	%-Anteil	ppm	A
Schaden Pumpe/-schaufeln	15 %	75	3
Schaden Turbine/-schaufeln	15 %	75	3
Schaden Leitrad/-schaufeln	15%	75	3
Fehlerhafte Ansteuerung	20 %	100	3
Fehlerhafte Auslegung Fliehölraum (Deckelbereich)	25 %	150	4
Wellenbruch	10 %	50	2

Alle Ergebnisse werden anschließend in das FMEA-Formblatt übertragen, über den weiteren Entwicklungsablauf gepflegt und ggf. mit neuen Entwicklungserkenntnissen aktualisiert und erweitert. Alle neuen Ergänzungen werden dann in Hinblick auf die

Weiterverwendung der Informationen zur Zuverlässigkeitsprognose mittels Lebensdauerverteilungen, mit Berücksichtigung des Auslegungsziels von $t_{\text{Bezug}} = 200.000$ km, durchgeführt.

8.4 Verteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen

Nach der Durchführung der FMEA werden in diesem Kapitel für die beiden untersuchten Beispielsysteme Zuverlässigkeitsprognosen mittels Lebensdauerverteilung, basierend auf den FMEA-Bewertungen, dargestellt und die dafür benötigten Verteilungsparameter ermittelt.

8.4.1 Ermittlung der Verteilungsparameter

Für die beiden Beispielsysteme werden die Verteilungsparameter, der Formparameter $b_{(2)}$ und die charakteristische Lebensdauer T der Weibullverteilung, nach der Beschreibung in Kapitel 6.1 ermittelt.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Nach Durchführung der FMEA und zu einem Zeitpunkt, zu dem das Anpassungsgetriebe bereits schon weitgehend konstruktiv ausgearbeitet ist, werden die gesamten Informationen über das Stirnradgetriebe in die gewünschten Eingangsdaten für die Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen zur Erstellung der Zuverlässigkeitsprognose überführt. Für diese Zuverlässigkeitsprognose werden nur die Fehlerfolgen und deren vernetzte Fehler und Fehlerursachen, die mit einer Bedeutung von $B = 9$ auftreten, ausgewertet. Eine besondere Bedeutung kommt hier dem Bezugspunkt $t_{\text{Bezug}} = 30.000$ km zu.

Im Folgenden werden die Formparameter b für einen Zahnbruch und für einen Lager Schaden ermittelt und die charakteristische Lebensdauer T für die beiden ausgewählten Fehlerbeispiele des Systems Stirnradgetriebe berechnet.

8.4.1.1 Ermittlung der Formparameter b des ersten Beispielsystems

Für die richtige Berechnung der Parameter werden zuerst die beteiligten Fehlerursachen der beiden Bauteile „Zahnrad“ und „Lager“, für die jeweils die Verteilungsparameter bestimmt werden sollen, ausgewertet. In unserem Beispiel soll die Fehlerursache „Zahnradbruch des Zahnrad 1“ drei verschiedene Fehlerursachen haben. Die drei Fehlerursachen sind zweimal (z.B. falsches Material und fehlerhafte Tolerierung) mit $A = 2$ und einmal (z.B. fehlerhafte Dimensionierung) mit $A = 4$ bewertet worden. Zusammen weisen die definierten Fehlerursachen 600 ppm auf. Für das zweite betrachtete Bauteil „Lager“ mit dem Fehler „Lagerfresser“ wurden zwei unterschiedliche Feh-

lerursachen definiert, die eine Fehlerursache „fehlerhafte Dimensionierung“ mit $A = 3$ und die zweite Fehlerursache „unzureichende Schmierung“ mit $A = 2$, die zusammen 150 ppm ergeben.

Die hier beschriebene Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten aus den Fehlerursachenbewertungen wird in Tabelle 8.12 dargestellt.

Tabelle 8.12: Umrechnung der A-Noten in Ausfallwahrscheinlichkeiten (mit t_{Bezug})

Bauteil	Fehlerursache	A-Note	ppm	Fehlerausfallwahrscheinlichkeit
Zahnrad 1	falsches Material	2	50	600 ppm für den Fehler Zahnradbruch
	fehlerhafte Tolerierung	2	50	
	fehlerhafte Dimensionierung	4	500	
Lager	fehlerhafte Dimensionierung	3	100	150 ppm für den Fehler Lagerfresser
	unzureichende Schmierung	2	50	

Mit diesen Werten, mit dem Bezugspunkt $t_{\text{Bezug}} = 30.000$ km und mit den abgeschätzten $b_{(3)}$ Parametern aus Bild 6.1 und Bild 6.2 können über die Gleichungen (6.2), (6.3) und (6.4) die Formparameter $b_{(2)}$ bestimmt werden. Die berechneten Formparameter sind in Tabelle 8.13 zusammengestellt.

Tabelle 8.13: Formparameter $b_{(2)}$ der betrachteten Bauteile

Bauteil mit Fehler	berechneter Formparameter $b_{(2)}$
Zahnrad 1- Zahnradbruch	6,5
Lager - Lagerfresser und -schaden (Einstellfehler)	1,44

8.4.1.2 Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T des ersten Beispielsystems

Mit den berechneten Formparametern $b_{(2)}$ für die Bauteile „Zahnrad“ und Lager“ ist es nun möglich, auch die charakteristische Lebensdauer T für die zweiparametrische Weibullverteilung zu berechnen. Dazu werden die berechneten Formparameter des jeweiligen Bauteils zusammen mit dem Bezugspunkt in Gleichung (6.5) eingefügt. Die bereits nach T aufgelöste Gleichung ergibt die in Tabelle 8.14 zusammengefassten, für die ausgewählten Bauteile berechneten Werte für die charakteristische Lebensdauer T .

Tabelle 8.14: Charakteristische Lebensdauer T der betrachteten Bauteile

Bauteil mit Fehler	berechnete charakteristische Lebensdauer T
Zahnrad 1- Zahnradbruch	93.922 km
Lager - Lagerfresser und -schaden (Einstellfehler)	53.216.525 km

Beispielsystem 2: Anfahrelement

Für die Zuverlässigkeitsprognose des Systems Anfahrelement werden wie beim ersten Beispiel nur die Fehlerfolgen und deren vernetzte Fehler und Fehlerursachen, die mit einer Bedeutung von $B = 9$ auftreten, ausgewertet. Zu dieser Bewertungsklasse gehören die beiden Systemfehler „Drehmoment wird nicht übertragen – Liegenbleiber“ und „Anfahren ist nicht gewährleistet – Liegenbleiber“. Eine besondere Bedeutung kommt hier dem Bezugspunkt $t_{\text{Bezug}} = 200.000$ km zu.

8.4.1.3 Ermittlung der Formparameter b des zweiten Beispielsystems

Für die Bestimmung der Formparameter $b_{(2)}$ wird der Fehler „Schaden Pumpe/-schaufeln“, der mit seinen unterschiedlichen Fehlerursachen auf insgesamt 200 ppm kommt, zum obigen Bezugszeitpunkt betrachtet. Der Formparameter $b_{(2)}$ wird für diesen Ausfall abgeschätzt, siehe Tabelle 8.15.

Tabelle 8.15: Formparameter $b_{(2)}$ des betrachteten Bauteils

Bauteil mit Fehler	abgeschätzter Formparameter $b_{(2)}$
Schaden Pumpe/-schaufeln	4,5

8.4.1.4 Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T des zweiten Beispielsystems

Mit dem abgeschätzten Formparameter $b_{(2)}$ für das Bauteil „Pumpen/-rad“ ist es nun möglich, auch die charakteristische Lebensdauer T für die zweiparametrische Weibullverteilung zu berechnen. Dazu wird der abgeschätzte Formparameter zusammen mit dem Bezugspunkt in Gleichung (6.5) eingefügt. Die bereits nach T aufgelöste Gleichung ergibt den in Tabelle 8.16 dargestellten berechneten Wert für die charakteristische Lebensdauer T .

Tabelle 8.16: Charakteristische Lebensdauer T des betrachteten Bauteils

Bauteil mit Fehler	berechnete charakteristische Lebensdauer T
Schaden Pumpe/-schaufeln	1.327.436 km

8.4.2 Ermittlung der Lebensdauerverteilungen für Bauteil und System

Mit den berechneten Formparametern und den charakteristischen Lebensdauern sind die Verteilungsparameter für die Bauteile bestimmt. Damit können die Weibullverteilungen in ein Weibullpapier eingezeichnet werden. Für die endgültige Beschreibung des Systemausfallverhaltens werden alle einzeln ermittelten Verteilungen nach der Systemtheorie, vgl. Gleichung (6.6), zusammengerechnet und die Verteilungsparameter für die Verteilung zur Beschreibung des Systemverhaltens abgeleitet.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Die Verteilungsparameter sind für das Anpassungsgetriebe $b = 6,60$ und $T = 83.957$ km. Wie im Grundlagenkapitel 6.2 beschrieben, muss für die endgültige Verteilung noch die Verschiebung, die notwendig ist, um eine zielgerichtete und realitätsnahe Prognose zu erstellen, ermittelt werden. Das Beispiel „Stirnradgetriebe“ weist eine geringe Systemkomplexität auf. Daher kann mit Bild 6.5, in dem der Zusammenhang zwischen Systemkomplexität und Verschiebungsfaktor dargestellt ist, die endgültige Lage der Verteilung bestimmt werden. Der Verschiebungsfaktor, der für dieses Beispiel ermittelt bzw. abgelesen werden kann, ist ca. $f_A = 5,0 \%$ (nach links im Weibullpapier). Die Verteilung vor und nach der Verschiebung ist in Bild 8.12 dargestellt. Die endgültigen Verteilungsparameter sind in Tabelle 8.17 zusammengefasst.

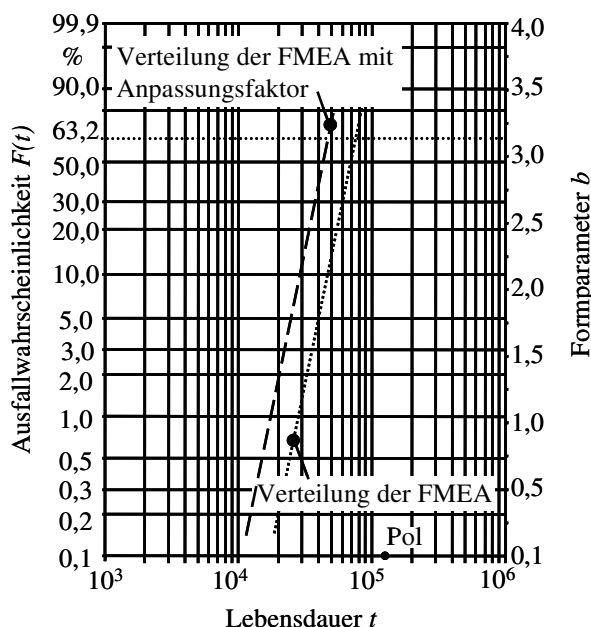


Bild 8.12: Systemausfallwahrscheinlichkeitsverteilung mit und ohne Verschiebungsfaktor f_A

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 8.17 wird gut ersichtlich, wie der Verschiebungsfaktor sich auf die Parameter der Systemverteilung auswirkt.

Tabelle 8.17: Parameterübersicht der Systemausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

	Formparameter $b_{(2)}$	charakteristische Lebensdauer T
$F(t)$ des Systems	6,6	83.957 km
$F(t)$ des Systems inkl. f_A	6,6	79.339 km

Der Formparameter bleibt bei dieser Anpassung unverändert, weil auch der prinzipielle Ausfallverlauf bestehen bleibt. Die Anpassung bzw. Verschiebung wirkt sich nur auf die Lage, d.h. auf die charakteristische Lebensdauer bzw. auch auf die B_{10} -Lebensdauer als wichtige Kennzahl technischer Systeme aus. Über das Beispielsystem kann damit eine gute Aussage bzgl. des zu erwartenden Ausfallverhaltens gemacht werden.

Aus diesem Musterbeispiel wird auch ersichtlich, dass bei den betrachteten Fehlern mehrere Bearbeitungsstände existieren, die das Ergebnis und die Genauigkeit der Prognose zur Ausfallwahrscheinlichkeit für die Bauteile bzw. für das System beeinflussen bzw. verändern. In der Regel führt die FMEA zu einer Verbesserung der Auftretenswahrscheinlichkeitsbewertung der Fehlerursache. Das heißt aber auch, dass die Prognose zu Beginn der FMEA schlechter ist und erst über die verschiedenen Aktualisierungsschleifen, die im Rahmen der Produktentwicklung durchgeführt werden, immer besser und aussagekräftiger wird.

Beispielsystem 2: Anfahrelement

Die aufgrund der Komplexität angenommenen Verteilungsparameter sind überschlägig aus Tabelle 8.15 und Tabelle 8.16 für den „Schaden Pumperad/-schaufeln“ abgeleitet und werden für das Anfahrelement mit $b = 5,40$ und $T = 500.000$ km abgeschätzt. Wie zuvor beschrieben, muss für die endgültige Verteilung noch die Verschiebung, die notwendig ist, um eine zielgerichtete und realitätsnahe Prognose zu erstellen, ermittelt werden. Das Beispiel „Drehmomentwandler“ weist eine geringe bis mittlere Systemkomplexität auf. Mit Bild 6.5, das den Zusammenhang zwischen Systemkomplexität und Verschiebungsfaktor zeigt, kann die endgültige Lage der Verteilung bestimmt werden. Der Verschiebungsfaktor, der für dieses Beispiel ermittelt bzw. abgelesen werden kann, ist ca. $f_A = 9,0 \%$ (nach links im Weibullpapier). Die Verteilungsparameter für das Systemausfallverhalten sind in Tabelle 8.18 dargestellt.

Tabelle 8.18: Parameterübersicht der Systemausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

	Formparameter $b_{(2)}$	charakteristische Lebensdauer T
$F(t)$ des Systems	5,4	500.000 km
$F(t)$ des Systems inkl. f_A	5,4	455.000 km

8.5 Mehrfachfehlerbetrachtung

Im Folgenden wird die Mehrfachfehlerbetrachtung mittels der FMEA und dem entsprechenden Formblatt behandelt.

Beispielsystem 1: Anpassungsgetriebe

Die Analyse zeigt, dass das „Anpassungsgetriebe“ keine Doppel- bzw. Mehrfachfehler aufweist. Die Absicherung und die Lebensdauerprognose für das betrachtete Stirnradgetriebe ist damit vollständig und kann als Teilumfang in die weiteren Untersuchungen des Gesamtantriebsstrangs eingebunden werden. Im Gesamtantriebsstrang wird das Anpassungsgetriebe mit einer hydraulisch gesteuerten Kupplung in den Leistungsfluss geschaltet. Diese Einbindung in das Gesamtsystem bildet dann ein Beispiel und Demonstrationsobjekt für Mehrfachfehlerbetrachtungen.

Die „Zuschaltung Kupplung“ wird mit hydraulischem Druck gesteuert. Beim Zuschaltvorgang wird in der elektronischen Steuerung darauf geachtet, dass während der Schaltung keine Momentenerhöhungsanforderung aus dem Hauptgetriebe erfolgt, da es in diesem Fall durch ein zu hartes Zuschalten zu Komforteinbußen kommen kann. Die Hydraulik hat einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Zuschaltung. Fehler bzw. Fehlerursachen in der hydraulischen Steuerung führen sehr schnell zu „Komforteinbußen“. Mit den Kenntnissen über das System der „Zuschaltkupplung“ kann das Formblatt der FMEA für Einfachfehler ausgefüllt werden. Für die Ansteuerung der Kupplung heißt das, dass der Fehler der ungewollten Momentenerhöhung bzw. des ungewollten Momentenstoßes aufgrund einer möglichen fehlerhaften Ansteuerung bzw. Anforderung in der Zuschaltroutine verursacht wird. Diese mögliche Fehlerursache soll eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $A = 3$ haben. Mit Hilfe von Funktionstests soll überprüft werden, ob diese Fehlerursache nachvollzogen werden kann und somit entdeckbar ist. Dann kann die Entdeckungswahrscheinlichkeit dieser Fehlerursache bewertet werden, hier mit $E = 3$.

Die Hydraulik hat, wie beschrieben, einen hohen Anteil an einer guten Zuschaltung des Stirnradgetriebes. Als mögliche Fehler, aufgrund derer das Anpassungsgetriebe nicht in den Leistungsfluss integriert werden kann, können zwei mögliche Fehlerursachen definiert werden. Zum einen kann das Ansteuerungsventil in der hydraulischen Schaltplatte klemmen, zum anderen ist die Pumpenleistung zur Erzeugung des Anpressdrucks nicht ausreichend groß. Wenn die Pumpenleistung n.i.O. (\equiv nicht in Ordnung) ist, kann kein ausreichender Druck aufgebaut werden, der für die schnelle und sichere Zuschaltung notwendig ist. Diese beiden Fehlerursachen führen ebenso wie der Momentenstoß aus der fehlerhaften Ansteuerung zu einem Durchrutschen der Kupplung und zur Fehlerfolge „Komforteinbuße“. Die beiden Fehlerursachen in der Hydraulik werden mit $A = 3$ und $A = 2$ bewertet. Diese Bewertungen sind durch Entwick-

lungserfahrung abgedeckt und die Einschätzung durch die Auslegung nach Firmenrichtlinien nachvollziehbar. Die Entdeckungsmaßnahmen sind jeweils mit $E = 2$ bewertet worden.

In der Mehrfachfehlerbetrachtung werden alle möglichen Einfachfehler mit ihren bereits betrachteten Fehlerursachen dahingehend untersucht, ob eine Kombination zu einem veränderten Fehler und damit zu einer weiteren Fehlerfolge führen kann. Nach dieser Untersuchung werden noch andere neue mögliche kombinatorische Fehlerursachen ermittelt. Wie das Beispiel und die beschriebenen Fehlerfolgen, Fehler und Fehlerursachen im Formblatt behandelt werden, ist in Bild 8.13 zu sehen.

Fehlerfolge	B	≥ 1 &	Fehler	≥ 1 &	Fehlerursache	Vermeidung	A	Entdeckung	E	RPZ		
Komforteinbuße	6	≥ 1	Momentenstoß mit Rutschen Kupplung	≥ 1	Fehlerhafte Ansteuerung	Signalüberwachung	3	Funktions-test	3	54		
					Druckeinbruch mit Rutschen Kupplung	≥ 1	Ventil klemmt	Erfahrung Mitarbeiter	3	Test der Hydraulik	2	36
							Pumpe n.i.O.	Auslegung nach Richtlinie	2	Test	2	24
Keine Anwendung mit Anpassungsgetriebe	8	≥ 1	Zerstörung der Kupplung	&	Ventil klemmt	Signalüberwachung	1	Funktions-test	5	40		
					Fehlerhafte Ansteuerung	Erfahrung Mitarbeiter		Test der Hydraulik				

Bild 8.13: Auszug aus dem Formblatt für die Zuschaltkupplung des Lösungsbeispiels Zahnradgetriebe

Dieser Formblattauszug ist auch ein Beispiel für die Behandlung eines Doppelfehlers, der für die Zuschaltkupplung im Gesamtsystem Antriebstrang identifiziert werden konnte. Der Doppelfehler setzt sich aus einer fehlerhaften Ansteuerung und einem Ventilklemmer in der Hydraulik zusammen. Diese Kombination kann zu einem Totalausfall der Zuschaltkupplung führen.

Dieser so ermittelte Doppelfehler wird als Möglichkeit in der FMEA dokumentiert. Das Klemmen des Ventils kann auch über eine Überwachung während des Betriebs nicht entdeckt werden. Das Ventil wird nur zur Zuschaltung verwendet. Es handelt sich somit dabei um einen schlafenden Einfachfehler. Kommt im Augenblick der Zuschaltung nun der weitere Fehler „Momentenanforderung fehlerhaft“ hinzu, dann treffen zwei Fehlerursachen zusammen, die den notwendigen Anpressungsdruck zur

Schaltung der Kupplung so reduzieren, dass die Differenzdrehzahlen in der Kupplung so groß werden, dass die Kupplung zerstört wird (Kupplungsbeläge überhitzen) und der Einsatz als zuschaltbares Anpassungsgetriebe nicht mehr gegeben ist.

Beispielsystem 2: Anfahrelement

Für das System Anfahrelement zeigt die Mehrfachfehlerbetrachtung mittels FMEA (vgl. Kapitel 7), dass auch bei diesem System ein potentieller Doppelfehler auftreten kann. Es ist genau der Fehler wie bei dem Beispielsystem 1 - „Momentenanforderung fehlerhaft“ und „Ventil klemmt“. Da es sich um den gleichen Mehrfachfehler handelt, ist die Vorgehensweise aus dem Beispielsystem 1 übertragbar. Der einzige Unterschied bei dieser Betrachtung besteht in der Auswirkung auf das Gesamtsystem. Beim System Anfahrelement führt der Fehler „Zerstörung der Kupplung“ (hier die Wandlerüberbrückungskupplung) zur Fehlerfolge „Wirkungsgrad wird nicht gewährleistet“ mit einer Bedeutungsbewertung von $B = 8$, vgl. Tabelle 8.5.

Damit kann auch hier die Absicherung und die Lebensdauerprognose für das Anfahrelement als vollständig angesehen werden. Die Ergebnisse können nun als Teilumfang in die weiteren Untersuchungen des Gesamtantriebs eingebunden werden.

8.6 Fazit

Die Musterbeispiele zeigen, dass die vorgestellte Vorgehensweise der integrativen Methode zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse von Bauteilen und Systemen über den gesamten Produktentwicklungszyklus anwendbar und sinnvoll ist, um sichere, langlebige und qualitativ hochwertige Produkte am Markt anzubieten. Durch die Nachvollziehbarkeit und besonders durch die Durchgängigkeit und Weiterverwendung der Informationen ergibt sich ein aussagefähiges Entwicklungstool. Ein ganz wesentlicher Vorteil liegt in der geringen Anzahl an unterschiedlichen Methoden, mit denen der Bereich der qualitativen Zuverlässigkeit abgedeckt wird. Durch die permanente Verifikation an Praxisbeispielen ist der in dieser Arbeit vorgestellte Methodeansatz sehr geeignet und gegenüber allen anderen alternativen Methoden, besonders zum Beispiel bei der Konzeptauswahl, bezüglich der Aussagesicherheit, der Bearbeitungsgeschwindigkeit und der umfassenden Analysetechnik überlegen. Der Arbeitsschritt zu einer Prognose des Ausfallverhaltens von Bauteilen und von Systemen sowie der Mehrfachfehlerbetrachtung erfordert keinen hohen zeitlichen Mehraufwand. Die Praxisanwendung in allen Industriezweigen, besonders aber in der entwicklungsintensiven Fahrzeugindustrie, ist sehr anwenderfreundlich, zeitsparend und angesichts der sicheren Ergebnisse auch sehr kostengünstig.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Forderung nach einer frühzeitigen, zuverlässigkeitsorientierten Konzeptauswahl sowie einer weiterführenden qualitativen Absicherung und Zuverlässigkeitsprognose im Produktentstehungsprozess zu einem noch früheren Zeitpunkt als bisher wird mit der in dieser Arbeit ermittelten neuen methodischen Vorgehensweise erfüllt. Dabei werden die umfangreichen Wissensinhalte und Informationen über Wechselwirkungen von Funktionen oder Fehlern sowie das Fachwissen, die Erfahrungen und die Kompetenz der Mitarbeiter aus Konstruktion, Entwicklung, Versuch und Service genutzt. Die Ergebnisse sind aussagekräftig, aufgabenorientiert, nachvollziehbar und wieder verwendbar. Durch diese methodische Problembearbeitung können Kosteneinsparpotentiale optimiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methodenbausteine eines integrativen Ansatzes zur frühzeitigen Konzeptauswahl, zur umfassenden Absicherung und zur Lebensdauerprognose erarbeitet und anhand von zahlreichen Systembeispielen untersucht und mit vorliegenden Praxisergebnissen validiert und verifiziert.

Zunächst werden hierfür die wesentlichen Aspekte und Grundlagen, die in sehr frühen Entwicklungsphasen zur Identifizierung und Auswahl geeigneter Lösungskonzepte erforderlich sind, bestimmt und mit bereits bestehenden Methoden und Vorgehensweisen verglichen. Im Anschluss daran wird ein Anforderungsprofil an den zu erarbeitenden Methodenansatz erstellt, der neben der zuverlässigkeitsorientierten Auswahl des Konzepts unter Berücksichtigung der technischen Kenntnisse und Kosten-/Zeitschiene auch die Überführung in andere Methoden des Produktentwicklungsprozesses erlaubt.

Ein besonderer Schwerpunkt des Lösungsvorschlags liegt darauf, alle Informationen und Bewertungen so weiter nutzen oder aufbereiten zu können, dass eine optimale Schnittstelle zu der Standardmethode, der FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse), generiert werden kann.

Mit dem qualitativen Konzeptvergleich wurde ein Methodenbaustein definiert, der die an ihn gestellten Aufgaben optimal erfüllt und die Schnittstellen zur FMEA ermöglicht. Durch die Definition des qualitativen Konzeptvergleichs als Konzeptauswahlmethode wird die Ermittlung des entwicklungsfähigsten Konzepts unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit, des Kosten- und des Zeitaufwands und damit den wichtigsten Einflussfaktoren auf die spätere Systemzuverlässigkeit ermöglicht.

Durch die Schnittstelle zur FMEA wird ein wesentliches Grundlagenwissen, das bereits in sehr frühen Entwicklungsphasen erarbeitet werden kann, im weiteren Entwicklungsprozess genutzt und in den Anpassungsschleifen der FMEA im Detail erweitert. Mit Hilfe der FMEA und dem ausgearbeiteten Ansatz, mit dem die Inhalte, Fehlerzusammenhänge und Informationen über die Fehlerhäufigkeiten nutzbar gemacht und als Eingangsinformationen für Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt werden, ist ein bedeutender Schritt zu einer sehr frühen Prognose des Ausfallverhaltens möglich geworden. Bisher wurde das enorme Wissen aus der FMEA für Prognosen nicht genutzt. Durch die Überführung in Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen sind, nach ausgiebiger Analyse der Ergebnisse, firmen- und systemspezifische Anpassungsfaktoren ermittelt worden. Damit bietet diese Prognosetechnik ein für die Zuverlässigkeitstechnik enormes Potential, z.B. für die Testplanung mit Vorkenntnissen, für die Ermittlung des Ersatzteilbedarfs und damit auch für ökonomische Untersuchungen und Abschätzungen, und das noch bevor Systemtests und Bauteilerprobungen vollständig durchlaufen sind.

Durch die Untersuchung und die Analyse der Integration der Mehrfachfehlerbetrachtung in der FMEA und in das zugehörige Formblatt wurden auch die Potentiale der FMEA für die zukünftige Anwendbarkeit im Umfeld der immer komplexer werdenden Entwicklungen geprüft. Durch die Erweiterung der Vorgehensweise ist die FMEA zukünftig in der Lage, der Forderung nach Doppelfehler- und Mehrfachfehlerbetrachtung gerecht zu werden.

Der Ausspruch von Jeremy Clarkson, dass jeder Fehler macht, aber die Auswirkung sich drastisch darin unterscheidet, wo man sie macht, beinhaltet viel Wahres. Daher ist es wichtig, mit Hilfe einer umfassenden und über den gesamten Produktentwicklungsprozess übergreifenden Absicherung alles zu tun, damit die Entwicklung von der Konzeptphase bis zur Serieneinführung abgesichert wird. Dazu bringt der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz seinen Beitrag.

Für die zukünftigen Untersuchungen und Auswertungen bietet sich die Erweiterung und Verbesserung der Prognoseaussage zur Ausfallwahrscheinlichkeit und Lebensdauer, basierend auf den FMEA-Ergebnissen, an. Hier verbirgt sich erhebliches Potential zur Überprüfung, ob sich die erarbeiteten Zusammenhänge für andere Systeme, für andere Firmen bzw. anderen Branchen ähnlich verhalten und diese gegebenenfalls in einer Datenbank zusammengefasst werden können. Weiter sollte die Untersuchung der tatsächlichen Beeinflussung der Einbeziehung der Doppel- und Mehrfachfehlerbetrachtung in der Ausfallwahrscheinlichkeitsprognose und auf den Anpassungsfaktor angestrebt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Clarkson, J.: The world according to Clarkson, Penguin Books, London, 2005.
- [2] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Springer, Berlin, 2004.
- [3] Riccò R.; Pickard, K.; Bertsche B.: Legal Aspects of Product Liability and FMEA. Proc. ESREL '06-Conference, 18. - 22. September 2006, Estoril, Portugal.
- [4] The council of the European Communities, Council Directive 85/374/EEC, Official Journal L210, p. 0029-0033.
- [5] Reuter A.: Produkthaftung und Risikomanagement, Rückrufe aus Sicht eines Zulieferers, risk.tech 2004, München, 2004.
- [6] Wörner C.M.: Produkthaftung und FMEA, Frankfurt, 1997.
- [7] Produkthaftungsgesetz, BGB I 2674, 2002.
- [8] DIN (Hrsg.): DIN Fachbericht 78 - Technische Spezifikation ISO TS 16494, Beuth, Berlin, 2002
- [9] Pickard, K.; Müller P.; Bertsche B.: Synergies of FMEA and other qualitative quality methods for an optimised quality assurance. Proc. 5th international conference of QRM 2004, 1st and 2nd April 2004, Oxford, England, pp 35-38.
- [10] Pickard, K.; Müller P.; Bertsche B.: FMEA as Design Monitor, Regulation and Management Tool Parallel to Product Design Cycle for Optimised Quality Assurance. Proc. PSAM 7 / ESREL '04-Conference, 14. - 18. June 2004, Berlin, Germany, pp. 3287-3292.
- [11] Müller P.; Pickard, K.; Bertsche B.: Analysis and Inclusion of Synergies of Common Quality Management Methods for Optimised Quality Assurance. Proc. PSAM 7 / ESREL '04-Conference, 14. - 18. June 2004, Berlin, Germany, pp. 3497-3502.
- [12] Edmund, G.: Entwickeln und Konstruieren mit System: Wege zur rationellen Lösungsfindung. Band 51 Kontakt & Studium, 2. Auflage, expert Verlag, Ehningen 1979.
- [13] Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer, Berlin 1997.

- [14] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre. 5. Auflage, Springer, Berlin 2003.
- [15] Wenzel, R.; Müller, J.: Entscheidungsfindung in Theorie und Praxis. VDI-Seminar, Stuttgart.
- [16] Gutsch, R.: Entscheidungshilfe durch Systemtechnik. Lehrgang der Technischen Akademie Esslingen, 1972.
- [17] Habermellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: System Engineering: Methoden und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1992.
- [18] Siemens AG: Organisationsplanung – Planung durch Kooperation. Siemens AG, München, 1974.
- [19] Kesselring, F.: Bewertung von Konstruktionen. Deutscher Ingenieur-Verlag GmbH, Düsseldorf 1951.
- [20] VDI (Hrg.): VDI-Richtlinie 2225 – Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung. VDI, 1998.
- [21] Habermellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: System Engineering: Methoden und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich 1992.
- [22] Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill Book Company, New York 1980.
- [23] Knosala, R.: Methoden zur Bewertung von Bauelementen als Voraussetzung für die Entwicklung von Baukastensystemen, Teile 1 und 2. Institut für Mechanik und Grundlagen der Maschinenkonstruktion, TU Gliwice 1989.
- [24] Knosala, R.: Objektivierung des Bewertungsprozesses beim Konstruieren. Konstruktion 43 (1991), S. 344-352.
- [25] Breiing, A.: Bewertung von Konstruktionsvarianten technischer Systeme. Schweizer Maschinenmarkt 9 (1990), S. 52-57.
- [26] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Wittmann'sche Buchhandlung, München, 1970.
- [27] VDA (Hrg.): Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. Teil 2: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Band. 4, VDA, Frankfurt am Main, Germany, 1996.
- [28] DIN 25448 – Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse). DIN, 1991.

- [29] QS-9000: FMEA - Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse, 3. 2001, Carwin Ltd.
- [30] DGQ: Band 13-11 FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, 2. Aufl. 2001, ISSN 0949-4782
- [31] Müller, D. H.; Tietjen, T.: FMEA-Praxis, 2000, ISBN 3-446-21236-1.
- [32] Masing (Hrsg.): Handbuch der Qualitätssicherung, 2. Auflage, München, 1988.
- [33] IEC 60812: Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure modes and effects analysis (FMEA). Ed. 2. 56/735/CD, 2001.
- [34] Verband der Automobilindustrie (Hrsg.): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Teil 2, 3. Auflage, VDA, Frankfurt 2000
- [35] BSI: BS5760 – Reliability of systems, equipment and component – Part 5 – Guide to failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). British Standard, 1991.
- [36] Rabbitt, J.T.; Bergh, P.A.: "The QS-9000 book: The fast track to compliance". New York, NY: Quality Resources, 1998. ISBN 0-527-76334-9.
- [37] Department of Defense (US): "Military Standard – procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis". MIL-STD-1629A. 1980.
- [38] SAE: "SAE FMECA-Standard". ARP5580.
- [39] WEKA (Hrg). Qualitätsmanagementmethoden – Ausführung, Einführung, Durchführung. Verlagsdruckerei Kessler, Bobingen, 2003.
- [40] Magnusson; Kroslid; Bergman: Six Sigma umsetzen – Die neuen Qualitätsstrategien für Unternehmen. Hanser, München, 2001.
- [41] Kistner, W.: FMEA noch besser anwenden. QZ 41 (1996) 2, S. 827-830.
- [42] DaimlerChrysler AG: System FMEA Leitfaden für Anwender. Stuttgart, 1995.
- [43] Carlson, C.S.: Lessons Learned for Effective FMEAs. Proc. RAMS 2007, 22nd - 25th January 2007, Orlando (FL), USA.
- [44] Wassermann, G.S.; Goktas, Y.: Enhanced FMEA. 2001 Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA. 2001.
- [45] Dyadem (ed.): Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis – For Automotive, Aerospace and General Manufacturing Industries. Revision 2, Dyadem Press, Ontario, 2003.

- [46] SAE: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Process (Process FMEA), SAE J-1739, 2000.
- [47] Chrysler Corporation, Ford Motor Company & General Motors Corporation: Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). 2nd Edition, AIAG, 1995.
- [48] Abernethy, R.B.: The New Weibull Handbook. Huston: Distr. Golf Publishing Company, 1994.
- [49] Sachs, L.: Angewandte Statistik: Anwendung stochastischer Methoden. 9. überarbeitete Auflage, Springer, Berlin, 1999.
- [50] Härtler, G.: Statistische Methoden für Zuverlässigkeitsanalyse, Springer, Berlin, 1983.
- [51] Voß, W.: Taschenbuch der Statistik. Hanser, München, 2000.
- [52] Kühlmeyer, M.: Statistische Anwendungsmethoden für Ingenieure. Springer, Berlin, 2001.
- [53] Beichelt, F.: Stochastik für Ingenieure: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Mathematische Statistik. Teubner, Stuttgart, 1995.
- [54] Springer (Hrsg.): Springer Handbook of Engineering Statistics, Springer, Berlin, 2006.
- [55] O'Connor, P.D.T.: Zuverlässigkeitstechnik. 2. Auflage, VCH, Weinheim, 1990
- [56] Weibull, W. A.: Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Journal of Applied Science, S. 293 – 297, 1951.
- [57] Luko, S. N.: A Review of the Weibull Distribution and Selected Engineering Applications. SAE-Paper, 1999.
- [58] Bedford, T.: Probabilistic Risk Analysis – Foundations and Methods. Cambridge University Press, 2001.
- [59] Birolini, A.: Reliability Engineering – Theory and Practice, Springer, Berlin, 1999.
- [60] Dodson, B.: Weibull Analysis. ASQ Quality Press, WI, 1994.
- [61] Pfeifer, T.: Praxisbuch Qualitätsmanagement. 2. überarbeitete Auflage, Hanser, 2001.
- [62] Kastreuz, G.: Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagement. Vieweg, Braunschweig, 1994.

- [63] Akao, A.: Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design. Productivity Press, Cambridge (Massachusetts/USA), 1990.
- [64] Hering E., Triemel J., Blank H.-P.: Qualitätssicherung für Ingenieure. VDI, Düsseldorf, 1993.
- [65] Westerbusch, R.: Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagement. Vieweg, Wiesbaden, 1998.
- [66] Zheng, R.: Übersicht und Vergleich der qualitativen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik über den Entwicklungszyklus bzgl. deren Einsatzmöglichkeiten und Aussagefähigkeit. Diplomarbeit (IMA), Universität Stuttgart, 2004.
- [67] Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. Hanser, München, 2002.
- [68] Syska, A.: Produktionsmanagement. Gabler, Wiesbaden, 2006.
- [69] Ishikawa, K.: "Guide to Quality Control". Asian productivity organisation, 1984.
- [70] Grimms, T.: Grundlagen Qualitäts- und Risikomanagement. Vieweg, 2001.
- [71] Masing, W.: Deutsche Gesellschaft für Qualität DGQ-Schrift 11-19 Einführung in die Qualitätslehre. DGQ, Frankfurt, 1994.
- [72] Ericson, C.: Fault Tree Analysis – A History from the Proceeding of the 17th International System Safety Conference, 1999.
- [73] Schlick, G. H.: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Maschinen, Geräten und Anlagen mit Ventilen. Expert, 2001.
- [74] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4008 Blatt 2 Boolesches Model. VDI, Düsseldorf, 1998.
- [75] Vesely, W. E.; Goldberg, F. F.; Roberts, N. H.; Haasl, D. F.: Fault tree handbook. United States Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1981.
- [76] Andrews, J.; Dugan, J.: Fault Tree Analysis. For Reliability and Risk Assessment. WILEY & SONS, 2002.
- [77] Davidson, J.: The Reliability of Mechanical Systems. 2nd Edition, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1994.
- [78] DIN 25424 – Fehlerbaumanalyse. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth, Berlin, 1981 (Teil 1), 1990 (Teil 2).
- [79] Andrews, J.D.; Moss, T.R.: Reliability and Risk Assessment. Professional Engineering Publications Ltd., 2002.

- [80] Andrews, J.D.: Fault Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams. Proc. RAMS 2007, 22nd - 25th January 2007, Orlando (FL), USA.
- [81] Barlow, R. E.; Fussell, J. B.; Singpurwalla, N. D. (ed.): Reliability and Fault Tree Analysis – Theoretical and Applied Aspects of System Reliability and Safety Assessment. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1975.
- [82] IEC 61025 Edition 2: Fault Tree Analysis. 2007.
- [83] NRC: Fault Tree Handbook. Nuclear Regulatory Commission Washington D.C., NUERG-0942, 1981.
- [84] Henley, E.J.; Kumamoto H.: Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. IEEE Press, 2nd Edition, 1996.
- [85] Pickard, K.; Müller P.; Bertsche B.: Reliability Related Concept Comparison and Derivation of a Risk Analysis in Early Design Stages. Proc. RAMS 2006, 23rd - 26th January 2006, Newport Beach (CA), USA.
- [86] Pickard, K.; Bertsche B.: Quality Assurance and Reliability Prediction over a Design Cycle. Proc. 6th International Conference of QRM 2007, 22nd - 23rd March 2007, Oxford, UK.
- [87] Müller, P.; Pickard, K.; Bertsche B.: Extended Possibilities to Identify Call for Actions in FMEA. Proc. ESREL '06-Conference, 18. - 22. September 2006, Estoril, Portugal.
- [88] Pickard, K.; Leopold, T.; Bertsche B.: Reliability Related Concept Assessment in Early Design Stages. Proc. ESREL '06-Conference, 18. - 22. September 2006, Estoril, Portugal.
- [89] Miller, G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. The Psychological Review, Vol. 6, p. 81-97, 1956.
- [90] Dieter A.; Pickard K.; von Eiff H.; Bertsche B.: Ermittlung von Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen auf Basis von FMEA-Bewertungen und Verifikation mit Felddaten. 23. Tagung Technische Zuverlässigkeit, 22. und 23. März 2007, Stuttgart / VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, VDI-Berichte, 2007.
- [91] Pickard, K.; Bertsche B.: Determination of Failure Probability Distribution of Complex Systems based on FMEA Assessment. Proc. ESREL '06-Conference, 18. - 22. September 2006, Estoril, Portugal.

- [92] Dieter, A.: Ermittlung von Lebensdauerverteilungen zur Zuverlässigkeitsbeschreibung auf Basis von FMEA Bewertungen, Diplomarbeit, Fachhochschule für Technik Esslingen, 2006.
- [93] Haibach, E: Betriebsfestigkeit; 2. Auflage, Springer, Berlin, 2002.
- [94] Yang, Q.: Zuverlässigkeit von Zahnradgetrieben; Diss. Institut für Konstruktionstechnik, Ruhr-Universität Bochum 1989.
- [95] Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren. Hanser, München, 2003.
- [96] Pickard K; Müller P; Bertsche B: Multiple Failure Mode and Effects Analysis – An Approach to Risk Assessment of Multiple Failures with FMEA. Proc. RAMS 2005, 24th - 27th January 2005, Alexandria (VA), USA.
- [97] Price, C.J., Taylor, N.S.: FMEA for multiple failures. 1998 Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA. 1998.
- [98] Looman, J.: Zahnradgetriebe. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2002.
- [99] Förster, H.J.: Automatische Fahrzeuggetriebe, Grundlage, Bauformen, Eigenschaften, Besonderheiten. Springer, Berlin, 1990.
- [100] Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.: Fahrzeuggetriebe. Springer, Berlin, 2007.
- [101] Pickard, J.: Schlupfmindernde Maßnahmen an Drehmomentwandlern von automatischen Pkw-Getrieben. Antriebstechnik 8/1993, S. 51-54.
- [102] Gimmler, J.: Drehmomentwandler mit Überbrückungskupplung der heutigen Personenwagen-Automatikgetriebe. ATZ 2/1986, S. 1-8.
- [103] Hein, L., Nauerz, H., Wörner, O.: Aufbau und Steuerung einer Schlupfgeregelten Überbrückungskupplung im hydrodynamischen Drehmomentwandler. VDI Bericht Nr. 1175, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.

Anhang

A 1: Bewertungskatalog der FMEA

	Bedeutung	Auftreten	Entdeckung
10 9	Sicherheitsrisiko, Nichterfüllung gesetzlicher Vorschriften, Liegenbleiber	Sehr häufiges Auftreten der Fehlerursache, unbrauchbares, ungeeignetes Konstruktionsprinzip 500.000 – 100.000 ppm	Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist unwahrscheinlich, Zuverlässigkeit der Konstruktionsauslegung wurde nicht oder kann nicht nachgewiesen werden. Nachweisverfahren sind unsicher 90 %
8 7	Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs stark eingeschränkt, sofortiger Werkstattaufenthalt zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung wichtiger Teilsysteme.	Fehlerursache tritt wiederholt auf, problematische, unausgereifte Konstruktion 50.000 – 10.000 ppm	Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist weniger wahrscheinlich, wahrscheinlich nicht zu entdeckende Fehlerursache, unsichere Prüfungen 98 %
6 5 4	Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs eingeschränkt, sofortiger Werkstattaufenthalt nicht zwingend erforderlich, Funktionseinschränkung von wichtigen Bedien- und Komfortsystemen.	Gelegentlich auftretende Fehlerursache, geeignete, im Reifegrad fortgeschrittene Konstruktion 5.000 – 1.000 – 500 ppm	Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist wahrscheinlich, Prüfungen sind relativ sicher 99,7 %
3 2	Geringe Funktionsbeeinträchtigung des Fahrzeugs, Beseitigung beim nächsten planmäßigen Werkstattaufenthalt, Funktionseinschränkung von Bedien- und Komfortsystemen.	Auftreten der Fehlerursache ist gering, bewährte konstruktive Auslegung 100 – 50 ppm	Entdecken der aufgetretenen Fehlerursache ist sehr wahrscheinlich, Prüfungen sind sicher, z.B. mehrere voneinander unabhängige Prüfungen 99,9%
1	Sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung, nur vom Fachpersonal erkennbar.	Auftreten der Fehlerursache ist unwahrscheinlich. 1ppm	Aufgetretene Fehlerursache wird sicher entdeckt 99,99 %

A 2: Übersicht Formblatt Konzeptvergleich

System: (1)		Konzept: (4)				Gesamtentwicklungsfähigkeit: (11)	
Nr.	Systembeschreibung	G	T	K	E	Konzeptbeschreibung	
1	Systemanforderung: (2)	(7)	(8)	(9)	(10)	Funktionsweise: (5)	Komponenten/Elemente (12)
	Systemfehler: (3)					Fehlerbeschreibung: (6)	Fehler (13)	% (14)

- 1 Feld für Definition des Systems
- 2 Feld für die Beschreibung der Systemanforderung
- 3 Feld für die Beschreibung des Systemfehlers
- 4 Feld für die Definition des Konzepts
- 5 Feld für die Beschreibung der Funktion des Konzepts
- 6 Feld für die Beschreibung der Fehlerfunktion/Fehler des Konzepts
- 7 Feld für die Bewertung der beschriebenen Systemanforderung
- 8 Feld für die Bewertung der technischen Umsetzbarkeit des Konzepts
- 9 Feld für die Bewertung des Kosten-Zeit-Faktors des Konzepts
- 10 Ausgabefeld der Entwicklungsfähigkeit der betrachteten Systemanforderung
- 11 Ausgabefeld der Gesamtentwicklungsfähigkeit des Konzepts

Für die Überführung vom Konzeptvergleich in System-FMEA

- 12 Feld für die Zusammenstellung der identifizierten Komponenten und Elementen
- 13 Feld für die Zusammenstellung der identifizierten Fehler und Ursachen
- 14 Feld für die Zusammenstellung und Vergabe der %-Werte auf die Fehler

A 3: Bewertungskatalog des qualitativen Konzeptvergleichs

Bewertungszahl	Gewichtung	Technische Umsetzbarkeit	Kosten-Zeit-Faktor	Abgeschätzte Zuverlässigkeit
1,00	Keine Anforderung, keine Gewichtung	Funktion kann sehr einfach oder intuitiv umgesetzt werden	Funktion kann mit sehr geringem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um mehr als x % unterschritten	Funktion erreicht sehr hohe Zuverlässigkeit; $0,999 > R(t) > 0,996$
0,75	Komfortanforderung	Funktion kann einfach umgesetzt werden	Funktion kann mit geringem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um ca. y % unterschritten	Funktion erreicht hohe Zuverlässigkeit; $0,995 > R(t) > 0,992$
0,50	Lebensdaueranforderung	Funktion kann durchschnittlich umgesetzt werden	Funktion kann mit durchschnittlichem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden eingehalten	Funktion erreicht durchschnittliche Zuverlässigkeit; $0,991 > R(t) > 0,988$
0,25	Funktionsanforderung	Funktion kann schlecht umgesetzt werden	Funktion kann mit hohem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um ca. y % überschritten	Funktion erreicht niedrige Zuverlässigkeit; $0,987 > R(t) > 0,984$
0,00	Gesetzliche Vorschrift bzw. Anforderung, sicherheitsrelevante Anforderung	Funktion kann sehr schlecht oder nicht intuitiv umgesetzt werden	Funktion kann mit sehr hohem Kosten-Zeit-Aufwand umgesetzt werden; Vorgaben werden um mehr als x % überschritten	Funktion erreicht sehr niedrige Zuverlässigkeit; $0,983 > R(t) > 0,970$

Lebenslauf

Name: Karsten Pickard
Geburtsdatum, -ort: 12. Juni 1975 in Esslingen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig
Eltern: Richard Jürgen Pickard und
Hannelore Pickard, geb. Amend

Schulbildung:

09/1982 - 07/1986 Grundschule in Wernau am Neckar
09/1986 - 06/1995 Robert Bosch Gymnasium in Wendlingen am Neckar
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst:

07/1995 - 07/1996 Kindertagesstätte Entengraben in Esslingen

Studium:

10/1996 - 02/2003 Studium des Maschinenwesens an der Universität Stuttgart
Hauptfächer: Konstruktionslehre und Kraftfahrzeuge
Abschluss: Dipl.-Ing.

Praktische Tätigkeiten:

08/1997 - 10/1997 Grundpraktikum bei Fa. Daimler-Benz AG
05/1998 – 05/2001 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
05/2000 - 06/2000 Fachpraktikum bei Fa. AIRFLOW streamlines plc., Northampton (UK)
04/2001 – 05/2001 Fachpraktikum bei Fa. DaimlerChrysler AG (Abt. EL-TA)
06/2001 – 07/2001 Fachpraktikum bei Fa. DaimlerChrysler AG (Abt. EP-MTS)
08/2001 – 02/2002 Werksstudent bei Fa. DaimlerChrysler AG (Abt. EP-MTS)

Berufliche Tätigkeiten::

03/2003 – 10/2003 Angestellter der TTI GmbH an der Universität Stuttgart
11/2003 – 10/2006 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
seit 11/2006 Entwicklungs- und Qualitätsingenieur bei der ZF Getriebe GmbH., Saarbrücken

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
3	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die 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-Verzahn mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentastlers
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. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur System-berechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und An-wendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätssystem für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräse-rherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

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

