

Melani Delonga

Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten

D 93
ISBN 3-936100-24-1

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

Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten

Von der Fakultät

Maschinenbau

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Melani Delonga

geboren in Bruchsal

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. U. Jensen

Tag der Einreichung: 20.11.2006

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2007

Institut für Maschinenelemente

2007

Meinem Mann Stipe und meinen Eltern gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin 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 Ermöglichung der Arbeit, die ständige Förderung der Arbeit und das mir stets entgegengebrachte Vertrauen.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Uwe Jensen, Institut für Angewandte Mathematik und Statistik der Universität Hohenheim, für die kritische Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts möchte ich mich für die kollegiale, bereichsübergreifende und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Bei allen Kolleginnen und Kollegen, meinen Studien- und Diplomarbeitern sowie wissenschaftlichen Hilfskräften, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Frau Monika Trost, Herrn Tillmann Hitziger und Herrn Patrick Jäger.

Für das menschlich äußerst angenehme und fachlich produktive Arbeitsklima möchte ich mich bei allen ehemaligen und aktiven Mitgliedern des „ZUV-Teams“ herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt des Weiteren den Herren Volker Metzger, Thomas Bayer, Michael Engelbreit, Dieter Arnold und Prof. Peter Gschwendner für die hervorragende Unterstützung bei der praktischen Umsetzung.

Ohne den Rückhalt und die Unterstützung meines Mannes und meiner Familie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihnen möchte ich daher in ganz besonderem Maße danken.

Stuttgart, im November 2007

Melani Delonga

Inhalt

Bezeichnungen und Formelzeichen	iii
Abstract	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik	7
2.1 Begriffe und Definitionen	7
2.2 Lebensdauervertelungen	10
2.2.1 Rechteckverteilung.....	10
2.2.2 Exponentialverteilung	11
2.2.3 Weibullverteilung.....	11
2.3 Analytische Methoden zur Parameterschätzung.....	14
2.3.1 Regressionsanalyse	14
2.3.2 Maximum-Likelihood Methode.....	15
2.4 Reparierbare Systeme	16
3 Auswertung von Lebensdauerersuchen.....	19
3.1 Typ I und Typ II Zensierung.....	21
3.2 Multiple Zensierung	22
4 Analyse unvollständiger Felddaten	27
4.1 Methoden zur Felddatenanalyse	27
4.2 Suzuki - Methode	30
4.3 Methode nach Kalbfleisch und Lawless	31
4.4 Ausfallrate nach Bayes	31
4.5 Beispielhafte Anwendung	34
4.5.1 Szenarien.....	34
4.5.2 Ergebnisse der Methode nach Kalbfleisch und Lawless.....	37
4.5.3 Ergebnisse der Ausfallrate nach Bayes.....	38
4.5.4 Gegenüberstellung der Methoden	42
4.6 Zusammenfassung.....	45
5 Analyse ungenauer Felddaten	46
5.1 Die Monte-Carlo Methode.....	46
5.1.1 Erzeugung von Pseudozufallszahlen.....	47
5.1.2 Erzeugung verteilter Zufallszahlen	48

5.2	Erzeugung synthetischer Stichproben	48
5.3	Streuende Lebensdauerverteilungen	50
5.4	Beispielhafte Anwendung	52
5.5	Zusammenfassung	54
6	Zuverlässigkeitsmanagementsystem und beispielhafte Anwendung	55
6.1	Zuverlässigkeitsmanagementsystem	55
6.2	Beispielhafte Anwendung an einem Planetengetriebe	60
6.2.1	Systemanalyse	60
6.2.1.1	Ermittlung der kritischen Systemelemente	61
6.2.1.2	Ermittlung der Zuverlässigkeitsstruktur	62
6.2.2	Bestimmung der Komponentenzuverlässigkeiten	62
6.2.2.1	Auslegung	63
6.2.2.2	Versuche	69
6.2.2.3	Online Monitoring	72
6.2.2.4	Optimierte Felddatenanalyse	75
6.2.2.5	Nutzung von Felddaten in der Produktentwicklung	77
6.3	Garantiekostenprognosemodell	79
6.3.1	Garantie und Gewährleistung	79
6.3.2	Modellaufbau und Vorgehensweise	80
6.3.3	Untersuchung von Abhängigkeiten	84
6.3.4	Ermittlung der Lebensdauerverteilungen	87
6.3.5	Berücksichtigung streuender Lebensdauerverteilungen	89
6.3.6	Simulation der Garantiekosten	91
6.3.7	Garantierweiterungen	96
6.3.8	Kostenreduzierung	99
6.3.9	Zusammenfassende Bewertung des Garantiekostenprognosemodells	102
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literatur	105

Bezeichnungen und Formelzeichen

A_D	Dauerverfügbarkeit
A_{DS}	Dauerverfügbarkeit für ein Seriensystem
b	Formparameter der Weibullverteilung
B_γ	Lebensdauer bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $\gamma\%$
$B_{\gamma k}$	Lebensdauer der Komponente k bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $\gamma\%$
$B_{\gamma k_LW}$	Lebensdauer der Komponente k bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $\gamma\%$
$c_{\text{Garantie } j,r}$	simulierte Garantiekosten je Replikation r
$\bar{c}_{\text{Garantie}}$	Mittelwert der Garantiekosten
c_i	Anzahl der Zensierungen im Intervall i
\tilde{c}_i	korrigierte Anzahl der Zensierungen im Intervall i
$c_{j,r}$	simulierte Gesamtkosten je Replikation r
D	Schädigungssumme
D_F	Schädigungssumme für die Feldbeanspruchung
D_f	Transformationsfaktor
D_R	Schädigungssumme für die geraffte Beanspruchung
$E(\bullet)$	Erwartungswert von \bullet
$f(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
$f_B(\sigma)$	Streuverteilung der einwirkenden Beanspruchung σ
f_i	Anzahl der Ausfälle im Intervall i
\tilde{f}_i	korrigierte Anzahl der Ausfälle im Intervall i
f_{tB}	Formfaktor
$f_W(\sigma)$	Streuverteilung der ertragbaren Beanspruchung σ
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit
F_i	Ausfallwahrscheinlichkeit der i -ten Ranggröße
\tilde{F}_i	empirische Ausfallwahrscheinlichkeit für die i -te Ranggröße
$g(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Reparaturdauer
g^2	Fehlerquadratsumme
i	Rangzahl, Laufparameter
j	Ordnungszahl, Laufparameter

$j(t_j)$	hypothetische Rangzahl
k	Neigungsexponent in der Gleichung der Wöhler- bzw. Zeitfestigkeitslinie, Anzahl der Komponenten im Planetengetriebe
L	Likelihood-Funktion
L_0	Lebensdauer in Schwingspielen
L_{0_h}	Lebensdauer in Betriebsstunden
L_F	Lebensdauer unter Feldbeanspruchung
L_R	Lebensdauer bei zeitraffenden Prüfbedingungen
m	Anzahl der Ausfälle je Replikation r
m_i	Laufleistung bis zum Ende des i – ten Intervalls
$M_{\Sigma i}$	Laufleistung aller Einheiten im Intervall i
$MTTF$	Mittelwert der ausfallfreien Funktionszeit (<u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>t</u> o <u>F</u> ailure)
$MTTR$	Mittelwert der Reparaturzeit (<u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>t</u> o <u>R</u> epair)
n	Stichprobenumfang, Anzahl der Merkmalswerte
n_c	Anzahl der Zensierungen
n_{c1}	Anzahl der Zensierungen während der Garantie
n_{c2}	Anzahl der Zensierungen nach der Garantie
n_i	Anzahl der Einheiten bis zum Ausfall i
n_{iF}	Anzahl der Schwingspiele im Intervall i für das Lastkollektiv aus der Feldbeanspruchung
n_{iR}	Anzahl der Schwingspiele im Intervall i für das Lastkollektiv des gerafften Tests
n_{kum}	Summe der Schwingspiele
n_l	Anzahl der verlorenen Einheiten
n_{LW1_B}	Anzahl der Lastwechsel je Minute bzgl. Bruch für die Komponente k
n_{LW1_G}	Anzahl der Lastwechsel je Minute bzgl. Grübchenbildung für die Komponente k
n_{LWk}	Anzahl der Lastwechsel je Minute für die Komponente k
n_{mF}	mittlere Schwingspielzahl des Lastkollektivs aus dem Feld
n_{mR}	mittlere Schwingspielzahl des gerafften Lastkollektivs
n_u	Anzahl der Ausfälle
n_{u1}	Anzahl der Ausfälle während der Garantie
n_{u2}	Anzahl der Ausfälle nach der Garantie
N	Anzahl der Einheiten im Feld

$N(t_j)$	Zuwachs
N_i	ertragbare Schwingenspielzahl
N_D	Grenzschwingspielzahl am Abknickpunkt der Wöhlerlinie
p	Anzahl der Replikationen, Anzahl der Planetenräder
$P(\bullet \circ)$	bedingte Wahrscheinlichkeit von \bullet
$P(t)$	Wahrscheinlichkeit, Zustandswahrscheinlichkeit
r	Laufparameter
r_i^2	Abstandsquadrate zwischen den empirischen Wertepaaren und der Ausgleichsgeraden
$R(t)$	Zuverlässigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit
\tilde{R}_i	empirische Überlebenswahrscheinlichkeit für die i -te Ranggröße
$R_{Sist}(t)$	aktuelle Systemzuverlässigkeit
t_0	ausfallfreie Zeit der Weibullverteilung
t_{ci}	Zensierungszeit für die i -te Einheit
$t_{ges,j,r}$	Summe der Betriebsdauer und der Reparaturdauer für den j -ten Ausfall und Replikation r
t_i	Ranggröße
t_{ialt}	Voralterung
t_m	Mittelwert
$t_{rep,j}$	Reparaturdauer für den j -ten Ausfall
t_{u1i}	Ausfallzeit für die i -te Einheit während der Garantie
t_{u2i}	Ausfallzeit für die i -te Einheit nach der Garantie
t_{ui}	Ausfallzeit für die i -te Einheit
T	charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung
T_k	charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung der Komponente k
x_i	Pseudozufallszahl
x_{k+1}	Pseudozufallszahl zur Ermittlung der Reparaturdauer
X	Zufallsvariable
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
ε	Parameter der Hjorthverteilung
$\bar{\theta}$	Parametervektor
θ_l	Parameter
$\lambda(t)$	Ausfallrate
$\tilde{\lambda}_i$	empirische Ausfallrate für die i -te Ranggröße

$\sigma_{\text{äquiv}}$	äquivalente auftretende Beanspruchung
σ_B	auftretende Beanspruchung
σ_D	Spannungsamplitude am Abknickpunkt der Wöhlerlinie
σ_i	ertragbare Spannungsamplitude
σ_w	ertragbare Beanspruchung
η	Parameter der Hjorthverteilung
δ	Parameter der Hjorthverteilung
χ	Raffungsfaktor
$\overline{\chi}$	transformierter Raffungsfaktor

Abstract

Reliability Management Process Based on Field Data

A well organized reliability management process is very important for manufacturers in order to achieve the reliability requirements set by the customers and to continuously maintain market position. The prediction of the failure behavior of a product in the field should be accomplished as early as possible. An optimized reliability management process contains qualitative and quantitative reliability methods based on fatigue damage calculations, test data, condition monitoring, field failure data and warranty cost analysis, which have to be fused to a closed loop failure analysis system in order to consider all lessons learned in the analysis tools used in product development.

At the beginning of a reliability analysis a qualitative analysis has to be done to identify the critical components in a system that has to be analyzed and to discover possible high risk issues in the design. The definition of the critical components in a system helps to delimitate the complexity of the subsequent analysis. The evaluation of the lifetime of a product and its components during early development stages can result from established design calculations if the two variables stress and strength are given. The results of the calculation may not be sufficiently representative, since there are influencing parameters that can not be covered completely in the calculation. Life testing can demonstrate the failure behavior of a product under specified environmental conditions and can be used to verify the design calculation with regard to the major influencing factors. The failure behavior of the product during in-house testing compared to the failure behavior of the product in the field can vary immense due to differences in the conditions and the treatment. The true operating conditions in the field can be determined for example by condition monitoring. As condition monitoring is not feasible in general for every single product in the field due to increasing costs, the field data collection and the analysis becomes very important. Field failure data reflects the true environmental conditions, which define the customer usage and gives an insight into the current failure situation of a product in the field. However, field data is often only available as incomplete and unprecise warranty data. Two methods were suggested in this work that consider lost information of the field data and can be used to perform representative reliability predictions. The Monte Carlo simulation

allows the consideration of the uncertainty in the drive performance of the field data and yields to distributed parameters of the lifetime distribution.

The results of the field data analysis can be used to simulate the expected warranty costs. The prediction of the warranty costs was accomplished for a synthetic example in terms of a repairable planetary gear. As the maintenance behavior of the components of the planetary gear is influenced by dependencies, the model was developed based on the Monte-Carlo simulation. The simulation model considers unprecise warranty data that yield to distributed warranty costs. Different examples were presented that illustrate the effects of distributed parameters of the lifetime distributions in case of extended warranties.

The presented analysis is limited to the prediction of the expected warranty costs. Further investigations should focus on the minimization of the life cycle costs of complex systems based on the minimization of the validation costs and the expected warranty costs.

1 Einleitung

Angesichts zunehmender Internationalisierung der Märkte wird die Sicherung von Wettbewerbsvorteilen ständig schwieriger. Es gilt schneller, besser oder wirtschaftlicher zu sein als die Konkurrenz [Bac03]. Ein Potential zur Erlangung von Wettbewerbsvorteilen besteht in der Entwicklung überdurchschnittlich zuverlässiger Produkte. Entsprechend der Zuverlässigkeitsdefinition gemäß [VDI4001] erlaubt dies den Unternehmen die Möglichkeit, den Kunden vergleichsweise hohe Garantiezeiträume anzubieten.

Der Markt stellt Ansprüche hinsichtlich verschiedener Produkteigenschaften, deren gleichzeitige Realisierung oft zu Zielkonflikten führt. So zählen unter Anderem die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit, die effektiven Nutzlasten sowie die Kosten zu den primären Anforderungen, die Kunden an ein maschinenbauliches Produkt stellen. Aufgabe eines Unternehmens ist es, die Gesamtheit dieser Anforderungen den Kundenwünschen entsprechend optimal umzusetzen. Auf Grund der zunehmenden Dienstleistungsorientierung auch im Bereich von Investitionsgütern, beispielsweise in Form von Betreibermodellen [Sch04], ergibt sich für die Anbieter zunehmend die Notwendigkeit, die gesamten Lebenszykluskosten prognostizieren zu können. Hierzu notwendig ist die Etablierung eines Zuverlässigkeitsmanagementsystems das fähig ist, vorhandene Zuverlässigkeitsinformationen über alle Lebensphasen eines Produkts hinweg effizient zu nutzen. Hierdurch werden die Kontrolle der Lebenszykluskosten sowie deren Minimierung ermöglicht.

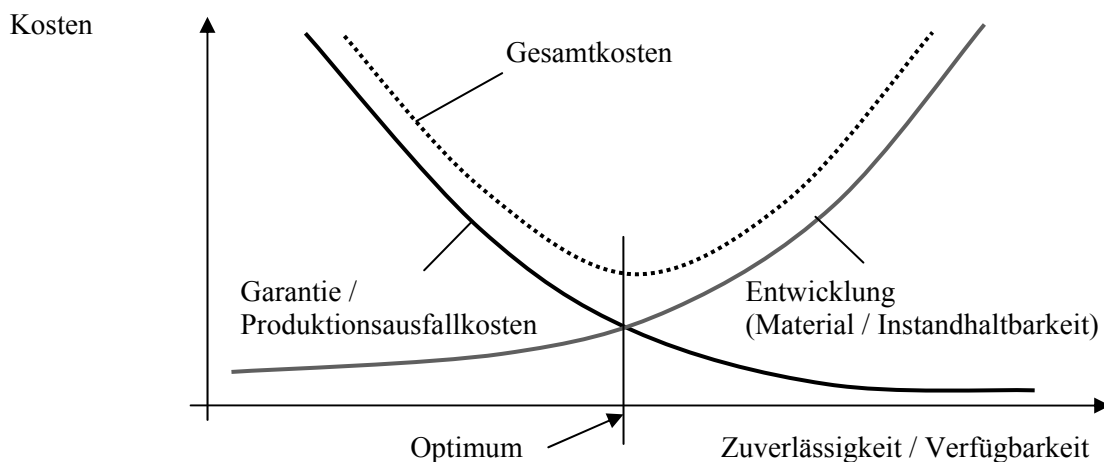


Bild 1.1: Minimierung der Kosten [Kle04]

1.1 Problemstellung

Die Entwicklung zuverlässiger Produkte erfordert den Einsatz spezieller qualitativer und quantitativer Zuverlässigkeitsmethoden, die, um ganzheitlich zu optimieren, den gesamten Produktlebenszyklus umfassen.

Die lebensdauerorientierte Auslegung dynamisch beanspruchter Bauteile kann gemäß den Grundsätzen der Betriebsfestigkeit erfolgen. Die Verifizierung der Ergebnisse mit Hilfe von Lebensdauererprobungen ist jedoch unabdingbar, da meist nur ein gewisser Teil der relevanten Einflussgrößen in Form einer Wöhlerlinie gegeben ist. Mittels der im Versuch gewonnenen Erkenntnisse über das Ausfallverhalten eines Produkts können Berechnungsergebnisse angepasst und optimiert werden. Des Weiteren können Schwachstellen behoben und Prognosen für den Feldeinsatz durchgeführt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Korrelation zwischen Versuch und Feld bekannt ist. Diese kann durch die Analyse von Felddaten ermittelt werden. Felddaten können in der Produktplanung zur Definition von Kunden- und Marktanforderungen, in der Produktkonstruktion zur Behebung von Fehlern und Schwachstellen und in der Produkterprobung zur Bestimmung relevanter Einfluss- sowie Zielgrößen genutzt werden, siehe Bild 1.2.

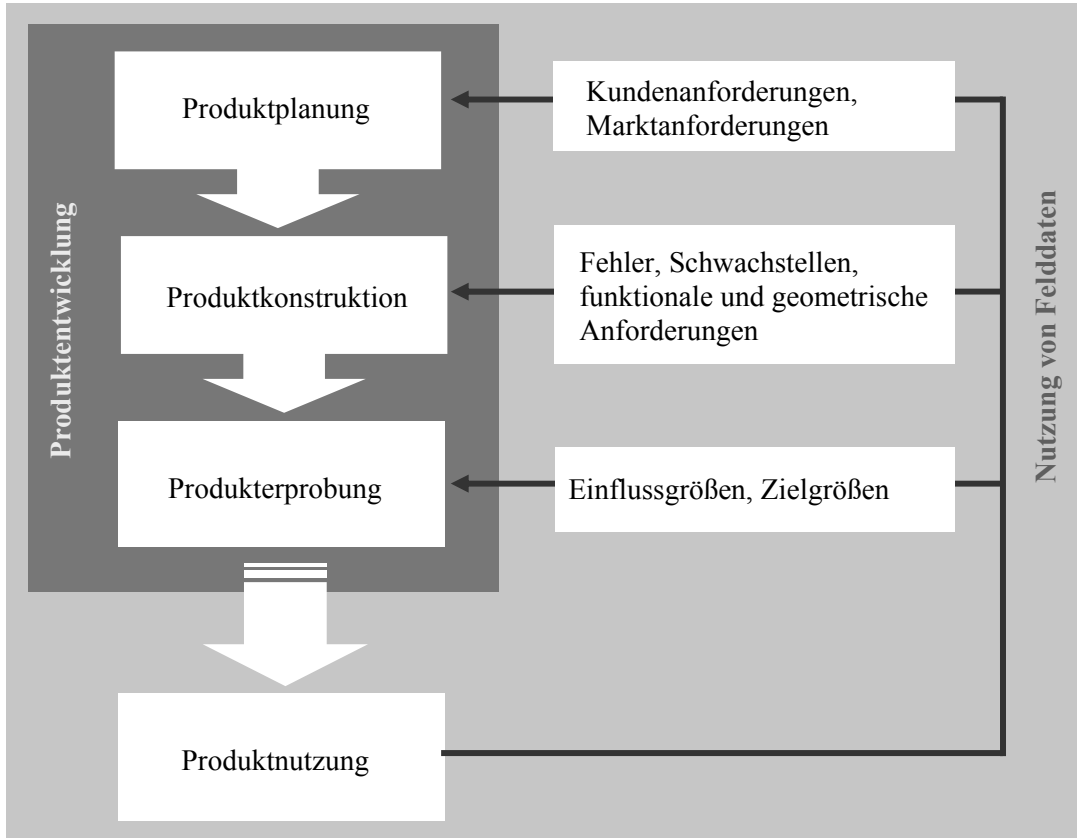


Bild 1.2: Nutzung von Felddaten in der Produktentwicklung [Edl01]

In der Praxis kommt es häufig vor, dass Felddaten nur in Form von Garantiedaten mit geringer Laufleistung zur Verfügung stehen. Des Weiteren sind die Daten sowohl unvollständig als auch ungenau. Um eine Zuverlässigkeitsprognose auf Basis unvollständiger und ungenauer Daten durchführen zu können, bedarf es an geeigneten Analysemethoden.

Technische Produkte sind meist Systeme, die aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen. Die Beschreibung des Systemverhaltens kann durch die Verknüpfung der Bauteilzuverlässigkeiten zur Systemzuverlässigkeit mit Hilfe der Booleschen Theorie erfolgen [Ber04]. Da es sich bei dem zu untersuchenden System um ein reparierbares System handelt, dessen Komponenten Abhängigkeiten beim Reparaturverhalten aufweisen, muss ein geeignetes Modell zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit und Verfügbarkeit erstellt werden.

Die mathematischen Modelle, die zur Prognose der Garantiekosten eingesetzt werden, setzen meist starke Vereinfachungen voraus. Beispielsweise werden die Abhängigkeiten der Komponenten untereinander vernachlässigt; es werden nur einzelne Komponenten unabhängig voneinander betrachtet. Die Prognose der Garantiekosten des zu untersuchenden Planetengetriebes setzt die Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Komponenten sowie der streuenden Eingangsgrößen bei der Modellierung voraus.

1.2 Ziele der Arbeit

Das Hauptziel dieser Arbeit ist der Aufbau eines praxisgerechten Zuverlässigkeitsmanagementsystems, das eine robuste Prognose der Lebensdauer und die Darstellung des Ausfallverhaltens von Produkten im Feldeinsatz ermöglicht. Hierbei sollen verschiedene qualitative und quantitative Methoden zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess zum Einsatz kommen. Die Methoden in den Bereichen Betriebsfestigkeit und Auslegung, Versuch, Felddaten und Online Monitoring sollen systematisch ineinander überführt werden, so dass die Abschätzung des Ausfallverhaltens eines Produkts im Feldeinsatz ermöglicht wird. Dabei soll es möglich sein, trotz unvollständiger und ungenauer Felddaten, eine robuste Zuverlässigkeitsprognose erzielen zu können. Mit Hilfe der Monte-Carlo Methode soll ein Garantiekostenprognosemodell entwickelt werden, das unterschiedliches Reparaturverhalten bei der Simulation berücksichtigen kann, und mit Hilfe dessen die Garantiekosten für den Fall einer Garantieverlängerung prognostiziert werden können. Bei der Garantiekosten-simulation sollen des Weiteren ungenaue Daten berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise soll am Beispiel eines Planetengetriebes verdeutlicht werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich entsprechend den in Bild 1.3 enthaltenen Arbeitsschwerpunkten.

Im Kapitel **Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik** werden die grundlegenden Begriffe und Definitionen der Zuverlässigkeitstechnik behandelt, sowie die Lebensdauerverteilungen dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Analyse eingesetzt werden. Das Kapitel **Auswertung von Lebensdauerversuchen** behandelt die unterschiedlichen Zensierungstypen einer Stichprobe und liefert einen Überblick über die Methoden zur Analyse dieser Stichproben.

Das Kapitel **Analyse unvollständiger Felddaten** stellt einige aus der Literatur bekannte Methoden vor, die zensierte Stichproben mit verlorenen Einheiten analysieren können. Eine beispielhafte Anwendung der Methoden zeigt, dass je nach vorliegender Datenqualität sowie verwendeter Methode die Ergebnisse der Analyse stark variieren können. Es werden zwei modifizierte Methoden vorgestellt, die abhängig von der Qualität der Daten sehr gute Ergebnisse erzielen konnten, und mittels derer eine robuste Zuverlässigkeitsprognose trotz unvollständiger Daten möglich ist.

Felddaten sind häufig mit einer Ungenauigkeit behaftet, da beispielsweise die exakte Laufleistung der Einheiten im Feld nicht bekannt ist, oder der genaue Zeitpunkt des Ausfalls nicht definiert werden kann. Im Kapitel **Analyse ungenauer Felddaten** wird eine Vorgehensweise auf Basis der Monte-Carlo Simulation vorgestellt, die die Ungenauigkeit der Felddaten bei der Analyse berücksichtigen kann.

Die bereits vorgestellten Methoden zur Felddatenanalyse bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen. Im Kapitel **Zuverlässigkeitsmanagementsystem und beispielhafte Anwendung** wird ein praxisgerechtes Zuverlässigkeitsprognosemodell vorgestellt, das basierend auf ungenauen und unvollständigen Daten in der Lage ist, das Ausfallverhalten von Planetengetrieben zu analysieren und die zu erwartenden Garantiekosten zu prognostizieren. Dabei gliedert sich das Kapitel in drei wesentliche Bereiche, die Vorstellung des Zuverlässigkeitsmanagementsystems, die beispielhafte Anwendung und das Garantiekostenprognosemodell. Die beispielhafte Anwendung beinhaltet die Systemanalyse und die Bestimmung der Komponentenzuverlässigkeiten.

Im Kapitel **Systemanalyse** werden zunächst die kritischen Komponenten des Planetengetriebes sowie die Zuverlässigkeitsstruktur ermittelt.

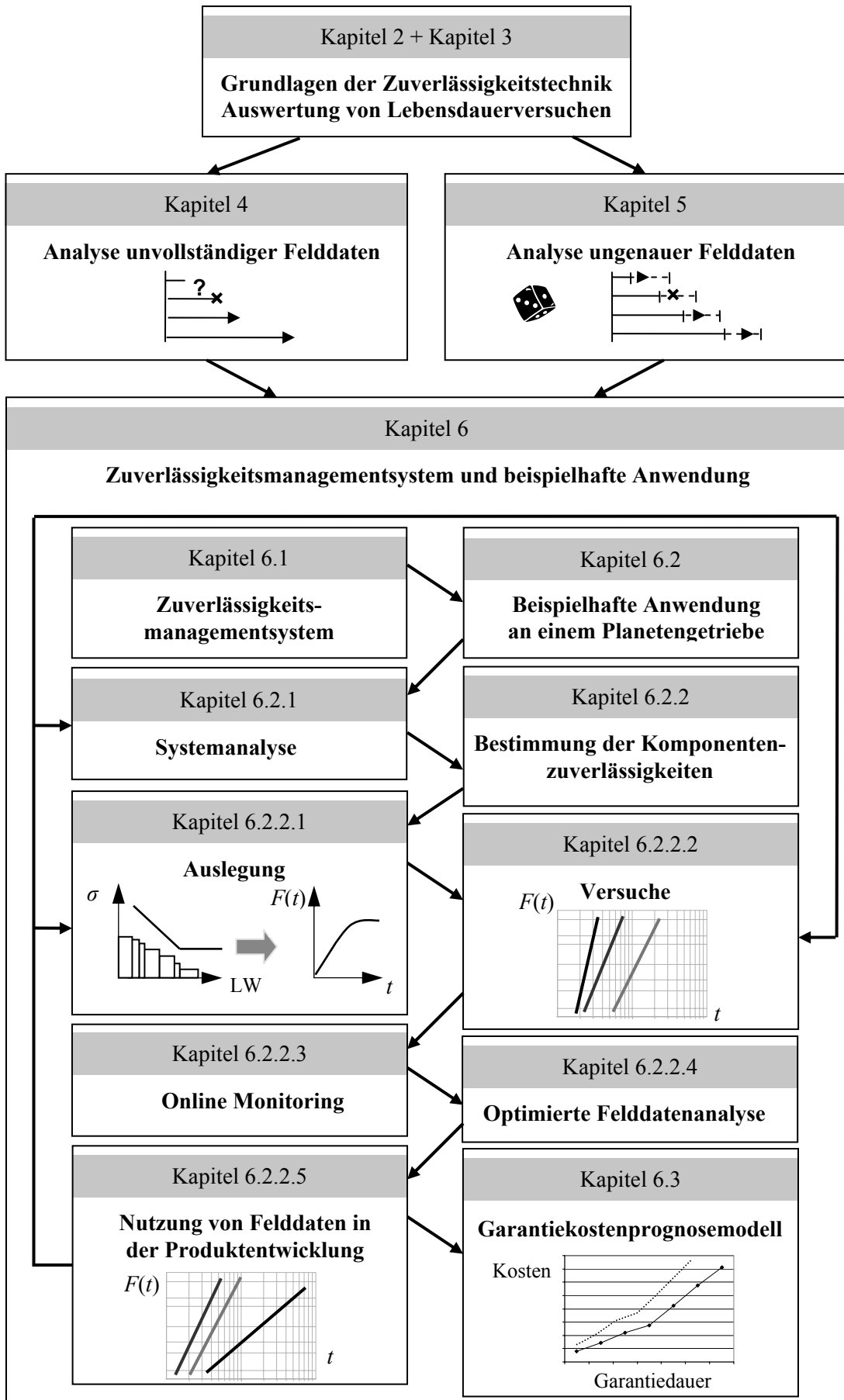


Bild 1.3: Aufbau der Arbeit

Die Komponentenzuverlässigkeiten können mit Hilfe unterschiedlicher Methoden ermittelt werden, die im Kapitel **Bestimmung der Komponentenzuverlässigkeiten** vorgestellt werden. Zu Beginn erfolgt die lebensdauerorientierte Auslegung der Komponenten nach den Grundsätzen der Betriebsfestigkeit. Die Ergebnisse der konstruktiven Auslegung können über Versuche verifiziert werden. Die Bestimmung der Korrelation zwischen Feld und Versuch kann mit Hilfe geeigneter Diagnosesysteme zur Erfassung der relevanten Betriebsdaten im Feldeinsatz erfolgen. Im Kapitel Online Monitoring wird des Weiteren eine Möglichkeit zur Bestimmung der aktuellen Zuverlässigkeit von Produkten im Feld vorgestellt. Da der Einsatz von Diagnosesystemen nicht immer realisiert werden kann, wird abschließend ein Überblick über die Methoden zur Analyse von Felddaten gegeben.

Im Kapitel **Garantiekostenprognosemodell** wird die Vorgehensweise zur Prognose der Garantiekosten vorgestellt. Hierbei wird das zu untersuchende Planetengetriebe als reparierbares System behandelt, dessen Komponenten Abhängigkeiten beim Reparaturverhalten aufweisen. Die Garantiekosten werden mit Hilfe der Monte-Carlo Methode simuliert. Bei der Simulation werden nicht nur präzise sondern auch ungenaue Daten berücksichtigt, die zu streuenden Garantiekosten führen. Unterschiedliche Beispiele zeigen die Auswirkung einer Garantieverweiterung auf die zu erwartenden Kosten. Abschließend erfolgt die Reduzierung der Garantiekosten durch die Optimierung einzelner Komponenten im Planetengetriebe.

2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik

Bei der Analyse der Zuverlässigkeit, der Verfügbarkeit und der Garantiekosten technischer Systeme treten eine Vielzahl von Begriffen auf. Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Begriffe und Definitionen aus der Zuverlässigkeitstechnik und deren mathematische Beschreibungsmethoden vorgestellt.

2.1 Begriffe und Definitionen

Die Begriffe und Definitionen in der Zuverlässigkeitstechnik werden im Folgenden angelehnt an die Standardwerke erläutert [Ber04], [Bei95], [Här81], [Küh01], [Sac99], [VDA3.2], [Voß00], [Web92].

Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein Ausfall im Zeitintervall $[0, t]$ auftreten wird. Dabei ist

$$F(t) = P(\tau \leq t),$$

mit der Wahrscheinlichkeit $P(\tau \leq t)$ dafür, dass die Lebensdauer τ einer Betrachtungseinheit die vorgegebene Zeit t nicht überschreitet. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist eine Verteilungsfunktion, die mit zunehmendem t monoton ansteigt. Dabei gilt $F(0) = 0$ und $F(\infty) = 1$.

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit $R(t)$ ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit

$$R(t) = P(\tau > t) = 1 - F(t)$$

und entspricht einer monoton fallenden Funktion.

„Die Zuverlässigkeit ist definiert als die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt [Ber04]“.

Hierbei können an Stelle der Zeitdauer auch andere Lebensdauermerkmale, wie z.B. die Anzahl an Lastwechseln, verwendet werden.

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$, im Folgenden auch Dichtefunktion genannt, beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zur Zeit t , bezogen auf ein kleines Zeitintervall dt . Sie entspricht der Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit und ist gegeben mit

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dP(\tau \leq t)}{dt}.$$

Ausfallrate

Eine weitere wichtige Lebensdauerkenngroße ist die Ausfallrate $\lambda(t)$. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls in einem Zeitintervall dt , bezogen auf die zum Zeitpunkt t intakten Einheiten

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

Sie kann auch als bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit je Zeiteinheit aufgefasst werden, die von den zum Zeitpunkt t intakten Einheiten abhängt.

Bedingte Wahrscheinlichkeit

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(A | B)$, ist die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses A unter der Bedingung, dass ein Ereignis B bereits eingetreten ist.

Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert \bar{x} berechnet sich aus der Summe der Beobachtungswerte x_i , dividiert durch die Anzahl n der Beobachtungswerte

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Instandhaltung

Nach [DIN31051] ist die Instandhaltung „die Gesamtheit der Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes sowie zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes.“ Die Maßnahmen werden untergliedert in Wartung, Inspektion

und Instandsetzung. Die ereignisorientierte Instandsetzung, auch Reparatur genannt, ist nach [DIN31051] die „*Maßnahme zur Wiederherstellung des Sollzustandes.*“

Ausfall

Unter Ausfall versteht man nach [DGQ11-4] „*die Beendigung der Funktionsfähigkeit einer materiellen Einheit im Rahmen der zugelassenen Beanspruchung.*“

Zensierte Daten

Zensierte Daten liegen vor, wenn nicht alle Einheiten einer Stichprobe ausgefallen sind. Die Stichprobe enthält sowohl ausgefallene Einheiten als auch intakte Einheiten. Die intakten Einheiten werden als Zensierungen bezeichnet. Eine Stichprobe, die sowohl Ausfälle als auch intakte Einheiten beinhaltet, wird nach [Ber04] als unvollständige Stichprobe bezeichnet. Unvollständige Daten bzw. unvollständige Felddaten jedoch besitzen im Rahmen dieser Arbeit eine andere Bedeutung, die im Folgenden erläutert wird.

Felddaten

In [Edl01] werden unter „*Felddaten alle Daten verstanden, die im Zusammenhang mit der Nutzung eines Produkts im Feld oder der Inanspruchnahme einer Dienstleistung durch den Kunden anfallen. Hierzu gehören neben Fehlern, Störungen, Mängeln oder Ausfällen auch Nutzungsinformationen.*“

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter Felddaten vereinfacht alle Ausfall- und Zensierungsdaten verstanden, die während der Nutzungsphase beobachtet werden.

Unvollständige Felddaten

Im Rahmen dieser Arbeit werden unvollständige Felddaten definiert als Ausfälle und intakte Einheiten, die während der Nutzungsphase beobachtet werden, während über einen Anteil der Daten jedoch keine Informationen vorliegen.

Ungenauere Felddaten

Ungenauere Felddaten sind Daten, die während der Nutzungsphase beobachtet werden, deren Laufleistungen jedoch nicht in Form präziser Angaben vorliegen, sondern mit einer Ungenauigkeit behaftet sind. Diese Ungenauigkeit in der Laufleistung kann mit Hilfe von Expertenschätzungen an Hand unterschiedlicher Verteilungsfunktionen beschrieben werden.

Garantie

Unter Garantie versteht man eine zusätzliche, freiwillige Leistung des Händlers und/oder des Herstellers, die die Funktionsfähigkeit des Produkts oder einzelner Komponenten während eines bestimmten Zeitraumes garantiert. Hierbei spielt der Zustand der Ware zum Zeitpunkt der Übergabe an den Kunden keine Rolle, da die Funktionsfähigkeit für den definierten Zeitraum garantiert wird.

Gewährleistung

Die Gewährleistung bedeutet, dass der Verkäufer dafür einsteht, dass das Produkt frei von Sach- und Rechtsmängeln ist. Hierbei ist der Zustand des Produkts zum Zeitpunkt der Übergabe entscheidend, da der Verkäufer für alle Mängel haftet, die schon zum Zeitpunkt des Verkaufs bestanden haben.

2.2 Lebensdauerverteilungen

Zur mathematischen Beschreibung des Ausfallverhaltens von Produkten können verschiedene statistische Verteilungsfunktionen verwendet werden. Im Folgenden werden einige für diese Arbeit wichtige Verteilungen erläutert.

2.2.1 Rechteckverteilung

Wenn eine Zufallsvariable X eine Rechteckverteilung [Zuc06] besitzt, so ist die Dichtefunktion gegeben durch

$$f_X(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq t \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.1)$$

Somit besitzen alle möglichen Ereignisse im Intervall $[a, b]$ dieselbe Wahrscheinlichkeit.

$$F_X(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < a \\ \frac{t-a}{b-a} & \text{für } a \leq t \leq b \\ 1 & \text{für } t > b \end{cases} \quad (2.2)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F_X(t)$ der Rechteckverteilung ergibt sich durch Integration der Dichtefunktion.

2.2.2 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung wird gewöhnlich im Bereich der Zuverlässigkeitsanalyse elektronischer Produkte verwendet. Sie besitzt nur einen Parameter, die konstante Ausfallrate λ , die dem Kehrwert des Erwartungswerts der Lebensdauer entspricht. Es gilt für den Erwartungswert

$$E(\tau) = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Die Dichtefunktion der Exponentialverteilung nimmt von einem Anfangswert monoton ab und ergibt sich zu

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \text{ und } \lambda > 0. \quad (2.4)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist gegeben mit [Voß02]

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \text{ und } \lambda > 0. \quad (2.5)$$

Die Annahme einer konstanten Ausfallrate ist zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Produkte meist unzureichend, da sich die Ausfallrate, wie bereits an Hand der „Badewannenkurve“ gezeigt, über der Zeit ändert.

2.2.3 Weibullverteilung

Die im Maschinenbau am häufigsten verwendete Lebensdauerverteilung ist die von Waloddi Weibull (1887 – 1979) entwickelte und nach ihm benannte Weibullverteilung [Wei51], [Luk99]. Die Weibullverteilung eignet sich zur Beschreibung unterschiedlichen Ausfallverhaltens, siehe Bild 2.1 [Ber04].

Die Weibullverteilung liegt in Form einer zweiparametrischen und einer dreiparametrischen Verteilung vor. Die dreiparametrische Verteilung besitzt neben dem Formparameter b und der charakteristischen Lebensdauer T im Gegensatz zur zweiparametrischen Verteilung einen zusätzlichen Parameter, die ausfallfreie Zeit t_0 . Treten Ausfälle erst ab einem bestimmten Zeitpunkt t_0 auf, so wird dies mit Hilfe der ausfallfreien Zeit berücksichtigt. Der Formparameter b ist ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und bestimmt die Form der Verteilungsfunktion. Die charakteristische Lebensdauer T ist ein Lageparameter, der die Lage der Verteilung bezüglich der Zeitachse bestimmt. Die Gleichung der dreiparametrischen Weibullverteilung (2.6) enthält die statistische Variable t in bezogener Form $(t - t_0) / (T - t_0)$ [Ber04]. Für den Zeitpunkt $t = T$ ergibt sich der Quotient zu 1. Der charakteristischen Lebensdauer wird damit die Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2% zugeordnet.

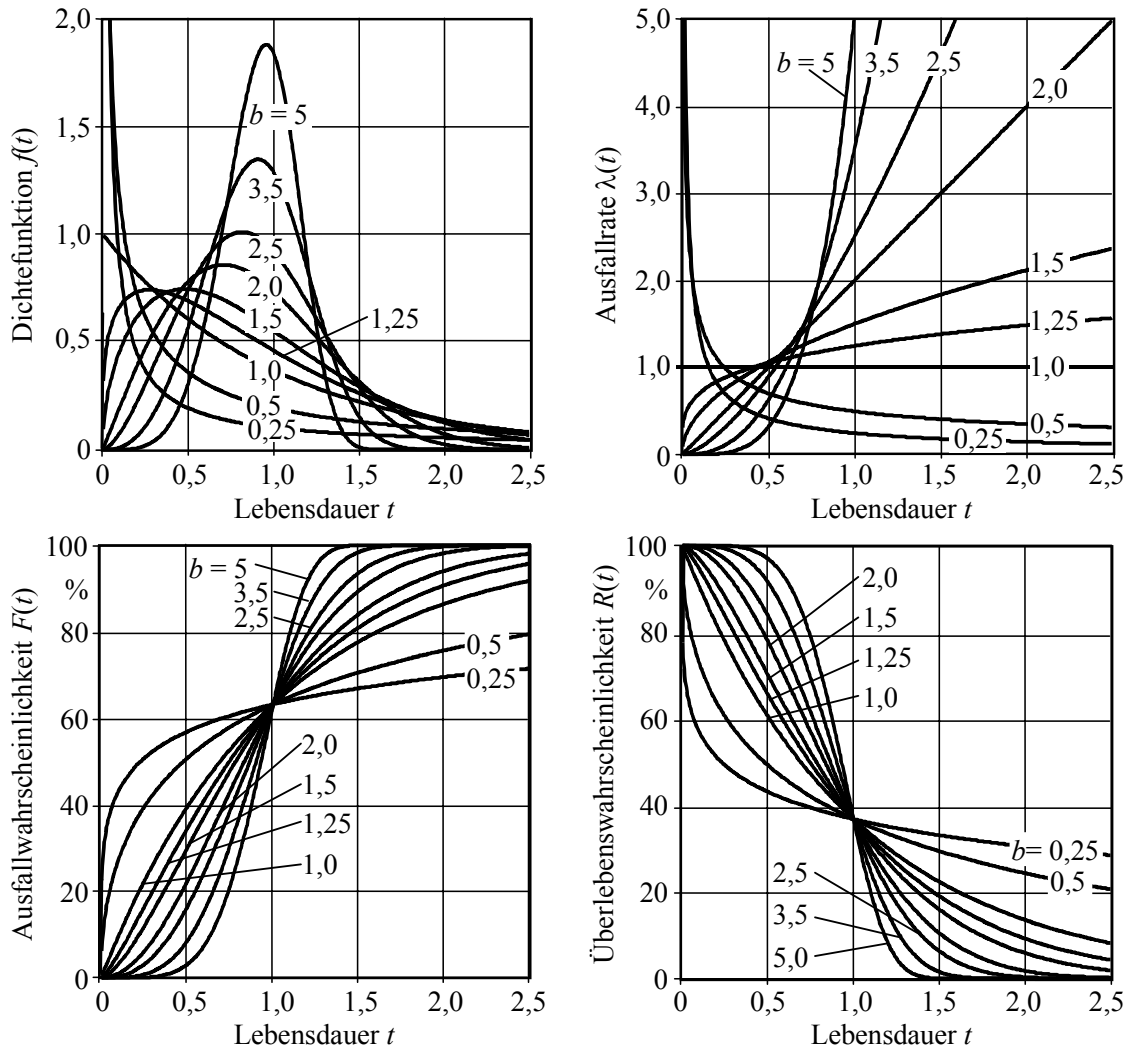


Bild 2.1: Weibullverteilung für unterschiedliche Formparameter b , charakteristische Lebensdauer $T = 1$ und ausfallfreie Zeit $t_0 = 0$ [Ber04], [Kro04]

Die Ausfallwahrscheinlichkeit der dreiparametrischen Weibullverteilung lautet

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}, \quad 0 \leq t_0 \leq t, t_0 \leq T, 0 < b. \quad (2.6)$$

Die Zuverlässigkeit ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}. \quad (2.7)$$

Die Dichtefunktion der Weibullverteilung entspricht der Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit und ist gegeben mit

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}. \quad (2.8)$$

Die Ausfallrate ergibt sich als Quotient der Dichtefunktion $f(t)$ und der Zuverlässigkeit $R(t)$ zu

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{b-1}. \quad (2.9)$$

Bei der graphischen Darstellung der Ausfallrate über dem gesamten Produktlebenszyklus kann das Ausfallverhalten eines Systems in Form der „Badewannenkurve“ beschrieben werden, siehe Bild 2.2. Die „Badewannenkurve“ kann in drei Bereiche eingeteilt werden. Der Bereich 1 besitzt eine abnehmende Ausfallrate und beschreibt somit die Frühausfälle, die vorwiegend durch Montagefehler, Fertigungsfehler oder Werkstofffehler verursacht werden.

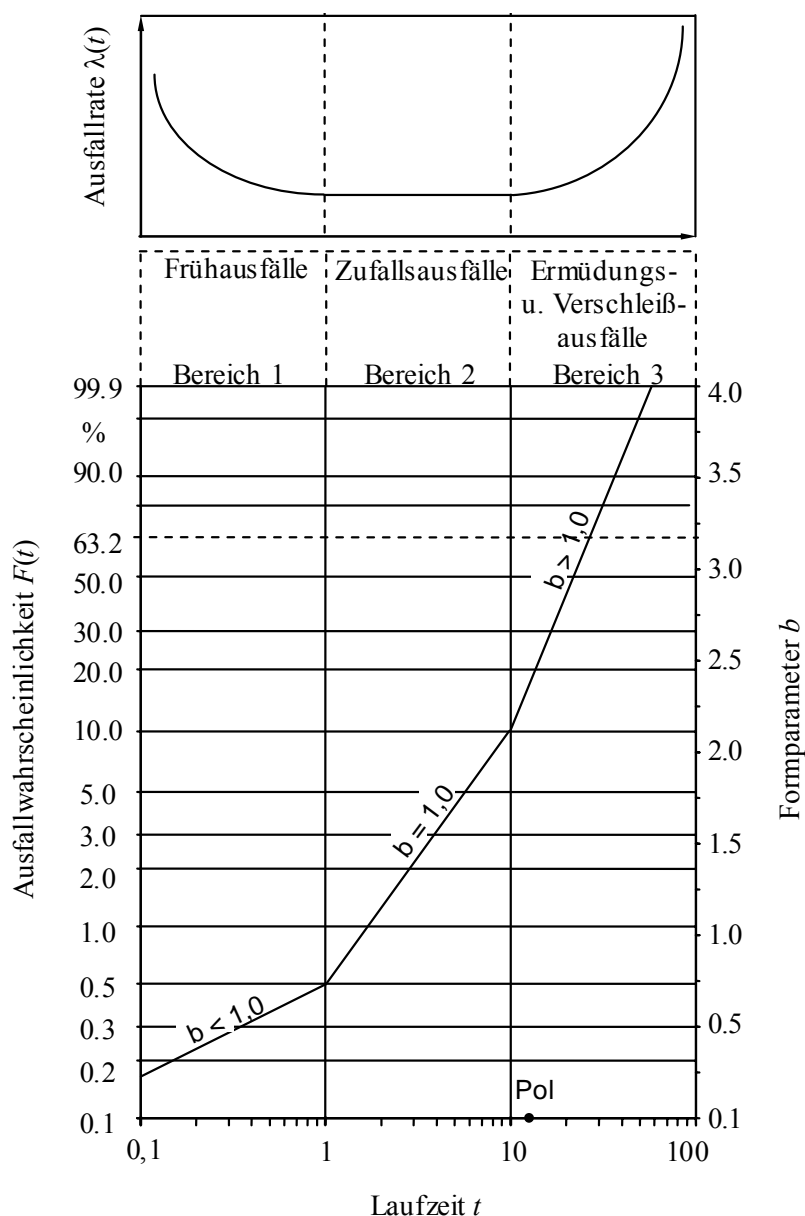


Bild 2.2: Badewannenkurve im Weibullwahrscheinlichkeitspapier [Ber04]

Bereich 2 besitzt eine konstante Ausfallrate und kennzeichnet den Bereich der Zufallsausfälle, die z.B. durch Bedienungs- und Wartungsfehler entstehen. Bereich 3 mit steigender Ausfallrate beschreibt die Verschleiß- und Ermüdungsausfälle. Die drei Bereiche der „Badewannenkurve“ können mit Hilfe einzelner Weibullverteilungen beschrieben werden. Eine abnehmende Ausfallrate der Weibullverteilung ergibt sich für einen Formparameter $b < 1$, eine konstante Ausfallrate für $b = 1$ und eine zunehmende Ausfallrate für $b > 1$, siehe Bild 2.2.

2.3 Analytische Methoden zur Parameterschätzung

Die Auswertung von Ausfalldaten kann mit verschiedenen analytischen Methoden erfolgen [Ber04]. Die bekanntesten Methoden sind die Momentenmethode, die Regressionsanalyse und die Maximum-Likelihood Methode. Die Momentenmethode kann im Gegensatz zur Regressionsanalyse und zur Maximum-Likelihood Methode nur für vollständige Stichproben angewendet werden, die keine Zensierungen besitzen [Ber04]. Die Analyse von Felddaten wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der Regressionsanalyse und der Maximum-Likelihood Methode durchgeführt. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

2.3.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse, auch als Methode der kleinsten Fehlerquadrate bekannt, ist ein Verfahren, das zur Schätzung der Verteilungsparameter die Abstandsquadrate r_i^2 zwischen den empirischen Wertepaaren und der Ausgleichsgeraden minimiert. Um die Ausfallwahrscheinlichkeiten einer Geradengleichung anpassen zu können, muss die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine entsprechende Umformung in die Form einer Geradengleichung transformiert werden [Ber04].

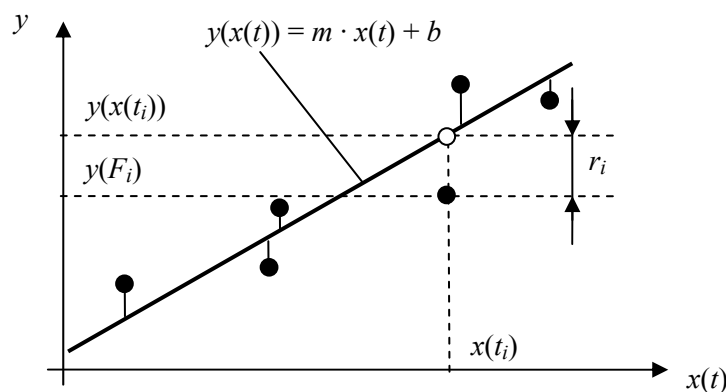


Bild 2.3: Regressionsgerade [Ber04]

Die gesuchten Größen der Ausgleichsgeraden, die Geradensteigung m und den Achsenabschnittsfaktor b erhält man, wenn die Fehlerquadratsumme g^2 minimiert wird

$$g^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y(F_i) - y(x(t_i)))^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - m \cdot x_i - b)^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (2.10)$$

Zur Schätzung der gesuchten Größen bildet man die ersten partiellen Ableitungen von g^2 nach m und b und setzt sie gleich Null

$$\frac{\partial g^2}{\partial b} = -\sum_{i=1}^n 2 \cdot (y_i - m \cdot x_i - b) \Rightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - m \cdot x_i - b) = 0, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial g^2}{\partial m} = -\sum_{i=1}^n 2 \cdot x_i \cdot (y_i - m \cdot x_i - b) \Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i \cdot (y_i - m \cdot x_i - b) = 0.$$

Aus der obigen Gleichung können maximal zwei Parameter berechnet werden. Für die Ermittlung von drei Parametern gestaltet sich die Berechnung aufwendiger, da sie iterativ erfolgen muss. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Parameter einer dreiparametrischen Weibullverteilung ist in [Ber04] aufgeführt.

2.3.2 Maximum-Likelihood Methode

Als Schätzwert für unbekannte Parameter einer Wahrscheinlichkeitsverteilung werden bei der Maximum-Likelihood Methode die Werte der Parameter gewählt, bei denen der konkreten Stichprobe eine möglichst große Wahrscheinlichkeit zukommt [Mai76]. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit L für das Auftreten einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung gegeben durch das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten.

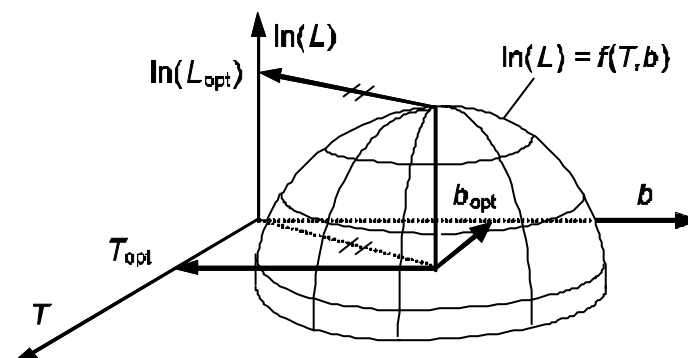


Bild 2.4: Beispielhafte Darstellung der logarithmierten Likelihood-Funktion [Ber04]

Ausgangspunkt der Methode ist die Zufallsvariable t , für die eine Dichtefunktion existiert mit k unbekanntem Parametern θ_l , $l = 1(1)k$, die oft zu einem Parametervek-

tor zusammengefasst werden $\vec{\theta}$. Die Likelihood-Funktion L für einen Stichprobenumfang n ergibt sich somit zu

$$L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k) \quad (2.12)$$

Bei der Likelihood-Funktion werden die Werte t_i der Stichprobe als gegeben und die zu schätzenden Parameter θ_i als Variablen aufgefasst. Als beste Schätzung der unbekannt Parameter werden die Werte gewählt, bei denen die Likelihood-Funktion ihr Maximum erreicht, siehe Bild 2.4.

Durch Logarithmieren wird aus der Produktformel eine Summenformel, was die partielle Differentiation vereinfacht. Die logarithmierte Likelihood-Funktion einer zensierten Stichprobe ergibt sich zu

$$\ln(L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \vec{\theta})) = \sum_{i=1}^{n_u} \ln(f(t_{u_i}; \vec{\theta})) + \sum_{i=1}^{n_c} \ln(R(t_{c_i}; \vec{\theta})). \quad (2.13)$$

Die nichtlinearen Gleichungen werden mit geeigneten numerischen Verfahren gelöst. Die Analyse einer zensierten Stichprobe kann mit Hilfe der Maximum-Likelihood Methode erfolgen, indem die Likelihood-Funktion aus Gleichung (2.12) um das Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten zur Berücksichtigung der Laufzeiten der zensierten Einheiten erweitert wird [Kal80], [Law82].

2.4 Reparierbare Systeme

Die Zuverlässigkeit beschreibt die Überlebenswahrscheinlichkeit von Komponenten oder Systemen bis zum ersten Ausfall. Mit Hilfe der Verfügbarkeitsanalyse können reparierbare Systeme betrachtet werden, bei denen das System durch Reparaturen wieder in einen funktionsfähigen Zustand gebracht wird. Dabei hängen die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit sowie die Kosten unmittelbar zusammen und beeinflussen sich gegenseitig. Die Erhöhung der Zuverlässigkeit eines Systems führt zur Erhöhung der Verfügbarkeit des Systems und dabei zur Reduzierung der zu erwartenden Garantiekosten. Die Verfügbarkeit wird neben der Zuverlässigkeit durch die Instandhaltbarkeit beeinflusst.

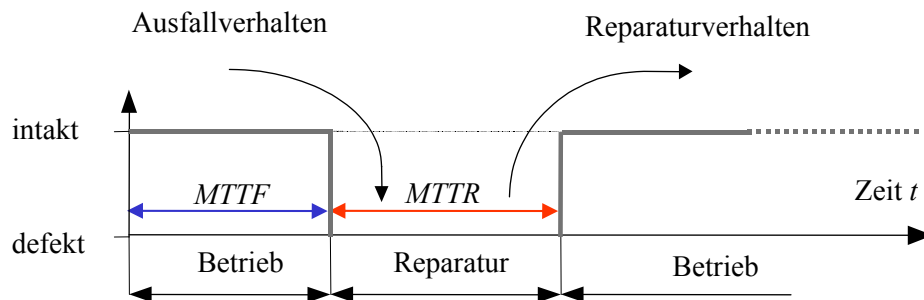


Bild 2.5: Ausfall- und Reparaturverhalten

Im Bild 2.5 ist das Ausfall- und Reparaturverhalten einer Komponente dargestellt. Hierbei beschreibt $MTTF$ (Mean Time to Failure) den Mittelwert der ausfallfreien Funktionszeit und $MTTR$ (Mean Time to Repair) den Mittelwert der Reparaturzeit.

Die $MTTF$ wird definiert als der Erwartungswert $E(\tau)$ der Lebensdauer τ . Ist $f(t)$, $F(t)$ oder $R(t)$ bekannt, so berechnet sich der Erwartungswert der mittleren Lebensdauer nach [Bir91]

$$MTTF = E(\tau) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (2.14)$$

Der Erwartungswert der mittleren Reparaturzeit $MTTR$ ergibt sich zu [Bir91]

$$MTTR = E(\tau_R) = \int_0^{\infty} t g(t) dt. \quad (2.15)$$

Die Verfügbarkeit wird nach [Bir91] definiert als die „Wahrscheinlichkeit, dass ein System zu einem gegebenen Zeitpunkt arbeitsfähig ist“. Das System wechselt zwischen den Zuständen funktionsfähig und ausgefallen. Die Verfügbarkeit mit der sich ein Produkt zum Zeitpunkt t im funktionsfähigen Betriebszustand befindet entspricht der Zustandswahrscheinlichkeit. Für t gegen Unendlich konvergiert die Verfügbarkeit gegen einen Grenzwert und wird Dauerverfügbarkeit A_D genannt

$$A_D = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}. \quad (2.16)$$

Die Berechnung der Verfügbarkeit reparierbarer Systeme kann mit Hilfe verschiedener Berechnungsmodelle erfolgen. In [Fri01] werden der Markov Prozess, der Erneuerungsprozess, der Semi-Markov Prozess sowie die Systemtransporttheorie ausführlich behandelt. Die grundlegende Voraussetzung für die Behandlung reparierbarer Systeme mit Hilfe des Markov-Modells ist, dass sich das Ausfall- und Reparaturverhalten durch Exponentialverteilungen mit konstanten Ausfallraten beschreiben lässt. Besteht ein

System aus voneinander unabhängigen, reparierbaren Systemelementen, so kann das Boole-Markov Modell zur Berechnung der Dauerverfügbarkeit des Systems angewendet werden [Fri01], [Ber04]. Die Dauerverfügbarkeit A_{DS} für ein Seriensystem mit k Komponenten berechnet sich zu

$$A_{DS} = \prod_{i=1}^k \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i}. \quad (2.17)$$

Ist die Beschreibung des Ausfall- und Reparaturverhaltens nur in Form von zeitabhängigen Ausfallraten möglich, so ist das Markov-Modell nicht geeignet. Für diesen Fall existieren weitere Modelle wie z.B. der gewöhnliche Erneuerungsprozess sowie der alternierende Erneuerungsprozess [Fri01], [Ave99], [Ber04]. Der gewöhnliche Erneuerungsprozess legt die Annahme zu Grunde, dass eine Komponente nach ihrem Ausfall sofort durch eine neue, statistisch identische Komponente erneuert wird, und die Reparaturdauer somit gegenüber den Betriebsdauern vernachlässigt werden kann, d.h. es gilt $MTTF \gg MTTR$ [Ber04]. Die Ermittlung der Verfügbarkeit mit Hilfe des gewöhnlichen Erneuerungsprozesses ist nicht aussagekräftig. Sind die Reparaturdauern gegenüber den Betriebsdauern nicht mehr vernachlässigbar, so treten alternierende Prozesse auf [Fri01], [Ave99], [Ber04], und die Verfügbarkeit ist demnach berechenbar. Die Erneuerungstheorie setzt voraus, dass die Komponenten keine Abhängigkeiten untereinander aufweisen. Eine umfassende Theorie zur Verfügbarkeitsanalyse ist die von Dubi entwickelte Systemtransporttheorie [Dub86], [Dub96], [Dub99]. Bezüglich der Modellierungstiefe, der verwendbaren Verteilungsfunktionen, der Anzahl an Komponenten, deren Zustände als auch deren Interaktionen weist die Systemtransporttheorie im Gegensatz zum Markov Prozess oder der Erneuerungstheorie kaum Einschränkungen auf [Fri01]. Die analytische Anwendung der Theorie ist jedoch aufwendig und schwierig, daher wird häufig die Monte-Carlo Methode verwendet [Fri01].

Das Systemverhalten des Beispielsystems Planetengetriebe besitzt Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten bezüglich des Reparaturverhaltens. Das Ausfall- und Reparaturverhalten ist nicht mit Hilfe einer konstanten Ausfallrate beschreibbar, da es sich vorwiegend um Verschleißausfälle handelt. Die Ermittlung des Systemverhaltens sowie der zu erwartenden Garantiekosten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation, die die Berücksichtigung von Abhängigkeiten sowie unterschiedlicher Verteilungsfunktionen ermöglicht. Die Vorgehensweise wird im Kapitel 6.3 detailliert beschrieben.

3 Auswertung von Lebensdauerversuchen

Im vorliegenden Kapitel wird auf die unterschiedlichen Zensierungstypen eingegangen, die auf Grund der Ergebnisse von Lebensdauerversuchen sowie der Dokumentation von Felddaten vorliegen können. Des Weiteren wird die Analyse dieser Daten zur Ermittlung des Ausfallverhaltens in Form von Lebensdauerverteilungen an Hand der bekannten analytischen Methoden aus [Ber04] und [VDA3.2] vorgestellt.

Das Bild 3.1 zeigt die unterschiedlichen Datenstrukturen, die sich auf Grund von Lebensdauerversuchen oder der Dokumentation von Felddaten ergeben können. Eine vollständige Stichprobe beinhaltet nur ausgefallene Einheiten, deren Laufleistungen bekannt sind. Dabei müssen bei der Durchführung von Lebensdauerversuchen alle Einheiten bis zum Ausfall getestet werden. Dies ergibt aus statistischer Sicht die höchste Aussagesicherheit. Der Testumfang kann deutlich reduziert werden, indem nicht alle Einheiten bis zum Ausfall getestet werden, und der Lebensdauerversuch abgebrochen wird, bevor alle Prüflinge ausgefallen sind. Hierbei wird zwischen der Typ I Zensierung und der Typ II Zensierung unterschieden. Wird ein Lebensdauerversuch nach einer vorgegebenen Zeit abgebrochen, so spricht man von einer Typ I Zensierung. Dabei entspricht die Laufzeit der intakten Einheiten der Dauer des Lebensdauerversuchs. Die Anzahl der Ausfälle n_u ist eine Zufallsgröße und ist vor der Versuchsdurchführung nicht bekannt. Wird jedoch ein Lebensdauerversuch nach einer vorgegebenen Anzahl an Ausfällen abgebrochen, so spricht man von einer Typ II Zensierung. Die Laufzeit der intakten Einheiten entspricht somit der Laufzeit des letzten Ausfalls. Die Anzahl der Ausfälle bzw. der intakten Einheiten ist demnach bereits vor der Versuchsdurchführung bekannt.

Bei der Durchführung von Lebensdauerversuchen kommt es häufig vor, dass ein Prüfling auf Grund eines unvorhergesehenen Schadensmechanismus ausfällt und aus dem Versuch herausgenommen werden muss. Dieser Ausfall wird bezüglich der zu analysierenden Ausfallart als nicht ausgefallen bzw. zensiert berücksichtigt. Der Zeitpunkt der Zensierung ist hierbei zufällig. Bei dieser Art von Zensierung spricht man von einer multiplen Zensierung, die in der Regel bei der Dokumentation von Felddaten bzw. Garantiedaten vorliegt.

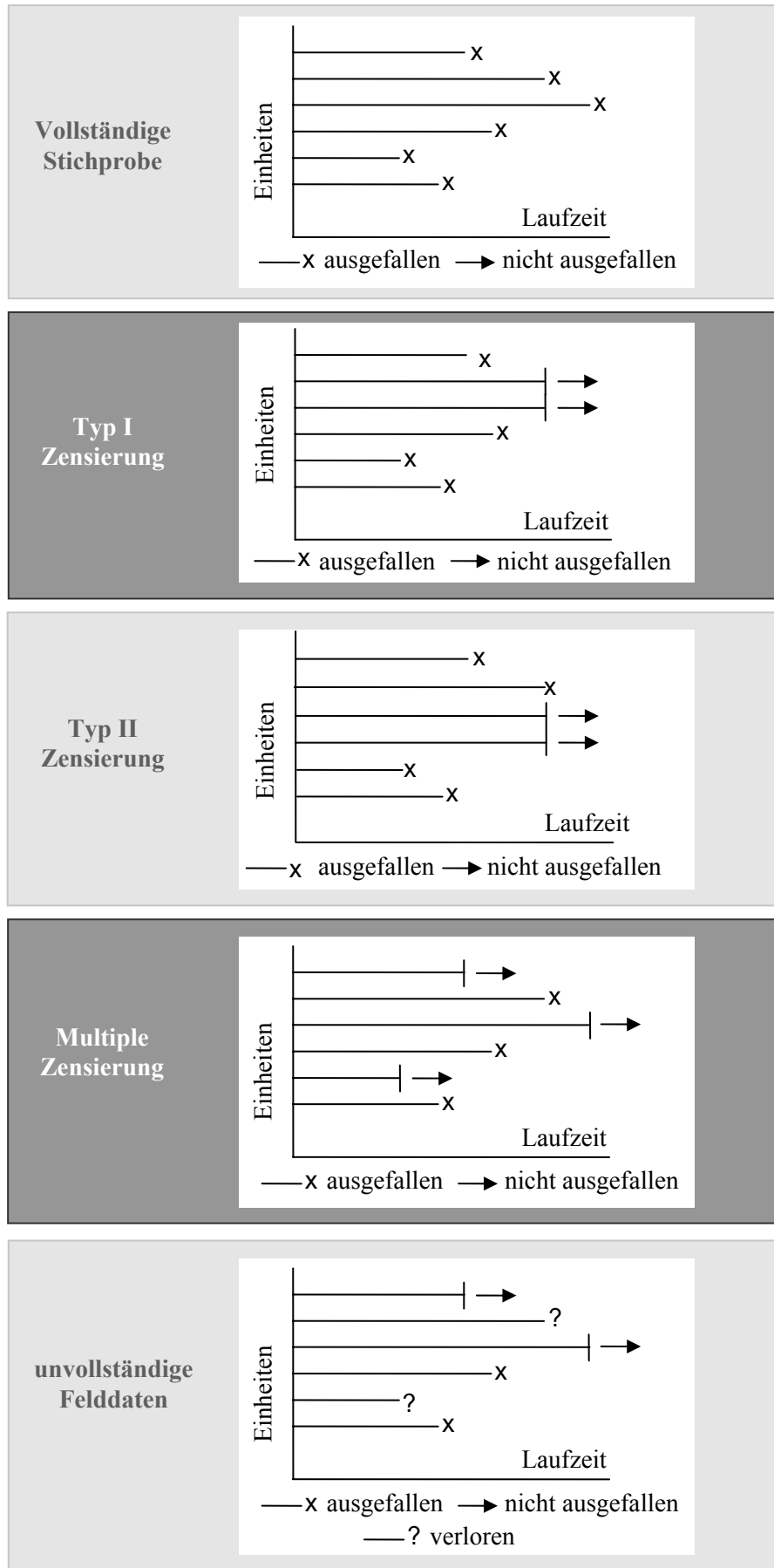


Bild 3.1: Unterschiedliche Datenstrukturen

Häufig kommt es vor, dass die vollständige Erfassung von Felddaten während der gesamten Nutzungsdauer nur vereinzelt möglich ist und über eine bestimmte Menge der sich im Feld befindenden Einheiten keinerlei Informationen vorliegen. Diese Daten werden als unvollständige Daten bezeichnet. Die Methoden zur Analyse unvollständiger Daten werden im Kapitel 4 behandelt.

Die Auswertung von Ausfalldaten kann mit Hilfe verschiedener analytischer Methoden erfolgen. Die Methoden, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurden, sind zum einen Methoden, die auf der Maximum-Likelihood Methode basieren, und zum anderen Methoden, die zunächst die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu den jeweiligen Lebensdauerwerten ermitteln und anschließend mit Hilfe der Regressionsanalyse die Verteilungsparameter bestimmen.

Im Folgenden werden einige Methoden zur Analyse der Typ I zensierten und Typ II zensierten Daten sowie multipel zensierter Daten aus [Ber04] erläutert.

3.1 Typ I und Typ II Zensierung

Bei der Auswertung zensierter Daten werden zunächst die Ausfallzeiten geordnet, um einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der Ausfallzeiten zu erhalten

$$t_1 < t_2 \dots < t_{n_u} \quad \text{bzw.} \quad t_i < t_{i+1}; \quad i = 1 \dots n_u.$$

Anschließend erfolgt die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t_i)$ für die einzelnen Ranggrößen t_i . Dies kann mit Hilfe der Näherungsformel erfolgen [Ber04]

$$F_i \approx \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad \text{für } i = 1(1)n_u. \quad (3.1)$$

Die Grundgesamtheit n beinhaltet alle zensierten Einheiten sowie alle ausgefallenen Einheiten $i = 1(1)n_u$. Im Fall einer vollständigen Stichprobe entspricht die Anzahl der ausgefallenen Einheiten der Grundgesamtheit $n_u = n$. Bei der Analyse Typ I- sowie Typ II zensierter Daten werden die intakten Einheiten dadurch berücksichtigt, dass im Nenner der Näherungsformel die Anzahl aller Einheiten n auftritt.

Nach der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten kann die Anpassung einer Verteilungsfunktion an die empirischen Werte erfolgen. Die Schätzung der Verteilungsparameter kann mit der Regressionsanalyse erfolgen, die im Kapitel 2.3.1 erläutert wurde.

3.2 Multiple Zensierung

Bei einer multiplen Zensierung ist der Zeitpunkt der Zensierung im Gegensatz zur Typ I oder Typ II Zensierung zufällig. Eine multiple Zensierung liegt in der Regel bei der Analyse von Felddaten bzw. Garantiedaten vor. Die Laufleistungen der intakten Einheiten können als konkrete Lebensdauermerkmale vorliegen oder in Form einer Laufleistungsverteilung gegeben sein. Es kann jedoch auch vorkommen, dass keinerlei Informationen über die Laufleistungen der intakten Einheiten vorliegen, siehe Bild 3.2. Die unterschiedlichen Analysemethoden werden im Folgenden vorgestellt werden.

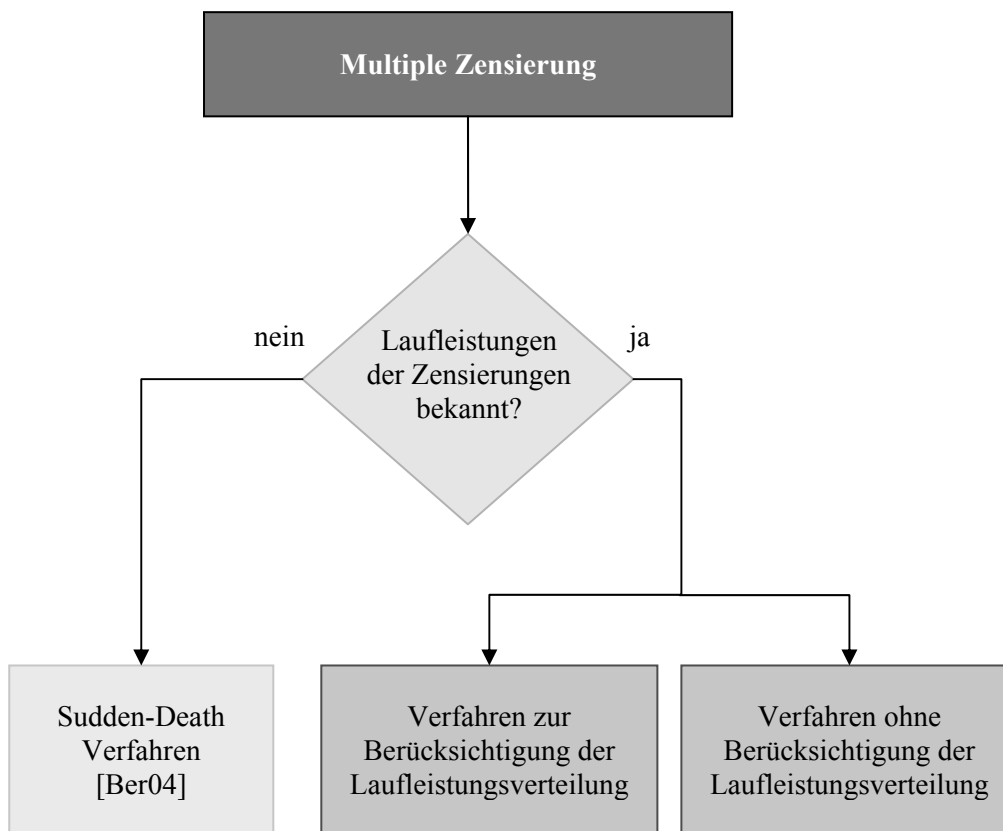


Bild 3.2: Laufleistungen der zensierten Einheiten

Die Methoden zur Analyse von Felddaten in [Ber04], [VDA00] gehen davon aus, dass die Laufleistungen aller Ausfälle vorliegen. Es können lediglich unterschiedliche Informationen bezüglich der intakten Einheiten vorliegen. Liegen für die intakten Einheiten keine Information bezüglich der Laufleistung vor, auch nicht in Form einer Laufleistungsverteilung, so kann die Analyse der Daten mit Hilfe des Sudden-Death Verfahrens aus [Ber04] durchgeführt werden.

Sudden-Death Verfahren

Beim Sudden-Death Verfahren geht man davon aus, dass sich der Ausfallmechanismus, der an Hand der Ausfalldaten einer Teilmenge der Stichprobe ermittelt werden kann, nicht ändert. Folglich bleibt die Form der Verteilungsfunktion erhalten. Dies kann erzielt werden, indem die intakten Einheiten zu gleich großen Anteilen verteilt werden, siehe Bild 3.3.

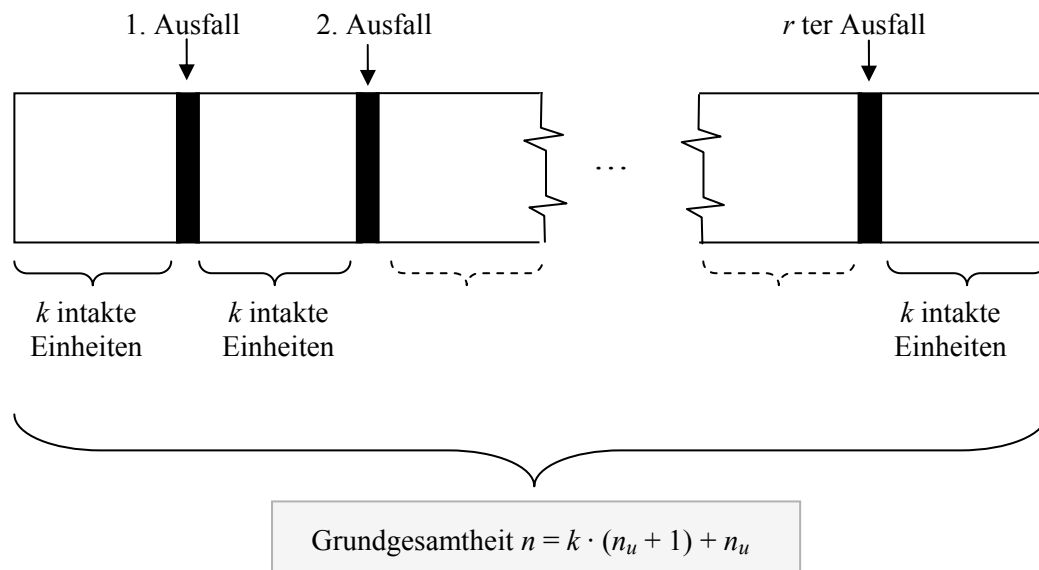


Bild 3.3: Sudden-Death Verfahren

Dabei liegen vor dem ersten Ausfall, zwischen den einzelnen Ausfällen sowie nach dem letzten Ausfall eine gleich große Menge an intakten Einheiten k . Die Anzahl an intakten Einheiten k berechnet sich mit der Grundgesamtheit n und der Anzahl an Ausfällen n_u zu

$$k = \frac{n - n_u}{n_u + 1}. \quad (3.2)$$

Nach der Zuordnung der intakten Einheiten zu den ausgefallenen Einheiten erfolgt die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten zu den jeweiligen Ausfallzeiten. Im ersten Schritt werden die Ausfallzeiten in steigender Reihenfolge geordnet. Anschließend werden den Ausfallzeiten hypothetische Rangzahlen $j(t_j)$ zugeordnet, die die intakten Einheiten mit berücksichtigen. Die hypothetische Rangzahl $j(t_j)$ entspricht der vorherigen Rangzahl plus Zuwachs $N(t_j)$ [Ber04]

$$j(t_j) = j(t_{j-1}) + N(t_j); \quad j(0) = 0. \quad (3.3)$$

Der Zuwachs $N(t_j)$ ergibt sich wie folgt

$$N(t_j) = \frac{n + 1 - j(t_{j-1})}{1 + (n - \text{Anzahl davorliegende Teile})} \quad (3.4)$$

Unter der Anzahl davorliegender Teile versteht man die Anzahl der intakten Einheiten sowie die Anzahl der Ausfälle, die gemäß Bild 3.3 vor dem zu betrachtenden Ausfall liegen. Bezüglich des zweiten Ausfalls würden sich somit $2 \cdot k$ intakte Einheiten und ein Ausfall als davorliegende Teile ergeben.

Nachdem die hypothetischen Rangzahlen der Ausfälle ermittelt sind, erfolgt die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t_j)$ bezüglich der einzelnen Ranggrößen t_j

$$F_i \approx \frac{j(t_j) - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.5)$$

Die Annäherung einer Lebensdauervertelung an die empirischen Wertepaare erfolgt nach der Regressionsanalyse.

Johnson-Verfahren

Das Johnson-Verfahren [Joh64] setzt die Kenntnis der Laufleistungen der intakten sowie der ausgefallenen Einheiten voraus. Die Vorgehensweise zur Analyse der Daten ist analog der Vorgehensweise des zuvor erläuterten Sudden-Death Verfahrens. Der Unterschied liegt darin, dass beim Johnson-Verfahren die genauen Laufzeiten der intakten Einheiten bekannt sind. Eine Verteilung der intakten Einheiten zu gleich großen Anteilen bezüglich der Ausfälle wird bei dieser Methode nicht durchgeführt, da somit wichtige Informationen verloren gingen.

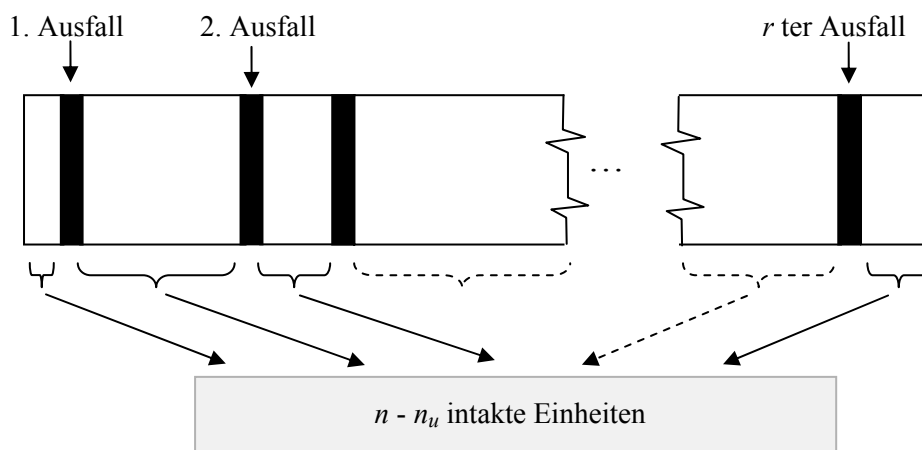


Bild 3.4: Johnson-Verfahren

Die Vorgehensweise wird im Folgenden an einem Beispiel verdeutlicht. Die Ausfallzeiten sowie die intakten Einheiten werden in steigender Reihenfolge geordnet und die Anzahl davorliegender Teile bezüglich der Ausfälle ermittelt, siehe Tabelle 3.1. Die Ordnungszahl j entspricht dabei den Ausfallzeiten t_j . Die Grundgesamtheit beträgt $n = 12$ Einheiten.

Tabelle 3.1: Ermittlung der Anzahl davorliegender Teile

Ordnungszahl j	Lebensdauer- merkmal t_j [h]	ausgefallen	intakt	Anzahl davorlie- gender Teile
	120		x	
	177		x	
1	186	x		2
	206		x	
2	222	x		4
3	243	x		5
	256		x	
	270		x	
4	291	x		8
	309		x	
5	318	x		10
	325		x	

Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t_j)$ erfolgt gemäß den Gleichungen (3.3) bis (3.5). Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Auswertung

Hypothetische Rangzahl $j(t_j)$	Lebensdauer- merkmal t_j [h]	Anzahl davor- liegender Teile	Zuwachs $N(t_j)$	Median [%] $F_{\text{Median}}(t_j)$
1,182	186	2	1,182	7,11
2,495	222	4	1,313	17,70
3,808	243	5	1,313	28,29
5,646	291	8	1,838	43,12
8,098	318	10	2,451	62,88

Laufleistungsverteilung

Wie im Bild 3.2 gezeigt, können die Laufleistungen der intakten Einheiten unbekannt sein, als konkrete Lebensdauermerkmale vorliegen oder in Form einer Laufleistungsverteilung gegeben sein. Die Laufleistungsverteilung gibt an wie viel Prozent der sich im Feld befindenden Einheiten eine gewisse Laufleistung beispielsweise pro Jahr oder während der Garantiezeit erreichen. Liegt für die Einheiten im Feld eine Laufleistungsverteilung vor, so ist die Berechnung des Anteils der intakten Einheiten pro Laufleistungsintervall möglich [Ber04].

Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten erfolgt, indem zunächst die intakten Einheiten je Laufleistungsintervall ermittelt und den Ausfällen zugeordnet werden. Anschließend werden gemäß dem Johnson-Verfahren die hypothetischen Rangzahlen $j(t_j)$ der Ausfallzeiten t_j ermittelt und die Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t_j)$ berechnet. Die Ermittlung der Parameter der Lebensdauerverteilung erfolgt mit Hilfe der Regressionsanalyse.

4 Analyse unvollständiger Felddaten

Es existieren unterschiedliche Methoden in der Literatur zur Analyse unvollständiger Felddaten. In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die bekannten Methoden gegeben. Anschließend werden die Vor- und Nachteile zweier Methoden an Hand einer beispielhaften Anwendung aufgeführt.

4.1 Methoden zur Felddatenanalyse

Die Ermittlung des Feldverhaltens kann durch Feldversuche erfolgen. Diese sind jedoch mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Um den notwendigen Stichprobenumfang für eine aussagekräftige Zuverlässigkeitsprognose mit geringem Kostenaufwand bereitstellen zu können, bietet die Analyse von Felddaten eine mögliche Alternative. Dabei ist zu beachten, dass die vollständige Erfassung von Felddaten während der gesamten Nutzungsdauer nur vereinzelt möglich ist, da die Instandhaltung von Maschinen und Anlagen nach Ablauf der Gewährleistungsfrist in der Regel in Eigenregie durchgeführt wird. Um aus Sicht des Herstellers den Informationsrücklauf über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, können beispielsweise Wartungsverträge oder Garantieverlängerungen angeboten werden [Edl01]. In der Tat entstehen bei der Beschaffung von Felddaten in der Praxis häufig Fehler [VDA3.2], die zur Folge haben, dass die Zuverlässigkeitsanalyse erschwert wird. Um eine aussagekräftige Zuverlässigkeitsprognose auf Basis unvollständiger Daten durchführen zu können, bedarf es geeigneter Methoden, die verlorene Informationen in der Analyse berücksichtigen können.

Im Bild 4.1 sind verschiedene Methoden zur Analyse unvollständiger Felddaten aufgeführt. Die Methoden können unterteilt werden in Methoden, die auf der Maximum-Likelihood Methode basieren und die Parameter der gesuchten Verteilung direkt aus den empirischen Daten mit Hilfe der Likelihood-Funktion bestimmt werden, sowie in Methoden, die zunächst die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu den Ausfallzeiten berechnen und anschließend die Parameter der Lebensdauerverteilung mit Hilfe der Regressionsanalyse ermitteln. Die Laufleistung der intakten Einheiten kann zum einen über konkrete Beobachtungen bekannt sein oder zum anderen über eine gegebene Laufleistungsverteilung ermittelt werden. Verlorene Daten werden den ausgefallenen und/oder den zensierten Daten mittels Gewichtungsfaktoren zugeordnet.

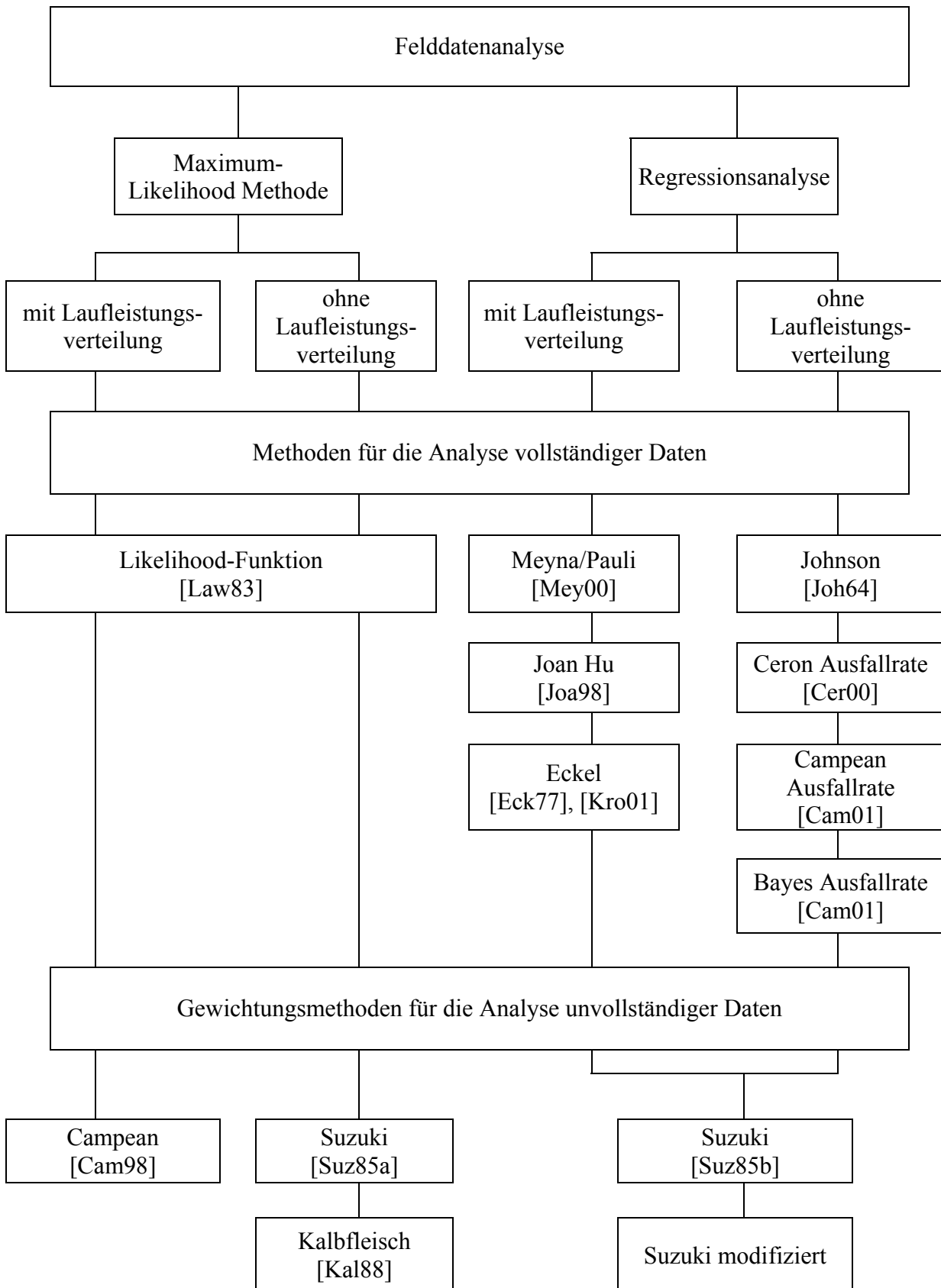


Bild 4.1: Methoden zur Felddatenanalyse [Del05b]

Einige dieser Methoden setzen die Kenntnis der Laufleistungsverteilung voraus, die im Bereich der Automobilindustrie bereits weit verbreitet ist. Planetengetriebe, die in industriellen Anwendungen zum Einsatz kommen, können unterschiedlichsten Beanspruchungen sowie Laufleistungen unterliegen, die meist nicht für jeden individuellen Einsatzfall ermittelt werden können. Oftmals ist es nur möglich, die Laufleistung über das Ausliefer- und Rücklieferdatum in Tagen zu ermitteln, wobei die effektive Laufzeit in Stunden einheitlich geschätzt werden muss. Die Information über die Anzahl an Lastwechseln ist in diesem Fall nicht gegeben, was die Ermittlung einer Laufleistungsverteilung und die Anwendung der jeweiligen Methoden sehr erschwert. Auf die Methoden unter Berücksichtigung der Laufleistungsverteilung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Die Gewichtungsmethoden für unvollständige Daten im Bild 4.1 ermöglichen die Analyse von Felddaten, deren Laufleistung nur für einen Teil der Einheiten bekannt ist. Über die restlichen Einheiten im Feld ist nichts bekannt; sie gelten somit als verloren gegangen. Um die im Bild 4.1 aufgeführten Methoden bezüglich ihrer Anwendbarkeit zu untersuchen, wurden in einer Vorstudie [Het03] zunächst unterschiedliche Szenarien in Anlehnung an die Datenbasis aus [Ber89] kreiert, die verschiedene Datenqualitäten repräsentieren. Einige dieser Datensätze beinhalten eine konstante Anzahl an Daten während der Garantiezeit, variieren jedoch in der Nachgarantiezeit. Hierbei können mehr oder weniger Daten bekannt sein. Dabei wird untersucht, wie sensibel die Methoden auf verlorene Informationen in der Nachgarantiezeit reagieren und ob es möglich ist, trotz unvollständiger Daten eine robuste Zuverlässigkeitsprognose durchzuführen. Des Weiteren wurden Datensätze kreiert, bei denen nicht nur die Nachgarantiedaten variieren, sondern auch unterschiedliche Informationen während der Garantiezeit vorliegen. Denn es kommt häufig vor, dass nicht alle Laufleistungen der Zensierungen dokumentiert werden können und verloren gehen. Die 15 unterschiedlichen Szenarien und die Ergebnisse der Auswertung werden eingehend in [Het03] diskutiert.

Die Unterschiede der Methoden für unvollständige Daten liegen in der Art der Gewichtung. Die unterschiedlichen Gewichtungsmethoden zur Analyse unvollständiger Daten ohne Berücksichtigung der Laufleistungsverteilung werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Im Kapitel 4.5 erfolgt die beispielhafte Anwendung der beiden Methoden, die abhängig von der Qualität der Daten sehr gute Ergebnisse erzielen konnten und mittels derer eine robuste Zuverlässigkeitsprognose trotz unvollständiger Daten möglich ist.

4.2 Suzuki - Methode

Die Schätzung der Verteilungsparameter mit der Maximum-Likelihood Methode erfolgt mit Hilfe der Likelihood-Funktion aus Kapitel 2.3.2. Hierbei werden die unbekannten Parameter $\vec{\theta}$ der Lebensdauerverteilung durch partielle Differentiation direkt aus den Ausfallzeiten und Zensierungszeiten geschätzt. Sind die Laufleistungen aller Ausfallzeiten t_{ui} und Zensierungszeiten t_{ci} bekannt, kann die logarithmierte Likelihood-Funktion gemäß Gleichung (2.13) angewendet werden [Law83]

$$\ln(L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \vec{\theta})) = \sum_{i=1}^{n_u} \ln(f(t_{ui}; \vec{\theta})) + \sum_{i=1}^{n_c} \ln(R(t_{ci}; \vec{\theta})). \quad (4.1)$$

Felddaten sind häufig unvollständig, da über eine bestimmte Anzahl an Einheiten im Feld keine Informationen vorliegen. Demzufolge können Sie weder den ausgefallenen Einheiten noch den Zensierten eindeutig zugeordnet werden. In diesem Fall spricht man von verloren gegangenen Daten. Um auf Basis unvollständiger Daten dennoch eine robuste Zuverlässigkeitsprognose zu erzielen, können die fehlenden Informationen mittels Gewichtungsfaktoren den ausgefallenen und/oder den zensierten Daten zugeordnet werden. Die Methode nach Suzuki [Suz85a] basiert auf einer Pseudo-Likelihood-Funktion, die verlorene Informationen mit Hilfe eines Gewichtungsfaktors $(1+n_l/n_c)$ berücksichtigen kann

$$\ln(L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \vec{\theta})) = \sum_{i=1}^{n_u} \ln(f(t_{ui}; \vec{\theta})) + \left(1 + \frac{n_l}{n_c}\right) \sum_{i=1}^{n_c} \ln(R(t_{ci}; \vec{\theta})). \quad (4.2)$$

Die verlorenen Einheiten n_l

$$n_l = N - (n_u + n_c) = N - (n_{u1} + n_{c1} + n_{u2} + n_{c2}) \quad (4.3)$$

werden den bekannten noch intakten Einheiten zugeordnet.

Bei dieser Methode wird davon ausgegangen, dass alle Ausfälle im Betrachtungszeitraum bekannt sind und demzufolge eine Gewichtung der verlorenen Einheiten ausschließlich auf die zensierten Einheiten erfolgt. Für den Fall, dass der Betrachtungszeitraum über den Garantiezeitraum hinaus gewählt wird, muss davon ausgegangen werden, dass sich Ausfälle ereignen, die nicht dokumentiert werden. Somit wäre eine Gewichtung auch auf die Ausfalldaten in der Nachgarantiezeit von Vorteil.

4.3 Methode nach Kalbfleisch und Lawless

Die Methode nach Kalbfleisch und Lawless [Kal88] legt die Annahme zu Grunde, dass nicht alle Ausfälle im Betrachtungszeitraum gegeben sind und folglich die Gewichtung nicht ausschließlich auf die zensierten Einheiten erfolgen sollte. Die Ausfälle, die sich während der Garantie ereignen, können in der Regel vollständig erfasst werden, da es im Interesse des Verbrauchers liegt, die Garantieleistungen bei Funktionseinbußen in Anspruch zu nehmen.

Die Methode nach Kalbfleisch und Lawless unterscheidet zwischen den Ausfalldaten während der Garantie t_{u1i} und nach Ablauf der Garantie t_{u2i}

$$\ln(L(t_1, \dots, t_n; \vec{\theta})) = \sum_{i=1}^{n_{u1}} \ln f(t_{u1i}, \theta) + \left(1 + \frac{n_l}{n_{u2} + n_c}\right) \left(\sum_{i=1}^{n_{u2}} \ln f(t_{u2i}, \theta) + \sum_{i=1}^{n_c} \ln R(t_{ci}, \theta) \right). \quad (4.4)$$

Die Berücksichtigung der verlorenen Daten erfolgt durch eine Gewichtung der Anzahl an Ausfällen nach Ablauf der Garantie n_{u2} und der Anzahl an Zensierungen während und nach der Garantie n_c .

4.4 Ausfallrate nach Bayes

Die Bestimmung der Verteilungsparameter erfolgt bei der Methode nach Campean, Kühn und Khan [Cam01], hier auch Ausfallrate nach Bayes genannt, in zwei Stufen. Im ersten Schritt werden aus den Felddaten die Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet. Nach einer geeigneten Transformation der Ausfallwahrscheinlichkeiten und Lebensdauern erfolgt im zweiten Schritt die Ermittlung der Verteilungsparameter mit Hilfe der Regressionsanalyse. Zur Berücksichtigung der verlorenen Einheiten wurde in [Suz85b] eine Methode vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit modifiziert wurde, um bessere Ergebnisse bei der Zuverlässigkeitsprognose erzielen zu können. Im Folgenden wird die Ausfallrate nach Bayes erläutert. Anschließend wird die Methode nach Suzuki zur Berücksichtigung unvollständiger Daten in ursprünglicher [Suz85b] und modifizierter Form aufgezeigt.

Die Ermittlung der Ausfallrate mit der Methode nach Campean, Kühn und Khan [Cam01] erfolgt je Intervall i . Der Verlauf der Ausfallrate in einem Intervall i ist konstant und folgt somit einer Exponentialverteilung. Die Bestimmung der Ausfallrate je Intervall beruht auf dem Bayes Prinzip. Man geht davon aus, dass für die Bestimmung der Ausfallrate im Intervall i eine Vorinformation aus dem vorherigen Intervall $i-1$ vorhanden ist, und die Änderung der Ausfallrate somit vom angrenzenden Intervall mitbestimmt wird. Dies führt zu einer Glättung des Verlaufs der Intervall-Ausfallrate. Gemäß [Cam01] wird die empirische Ausfallrate im Intervall i wie folgt berechnet

$$\tilde{\lambda}_i(t) = \frac{\alpha_i^*}{\beta_i^*} = \frac{\alpha_i + f_i}{\beta_i + M_{\Sigma i}}, \quad (4.5)$$

mit der Anzahl der Ausfälle f_i im Intervall i , der Laufleistung $M_{\Sigma i}$ aller Einheiten im Intervall i sowie α_i und β_i zur Übertragung der Vorinformation aus dem vorherigen Intervall $i-1$ in das aktuelle Intervall i . Die Intervalllänge kann individuell bestimmt werden. [Cam01] legt eine einheitliche Intervalllänge zu Grunde; [Del05a] hingegen wählt das Intervall von einem zum nächsten Ausfall. Die Laufleistung $M_{\Sigma i}$ aller Einheiten im Intervall i ergibt sich nach [Cam01] aus der Summe

- der Laufleistung von Anfang des Intervalls bis zum Ausfall,
- der Laufleistung von Anfang des Intervalls bis zur Zensierung und
- der Laufleistung für die Überlebenden des Intervalls (Laufleistungsband).

Für eine Intervalllänge gemäß [Del05a] kann die Laufleistung aller Einheiten im Intervall i wie folgt beschrieben werden

$$M_{\Sigma i} = n_i \cdot (m_i - m_{i-1}) + \sum_{j=1}^{c_i} t_{cj} - c_i \cdot m_{i-1}, \quad (4.6)$$

n_i ist dabei die Anzahl Einheiten bis zum Ausfall i , m_i ist die Laufleistung bis zum Ende des i -ten Intervalls, c_i ist die Anzahl Zensierungen im Intervall i , t_{cj} ist die Laufleistung der Zensierungen.

Für α_i und β_i gilt

$$\alpha_i = k_i \alpha_{i-1}^* \quad \text{und} \quad (4.7)$$

$$\beta_i = k_i \beta_{i-1}^*. \quad (4.8)$$

Der Faktor k_i ermöglicht die Berücksichtigung von Vorinformation nur zu einem bestimmten Anteil und berechnet sich aus

$$k_i = (\alpha_{i-1}^*)^2 / ((\alpha_{i-1}^*)^2 + D_f^{-1} - 1). \quad (4.9)$$

Wenn die Vorinformation ignoriert werden soll, so gilt $D_f \rightarrow 0$ und demnach $k_i \rightarrow 0$, bei vollständiger Berücksichtigung der Vorinformation im angrenzenden Intervall gilt $D_f \rightarrow 1$ und $k_i \rightarrow 1$. Durch die qualitative Bestimmung des so genannten [Kro04] Transformationsfaktors D_f kann der Anteil zur Berücksichtigung der Vorinformation definiert werden. Für das erste Intervall ist keine Vorinformation vorhanden; die Ausfallrate kann vereinfacht geschrieben werden als

$$\lambda_1(t) = \frac{f_1}{M_{\Sigma 1}}. \quad (4.10)$$

Auf Grund der konstanten Ausfallrate je Intervall kann die empirische Zuverlässigkeit

$$\tilde{R}_i(t) = \begin{cases} e^{-\tilde{\lambda}_1 m_1} & \text{für } i = 1 \\ \tilde{R}_{i-1}(t) \cdot e^{-\tilde{\lambda}_i (m_i - m_{i-1})} & \text{für } i > 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

stückweise für jedes Intervall i mit Hilfe der Exponentialverteilung beschrieben werden [Kim91].

Für die empirische Ausfallwahrscheinlichkeit $\tilde{F}_i(t)$ ergibt sich

$$\tilde{F}_i(t) = 1 - \tilde{R}_i(t). \quad (4.12)$$

Die Ermittlung der Weibullverteilung erfolgt mit Hilfe der Regressionsanalyse. Dabei müssen zunächst die Ausfallwahrscheinlichkeiten $\tilde{F}_i(t)$ sowie die Lebensdauern t_i transformiert werden. Ausgangspunkt zur Regressionsanalyse bildet das Weibullnetz. Die Geradengleichung ergibt sich zu [Ber04]

$$\ln(-\ln(1 - \tilde{F}_i(t))) = b \cdot \ln(t) - b \cdot \ln(T). \quad (4.13)$$

Der Formparameter der zweiparametrischen Weibullverteilung berechnet sich wie folgt [Ber04]

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \text{mit } y_i = \ln(-\ln(1 - \tilde{F}_i)); \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(-\ln(1 - \tilde{F}_i)) \quad (4.14)$$

$$\text{und } x_i = \ln(t_i); \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i).$$

Für die charakteristische Lebensdauer ergibt sich [Ber04]

$$T = \exp\left(-\frac{\bar{y} - b \cdot \bar{x}}{b}\right). \quad (4.15)$$

Bisher kann die Ausfallrate nach Bayes nur für vollständige Daten angewendet werden. Die Berücksichtigung der verlorenen Einheiten kann durch die Gewichtung der bekannten Zensierungen erfolgen [Suz85b]. Alle Ausfälle während und nach der Garantie bleiben ungewichtet. Die korrigierte Anzahl an Zensierungen ergibt sich zu

$$\tilde{c}_i = \left[1 + \frac{n_l}{n_c} \right] \cdot c_i. \quad (4.16)$$

Zur Bestimmung der Ausfallrate nach Bayes auf Basis unvollständiger Daten muss die Anzahl der zensierten Einheiten c_i in Gleichung (4.6) durch \tilde{c}_i ersetzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Ausfälle im Betrachtungszeitraum bekannt sind, da die Gewichtung der verlorenen Einheiten ausschließlich auf die zensierten Einheiten erfolgt. Eine Gewichtung von Zensierungen und Ausfällen in der Nachgarantiezeit kann sich je nach Einsatzfall bei der Parameterschätzung vorteilhaft auswirken. Demzufolge wurde die Methode nach [Suz85b] modifiziert.

Die Ausfälle sowie Zensierungen während der Garantiezeit bleiben ungewichtet. Für die Anzahl an ausgefallenen Einheiten f_i sowie zensierten Einheiten c_i , die sich nach Ablauf der Garantie im Intervall i ereignen, gilt

$$\tilde{f}_i = \left[1 + \frac{n_l}{n_{u2} + n_{c2}} \right] \cdot f_i \text{ und} \quad (4.17)$$

$$\tilde{c}_i = \left[1 + \frac{n_l}{n_{u2} + n_{c2}} \right] \cdot c_i. \quad (4.18)$$

Wird die modifizierte Methode auf die Ausfallrate nach Bayes angewendet, so muss die Anzahl der zensierten Einheiten c_i nach Ablauf der Garantie in Gleichung (4.6) durch \tilde{c}_i ersetzt werden, und die Anzahl an ausgefallenen Einheiten f_i nach Ablauf der Garantie in Gleichung (4.5) durch \tilde{f}_i ersetzt werden.

4.5 Beispielhafte Anwendung

Die beispielhafte Anwendung der Kalbfleisch-Methode sowie der Ausfallrate nach Bayes in Verbindung mit der modifizierten Gewichtungsmethode wird in diesem Kapitel gezeigt. Die Analyse erfolgt auf Basis der zweiparametrischen Weibullverteilung. Mittels zweier Szenarien werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methode demonstriert.

4.5.1 Szenarien

Bei Felddaten, die auf Basis von Garantiedaten ermittelt werden, handelt es sich im Allgemeinen um unvollständige Daten mit Ausnahme der Ausfälle, die sich während der Garantiezeit ereignen. Nach Ablauf der Garantie liegen meist nur noch wenige Daten vor. Zur Untersuchung der Methoden bezüglich ihrer Eignung für eine robuste Zuverlässigkeitsprognose, wurden 15 unterschiedliche Szenarien in Anlehnung an die

Datenbasis aus [Ber89] kreiert, die verschiedene Datenqualitäten repräsentieren. Bei den Datensätzen wird die Laufleistung in Stunden angegeben, was eine realistische Größe bei der Dokumentation von Felddaten im Bereich der Industriegetriebe darstellt. Oftmals ist die tatsächliche Laufzeit nicht bekannt und muss über das Ausliefer- und Rücklieferdatum geschätzt werden [IEC60605]. Die Auswertung für den Bereich der Industriegetriebe kann nach dem jeweiligen Einsatzgebiet und Kunden erfolgen. Somit kann vereinfacht eine einheitliche Schätzung der tatsächlichen Laufzeit über den Schichtbetrieb sowie der effektiven Einsatzdauer erfolgen. Für die beispielhafte Anwendung der Methoden wurde eine eindimensionale Garantie mit der Zeit als Variablen gewählt. Die Garantie ist in Jahren angegeben, kann jedoch auch in Stunden angegeben werden, da die jährliche Laufleistung der Getriebe beim jeweiligen Kunden identisch ist.

Die Analyse erfolgt zunächst auf Basis des vollständigen Datensatzes. Anschließend werden die unvollständigen Datensätze analysiert, und die Ergebnisse mit denen des vollständigen Datensatzes verglichen. Die Ergebnisse der Vorstudie [Het03] werden im Rahmen dieser Arbeit an Hand von zwei Szenarien vorgestellt. Der vollständige Datensatz aus [Ber89] besteht aus einer Grundgesamtheit von 34 Einheiten mit 12 Zensierungen und 22 Ausfällen. Die Ausfälle ereigneten sich auf Grund desselben Ausfallmechanismus. Die Daten wurden so angepasst, dass die Laufleistung in Stunden angegeben werden kann. Die Garantiedauer wurde mit 5 000 Stunden festgelegt.

Tabelle 4.1: Vollständiger Datensatz

Anzahl		Laufzeiten [h] für			
		<i>u1</i>	<i>c1</i>	<i>u2</i>	<i>c2</i>
n_{u1}	= 11	2 040	2 220	5 180	5 030
n_{c1}	= 7	2 730	2 310	5 450	5 120
n_{u2}	= 11	3 020	2 540	5 840	5 420
n_{c2}	= 5	3 570	3 320	5 850	5 980
		3 970	3 390	5 860	6 650
		4 100	4 530	6 230	
		4 140	4 620	6 810	
		4 440		7 220	
		4 610		7 560	
		4 710		9 330	
		4 890		10 350	

Tabelle 4.2: Szenario 1

Anzahl		Laufzeiten [h] für			
		<i>u1</i>	<i>c1</i>	<i>u2</i>	<i>c2</i>
n_{u1}	= 11	2 040	2 220	5 180	5 030
n_{c1}	= 7	2 730	2 310	?	?
n_{u2}	= 5	3 020	2 540	5 840	5 420
n_{c2}	= 3	3 570	3 320	?	5 980
		3 970	3 390	?	?
		4 100	4 530	?	
		4 140	4 620	6 810	
		4 440		?	
		4 610		7 560	
		4 710		?	
		4 890		10 350	

Tabelle 4.3: Szenario 2

Anzahl		Laufzeiten [h] für			
		<i>u1</i>	<i>c1</i>	<i>u2</i>	<i>c2</i>
n_{u1}	= 11	2 040	2 220	5 180	5 030
n_{c1}	= 7	2 730	2 310	?	5 120
n_{u2}	= 2	3 020	2 540	?	?
n_{c2}	= 2	3 570	3 320	5 850	?
		3 970	3 390	?	?
		4 100	4 530	?	
		4 140	4 620	?	
		4 440		?	
		4 610		?	
		4 710		?	
		4 890		?	

Die Daten sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Es wird zwischen Daten, die sich in der Garantie und in der Nachgarantie befinden, unterschieden. Szenario 1, Tabelle 4.2, repräsentiert einen Datensatz, bei dem bis zum Garantieende von 5 000 Stunden alle Daten vorliegen. Nach Ablauf der Garantie liegen nur noch vereinzelt Daten vor, die jedoch regelmäßig über einen längeren Zeitraum vorhanden sind. Dagegen liegen bei Szenario 2, siehe Tabelle 4.3, nur kurz nach Ablauf der Garantie Daten vor. Während der Garantiezeit von 5 000 Stunden sind gleichermaßen alle Daten bekannt.

4.5.2 Ergebnisse der Methode nach Kalbfleisch und Lawless

Verlorene Daten werden bei der Methode nach Kalbfleisch und Lawless aus Kapitel 4.3 durch die Gewichtung der Anzahl an Ausfällen nach Ablauf der Garantie n_{u2} und der Anzahl an Zensierungen während und nach der Garantie $n_c = n_{c1} + n_{c2}$ berücksichtigt. In diesem Abschnitt erfolgt die beispielhafte Anwendung der Methode auf Basis der zweiparametrischen Weibullverteilung. Die Bestimmung der unbekannt Parameter b und T der zweiparametrischen Weibullverteilung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nach dem Newton-Raphson Verfahren [Nel82], [Las02]. Daher müssen zu Beginn der Berechnung Startwerte für die unbekannt Parameter angegeben werden. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Tabelle 4.4: Weibullparameter / Kalbfleisch und Lawless

Felddaten	T [h]	b
vollständiger Datensatz	6 547	3,16
Szenario 1	6 578	3,00
Szenario 2	5 219	5,44

Bei der Parameterschätzung kann es zu erheblichen Unterschieden kommen, abhängig davon, wie die Beschaffenheit der Datenstruktur ist. Die Parameter des Szenario 1 entsprechen bis auf geringe Abweichungen denen des kompletten Datensatzes. Szenario 2 hingegen liefert Ergebnisse, die in dieser Form für eine Zuverlässigkeitsprognose unzulässig wären. Bezogen auf den kompletten Datensatz ergibt sich eine Abweichung der charakteristischen Lebensdauer T von 20% und eine Abweichung des Formparameters b von 72 %.

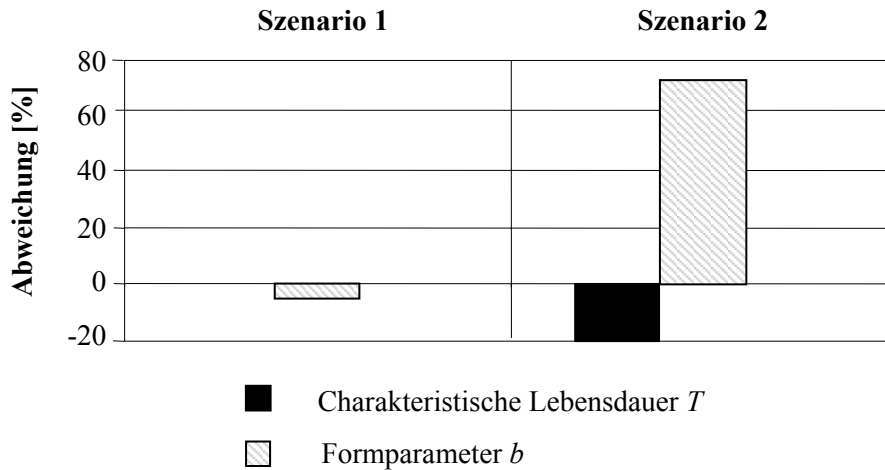


Bild 4.2: Abweichung der Weibullparameter

4.5.3 Ergebnisse der Ausfallrate nach Bayes

Die Ausfallrate nach Bayes wird dahingehend erweitert, dass unvollständige Daten berücksichtigt werden können. Dies geschieht mit Hilfe der modifizierten Gewichtungsmethode. Die Intervall-Ausfallrate berechnet sich zu

$$\tilde{\lambda}_i(t) = \frac{\alpha_i^*}{\beta_i^*} = \frac{\alpha_i + \tilde{f}_i}{\beta_i + n_i \cdot (m_i - m_{i-1}) + \sum_{j=1}^{\tilde{c}_i} t_{cj} - \tilde{c}_i \cdot m_{i-1}}; \quad (4.19)$$

die korrigierte Anzahl der Ausfälle \tilde{f}_i und Zensierungen \tilde{c}_i in der Nachgarantiezeit können mit den Gleichungen (4.17) und (4.18) ermittelt werden. Die Parameterschätzung erfolgt bei dieser Methode mit Hilfe der Regressionsanalyse. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 4.5 gegeben. Bei der Analyse wurde zunächst ein Transformationsfaktor von $D_f = 0,25$ gewählt [Del05a], [Cam01].

Tabelle 4.5: Weibullparameter / Ausfallrate nach Bayes

Felddaten	T [h]	b
vollständiger Datensatz	7 072	3,05
Szenario 1	7 421	2,85
Szenario 2	6 767	3,25

Im Gegensatz zur Methode nach Kalbfleisch und Lawless liefert die Ausfallrate nach Bayes unter Berücksichtigung verlorener Daten sehr gute Ergebnisse für Szenario 2. Die Abweichung der Charakteristischen Lebensdauer T ist geringer als 5 % und die des Formparameters b liegt unter 7%.

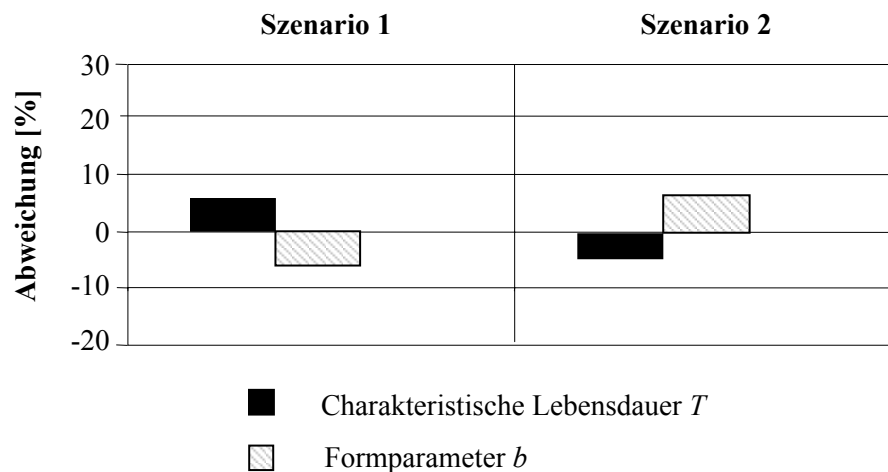


Bild 4.3: Abweichung der Weibullparameter bei $D_f = 0,25$

Durch die Berücksichtigung von Vorinformation wird die empirische Ausfallrate geglättet. Dadurch kann der tatsächliche Verlauf anschaulicher dargestellt und der entsprechende Ausfallmechanismus besser erkannt werden. Je nach Wahl des Transformationsfaktors kann sich der Verlauf erheblich ändern. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Ausfallrate nach Bayes auf Basis des vollständigen Datensatzes und der zwei Szenarien unter Verwendung unterschiedlicher Transformationsfaktoren ermittelt. Die Ergebnisse der Auswertung auf Basis des vollständigen Datensatzes sind im Bild 4.4 für sechs verschiedene Transformationsfaktoren dargestellt.

Die empirische Ausfallrate, die für einen Transformationsfaktor von 0,1 ermittelt wurde, liefert keinen charakteristischen Verlauf. Die einzelnen Werte der Ausfallrate weichen von einem Intervall zum nächsten zu sehr voneinander ab. Eine Erhöhung des Transformationsfaktors bewirkt eine Glättung des Verlaufs. Erhebliche Unterschiede zeigen sich bereits bei der Erhöhung des Transformationsfaktors von 0,2 auf 0,3. Es wird ersichtlich, dass es sich bei dem Datensatz aus [Ber89] auf Grund der steigenden Ausfallrate um Verschleißausfälle handelt. Die Wahl eines Transformationsfaktors größer als 0,3 ist für den verwendeten Datensatz jedoch ungünstig, da die Glättung zu intensiv erscheint und somit zu unrealistischen Verteilungsparametern führen kann. Ähnliche Verläufe der empirischen Ausfallrate zeigen sich für Szenario 1 sowie Szenario 2.

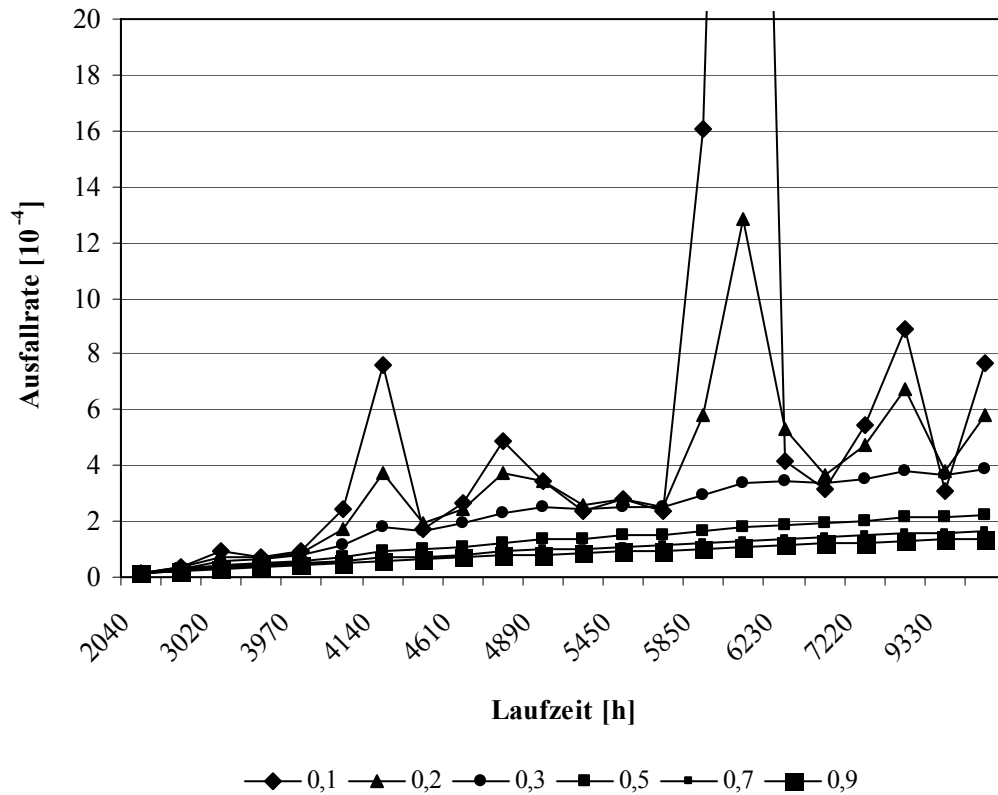


Bild 4.4: Vollständiger Datensatz bei Variation des Transformationsfaktors

Die Parameter der Weibullverteilung sind für verschiedene Transformationsfaktoren im Bild 4.5 und Bild 4.6 dargestellt.

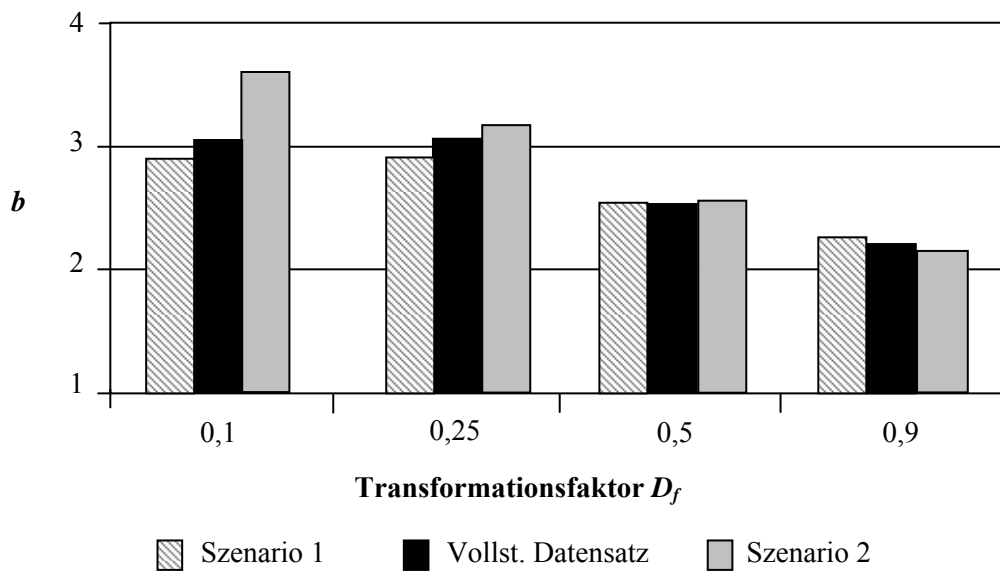


Bild 4.5: Formparameter b bei Variation des Transformationsfaktors

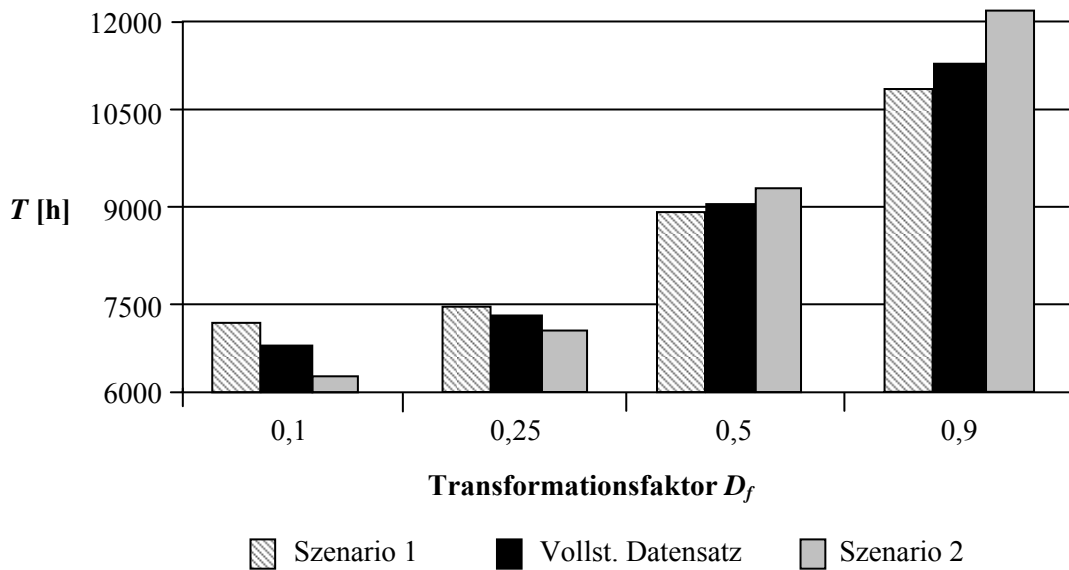


Bild 4.6: Charakteristische Lebensdauer T bei Variation des Transformationsfaktors

Der Formparameter b der Weibullverteilung befindet sich für unterschiedliche Transformationsfaktoren im Bereich von ca. 2,1 und 3,6. Die Werte der charakteristischen Lebensdauer T liegen im Bereich von ca. 6200 h und 12200 h. Je größer der Transformationsfaktor gewählt wird, desto intensiver wird die Glättung der empirischen Ausfallrate. Dies hat zur Folge, dass der Formparameter b der Weibullverteilung sinkt und die charakteristische Lebensdauer T demnach sehr hohe Werte annimmt. In diesem Beispiel hat sich gezeigt, dass eine realistische Prognose mit Hilfe eines Transformationsfaktors von ca. 0,25 erzielt werden kann.

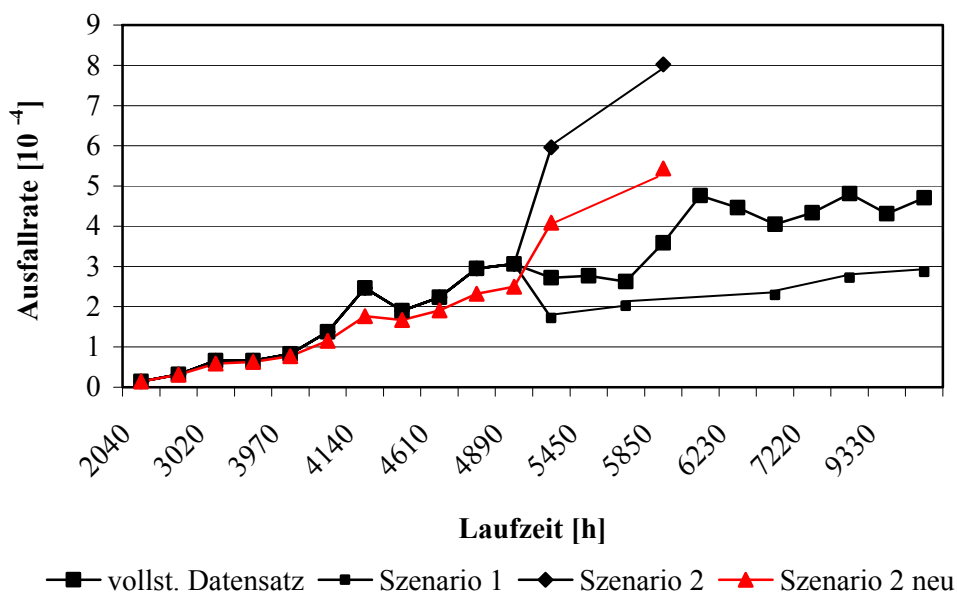


Bild 4.7: Ausfallrate nach Bayes

Die empirischen Ausfallraten des vollständigen Datensatzes, Szenario 1 und Szenario 2 sind für einen Transformationsfaktor von 0,25 im Bild 4.7 veranschaulicht. Auf den Verlauf von „Szenario 2 neu“ wird später eingegangen.

Verglichen mit dem vollständigen Datensatz und Szenario 1 nimmt die Ausfallrate für Szenario 2 nach Ablauf der Garantie sehr hohe Werte an. Dies ergibt sich dadurch, dass die Anzahl bekannter Daten in der Nachgarantiezeit für Szenario 2 sehr gering ist und eine relativ geringe Laufleistung aufweisen. Zudem werden die Nachgarantiedaten gewichtet, was zu einer hohen Anzahl an Ausfällen im Intervall führt, die eine geringe Laufleistung besitzen. Eine hohe Anzahl an Ausfällen \tilde{f}_i und eine geringe Laufleistung $M_{\Sigma i}$ im Intervall i ergeben eine erhöhte Ausfallrate für das Intervall i . Um dem entgegen zu wirken, kann der Transformationsfaktor in der Garantiezeit sowie in der Nachgarantiezeit angepasst werden. Für Szenario 2 neu wurde ein Transformationsfaktor von 0,3 während der Garantie und 0,4 nach Ablauf der Garantie gewählt. Es ist eine deutliche Verbesserung der empirischen Ausfallrate in der Nachgarantiezeit sichtbar, siehe Bild 4.7. Durch die Erhöhung des Transformationsfaktors in der Garantiezeit von 0,25 auf 0,3 ergibt sich ein veränderter Verlauf. Die Ausfallrate im letzten Intervall während der Garantiezeit wird im ersten Intervall in der Nachgarantiezeit mit dem Transformationsfaktor $D_f = 0,4$ berücksichtigt. Dadurch konnte die Abweichung zum vollständigen Datensatz wesentlich verringert werden. Es ergibt sich eine Weibullverteilung mit einer charakteristischen Lebensdauer von $T = 7265$ h und einem Formparameter von $b = 3,02$.

4.5.4 Gegenüberstellung der Methoden

Die Methode nach Kalbfleisch und Lawless liefert sehr gute Ergebnisse für Szenario 1. Wie im Bild 4.8 an Hand der Weibullverteilungen ersichtlich ist, kann trotz einer unvollständigen Datenbasis eine robuste Zuverlässigkeitsprognose erzielt werden. Der Grund für die gute Schätzung der Parameter im Fall von Szenario 1 liegt in der Struktur der Daten. Die Nachgarantiedaten besitzen sowohl Ausfall- als auch Zensierungszeiten, die über einen längeren Betrachtungszeitraum in nahezu regelmäßigen Abständen vorhanden sind. Die Maximum-Likelihood Methode reagiert bei diesem Beispiel weniger sensibel bezüglich solcher Datenstrukturen, da hierbei Daten von Beginn bis zum Ende der Nachgarantie in regelmäßigen Abständen vorhanden sind. Schlechte Schätzungen würden sich ergeben, wenn die Daten nur für einen kurzen Zeitraum verfügbar und keine Daten im Bereich der größeren Laufleistungen vorhanden wären. Dies zeigt sich bei der Analyse von Szenario 2. Hier liegen nur kurz nach Ablauf der Garantie Daten vor. Die Maximum-Likelihood Methode reagiert an dieser Stelle sensibel. Die Steigung der Weibullverteilung ist im Gegensatz zum vollständigen Datensatz wesentlich höher, da die bekannten Daten von Szenario 2 eine erheblich

geringere Streuung aufweisen. Bezogen auf den vollständigen Datensatz beträgt die Abweichung des Formparameters b 72%.

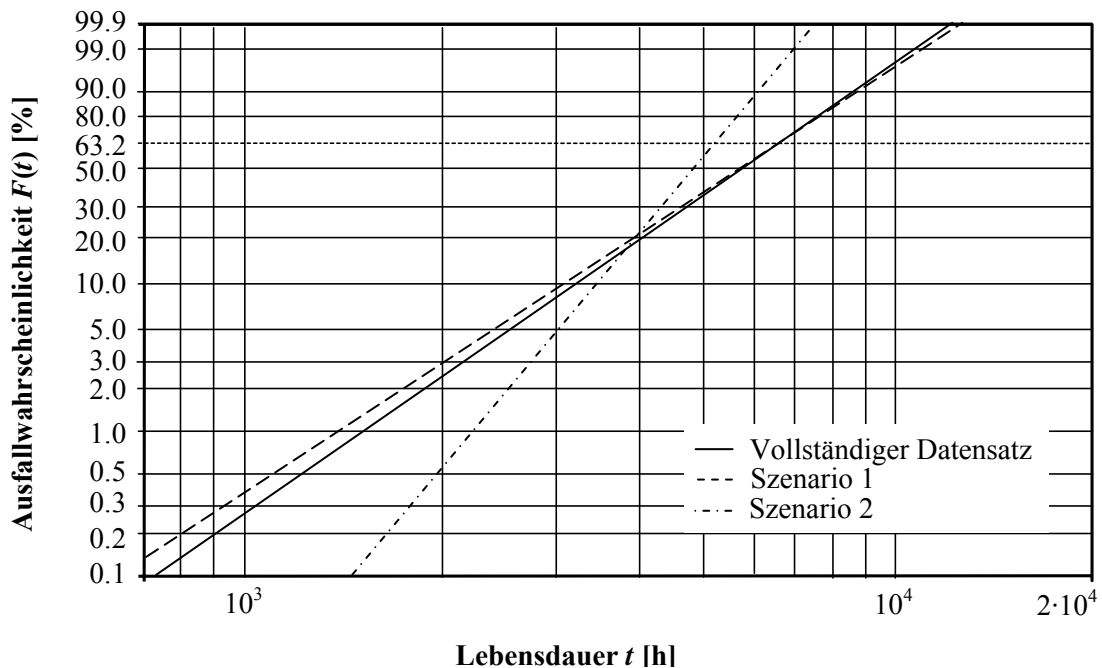


Bild 4.8: Ergebnisse der Methode nach Kalbfleisch und Lawless

Um eine robuste Zuverlässigkeitsprognose auf Basis unvollständiger Daten erzielen zu können, muss zunächst die Qualität der Daten untersucht werden, um im Anschluss die entsprechende Methode zur Analyse der Felddaten festlegen zu können. Dabei ist die Datenqualität abhängig vom Kundenverhalten und den bestimmten Vertragsbedingungen.

Das Bild 4.9 zeigt die Ergebnisse der Auswertung nach der Ausfallrate nach Bayes in Kombination mit der modifizierten Gewichtungsmethode. Für den Transformationsfaktor D_f wurde zunächst der Wert 0,25 gewählt, siehe Kapitel 4.5.3. Beide Szenarien lassen sich gut mit Hilfe der Ausfallrate nach Bayes analysieren. Eine bessere Annäherung der Weibullverteilung an die des vollständigen Datensatzes konnte für Szenario 2 durch die Variation des Transformationsfaktors erreicht werden, siehe Bild 4.10. Die Abweichung der charakteristischen Lebensdauer T konnte auf 2,7 % und die des Formparameters b auf 0,98 % reduziert werden.

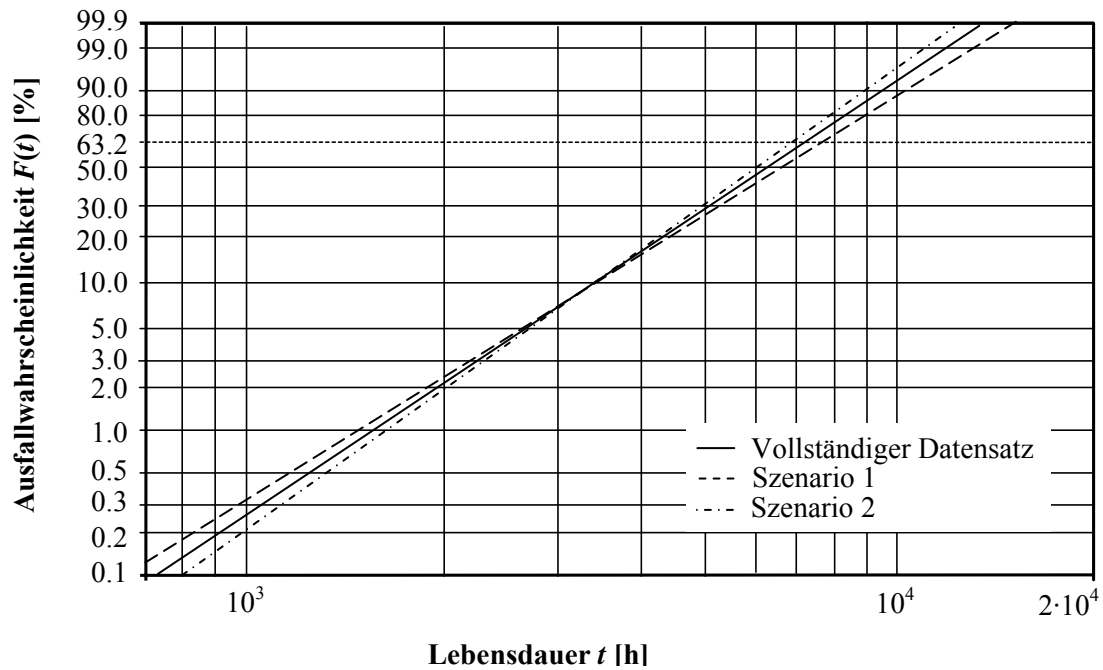


Bild 4.9: Ergebnisse der Ausfallrate nach Bayes für $D_f = 0,25$

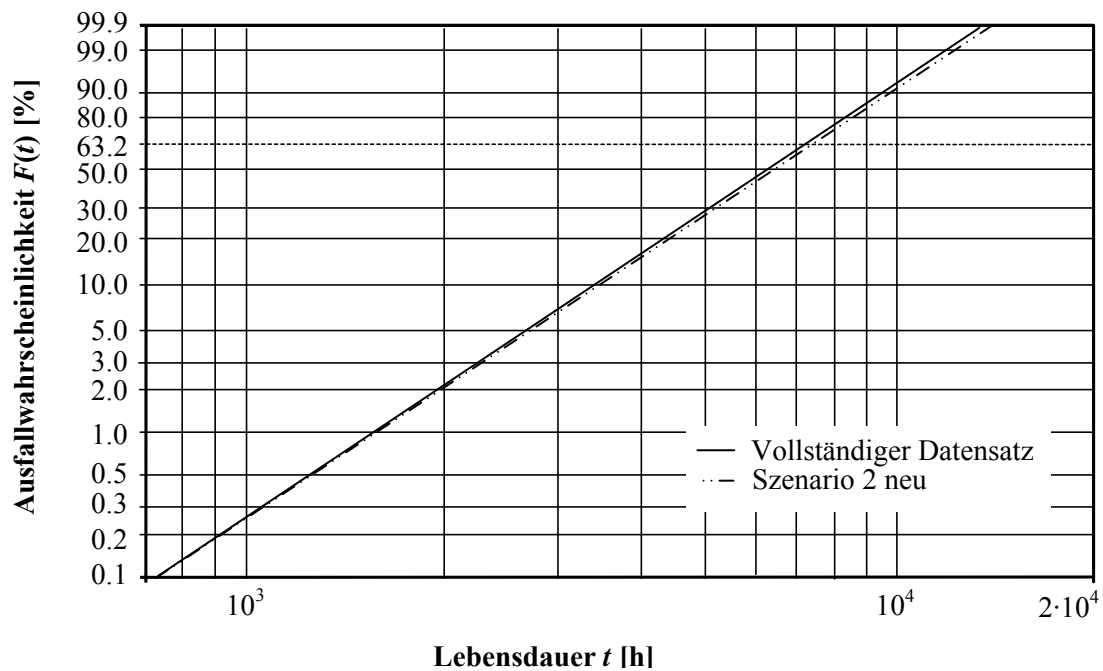


Bild 4.10: Ausfallrate nach Bayes bei Variation des Transformationsfaktors, $D_f = 0,3$ während der Garantiezeit und $D_f = 0,4$ nach Ablauf der Garantie

4.6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel zweier Szenarien demonstriert wurden, haben gezeigt, dass die Parameter der Weibullverteilung bei der Analyse unvollständiger Daten sehr stark variieren können. Die Ergebnisse hängen von der Qualität der Daten ab. Es können trotz schlechter Datenqualität sehr gute Ergebnisse erzielt werden, je nachdem welche Methode für die Analyse herangezogen wird. Voraussetzung für die Anwendung der vorgestellten Methoden ist die Kenntnis der Laufleistung der Ausfälle als auch der Zensierungen während der Garantie. Des Weiteren muss ein Anteil an Zensierungen und Ausfällen nach Ablauf der Garantie bekannt sein.

Die hier vorgestellten Szenarien repräsentieren ein unterschiedliches Kundenverhalten. Szenario 1 stellt einen Kunden dar, der dem Hersteller nach Ablauf der Garantie regelmäßig Ausfall- und Zensierungsdaten zur Verfügung stellt. Dabei kann es durchaus passieren, dass Daten verloren gehen. Szenario 2 repräsentiert ein typisches Kundenverhalten; hierbei werden ausschließlich während der Garantie und kurz nach Ablauf der Garantie Ausfälle an den Hersteller gemeldet. Je nach Kulanz des Herstellers kann die Phase nach Ablauf der Garantie kürzer oder länger sein.

Die Methode nach Kalbfleisch und Lawless liefert sehr gute Ergebnisse für Szenario 1. Die Parameter der Weibullverteilung für Szenario 1 entsprechen bis auf geringe Abweichungen denen des vollständigen Datensatzes. Für die Analyse von Szenario 2 ist die Methode nach Kalbfleisch und Lawless weniger geeignet, da sie zu sehr hohen Abweichungen bei der Parameterschätzung im Vergleich zum vollständigen Datensatz führt. Mittels der Ausfallrate nach Bayes in Kombination mit der modifizierten Gewichtungsmethode konnten für Szenario 2 bessere Ergebnisse erzielt werden. Des Weiteren wurde am Beispiel des Szenarios 2 gezeigt, wie die Abweichung der Parameter durch die Variation des Transformationsfaktors verringert werden kann.

5 Analyse ungenauer Felddaten

Ungenauere Daten können auf Grund unterschiedlicher Gegebenheiten entstehen. Bei der Beschreibung der Ungenauigkeit kann unter anderem zwischen der Vagheit und der Beobachtungsunschärfe unterschieden werden [Sch03]. Vage Aussagen sind oft bei Expertenschätzungen in Form verbaler Beschreibungen vorzufinden, indem z.B. die Ausfallrate als sehr hoch bezeichnet wird und die Zuverlässigkeit als sehr schlecht. Die Beobachtungsunschärfe entsteht beispielsweise, indem die Laufleistung eines Planetengetriebes im Feldeinsatz nicht konkret bekannt ist. Oftmals wird die Laufleistung über das Ausliefer- und Rücklieferdatum ermittelt. Der Zeitpunkt der Inbetriebnahme ist jedoch meist nicht bekannt und kann nur grob geschätzt werden. Da keine präzisen Angaben der Laufleistung gemacht werden können, entstehen ungenaue Daten.

Im Folgenden wird eine Vorgehensweise auf Basis der Monte-Carlo Simulation vorgestellt, die die Ungenauigkeit der Felddaten bei der Analyse berücksichtigen kann. Zu Beginn wird das Grundprinzip der Monte-Carlo Methode erläutert. Anschließend erfolgt die Analyse ungenauer Felddaten an einem synthetischen Beispiel.

5.1 Die Monte-Carlo Methode

Die Monte-Carlo Methode wurde 1949 von den Mathematikern Metropolis, Ulam und von Neumann begründet [Met49], [Fri01], [Lor98]. Sie ist eine numerische Methode zur näherungsweise Lösung analytischer Probleme, die auf dem Prinzip der Zufallsstichprobe basiert [Mar02], [Fri01], [Dub00], [Poz06]. Die Monte-Carlo Methode erhielt ihren Namen von der Stadt Monte-Carlo in Monaco, den für Glücksspiele bekannten Ort. Basierend auf dem Glücksspiel Roulette bezieht sich der Name auf die Erzeugung von Zufallszahlen, die auch mit einem Roulette-Rad ermittelt werden könnten.

„Unter Simulation versteht man ein allgemeines Verfahren zur Durchführung von Experimenten mit dem Ziel, Aussagen über das Verhalten eines realen Systems zu gewinnen. Man spricht von zufallsbedingten Simulationen oder Monte-Carlo Simulation, wenn das System einem stochastischen Einfluss unterliegt [Las02].“

Das Grundprinzip der Monte-Carlo Methode soll im Folgenden an einem einfachen Beispiel aus [Fri01] erläutert werden.

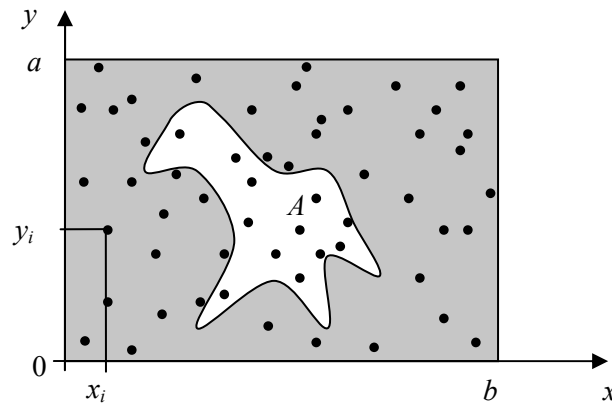


Bild 5.1: Grundprinzip der Monte-Carlo Methode [Fri01]

Die Figur im Bild 5.1 besitzt den Flächeninhalt A und liegt vollständig innerhalb des Rechtecks mit den Abmessungen a und b . Für die Berechnung des Flächeninhalts der Figur werden zunächst n zufällige Punkte (x_i, y_i) innerhalb des Rechtecks ermittelt. Anschließend wird die Anzahl n' der Punkte ermittelt, die sich innerhalb der Figur befinden. Der Flächeninhalt A der Figur ergibt sich annähernd mit

$$A \approx \frac{n'}{n} a \cdot b. \quad (5.1)$$

Je mehr Punkte innerhalb des Rechtecks ermittelt werden, desto besser die Annäherung. Wichtig dabei ist, dass die Ermittlung der Punkte einem Zufallsprozess unterliegt, und die Punkte gleichmäßig über das gesamte Rechteck verteilt sind.

Im Folgenden wird zunächst auf die Erzeugung von Pseudozufallszahlen eingegangen. Anschließend wird die Transformation der Pseudozufallszahl in eine verteilte Zufallszahl erläutert.

5.1.1 Erzeugung von Pseudozufallszahlen

Pseudozufallszahlen sind Zahlenfolgen, die mit Hilfe deterministischer Algorithmen, den Pseudozufallszahlengeneratoren, berechnet werden. Die berechnete Zahlenfolge ist demnach nicht „zufällig“, da sie auf einem deterministischen Algorithmus basiert. Mit Hilfe geeigneter Generatoren ist es jedoch möglich eine pseudozufällige Zahlenfolge zu erzeugen, die die wesentlichen Eigenschaften eines echten zufälligen Verhaltens besitzt, wie z.B. die Unabhängigkeit der Pseudozufallszahlen untereinander sowie die möglichst gleichverteilte Auftretenswahrscheinlichkeit der Pseudozufallszahlen [Poz06]. In der Literatur sind unterschiedliche Generatoren aufgeführt, die, um repräsentative Simulationsergebnisse zu erzielen, „gute“ Zufallszahlen erzeugen können [Neb06], [Mat98], [Fri01], [Sob85].

5.1.2 Erzeugung verteilter Zufallszahlen

Die Ermittlung verteilter Zufallszahlen mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird eine Pseudozufallszahl x_i aus dem Intervall $]0,1[$ erzeugt.

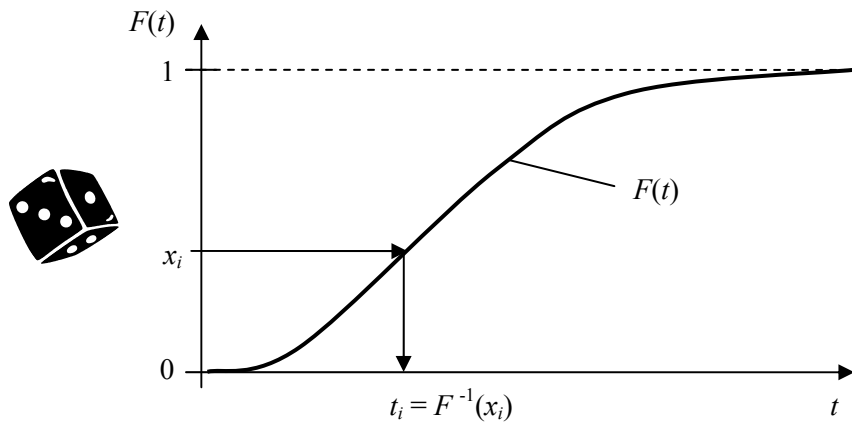


Bild 5.2: Erzeugung der Zufallsgröße t_i [Fri01]

Anschließend wird die entsprechende Inverse $F^{-1}(x_i)$ nach der Inversionsmethode [VDI4008] berechnet, und somit die verteilte Zufallsgröße t_i ermittelt

$$x_i = F(t_i) \quad \text{bzw.} \quad t_i = F^{-1}(x_i). \quad (5.2)$$

Die Inverse der dreiparametrischen Weibullverteilung lautet

$$t_i = F^{-1}(x_i) = t_0 + (T - t_0) \cdot (-\ln(1 - x_i))^{\frac{1}{b}}. \quad (5.3)$$

Als Inverse für die Rechteckverteilung nach Gleichung (2.2) erhält man

$$t_i = F^{-1}(x_i) = x_i \cdot (b - a) + a. \quad (5.4)$$

Im Folgenden soll die Analyse ungenauer Felddaten mit Hilfe der Monte-Carlo Methode untersucht werden.

5.2 Erzeugung synthetischer Stichproben

Die Ungenauigkeit der Daten kann sowohl bei Ausfalldaten als auch bei Zensierungen vorkommen. Des Weiteren kann sie unterschiedliche Formen innerhalb einer Stichprobe annehmen. Bestimmte Ausfallzeiten können mit einer größeren Ungenauigkeit behaftet sein. Dies kann dann eintreten, wenn der exakte Ausfallzeitpunkt nicht

bestimmt werden kann, da das Ausfallkriterium bereits überschritten wurde. Beispielsweise ist die Ermittlung des Ausfallzeitpunkts im Fall der Grübchenbildung oder der Leckage mit Unsicherheiten behaftet. Hierzu müsste eine definierte Leckagemenge oder ein festgelegter Fortschritt der Grübchenbildung an der Zahnflanke erreicht werden. Dann kann der Ausfall dokumentiert werden. Dies ist in der Regel schwierig zu realisieren. Meist wird das System so lange im eingeschränkten Zustand betrieben, bis es den Anforderungen nicht mehr gerecht wird. Eine präzise Angabe bezüglich der Laufleistung bis zum Ausfall kann demnach nicht gemacht werden.

Die Analyse ungenauer Daten kann mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation erfolgen. Hierbei werden auf Basis streuender Felddaten synthetische Stichproben erzeugt. Die Streuung der Daten kann mit Hilfe von Expertenschätzungen durch Verteilungen beschrieben werden. Wenn jedoch keine Verteilungsform zu Grunde gelegt werden kann, da nicht genügend Informationen vorliegen, so kann eine einfache Schätzung der Streuung mit Hilfe einer Rechteckverteilung erfolgen, siehe Bild 5.3.

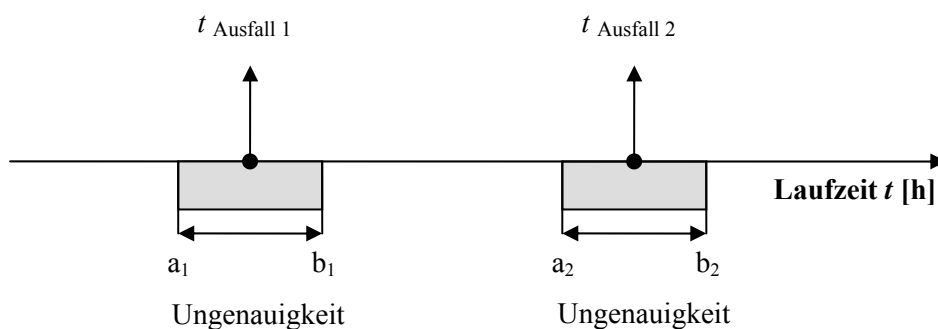


Bild 5.3: Ungenaue Felddaten

Die Analyse ungenauer Felddaten kann im ersten Schritt durch eine vereinfachte Betrachtung der Grenzwerte erfolgen. Hierbei werden die minimal auftretenden Laufzeiten und die maximal auftretenden Laufzeiten getrennt voneinander analysiert. Eine Auswertung der Daten ausschließlich unter Berücksichtigung der Extremwerte kann jedoch je nach Verteilungsform zu Ergebnissen führen, die nicht repräsentativ sind. Um repräsentative Ergebnisse bei der Felddatenanalyse erzielen zu können, werden im Folgenden mit Hilfe der Monte-Carlo Methode Pseudozufallszahlen generiert und Stichproben erzeugt, siehe Bild 5.4, die anschließend mit Hilfe geeigneter Methoden analysiert werden.

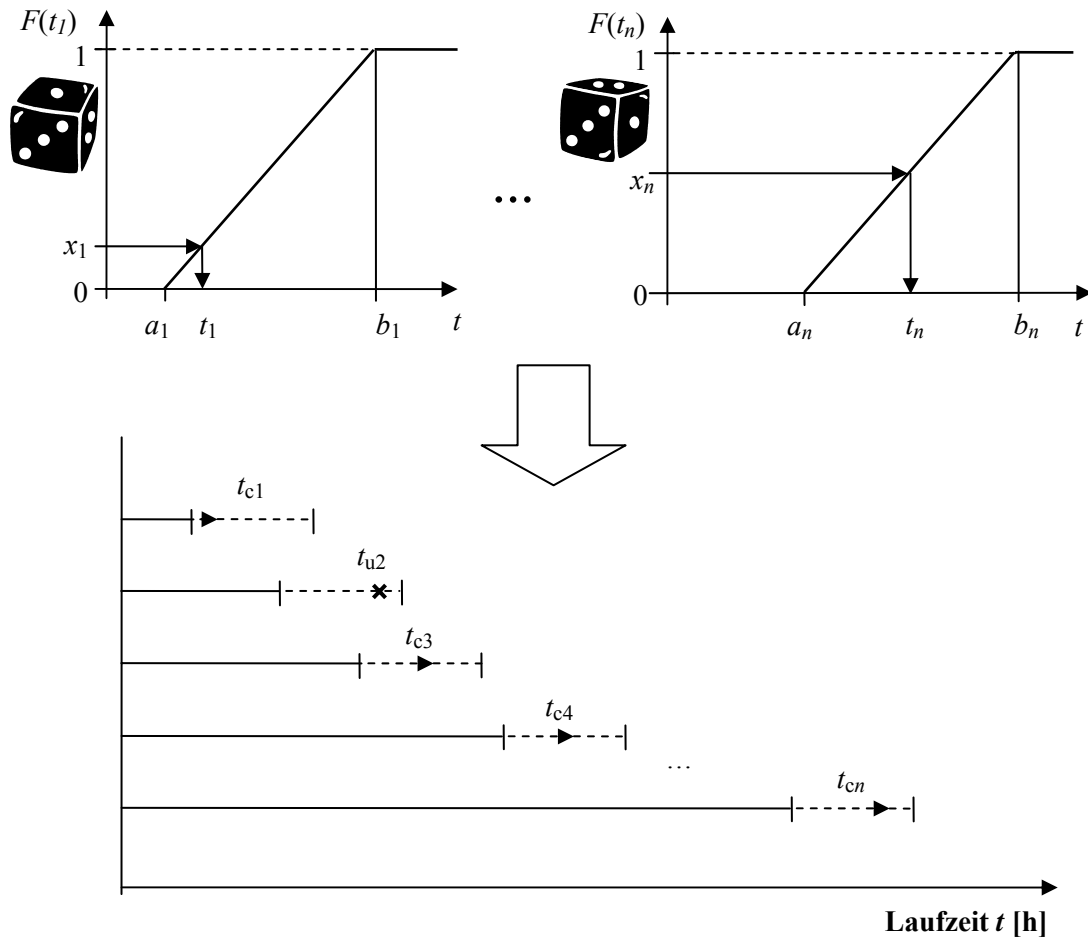


Bild 5.4: Monte-Carlo Simulation zur Erzeugung synthetischer Stichproben

Um eine aussagekräftige Prognose bei der Analyse zu erzielen, muss eine ausreichende Anzahl an Stichproben ermittelt werden. Die Anzahl an Replikationen, die im Rahmen dieser Arbeit für die Monte-Carlo Simulation festgelegt wurde, beträgt 20 000 Replikationen. Somit konnte eine geringe Fehlerstreuung erzielt werden, siehe Kapitel 6.3.6.

5.3 Streuende Lebensdauerverteilungen

Die Ermittlung streuender Lebensdauerverteilungen erfolgt durch die Analyse der zuvor erzeugten synthetischen Stichproben. Um eine repräsentative Analyse durchführen zu können, muss eine große Anzahl an Stichproben bei der Analyse berücksichtigt werden. Je nachdem wie hoch die Anzahl an Replikationen gewählt wurde, entstehen große Datenmengen. Um diese nach Durchführung der Analyse zu reduzieren, kann z.B. eine gesonderte Betrachtung durchgeführt werden, indem die untere sowie obere Grenze ermittelt wird, Bild 5.5. Somit sind alle möglichen Fälle abgedeckt, die sich zwischen den Grenzen befinden.

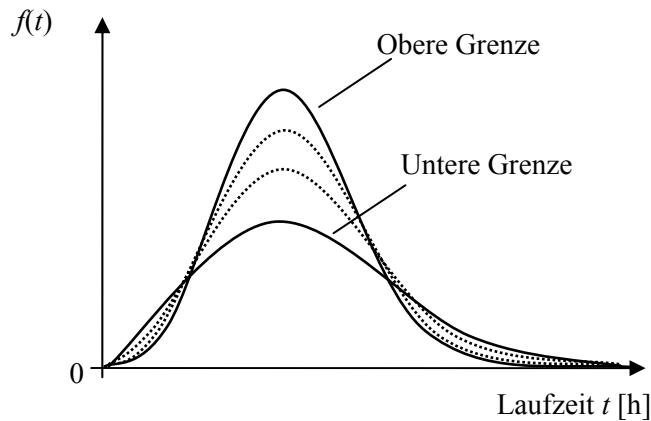


Bild 5.5: Grenzen der Dichtefunktion

Ist eine Grenzwertbetrachtung nicht erwünscht, so können die Lebensdauerverteilungen bestimmt werden, die beispielsweise einen bestimmten Anteil aller Fälle abdecken. Dieser Bereich kann individuell bestimmt werden. Ist die Streuung der Daten jedoch so groß, dass sich bei der Analyse zu unterschiedliche Verläufe der Lebensdauerverteilungen ergeben, so ist es nicht möglich, einen Bereich festzulegen, der repräsentativ für die ermittelten Lebensdauerverteilungen steht, Bild 5.6.

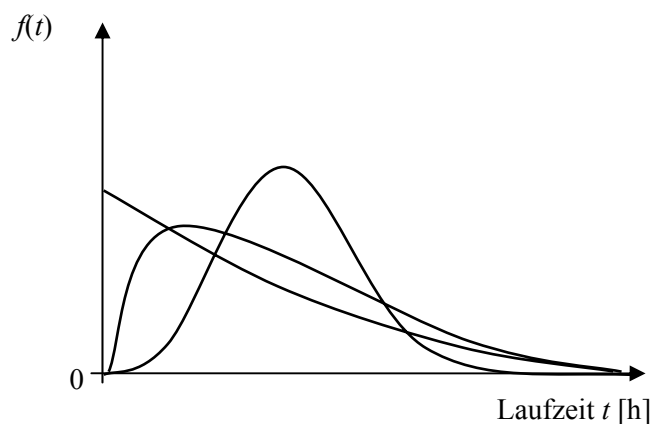


Bild 5.6: Stark unterschiedliche Dichtefunktionen

Demnach müssten alle weiteren Untersuchungen, wie z.B. die Verfügbarkeitsbetrachtung oder die Garantiekostenprognose, unter Berücksichtigung jeder einzelnen Lebensdauerverteilung durchgeführt werden. Dies würde den Rechenaufwand jedoch sehr stark steigern. Man kann davon ausgehen, dass die Daten in hinreichender Genauigkeit angegeben werden, wenn eine Zuverlässigkeitsprognose durchgeführt werden soll. Die Streuung der Daten soll keine Veränderung des Ausfallverhaltens bewirken. Die Ermittlung zweier repräsentativer Lebensdauerverteilungen, die eine obere und eine untere Grenze beschreiben, wird somit ermöglicht.

5.4 Beispielhafte Anwendung

Die beispielhafte Anwendung der Analyse ungenauer Daten wird im Folgenden auf Basis des im Kapitel 4.5.1 vorgestellten vollständigen Datensatzes erfolgen. Die Methode, die zur Analyse der Felddaten eingesetzt wird, ist die Methode nach Kalbfleisch und Lawless, Kapitel 4.3. Da es sich um einen vollständigen Datensatz handelt, ist die Methode nach Kalbfleisch und Lawless mit der Maximum-Likelihood Methode aus Kapitel 2.3.2 gleichzusetzen.

In den Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3 sind die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation für eine gleichverteilte Streuung von ± 12 h, ± 36 h und ± 72 h aufgelistet. Die charakteristische Lebensdauer T der zweiparametrischen Weibullverteilung beträgt für präzise Daten $T = 6\,547$ h, der Formparameter $b = 3,16$. Für eine Garantiekostenprognose ist der vordere Bereich der Lebensdauer-Verteilung von Bedeutung, der die Laufleistung bis zum Garantieende besitzt. Diese Laufleistung befindet sich in der Regel im Bereich der niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeiten. Die untere und obere Grenze wird hier unter Berücksichtigung der B_1 -Lebensdauer ermittelt.

Tabelle 5.1: Zuverlässigkeitskennwerte für eine Streuung von ± 12 h

B_γ	$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}	T_{\max} [h]	$b_{T_{\max}}$	T_{\min} [h]	$b_{T_{\min}}$
	6542,065	3,171	6551,225	3,157	6551,093	3,167	6542,753	3,164
B_1	1533,51		1525,81		1532,82		1528,76	
B_{10}	3217,43		3211,81		3218,98		3212,72	
B_{50}	5827,98		5833,15		5835,17		5827,10	

Tabelle 5.2: Zuverlässigkeitskennwerte für eine Streuung von ± 36 h

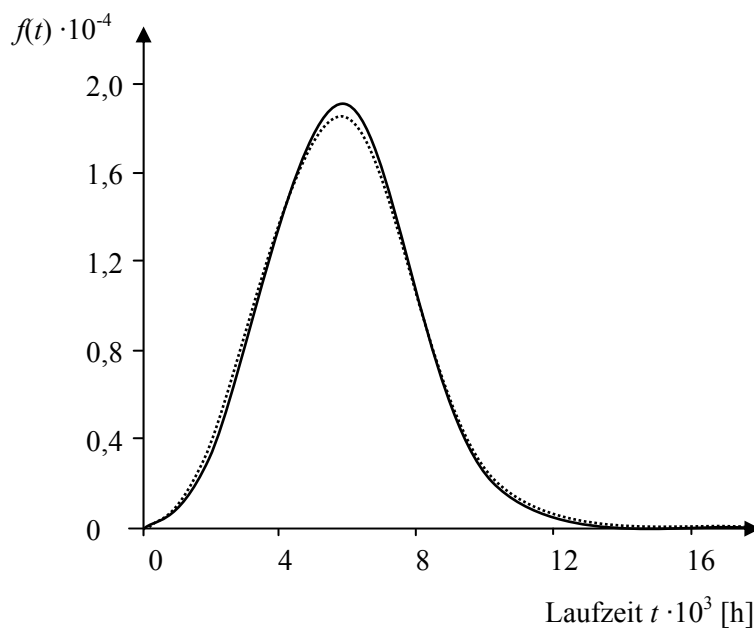
B_γ	$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}	T_{\max} [h]	$b_{T_{\max}}$	T_{\min} [h]	$b_{T_{\min}}$
	6540,408	3,177	6547,915	3,145	6558,219	3,159	6534,209	3,153
B_1	1537,33		1516,58		1528,85		1519,04	
B_{10}	3220,93		3201,47		3216,69		3200,57	
B_{50}	5827,77		5827,62		5839,80		5817,14	

Tabelle 5.3: Zuverlässigkeitskennwerte für eine Streuung von ± 72 h

B_γ	$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}	T_{\max} [h]	$b_{T_{\max}}$	T_{\min} [h]	$b_{T_{\min}}$
	6546,390	3,206	6567,993	3,123	6574,469	3,162	6515,869	3,159
B_1	1559,02		1505,64		1534,76		1518,98	
B_{10}	3244,59		3195,14		3226,84		3195,92	
B_{50}	5839,19		5840,69		5858,81		5802,09	

Es ist nicht immer plausibel, eine Lebensdauerverteilung für die untere Grenze aus den Simulationsergebnissen zu ermitteln, die den geringsten Formparameter b besitzt und zudem die größte charakteristische Lebensdauer T . Das Gleiche gilt im umgekehrten Sinn für die Ermittlung der Lebensdauerverteilung bezüglich der oberen Grenze. Für die Ermittlung zweier Lebensdauerverteilungen, die für weitere Garantiekostenprognosen alle Fälle abdecken können, ist für dieses Beispiel die Betrachtung der B_1 -Lebensdauer von Bedeutung. Wie an Hand der Tabellenwerte zu erkennen ist, ergibt sich die geringste Laufleistung der B_1 -Lebensdauer für die Weibullverteilung mit dem geringsten Formparameter b und somit auch die untere Grenze bzgl. der B_1 -Lebensdauer. Die obere Grenze der B_1 -Lebensdauer ergibt sich für die Weibullverteilung mit dem größten Formparameter b .

Das Bild 5.7 zeigt die zwei Dichtefunktionen der Weibullverteilung für eine Streuung von ± 72 h. Die Abweichung zwischen den Dichtefunktionen erscheint gering.

Bild 5.7: Streuende Dichtefunktion für eine Streuung von ± 72 h

5.5 Zusammenfassung

Die Analyse ungenauer Daten kann beispielsweise durch die Betrachtung der Grenzwerte erfolgen. Die Ergebnisse einer Grenzwertbetrachtung sind jedoch nicht immer repräsentativ. Im Kapitel 5 wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, wie mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation ungenaue Daten analysiert werden können. Die beispielhafte Anwendung des Verfahrens erfolgte auf Basis des in 4.5.1 vorgestellten vollständigen Datensatzes. Zu Beginn wurden unterschiedliche synthetische Stichproben mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation erzeugt, wobei die Streuung der Daten des vollständigen Datensatzes durch eine Rechteckverteilung beschrieben wurde. Anschließend erfolgte die Analyse dieser Stichproben. Hierbei können, wie bereits im Kapitel 4 vorgestellt, unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen. Die Analyse der Stichproben wurde mit Hilfe der Methode nach Kalbfleisch und Lawless durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse haben gezeigt, dass es nicht plausibel erscheint eine Weibullverteilung für die untere bzw. obere Grenze zu ermitteln, die den geringsten bzw. größten Formparameter b und die größte bzw. geringste charakteristische Lebensdauer T besitzt. Für eine Garantiekostenprognose ist die Betrachtung der Lebensdauerverteilung im Bereich niedriger Ausfallwahrscheinlichkeiten von Bedeutung, da die Ausfallwahrscheinlichkeit der Produkte während der Garantiezeit in der Regel niedrig ist. Bei der Gegenüberstellung der B_1 -Lebensdauern der Weibullverteilungen hat sich gezeigt, dass der Formparameter b im Gegensatz zur charakteristischen Lebensdauer T für die Ermittlung der Grenzen entscheidend ist. Der Einfluss einer streuenden Lebensdauerverteilung auf die Garantiekostenprognose wird im Kapitel 6.3.5 am Beispiel eines Planetengetriebes behandelt.

6 Zuverlässigkeitsmanagementsystem und beispielhafte Anwendung

Ein ganzheitliches Zuverlässigkeitsmanagementsystem beinhaltet das Zusammenwirken von Zuverlässigkeitsmethoden in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus. Für die Beseitigung von Schwachstellen und Fehlern sowie die Durchführung von Garantiekostenprognosen ist die Nutzung von Felddaten in der Produktentwicklung unumgänglich.

Im Folgenden wird ein praxisgerechtes Zuverlässigkeitsprognosemodell vorgestellt, das basierend auf ungenauen Daten in der Lage ist, das Ausfallverhalten von Planetengetrieben zu analysieren und die zu erwartenden Garantiekosten zu prognostizieren.

6.1 Zuverlässigkeitsmanagementsystem

Das Bild 6.1 zeigt den Aufbau eines ganzheitlichen Zuverlässigkeitsmanagementsystems.

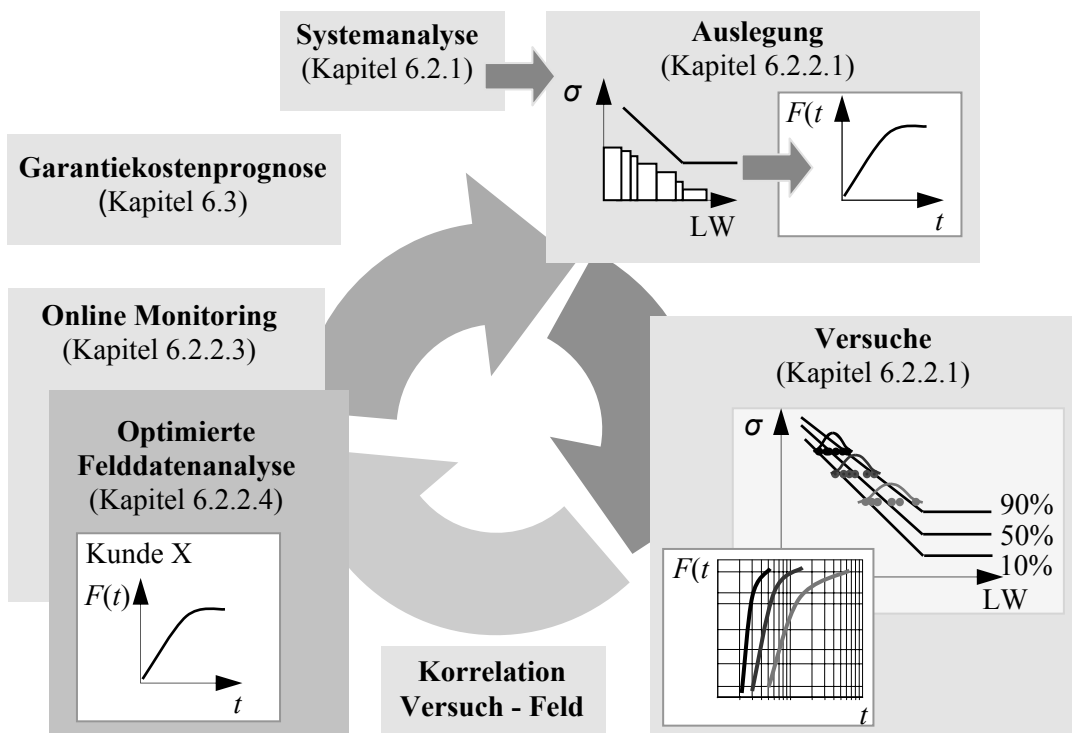


Bild 6.1: Zuverlässigkeitsmanagementsystem

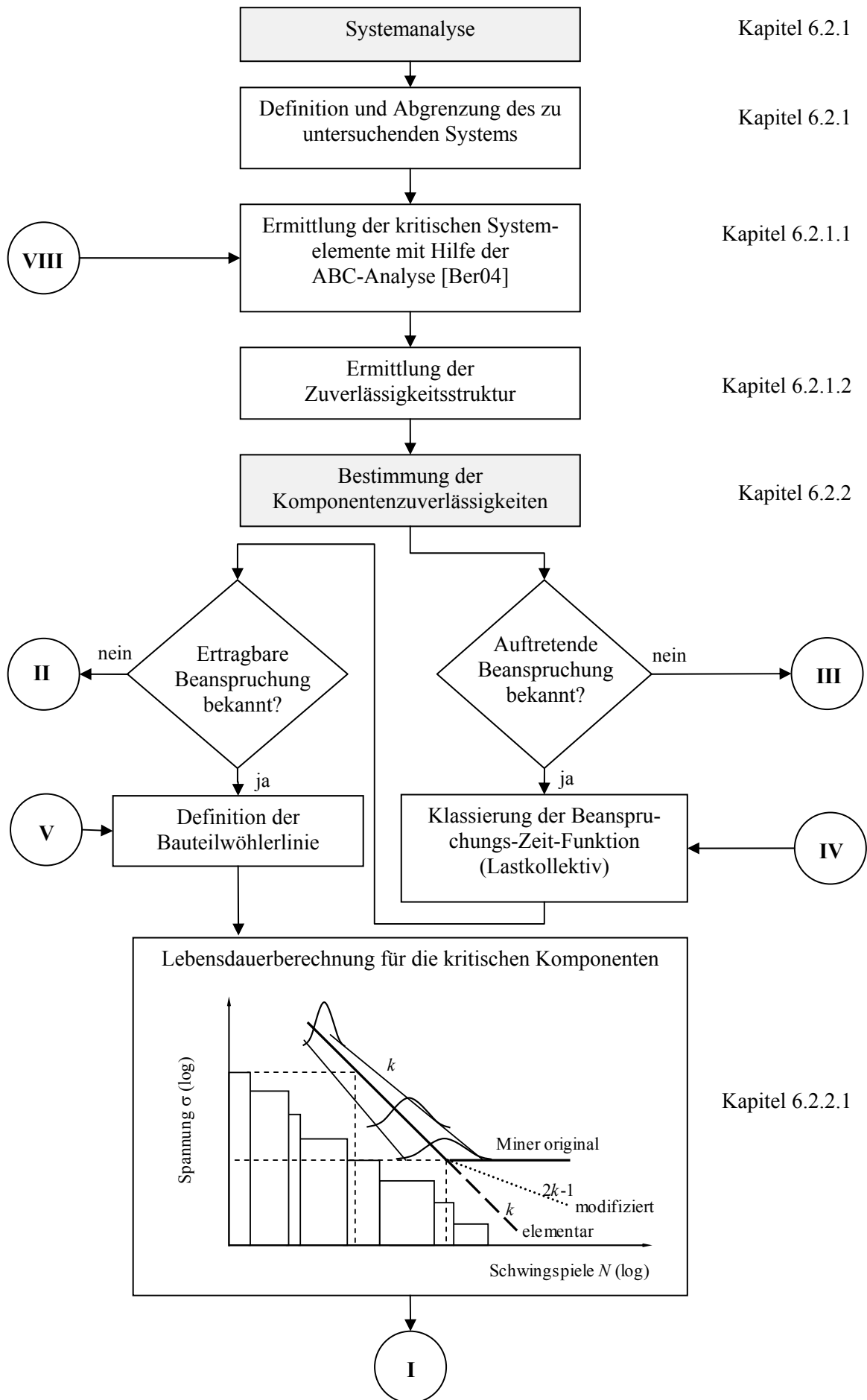
Die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse wird im Folgenden in Anlehnung an den Ablauf auf den Seiten 57 bis 59 näher erläutert.

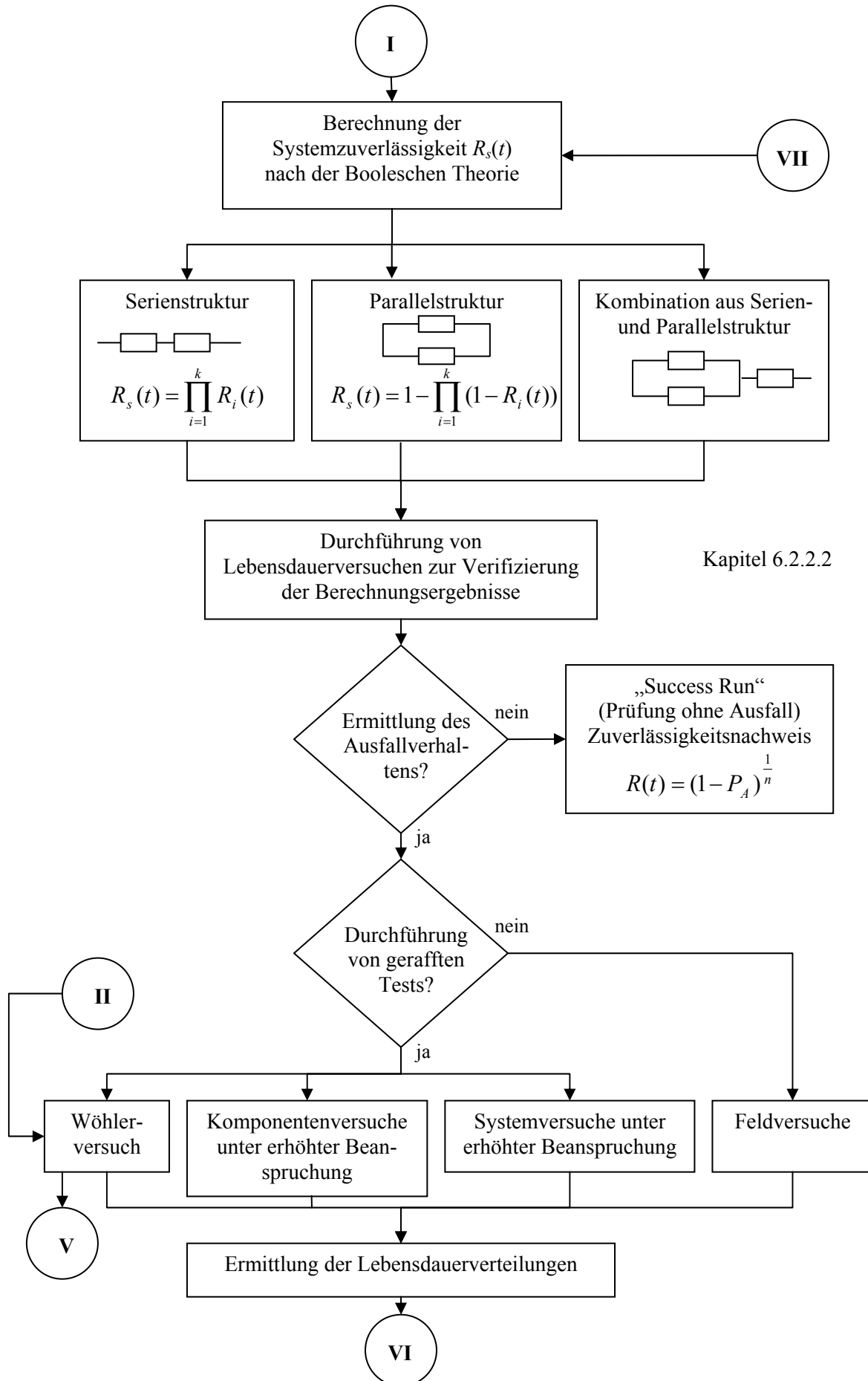
Zu Beginn wird die Systemanalyse durchgeführt, bei der die kritischen Systemelemente, die für die weitere Zuverlässigkeitsbetrachtung relevant sind, definiert werden. Dies kann mit Hilfe der in [Mül02] oder in [Ber04] vorgestellten ABC-Analyse erfolgen. Anschließend wird die Zuverlässigkeitsstruktur festgelegt, die für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit, Verfügbarkeit sowie der zu prognostizierenden Garantiekosten notwendig ist.

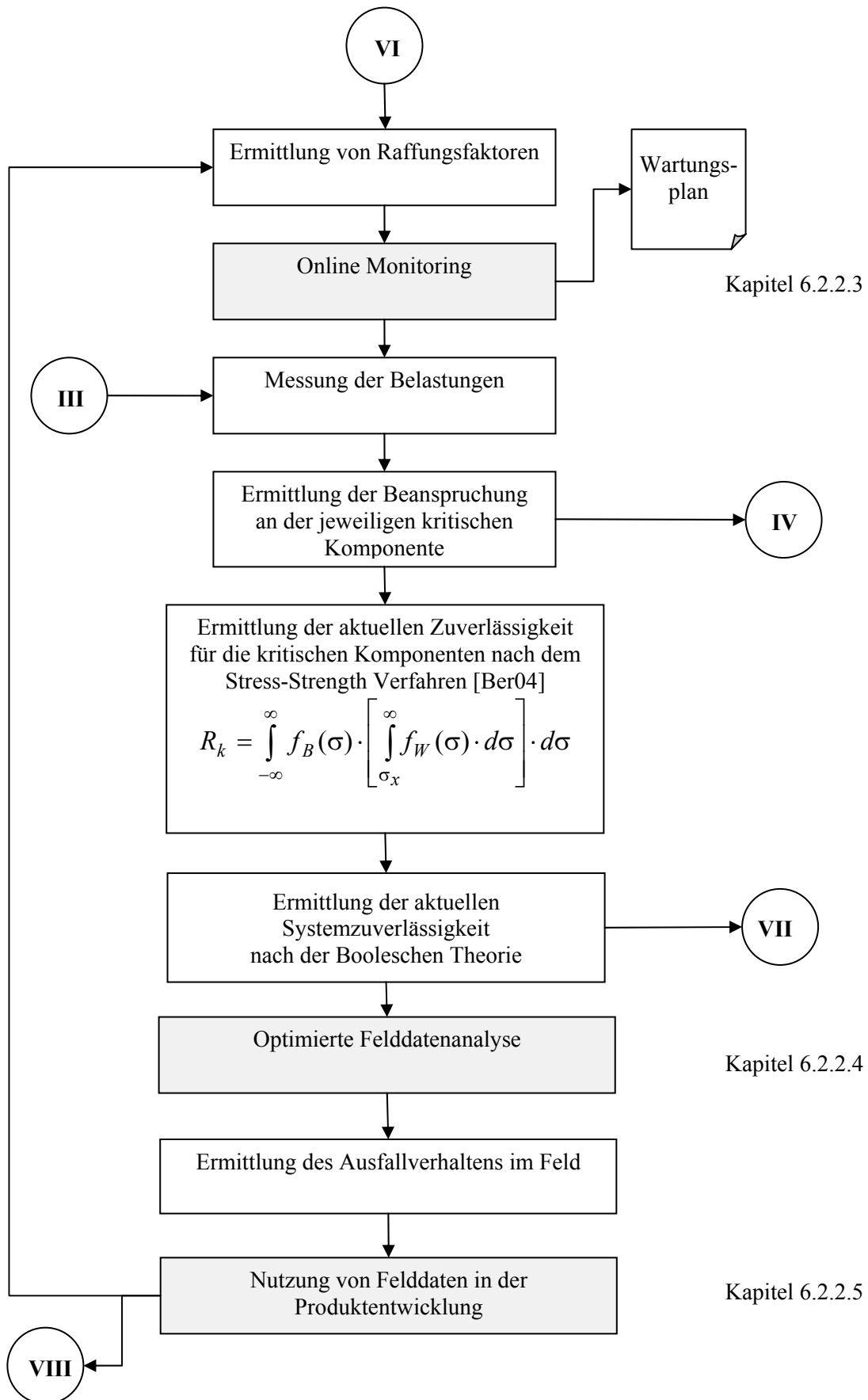
Für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit wird die Kenntnis der Lebensdauerverteilungen der kritischen Komponenten vorausgesetzt. Die Bestimmung der Komponentenzuverlässigkeiten kann in der Produktentwicklung unter anderem über die rechnerische Lebensdauer vorhersage erfolgen. Dabei muss die auftretende Beanspruchung an der Komponente in Form eines Lastkollektivs sowie die ertragbare Beanspruchung in Form einer Bauteilwöhlerlinie gegeben sein. Die Verifizierung der Berechnungsergebnisse kann mit Hilfe geeigneter Lebensdauerexperimente erfolgen. Hierbei kann zwischen dem Komponentenversuch, dem Systemversuch sowie dem Feldversuch unterschieden werden. Der Komponentenversuch und der Systemversuch kann unter verschärften Prüfbedingungen durchgeführt werden, um die Prüfzeit zu verkürzen. Der Feldversuch hingegen wird unter realen Einsatzbedingungen durchgeführt mit dem Ziel das wahre Ausfallverhalten des Produkts im Feld abzubilden. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse ermöglicht die Ermittlung von Raffungsfaktoren.

Für die rechnerische Lebensdauer vorhersage sowie die Planung von Lebensdauerexperimenten ist die Kenntnis der Belastung sowie der Beanspruchung unabdingbar. Häufig kommt es vor, dass die Belastungen nicht bekannt sind. Die Online Messung der Belastungen ermöglicht die Ermittlung der aktuellen Zuverlässigkeit der kritischen Komponenten nach dem Stress-Strength Verfahren [Ber04]. Folglich können Aussagen über die Restlebensdauer der einzelner Komponenten sowie des Systems gemacht werden.

Der Einsatz von Diagnosesystemen kann nicht immer realisiert werden, da die Zustandsüberwachung von den Endkunden häufig nicht geduldet wird. Die Felddatenanalyse auf Basis von Garantiedaten ist Voraussetzung für die Ermittlung des Ausfallverhaltens eines Produkts im Feld und für die Herstellung der Korrelation zwischen Feld und Versuch. Die Ergebnisse der Felddatenanalyse können bei der Entwicklung von Nachfolgeprodukten genutzt werden.







6.2 Beispielhafte Anwendung an einem Planetengetriebe

Die beispielhafte Anwendung der unterschiedlichen Methoden des Zuverlässigkeitsmanagementsystems erfolgt an Hand eines Beispielplanetengetriebes, dessen Aufbau im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

6.2.1 Systemanalyse

Zu Beginn einer Lebensdaueranalyse erfolgt die Systemanalyse, die das zu untersuchende System definiert und gegenüber der Umgebung abgrenzt. Des Weiteren beinhaltet sie die Ermittlung der kritischen Systemelemente und ihr Zusammenwirken im System.

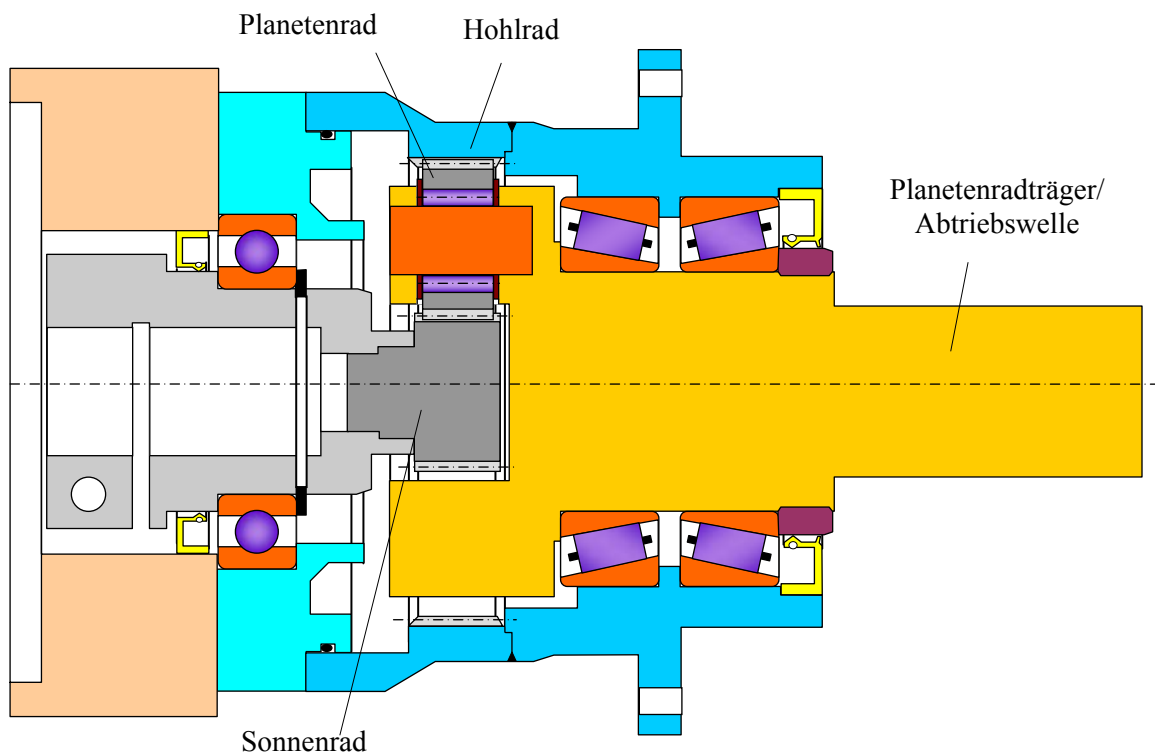


Bild 6.2: Beispielsystem: Einstufiges Planetengetriebe

Das Beispielsystem ist in Bild 6.2 dargestellt. Es handelt sich um ein einstufiges, dreirädriges Planetengetriebe bei dem das Sonnenrad als Antrieb und der Planetenradträger, auf dem drei Planetenräder gelagert sind, als Abtrieb dient. Das Hohlräderpaar ist fest mit dem Gehäuse verbunden. Dreirädrige Planetengetriebe [Bög80] besitzen einen einfachen Aufbau und werden am häufigsten verwendet. Planetengetriebe zeichnen sich unter anderem durch ihren hohen Wirkungsgrad aus. Des Weiteren können durch den Einsatz mehrerer Planetenräder hohe Drehmomente übertragen werden. Das Beispielplanetengetriebe gehört zur Gruppe industrieller Getriebe und bietet somit eine

Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten, wie z.B. im Bereich der Verpackungs-, Druck-, Werkzeug- und Textilindustrie sowie der Aufzugstechnik.

6.2.1.1 Ermittlung der kritischen Systemelemente

Die kritischen Systemelemente des Planetengetriebes werden mit Hilfe der ABC-Analyse aus [Ber04] ermittelt. Die A-, B- und C-Teile sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: ABC-Analyse für die Komponenten des Planetengetriebes

<i>k</i>	Komponente	A - Teil	B - Teil	C - Teil
1	Ritzel	x		
2..4	Planetenrad 1..3	x		
5	Hohlrad	x		
6	Rillenkugellager	x		
7	Kegelrollenlager	(x)		x
8..10	Nadellager 1..3	x		
11	RWDR am Antrieb		x	
12	RWDR am Abtrieb		x	
13	Öl		x	
14	Antriebswelle	(x)		x
15	Abtriebswelle	(x)		x
16	Schweißnaht			x
17	Schrauben			x
18	O - Ring			x
19	Wellenmutter			x
20	Steckhülse			x
21	Passfeder			x

Kritische Komponenten im Planetengetriebe sind die Verzahnung, die Antriebs- und Planetenradlagerung, die Radialwellendichtringe (RWDR) sowie das Öl. Die Abtriebslagerung und Wellen können in dieser Ausführung als unkritisch angesehen werden. Die C-Teile werden in der nachfolgenden Zuverlässigkeitsanalyse nicht näher betrachtet.

6.2.1.2 Ermittlung der Zuverlässigkeitsstruktur

Das Planetengetriebe besitzt eine reine Serienstruktur; somit sind alle kritischen Komponenten in Reihe geschaltet. Bei Ausfall einer Komponente ist das Gesamtsystem nicht mehr funktionsfähig. Wichtig bei der Erstellung eines Zuverlässigkeitsblockschaltbildes ist die Betrachtung verschiedener Ausfallarten, die an einer Komponente auftreten können, wie z.B. Grübchenbildung und Bruch an der Verzahnung.

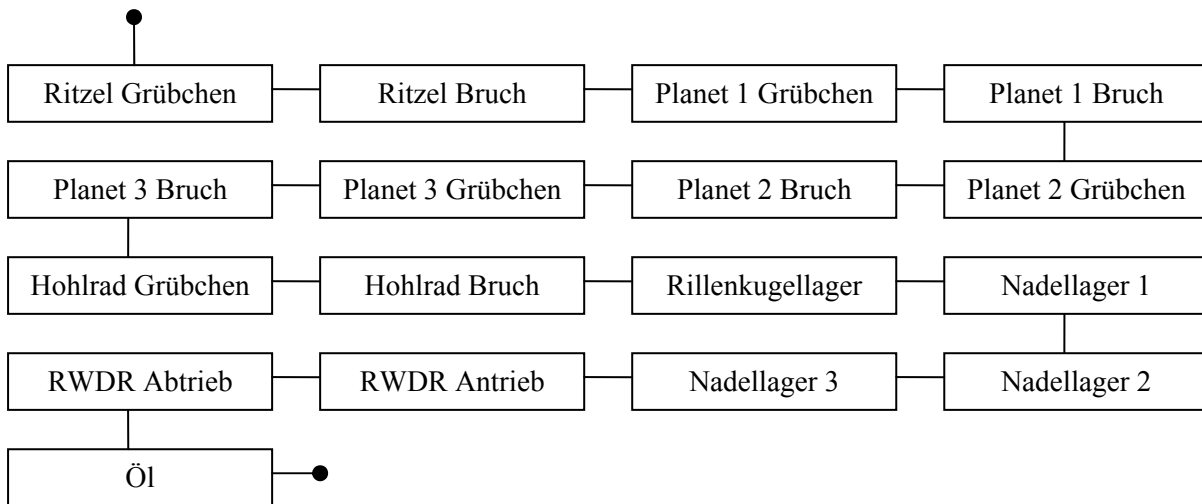


Bild 6.3: Zuverlässigkeitsblockschaltbild

Mit Hilfe der Booleschen Algebra kann die Systemzuverlässigkeit aus dem Produkt der Komponentenzuverlässigkeiten wie folgt berechnet werden [Mes86]:

$$\begin{aligned}
 R_{System} = & R_{Ritzel,Gruebchen} \cdot R_{Ritzel,Bruch} \cdot R_{Planet1/2/3,Gruebchen} \cdot R_{Planet1/2/3,Bruch} \cdot \\
 & R_{Hohlrad,Gruebchen} \cdot R_{Hohlrad,Bruch} \cdot R_{Rillenkugellager} \cdot R_{Nadellager1/2/3} \cdot \\
 & R_{RWDR\ Antrieb} \cdot R_{RWDR\ Abtrieb} \cdot R_{\text{Öl}}.
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Nach der Systemanalyse erfolgt die Ermittlung des Ausfallverhaltens der kritischen Komponenten. Dies kann durch unterschiedliche Methoden erfolgen, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

6.2.2 Bestimmung der Komponentenzuverlässigkeiten

Nach der Ermittlung der kritischen Systemelemente und deren Zuverlässigkeitsstruktur erfolgt die quantitative Bestimmung der Systemelementenzuverlässigkeiten. Es existieren mehrere Ansätze zur Berechnung der Zuverlässigkeit und Ermittlung des Ausfallverhaltens eines Produkts, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess zum Einsatz kommen können. In den folgenden Kapiteln werden einige dieser Methoden behandelt und systematisch ineinander überführt mit dem Ziel, ein ganzheitliches Zuverlässigkeitsmanagementsystem aufzubauen.

6.2.2.1 Auslegung

Die lebensdauerorientierte Auslegung schwingbeanspruchter Bauteile kann nach den Grundsätzen der Betriebsfestigkeit erfolgen, so dass bei kleinstem Raum-, Werkstoff- und Herstellungsaufwand ein vorzeitiges Versagen des Bauteils mit notwendiger Sicherheit ausgeschlossen werden kann [Hai02]. Voraussetzung für die Betrachtung der Betriebsfestigkeit ist die Kenntnis der Beanspruchung am Bauteil in Form einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion oder diese bereits klassiert in Form eines Lastkollektivs. Des Weiteren muss die Beanspruchbarkeit des Bauteils durch eine Wöhlerlinie gegeben sein, siehe Bild 6.4. Hierbei beschreibt die Ordinatenachse die ertragbaren Spannungsamplituden σ_i , und die Abszissenachse die ertragbaren Schwingspielzahlen N_i . Die Wöhlerlinie wird durch den Werkstoff und die Geometrieparameter des Werkstücks wie Form, Größe und Oberfläche bestimmt [Ber04]. Da auch die Wöhlerlinie einem Streubereich unterliegt, muss sie mit der entsprechenden Überlebenswahrscheinlichkeit gekennzeichnet werden. In der doppellogarithmischen Darstellung der Wöhlerlinie kann zwischen drei Bereichen unterschieden werden, dem Bereich der Kurzzeitfestigkeit bis ca. $N = 10^1 - 10^3$ Schwingspiele, der Zeitfestigkeit mit der geneigten Zeitfestigkeitslinie bis zum Abknickpunkt N_D , sowie dem Bereich der Dauerfestigkeit für $N_i > N_D$, der abhängig vom Werkstoff des zu untersuchenden Bauteils unterschiedliche Verläufe aufweisen kann. Im Folgenden wird die Wöhlerlinie für den Bereich der Zeitfestigkeit und der Dauerfestigkeit unter Berücksichtigung der Schadensakkumulationshypothesen nach Miner original, elementar und modifiziert [Hai02] mathematisch beschrieben.

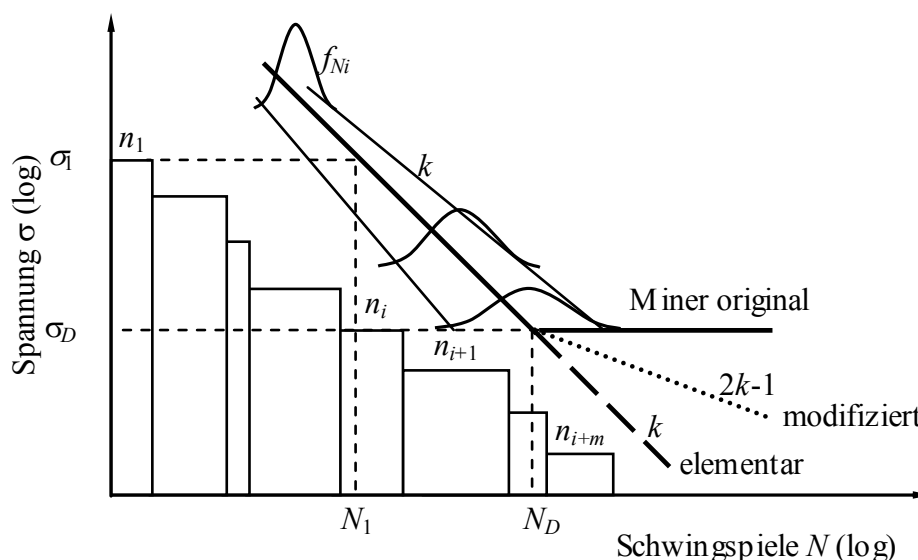


Bild 6.4: Wöhlerlinie mit Streubereich [Wol05]

Die Originalform der Miner-Regel geht davon aus, dass eine Beanspruchung unterhalb der Dauerfestigkeit beliebig oft ertragen werden kann, und somit keinen Einfluss auf die Lebensdauer hat. Die Lebensdauerberechnung kann mit der Formel (6.2) erfolgen. Im Zeitfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie gilt für die ertragbare Schwingenspielzahl N_i im Intervall i :

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^k \quad \text{für } \sigma_i \geq \sigma_D, \quad (6.2)$$

mit dem Exponenten k zur Beschreibung der Neigung der Wöhlerlinie.

Die elementare Form der Miner-Regel nimmt an, dass kein Dauerfestigkeitsbereich vorhanden ist, und alle auftretenden Spannungsamplituden schädigend auf das Bauteil wirken. Der Verlauf der Wöhlerlinie entspricht dem der Zeitfestigkeitslinie. Die ertragbare Schwingenspielzahl kann für alle Spannungsamplituden σ_i allein aus der Gleichung der Zeitfestigkeitslinie (6.2) berechnet werden.

Die modifizierte Form der Miner-Regel berücksichtigt eine abfallende Dauerfestigkeit bei fortschreitender Schädigung. Die Neigung der Wöhlerlinie im Dauerfestigkeitsbereich wird durch den Exponenten $2k-1$ bestimmt. Damit ergibt sich die ertragbare Schwingenspielzahl N_i für Spannungsamplituden $\sigma_i < \sigma_D$ zu

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^{2k-1}. \quad (6.3)$$

Die Schädigung eines Bauteils durch das vorgegebene Kollektiv berechnet sich mit Hilfe der Schädigungssumme, die für den Wert eins in der Regel als kritisch angesehen wird und ein Bauteilversagen zur Folge hat:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1. \quad (6.4)$$

Bei gegebenem Lastkollektiv und einem durch Experten festgelegten, kritischen Schädigungswert für das Bauteilversagen, kann die Lebensdauer L_0 in Schwingspielen für die Originalform der Miner-Regel aus Formel (6.2) und (6.4) zu

$$L_0 = \frac{\sum n_i}{D} = N_D \frac{\sum_{i=1}^{j+m} n_i}{\sum_{i=1}^j n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k} \quad (6.5)$$

berechnet werden.

Die Lebensdauerberechnung in Schwingspielen für die modifizierte Form der Miner-Regel ergibt sich zu

$$L_0 = \frac{\sum n_i}{D} = N_D \frac{\sum_{i=1}^{j+m} n_i}{\sum_{i=1}^j n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k + \sum_{i=j+1}^{j+m} n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{(2k-1)}, \quad (6.6)$$

und für die elementare Form der Miner-Regel zu

$$L_0 = \frac{\sum n_i}{D} = N_D \frac{\sum_{i=1}^{j+m} n_i}{\sum_{i=1}^{j+m} n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k}. \quad (6.7)$$

Die Lebensdauerberechnung liefert eine Lebensdauer bezogen auf eine bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit, die aus der verwendeten Wöhlerlinie resultiert.

Das Beispielsystem Planetengetriebe enthält mit Ausnahme der Radialwellendichtringe und des Öls, das Ritzel, die Planetenräder und die Lager als kritische Komponenten, deren Lebensdauer mit Hilfe geeigneter Schadensakkumulationshypothesen ermittelt werden kann. Über ein angenommenes Lastkollektiv am Getriebeeingang kann zunächst die Beanspruchung der einzelnen Komponenten im Getriebe unter Berücksichtigung wichtiger Kenngrößen, wie z.B. Zahnfuß- sowie Zahnflankenbeanspruchung und Lagerkräfte, ermittelt werden [Ber04]. Anschließend wird die Lebensdauer für die A-Systemkomponenten berechnet.

Bei der Untersuchung eines Planetengetriebes bezüglich dessen Systemlebensdauer oder der zu erwartenden Garantiekosten ist die Aufführung der Komponentenlebensdauer in Abhängigkeit der Lastwechselzahl nicht aussagekräftig, da auf Grund des Übersetzungsverhältnisses nicht alle Komponenten dieselbe Anzahl an Lastwechseln während einer definierten Zeitdauer erfahren. Demzufolge müssen die Lebensdauern in Schwingspielen L_0 zunächst auf die Einheit Betriebsstunden transformiert werden

$$L_{0_h} = \frac{L_0}{n_{LWk} \cdot 60} [\text{h}]. \quad (6.8)$$

Die Anzahl an Lastwechseln n_{LWk} je Minute kann für jede Komponente k mit Hilfe der Kinematik des Planetengetriebes ermittelt werden.

Für die weitere Zuverlässigkeitsanalyse des Beispielsystems wird ein Übersetzungsverhältnis von vier festgelegt. Das Ritzel dient als Antrieb und der Planetenradträger als Abtrieb. Das Hohlrاد steht fest. Die Planetenräder werden vom Ritzel angetrieben; sie drehen sich zum einen um ihre eigene Achse und zum anderen bewegen sie sich durch das Abrollen am feststehenden Hohlrاد auf einer Kreisbahn um die zentrale Achse. Die Bewegung der Planetenräder auf der Kreisbahn um die zentrale Achse, dem Ritzel, bewirkt die Drehung des Planetenradträgers, des Abtriebs.

Die Ermittlung der für die Lebensdauer relevanten Lastwechsel je Minute bezüglich Grübchenbildung oder Bruch ist in Tabelle 6.2 für eine konstante Drehrichtung aufgeführt. Die fortschreitende Grübchenbildung auf Grund zu hoher Flankenpressung führt zur Zerstörung der Zahnflanken [Dub97]. Demnach ist die Anzahl an Lastwechseln je Zahnflanke relevant. Der Dauerbruch hingegen entsteht z.B. auf Grund von Kerben, Härterissen, Werkstoff- oder Wärmebehandlungsmängeln im Zahnfuß [Dub97]. Für die Beanspruchung im Zahnfuß ist die gesamte Anzahl an Lastwechseln, unabhängig von der Drehrichtung, relevant.

Tabelle 6.2: Ermittlung der Lastwechsel bei konstanter Drehrichtung

<i>k</i>	Komponente		Lastwechsel je Minute
1	Ritzel	(Grübchen)	$n_{LW1_G} = (n_{an} - n_{ab}) \cdot p$
1	Ritzel	(Bruch)	$n_{LW1_B} = (n_{an} - n_{ab}) \cdot p$
2..4	Planetenrad 1..3	(Grübchen)	$n_{LW2_G} = (n_{an} - n_{ab}) \cdot (-Z_{Ritzel}/Z_{Planet}) $
2..4	Planetenrad 1..3	(Bruch)	$n_{LW2_B} = (n_{an} - n_{ab}) \cdot (-Z_{Ritzel}/Z_{Planet}) \cdot 2$
5	Hohlrاد	(Grübchen)	$n_{LW5_G} = (n_{ab} - 0) \cdot p$
5	Hohlrاد	(Bruch)	$n_{LW5_B} = (n_{ab} - 0) \cdot p$

Die Ritzeldrehzahl relativ zur Abtriebsdrehzahl ergibt sich aus der Differenz zwischen Antriebsdrehzahl und Abtriebsdrehzahl. Die Anzahl an Lastwechseln bezüglich Grübchenbildung und Bruch berechnet sich, ausgehend von einer konstanten Drehrichtung, aus der relativen Drehzahl multipliziert mit der Anzahl an Planetenrädern p . Das Planetenrad befindet sich mit dem Ritzel und dem Hohlrاد im Eingriff. Hierbei wird jeweils die gegenüberliegende Zahnflanke beansprucht. In Bezug auf die Ausfallart Bruch müssen beide Eingriffe berücksichtigt werden. Die Anzahl der Lastwechsel, die das Hohlrاد erfährt, berechnet sich aus der Differenz zwischen Abtriebsdrehzahl und der Drehzahl des Hohlrads, multipliziert mit der Anzahl der Planetenräder p . Eine wechselnde Drehrichtung muss bei der Berechnung der Lastwechsel bezüglich Grübchenbildung berücksichtigt werden.

Tabelle 6.3: Ermittlung der Lebensdauererwartung [Ber89]

k	Komponente		$B_{\gamma k}$ [h]	T_k [h]
				$T_1 = \frac{B_{1_1} - f_{tB} \cdot B_{10_1}}{\sqrt[b]{-\ln 0,99}} + f_{tB} \cdot B_{10_1}$
1	Ritzel	(Grübchen)	$B_{1_1} = \frac{B_{1_1-LW}}{n_{LW1-G} \cdot 60}$	mit $B_{10_1} = \frac{B_{1_1}}{(1 - f_{tB}) \cdot \sqrt[b]{\frac{\ln 0,99}{\ln 0,9}} + f_{tB}}$
1	Ritzel	(Bruch)	dauerfest	-
				$T_2 = \frac{B_{1_2} - f_{tB} \cdot B_{10_2}}{\sqrt[b]{-\ln 0,99}} + f_{tB} \cdot B_{10_2}$
2..4	Planetenrad 1..3	(Grübchen)	$B_{1_2} = \frac{B_{1_2-LW}}{n_{LW2-G} \cdot 60}$	mit $B_{10_2} = \frac{B_{1_2}}{(1 - f_{tB}) \cdot \sqrt[b]{\frac{\ln 0,99}{\ln 0,9}} + f_{tB}}$
2..4	Planetenrad 1..3	(Bruch)	dauerfest	-
				$T_5 = \frac{B_{1_5} - f_{tB} \cdot B_{10_5}}{\sqrt[b]{-\ln 0,99}} + f_{tB} \cdot B_{10_5}$
5	Hohlrad	(Grübchen)	$B_{1_5} = \frac{B_{1_5-LW}}{n_{LW5-G} \cdot 60}$	mit $B_{10_5} = \frac{B_{1_5}}{(1 - f_{tB}) \cdot \sqrt[b]{\frac{\ln 0,99}{\ln 0,9}} + f_{tB}}$
5	Hohlrad	(Bruch)	dauerfest	-
6	Rillenkugellager	(Grübchen)	B_{10_6}	$T_6 = \frac{B_{10_6} - f_{tB} \cdot B_{10_6}}{\sqrt[b]{-\ln 0,9}} + f_{tB} \cdot B_{10_6}$
7	Kegelrollenlager	(Grübchen)	C - Teil	-
8..10	Nadellager 1..3	(Bruch)	B_{10_8}	$T_8 = \frac{B_{10_8} - f_{tB} \cdot B_{10_8}}{\sqrt[b]{-\ln 0,9}} + f_{tB} \cdot B_{10_8}$
11	RWDR Antrieb	(Leckage)	-	-
12	RWDR Abtrieb	(Leckage)	-	-
13	Öl	(Alterung)	-	-
14	Antriebswelle	(Bruch)	C - Teil	-
15	Abtriebswelle	(Bruch)	C - Teil	-

Mit Hilfe der Gleichung (6.8) und der in Tabelle 6.2 angegebenen Formeln zur Berechnung der Lastwechsel n_{LWk} je Minute kann die $B_{\gamma k}$ Lebensdauer der einzelnen Komponente k im Gesamtsystem Planetengetriebe in Stunden bestimmt werden.

Um eine Verfügbarkeitsanalyse oder eine Kostenprognose durchführen zu können, muss das Ausfallverhalten in Form von Lebensdauerverteilungen gegeben sein. Für die Ermittlung der Verteilungsparameter können z.B. umfangreiche Versuche durchgeführt, oder Felddaten von Vorgängerprodukten analysiert werden. Ist dies zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt nicht möglich, so kann das Ausfallverhalten für elektronische sowie mechanische Komponenten zunächst mit Hilfe von Zuverlässigkeitskennwerten aus der Literatur grob abgeschätzt werden. In [MIL95], [NPR85], [NSW94] werden elektronische sowie mechanische Bauteile hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Ausfallursache dokumentiert. Die Darstellung des Ausfallverhaltens mittels dieser Informationen ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da von einer konstanten Ausfallrate ausgegangen wird. [Ber89] liefert eine Zuverlässigkeitsdatenbank zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Komponenten mit Hilfe der dreiparametrischen Weibullverteilung.

In Tabelle 6.3 ist der Zusammenhang zwischen der charakteristischen Lebensdauer T sowie der B_1 und B_{10} Lebensdauer nach [Ber89] dargestellt. Für die Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T wird die Kenntnis des Formparameters b und des Formfaktors f_{tB} vorausgesetzt. Die Werte für den Formparameter b und den Formfaktor f_{tB} können [Ber89] entnommen werden. Eine Lebensdauerberechnung der kritischen B-Systemelemente, der Radialwellendichtringe und des Öls, ist nicht möglich. Da sie jedoch je nach Einsatzfall einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten haben können, müssen die Lebensdauerverteilungen über Versuche oder Felddaten ermittelt werden.

Die Datenbanken aus der Literatur beinhalten meist nur wenig Informationen hinsichtlich der Belastung und den Einsatzbedingungen, die Ausfallursachen sind nicht klar definiert. Eine vollständige Übertragbarkeit der Informationen auf ein aktuelles Produkt ist nicht möglich. Demzufolge können nur erste, grobe Schätzungen getroffen werden. Des Weiteren hat sich in der Praxis erwiesen, dass die rechnerische Vorhersage der Lebensdauer aufgrund der stark streuenden Schädigungssumme beim Versagen sowie der ungenauen Wöhlerlinien, besonders im Bereich der Dauerfestigkeit, sehr unsichere Ergebnisse liefert [Bor90]. Von einer absoluten Schädigungsrechnung sollte daher abgesehen werden. Die rechnerische Vorhersage der Lebensdauer und die Abschätzung des Ausfallverhaltens mittels Datenbanken oder Expertenwissen allein reicht auf Grund dieser Unsicherheiten nicht aus, und muss mit Hilfe weiterer Zuverlässigkeitsmethoden abgesichert werden, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

6.2.2.2 Versuche

Die klassische Planung und Durchführung von Lebensdauertests hat das Ziel, eine statistisch abgesicherte Aussage zur Zuverlässigkeit im Kundenbetrieb zu liefern bzw. den Nachweis von Zuverlässigkeitsvorgaben durchzuführen. Dabei ist die geforderte Zuverlässigkeit bei definierter Aussagesicherheit und Lebensdauer im Weibullnetz als Punkt gegeben [Kro04]. Geht man von einer Prüfung ohne Ausfall aus, einem Erfolgslauf oder „Success Run“ [Ber04], so ist der Verlauf der Lebensdauervertelung nicht relevant, da man lediglich die Vorgabe betrachtet. Sollen jedoch Verfügbarkeitsbetrachtungen oder Garantiekostenprognosen durchgeführt werden, Berechnungsmodelle verifiziert und Zuverlässigkeitsdatenbanken aufgebaut werden, so ist der gesamte Verlauf der Lebensdauervertelung bedeutsam. Dieser kann in frühen Entwicklungsphasen nur mit Hilfe geeigneter Teststrategien ermittelt werden. Man unterscheidet zwischen [Ber04]

- vollständigen Tests,
- zensierten Tests und
- Strategien zur Testzeitverkürzung.

Wie bereits im Kapitel 3 erläutert, werden beim vollständigen Test alle Prüflinge bis zum Ausfall getestet. Diese Art der Testdurchführung liefert die statistisch beste Aussage, ist jedoch mit dem höchsten Testaufwand verbunden. Eine Reduzierung des Testaufwands kann durch einen zensierten Test erfolgen. Hierbei werden nicht alle Prüflinge bis zum Ausfall getestet. Die Laufzeiten der ausgefallenen Einheiten sind bekannt, während die der noch intakten Einheiten nicht zwingend gegeben sein müssen.

Die unterschiedlichen Methoden zur Auswertung zensierter Stichproben wurden zuvor in den Kapiteln 3 und 4 behandelt. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Testzeit bietet der geraffte Lebensdauertest, bei dem das Bauteil einer höheren Beanspruchung als im Feld unterliegt [Kro04]. Um Prognosen an Hand der Versuchsergebnisse für das Ausfallverhalten im Feld durchzuführen, muss die Relation zwischen dem Ausfallverhalten im Versuch und im Feld bekannt sein. Dies kann mit Hilfe des Raffungsfaktors χ erfolgen, der sich aus dem Verhältnis der Lebensdauer unter Feldbeanspruchung L_F und der Lebensdauer bei zeitraffenden Prüfbedingungen L_R bei identischer Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt [Mee98]

$$\chi = \frac{L_F}{L_R} . \quad (6.9)$$

Ist die Anzahl der Schwingspiele n_{iF} im Intervall i für das Lastkollektiv aus der Feldbeanspruchung identisch mit der Anzahl der Schwingspiele n_{iR} im Intervall i für das Lastkollektiv des gerafften Tests, so lässt sich schreiben

$$\chi = \frac{D_R}{D_F}. \quad (6.10)$$

Mit Hilfe der Formeln (6.5) bis (6.7) kann die Lebensdauer für eine Laufleistung in Schwingspielen berechnet werden. Soll der Raffungsfaktor für eine Laufleistung in Abhängigkeit der Zeit, z.B. Stunden, angegeben werden, so muss dieser mit dem Verhältnis der mittleren Schwingspielzahl des gerafften Lastkollektivs n_{mR} und der mittleren Schwingspielzahl n_{mF} des Lastkollektivs aus dem Feld angepasst werden [Kro01]

$$\bar{\chi} = \chi \frac{n_{mR}}{n_{mF}}. \quad (6.11)$$

Um Falschinterpretationen zu vermeiden, ist es sehr wichtig anzugeben, auf welcher Einheit der Raffungsfaktor basiert.

Bei der Ermittlung des Raffungsfaktors als auch der rechnerischen Auslegung der Lebensdauer nach Kapitel 6.2.2.1 wird die Kenntnis der Bauteilwöhlerlinie vorausgesetzt. Die Ermittlung der Wöhlerlinie kann zum einen auf Basis von Versuchen und zum anderen auf Basis von Felddaten erfolgen unter der Voraussetzung, dass die Beanspruchung bekannt ist.

Für die versuchstechnische Bestimmung der Wöhlerlinie existieren verschiedene Prüfverfahren. Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Wöhlerlinie bietet der Wöhler-Versuch [Hai02], [Cot92]. Hierbei wird das Bauteil mit einer konstanten Spannungsamplitude, konstanter Mittellast und meist konstanter Frequenz beansprucht bis ein Schwingbruch bzw. Schwinganriss entsteht. Die Lebensdauer wird in Schwingspielen angegeben. Ein weiteres Prüfverfahren zur Ermittlung der Wöhlerlinie ist der Blockprogrammversuch [Hai02], [Cot92]. Der wesentliche Unterschied zum Wöhler-Versuch ist die Ersetzung der einstufigen Beanspruchung durch ein Lastkollektiv mit mehreren Einstufenbeanspruchungen, um die betriebsähnliche Durchmischung unterschiedlich hoher Beanspruchungen im Versuch zu simulieren [Cot92]. Für die Ermittlung einer Wöhlerlinie und deren Streubereich müssen mehrere Proben bei unterschiedlichen Spannungsamplituden bis zum Ausfall getestet werden. Die Wöhlerlinie charakterisiert die Beanspruchbarkeit eines Bauteils bezüglich einer konkreten Ausfallart. Dabei kann die Streuverteilung der ertragbaren Spannungsamplituden im Zeitfestigkeits- sowie Dauerfestigkeitsbereich unterschiedlichen Verteilungen folgen.

Die experimentelle Ermittlung der Form der Streuverteilung im Bereich ihrer Extremwerte ist auf Grund des hohen Stichprobenumfangs kaum realisierbar [Hai02]. Infolgedessen muss bezüglich ihrer Form eine Annahme getroffen werden. Unterschiedliche Verteilungen des Streubereichs einer Wöhlerlinie werden z.B. in [Hai02], [Mee98], [Mai05a] und [Wol05] behandelt. [Mai05b] geht davon aus, dass der Dauerfestigkeitsbereich einer normalverteilten Streuung unterliegt. Der Stichprobenumfang, der bei der statistischen Ermittlung des Dauerfestigkeitsbereichs nach dem Treppenstufenverfahren [Hai02] benötigt wird, kann mit Hilfe des in [Mai05b] vorgestellten Ansatzes reduziert werden.

Eine experimentelle Ermittlung der Wöhlerlinie kann in der Praxis auf Grund von Zeit- und Kostenaspekten nicht immer realisiert werden. Folglich wird versucht mit Hilfe geeigneter Teststrategien frühzeitig Schwachstellen zu identifizieren und Prognosen für den Feldeinsatz durchzuführen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Korrelation zwischen Versuch und Feld bekannt ist. In der Praxis kommt es jedoch häufig vor, dass nicht alle Einflussparameter, die im Feld auftreten, bekannt sind und somit die reale Beanspruchung im Versuchsfeld nicht repräsentiert werden kann. Dies hat zur Folge, dass der sich aus der Praxis ergebende Zusammenhang zwischen Feld und Versuch nicht dem theoretisch ermittelten entspricht. [Vog02] stellt ein Verfahren vor, das die Korrelation von Felddaten und Erprobungsbedingungen ermöglicht, und mit Hilfe dessen das verbleibende Lebensdauerpotential einer intakten aber vorgeschädigten Komponente bestimmt werden kann. Intakte Bauteile werden aus dem Feld entnommen und im Labor unter verschärften Bedingungen bis zum Ausfall getestet. Des Weiteren werden nicht vorgeschädigte Bauteile im Labor bis zum Ausfall getestet. Aus der gewichteten Summe von Feld- und Laborschädigung ergibt sich eine fiktive Summenlaufzeit, die mit der Laufzeit der nicht vorgeschädigten Komponente aus dem Labor verglichen wird. Mittels eines Gewichtungsfaktors wird die Verteilung der fiktiven Lebensdauer an die der reinen Laborbeanspruchung angepasst, und somit das Verhältnis der Schädigung im Feld und Labor abgeleitet. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Ermittlung der Korrelation zwischen der Schädigung an einer Komponente im Feld und im Versuch, wenn keine oder nur wenig Ausfälle aus dem Feld zur Verfügung stehen.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Korrelation zwischen Feld und Versuch ist der Einsatz geeigneter Diagnosesysteme zur Erfassung der relevanten Betriebsdaten im Feldeinsatz. Im folgenden Kapitel wird ein Einblick in das Thema Online Monitoring und eine Möglichkeit zur Bestimmung der aktuellen Zuverlässigkeit von Produkten im Feld gegeben.

6.2.2.3 Online Monitoring

Diagnosesysteme werden in unterschiedlichen Bereichen zur Erfassung aktueller Zustands- und Lastparameter eingesetzt, um frühzeitig Fehler zu erkennen, sie zu lokalisieren, deren Ursachen zu ermitteln und entsprechende Maßnahmen zur Fehlerbehebung abzuleiten [Mel05]. Mit Hilfe der daraus gewonnenen Informationen ist es möglich, gezielte Wartungsstrategien festzulegen sowie Service-Dienstleistungen durchzuführen, um die Verfügbarkeit eines Systems aufrecht zu erhalten bzw. sie zu steigern.

Neben der belastungsabhängigen Planung von Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen können mit Hilfe der gemessenen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen Lebensdauerprognosen für einzelne Komponenten und das Gesamtsystem durchgeführt, sowie Aussagen über die Restlebensdauer einzelner Komponenten getroffen werden. Des Weiteren kann durch die Dokumentation der Beanspruchung eine Korrelation zwischen Feld und Versuch hergestellt werden. Das Bild 6.5 zeigt eine Vorgehensweise zur Ermittlung der aktuellen Zuverlässigkeit. Wichtige Belastungsgrößen zur Ermittlung der Lebensdauer eines Planetengetriebes sind die Drehzahl und das Drehmoment über der Zeit, die Radial- und Axialkraft sowie der Temperaturverlauf über der Zeit, die mittels unterschiedlicher Sensorelemente erfasst werden können. Somit lässt sich die Beanspruchung an den kritischen Komponenten, der Verzahnung und der Lagerung aus Kapitel 6.2.1.1, ermitteln. Ausgehend von den gemessenen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen lassen sich mittels statistischer Zählverfahren Lastkollektive ermitteln, die die Grundlage für weitere Lebensdauerberechnungen und Zuverlässigkeitsabschätzungen bilden [Hai02]. Die aktuelle Zuverlässigkeit eines Produkts im Feld kann bestimmt werden, indem zunächst die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten ermittelt wird. Anschließend kann die Systemzuverlässigkeit mit Hilfe der Booleschen Theorie berechnet werden. Im Folgenden wird gezeigt, wie die aktuelle Zuverlässigkeit bestimmt werden kann.

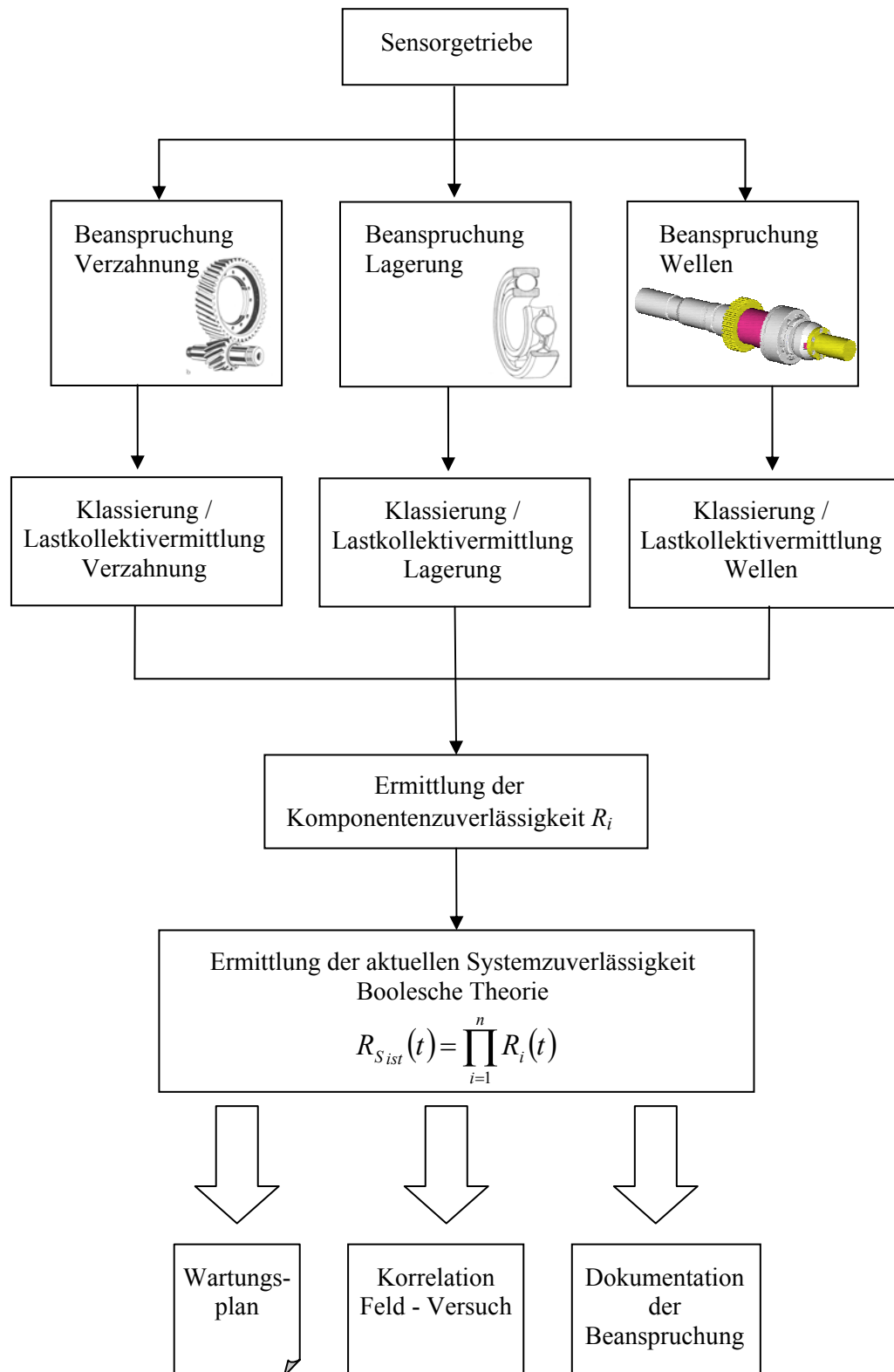


Bild 6.5: Sensorgetriebe zur Online Ermittlung der Zuverlässigkeit

Die Bestimmung der aktuellen Zuverlässigkeit basiert auf dem Stress-Strength Verfahren [Ber04] für die statische Auslegung. „Die Zuverlässigkeit R ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die auftretende Beanspruchung σ_B die ertragbare Beanspruchung σ_W nicht überschreitet [Ber04]“

$$R = P(\sigma_W > \sigma_B). \quad (6.12)$$

„Für eine Beanspruchung σ_x werden alle Bauteile nicht versagen, für die gilt $\sigma_W > \sigma_x$.“ Ist die Streuung der ertragbaren Beanspruchung σ_W und der auftretenden Beanspruchung σ_B in Form einer Dichteverteilung bekannt, so kann die Zuverlässigkeit mit folgender Formel beschrieben werden [Ber04]

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_B(\sigma) \cdot \left[\int_{\sigma_x}^{\infty} f_W(\sigma) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma. \quad (6.13)$$

Im Zeitfestigkeitsbereich ist die Zuverlässigkeit im Gegensatz zum statischen Bereich nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Lastwechselzahl ab. Im Folgenden wird eine Vorgehensweise zur Bestimmung der aktuellen Zuverlässigkeit bei einer Beanspruchung durch ein Lastkollektiv in Anlehnung an [Con90] und [Mai05a] vorgestellt. Das Lastkollektiv wird zunächst in eine äquivalente einstufige Beanspruchung transformiert [Con90], deren Schwingspielzahl n_{kum} sich aus der Summe der Schwingspiele n_i über m Klassen des ursprünglichen Lastkollektivs wie folgt ergibt [Mai05a]

$$n_{kum} = \sum_{i=1}^m n_i. \quad (6.14)$$

Die Schadenssumme der äquivalenten, einstufigen Beanspruchung ergibt sich nach Gleichung (6.2) und (6.4) im Zeitfestigkeitsbereich zu

$$D = \frac{n_{kum}}{N_D} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{äquiv}}}{\sigma_D} \right)^k. \quad (6.15)$$

Wird davon ausgegangen, dass die Schadenssumme des ursprünglichen Lastkollektivs der Schadenssumme der äquivalenten Beanspruchung entspricht, so kann die äquivalente Spannungsamplitude entsprechend [Mai05a] berechnet werden

$$\sigma_{\text{äquiv}} = \sqrt[k]{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n_{kum}} \cdot \sigma_i^k}. \quad (6.16)$$

Sind die Dichteverteilungen der ertragbaren Beanspruchung σ_W und der auftretenden Beanspruchung $\sigma_{\text{äquiv}}$ bei der Schwingspielzahl n_{kum} bekannt, so kann die aktuelle Zuverlässigkeit gemäß Gleichung (6.13) bestimmt werden. Werden weitere Parameter als

verteilt angenommen, wie z.B. die Schadenssumme, so kann die aktuelle Zuverlässigkeit nicht mehr analytisch bestimmt werden und es müssen numerische Methoden eingesetzt werden. Für die Bestimmung der aktuellen Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung verteilter Parameter soll an dieser Stelle auf die Literatur [Mai05a], [Con90], [Ass02] und [Ass99] verwiesen werden. Der Einsatz von Sensorgetrieben im Feld ermöglicht die Ermittlung individueller Lastparameter zur Abschätzung der aktuellen Zuverlässigkeit. Wird eine definierte Mindestzuverlässigkeit unterschritten, so können gezielt Wartungsmaßnahmen eingeleitet werden, die die Schwachstellen frühzeitig beheben und die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit steigern. Mit Hilfe der gewonnenen Informationen bezüglich der Lastparameter können Versuche besser geplant und an reale Bedingungen angepasst werden. Die Korrelation zwischen Feld und Versuch ist somit für unterschiedlichste Einsatzbedingungen gegeben. Für die Auslegung der einzelnen Komponenten in der Konstruktion ist die Kenntnis der Lastkollektive beim Kundeneinsatz von großer Bedeutung. Dadurch können die Komponenten gezielt ausgelegt werden, und die Lebensdauer des Systems bereits in frühen Phasen rechnerisch prognostiziert werden. Der Einsatz von Sensorgetrieben kann aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht immer realisiert werden. Des Weiteren wird die Zustandsüberwachung von vielen Endkunden nicht geduldet. Eine Felddatenanalyse auf Basis von Garantiedaten ist demnach unumgänglich.

6.2.2.4 Optimierte Felddatenanalyse

Mit Hilfe der Felddatenanalyse können Früh- sowie Zufallsausfälle ermittelt und durch eine Lebensdauerverteilung dargestellt werden. Des Weiteren kann das reale Ausfallverhalten im Bereich der Verschleißausfälle untersucht und den Ergebnissen aus der konstruktiven Auslegung und dem Versuch gegenübergestellt werden. Im Bild 6.6 ist die Vorgehensweise bei der Felddatenanalyse aufgezeigt. Felddaten können in vollständiger oder unvollständiger Form vorliegen. Zunächst werden die Analysemethoden für vollständige Daten behandelt. Die Laufleistungen aller ausgefallenen Einheiten sind bekannt. Für den Fall, dass die Laufleistungen der zensierten, noch intakten Einheiten im Feld nicht bekannt sind, kann das Sudden-Death Verfahren angewendet werden [Ber04], [VDA3.2]. Sind die Laufleistungen der zensierten Einheiten in Form einer Laufleistungsverteilung oder an Hand dokumentierter Daten vorhanden, so können unterschiedliche Methoden zur Analyse herangezogen werden. Die in Kapitel 4 vorgestellten Methoden werden unterteilt in Methoden, die auf der Maximum-Likelihood Methode basieren sowie in Methoden, die zunächst die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu den Ausfallzeiten berechnen, um anschließend die Parameter der Lebensdauerverteilung mit Hilfe der Kapitel 2.3.1 vorgestellten Regressionsanalyse zu ermitteln. Hierzu existieren viele verschiedene Methoden; einige Literaturstellen sind im Bild 6.6 aufgeführt.

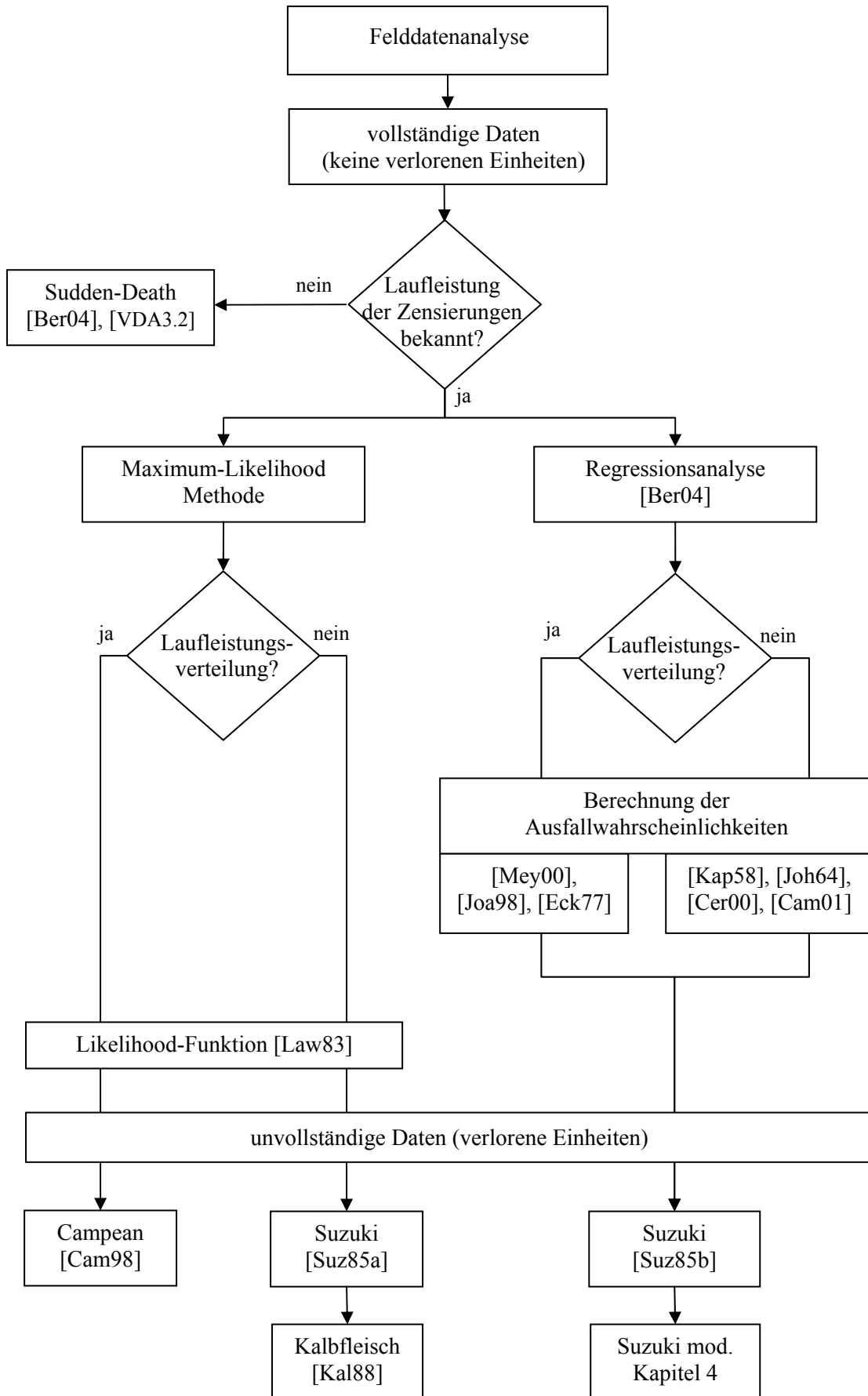


Bild 6.6: Vorgehensweise bei der Felddatenanalyse

Es kann zwischen Methoden unterschieden werden, die eine Laufleistungsverteilung zu Grunde legen, sowie Methoden die keine Laufleistungsverteilung benötigen, da die Laufleistungen der Zensierungen im Einzelnen bekannt sind.

In der Praxis kommt es häufig vor, dass die Daten unvollständig sind und Informationen verloren gehen. Um diese verlorenen Einheiten bei der Analyse mit berücksichtigen zu können, bedarf es geeigneter Methoden, die im Kapitel 4 vorgestellt wurden. Mit Hilfe der Methode nach Kalbfleisch und Lawless [Kal88] und der Ausfallrate nach Bayes [Cam01] können, trotz mangelnder Datenqualität, robuste Zuverlässigkeitsprognosen durchgeführt werden. Des Weiteren können ungenaue Daten mittels der im Kapitel 5 vorgestellten Vorgehensweise analysiert und streuende Lebensdauerverteilungen ermittelt werden, die eine optimistische und eine pessimistische Prognose erlauben. Die Vorgehensweise bei der Felddatenanalyse ungenaue Daten, zur Prognose von Garantiekosten oder der Analyse der Verfügbarkeit, wird im Kapitel 6.3 an Hand eines Planetengetriebes gezeigt.

6.2.2.5 Nutzung von Felddaten in der Produktentwicklung

Mit Hilfe der Felddatenanalyse kann das tatsächliche Ausfallverhalten eines Produkts im Feld abgebildet werden. Häufig treten während der Garantiezeit Frühausfälle sowie Zufallsausfälle auf, die in der Entwicklung schwer vorhersagbar sind. Die Kombination aus Früh- und Zufallsausfällen durch Felddaten, sowie den Verschleißausfällen, die über Versuche, die konstruktive Auslegung oder geeignete Diagnosesysteme ermittelt werden können, ermöglicht die Darstellung des kompletten Bereichs der Badewannenkurve. Es existieren verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Badewannenkurve [Hjo80], [Pau98], [Gov82], [Hah82], [Kec71], [Jia97], [Beb05], [Lai01], [Xie95].

Ein Ansatz ist die Darstellung der Badewannenkurve mittels einer Verteilungsfunktion [Mey03]. Die Hjorthverteilung [Hjo80] ermöglicht die Approximation der gesamten Badewannenkurve. Ihre Ausfallrate besteht aus der Summe von zwei Anteilen, dem steigenden Anteil δt und dem fallenden Anteil $\eta/(1+\epsilon t)$ [Ber04]

$$\lambda(t) = \delta t + \frac{\eta}{1 + \epsilon t}. \quad (6.17)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Badewannenkurve ist das Mischverteilungsmodell, indem die einzelnen Bereiche der Badewanne mit Hilfe einzelner Verteilungen beschrieben werden können [Hah82], [Kec71]. Ein Mischverteilungsmodell mit drei weibullverteilten Subpopulationen ist in [Mey03] aufgeführt. Die

Betrachtung aller Bereiche der Badewannenkurve ist in der Produktentwicklung von großer Bedeutung.

Bei der Neuentwicklung von Produkten wird in der Regel die Konstruktion des Vorgängerprodukts verbessert und den entsprechenden Kundenwünschen angepasst. Die Entwicklung völlig neuer Konzepte ist für mechanische Produkte selten der Fall [Kis96]. Die Erfahrungen, die während der Produktnutzung gesammelt werden, müssen, um zuverlässige Produkte zu erzeugen, in die Entwicklung einfließen [Ebn96].

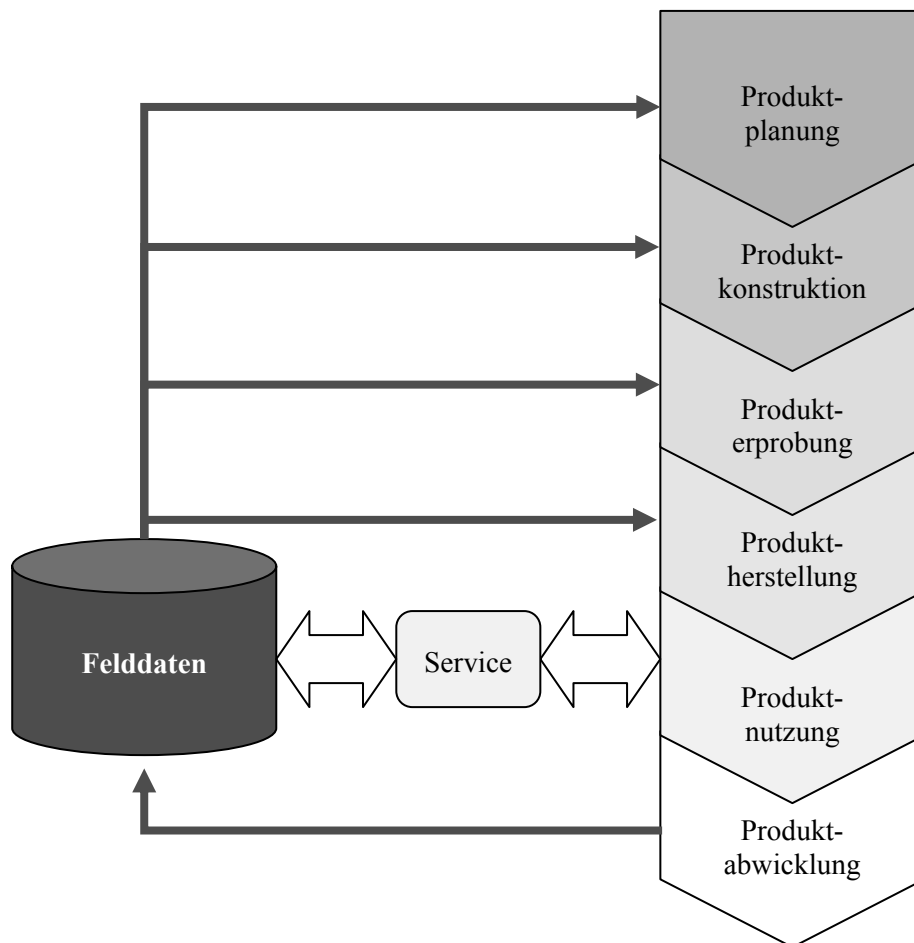


Bild 6.7: Nutzung von Felddaten im Produktlebenszyklus [Edl01]

Felddaten bilden eine Wissensbasis, die in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus genutzt werden kann [Edl01], siehe Bild 6.7. Bei der Planung von Nachfolgeprodukten kann gezielt auf konkrete Kundenwünsche eingegangen werden. In der Konstruktion können Schwachstellen und Fehler beseitigt werden, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Produkte zu steigern. Die Kenntnis der realen Einsatzbedingungen erleichtert die Definition der wesentlichen Einflussgrößen sowie Zielgrößen bei der Produkterprobung. Felddaten können bei der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) herangezogen werden, um die Identifikation potentieller

Fehler zu erleichtern, sowie die Risikokennzahlen für die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit auf Basis realer Daten zu ermitteln [Edl01]. Des Weiteren ist die Erfassung von Felddaten für die Durchführung von Garantiekostenprognosen unumgänglich. Dies wird in den folgenden Abschnitten am Beispiel des im Kapitel 6.2.1 vorgestellten Planetengetriebes demonstriert.

6.3 Garantiekostenprognosemodell

Die technischen Produkte, die heutzutage auf den Markt kommen, sind meist komplexe Systeme, die aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen. Die Funktionsfähigkeit und der Einfluss einzelner Komponenten bestimmen das Ausfallverhalten und die Zuverlässigkeit des gesamten Systems. Da die Garantiekosten eines Produkts abhängig von der Zuverlässigkeit sind, ist der Hersteller stets bemüht eine hohe Zuverlässigkeit zu erreichen. Weitere Faktoren, die die Garantiekosten beeinflussen, sind zudem die Garantieart, Garantiepolice, Garantiezeit und die Art des Ersatzes. Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Einblick in die Strukturierung und Unterteilung der Garantiearten gegeben. Anschließend wird das Modell zur Simulation der Garantiekosten am Beispiel eines Planetengetriebes beschrieben, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde.

6.3.1 Garantie und Gewährleistung

Auf dem Markt für technische Produkte spielt die Produktgarantie heute sowohl im Bereich der Verbraucher- sowie der Geschäftstransaktionen eine wichtige Rolle. Der Gebrauch von Garantien ist weit gestreut und dient in erster Linie dem Schutz für Hersteller, Verkäufer und Käufer. Somit ist die Garantie ein Zeichen für Qualität und spiegelt die Anforderung der Gesellschaft an das Produkt wider. Sie ist auch ein Element der Marketingstrategie und ein Faktor zur Beilegung von Streitigkeiten [Bli94].

Eine Garantie ist die Versicherung eines Verkäufers, dass ein Produkt oder eine Dienstleistung den gemachten Angaben entspricht, andernfalls hat der Käufer Anspruch auf Erfüllung des Produktversprechens. Sie darf als eine vertragliche Übereinkunft zwischen Käufer und Verkäufer (oder Hersteller) angesehen werden, die zum Verkauf eines Produkts oder einer Dienstleistung führt. In diesem Zusammenhang ist als Verkäufer diejenige Partei gemeint, welche für die Gewährleistung der Garantiebedingungen verantwortlich ist. Dies ist normalerweise der Hersteller des Produkts, ein Händler, oder andere Zwischenhändler, Endverkäufer, oder ein Dienstleistungsanbieter. Der Käufer ist normalerweise der letztendlich zahlende Verbraucher. In einigen Fällen können auch andere Parteien, zum Beispiel ein Versicherer oder eine unabhängige Reparaturwerkstatt, ebenfalls beteiligt sein [Bli94].

Im Allgemeinen dient eine Garantie dem Einrichten von Verbindlichkeiten zwischen diesen Parteien für den Fall, dass ein Objekt ausfällt oder seine vorgesehene Funktion nicht erfüllen kann. Der Vertrag definiert sowohl die zu erwartende Funktion, als auch die Entschädigung für den Käufer, wenn ein Fehler auftaucht, oder die Funktion nicht zufrieden stellend ist. Die Begriffe Garantie und Gewährleistung werden oft gleichermaßen verwendet. Der Unterschied ist, dass bei einer Garantie der Zustand der Ware zum Zeitpunkt der Übergabe an den Kunden keine Rolle spielt, da die Funktionsfähigkeit des Produkts für den Zeitraum garantiert wird. Die Gewährleistung hingegen besagt, dass die gehandelte Ware frei von Sach- und Rechtsmängeln ist. Der Verkäufer haftet daher für alle Mängel, die schon zum Zeitpunkt des Verkaufs bestanden haben, auch für solche, die sich erst später bemerkbar gemacht haben.

6.3.2 Modellaufbau und Vorgehensweise

Die Untersuchung von Systemen bezüglich ihrer Zuverlässigkeit kann mit Hilfe der Booleschen Theorie erfolgen. Hierzu müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein [Ber04]:

- *„handelt es sich um ein reparierbares System, so kann nur bis zum ersten Ausfall gerechnet werden;*
- *die Systemelemente können ausschließlich die beiden Zustände funktionsfähig oder ausgefallen annehmen;*
- *die Systemelemente sind unabhängig und beeinflussen sich nicht gegenseitig bezüglich ihres Ausfallverhaltens.“*

Die Boolesche Theorie ist nur eingeschränkt einsetzbar. Da es sich bei dem zu untersuchenden Planetengetriebe um ein reparierbares System handelt, dessen Komponenten Abhängigkeiten beim Reparaturverhalten aufweisen, ist die Berechnung des Systemverhaltens mittels Boolescher Theorie nicht möglich. Im Folgenden wird ein Modell vorgestellt, das das Reparaturverhalten sowie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten bei der Analyse berücksichtigen kann, es ist im Bild 6.8 und Bild 6.9 dargestellt. Das Modell wurde in MAPLE 7 aufgebaut und besteht aus zwei Teilen. Den ersten Teil bildet die Monte-Carlo Simulation der synthetischen Stichproben zur Analyse ungenauer Felddaten. Der zweite Teil enthält die Monte-Carlo Simulation der Garantiekosten.

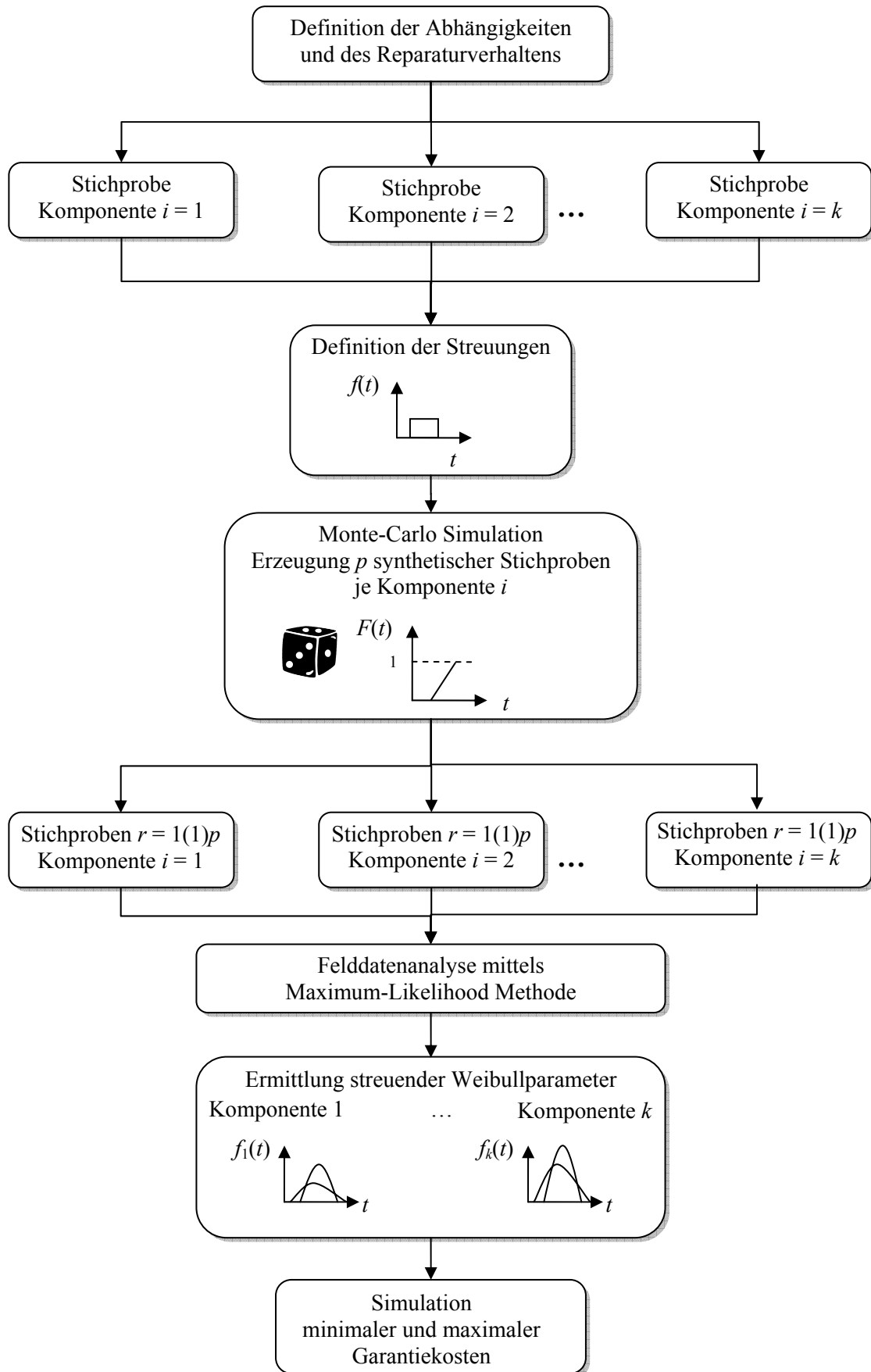


Bild 6.8: Garantiekostenprognosemodell

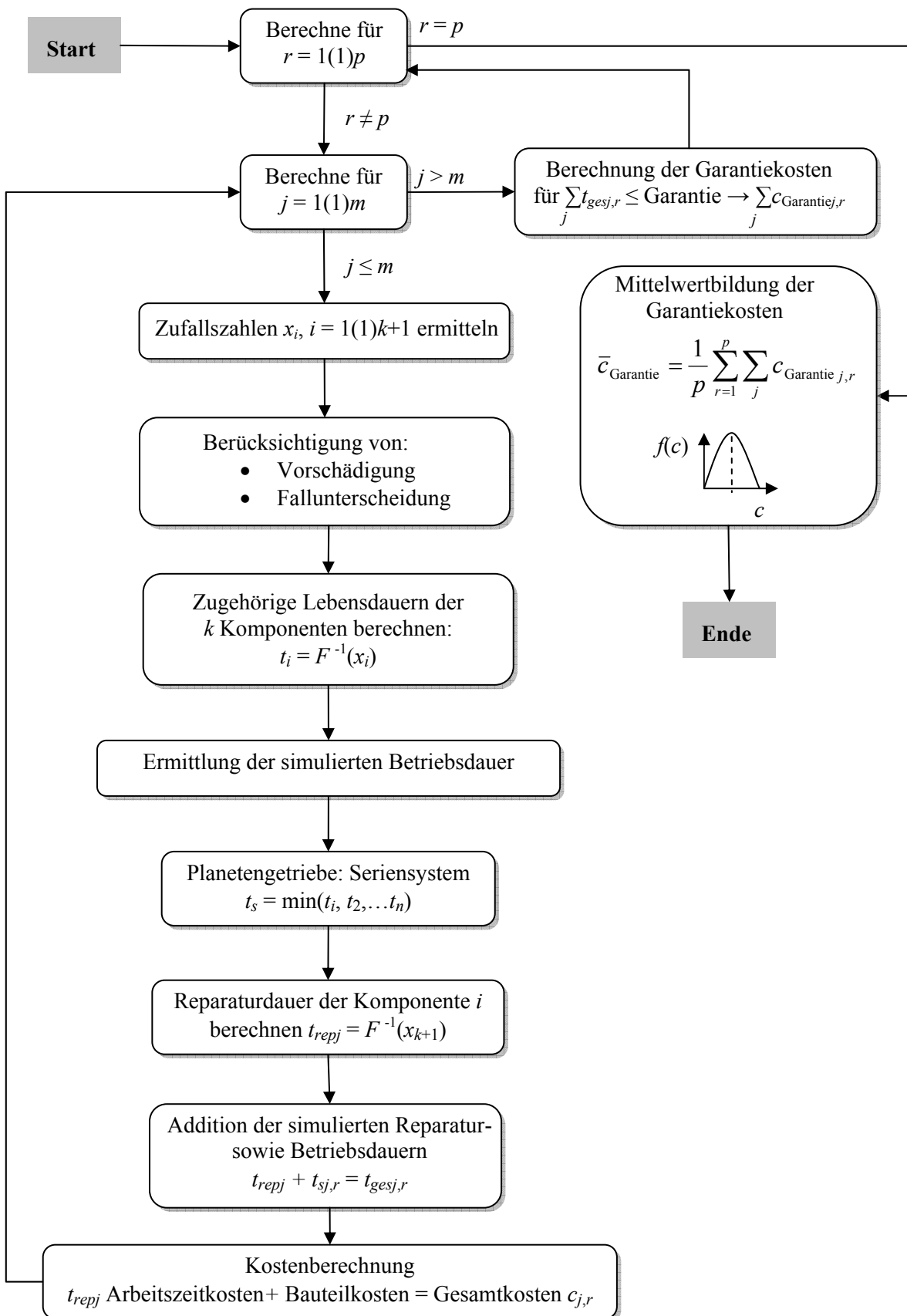


Bild 6.9: Algorithmus zur Monte-Carlo Simulation der Garantiekosten

Zu Beginn muss das Reparaturverhalten des Planetengetriebes untersucht werden. Hierbei werden die Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten untereinander definiert und das Reparaturverhalten in Form von zweiparametrischen Weibullverteilungen beschrieben. Um eine Garantiekostenprognose durchführen zu können, werden die Lebensdauerverteilungen der kritischen Komponenten benötigt. Diese werden beispielsweise mit Hilfe von Felddaten ermittelt. Felddaten liegen häufig auf Grund unpräziser Angaben nur in ungenauer Form vor. Um diese Ungenauigkeit der Daten bei der Analyse berücksichtigen zu können, wurde im Kapitel 5 eine Vorgehensweise in Anlehnung an [Jäg06] vorgestellt. Die Art der Ungenauigkeit muss zu Beginn definiert werden, Bild 6.8. Die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, legen eine gleichverteilte Streuung der Felddaten in einem vorgegebenen Intervall zu Grunde. Mit Hilfe der Monte-Carlo Methode können an Hand der vorgegebenen Streuung p verschiedene synthetische Stichproben für jede Komponente erzeugt werden. Diese Stichproben werden mit der Maximum-Likelihood Methode nach [Law83] aus Kapitel 2.3.2 analysiert. Für jede kritische Komponente des zu untersuchenden Planetengetriebes kann gemäß Kapitel 5.4 eine untere Grenze sowie eine obere Grenze für die Ausfalldichte ermittelt werden. Anschließend erfolgt die Monte-Carlo Simulation der Garantiekosten. Hierbei werden die zuvor ermittelten streuenden Eingangparameter berücksichtigt, indem zum einen die Garantiekosten unter Berücksichtigung der oberen und zum anderen der unteren Grenze berechnet werden. Als Ergebnis wird der maximale sowie minimale Mittelwert der Garantiekosten aufgeführt.

Das Bild 6.9 zeigt den Algorithmus zur Monte-Carlo Simulation der Garantiekosten. Es werden für jede der k kritischen Komponenten $i = 1(1)k$ Pseudozufallszahlen x_i erzeugt, die anschließend in weibullverteilte Lebensdauern t_i nach der Inversionsmethode [VDI4008] transformiert werden. Die Pseudozufallszahlen t_i ergeben die Lebensdauern der k Komponenten. Die Pseudozufallszahl t_i , die den kleinsten Wert besitzt, verursacht den Stillstand des gesamten Systems, da es sich bei dem Planetengetriebe um ein Seriensystem handelt. Um den Zeitpunkt zu ermitteln, zu dem das System wieder betriebsfähig ist, muss die Reparaturdauer für die ausgefallene Komponente ermittelt werden. Bild 6.10 zeigt exemplarisch die zeitliche Abfolge der Betriebs- und Reparaturzustände. Es handelt sich hierbei um einen stochastischen Prozess, dessen Betriebsdauern als auch Reparaturdauern in jedem Zyklus unterschiedlich sind [Fri01].

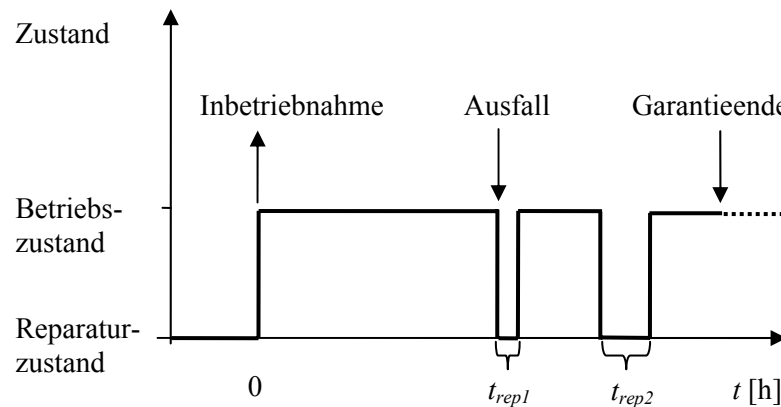


Bild 6.10: Zeitliche Abfolge der Betriebs- und Reparaturdauern

Das Reparaturverhalten wird im Rahmen dieser Arbeit mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung beschrieben, deren Parameter unterschiedliche Werte für die einzelnen Komponenten besitzen können. Für die Simulation der Reparaturdauer mittels der Monte-Carlo Methode wird eine weitere Pseudozufallszahl x_{k+1} benötigt. Diese wird ebenso in eine weibullverteilte Pseudozufallszahl transformiert. Somit ist der Zeitpunkt des ersten Ausfalls des Systems ermittelt worden sowie die Dauer der Reparatur. Um das Systemverhalten während der gesamten Garantiezeit abbilden zu können, muss die zeitliche Abfolge zwischen Betriebsdauer und Reparaturdauer, die sich während der Garantiezeit ergibt, simuliert werden. Um eine repräsentative Aussage über das Systemverhalten oder über die Garantiekosten zu erzielen, muss eine entsprechende Anzahl an Simulationsdurchläufen gewählt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Anzahl von 20 000 Replikationen gewählt, da somit eine gute Aussage erzielt werden konnte. Abschließend kann an Hand der Simulationsergebnisse z.B. der Mittelwert der Garantiekosten berechnet werden.

Die Vorgehensweise wird im Folgenden am Beispiel des Planetengetriebes verdeutlicht. Im Kapitel 6.3.3 werden zunächst die Abhängigkeiten der Komponenten untersucht. Anschließend erfolgt die Ermittlung streuender Lebensdauerverteilungen auf Basis fiktiver Daten. Die Simulation der Garantiekosten wird im Kapitel 6.3.6 vorgestellt.

6.3.3 Untersuchung von Abhängigkeiten

Die Abhängigkeiten, die sich für einzelne Komponenten im Planetengetriebe im Fall der Instandsetzung bzw. Reparatur ergeben, sowie die damit verbundenen Reparaturkosten sind in Tabelle 6.4 für die kritischen Komponenten aufgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Erneuerungsgrad, der die Güte einer Instandhaltungs-

maßnahme beschreibt [Poz01], als maximal angenommen. Somit wird festgelegt, dass es sich stets um eine vollständige Erneuerung handelt [Bec94], und die reparierte Komponente als wieder neuwertig gilt. Die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten im Planetengetriebe ergeben sich dadurch, dass nicht immer lediglich die ausgefallene Komponente im System repariert wird. Je nachdem um welchen Komponentenausfall es sich handelt, entsteht ein unterschiedliches Reparaturverhalten, das im Folgenden näher erläutert wird.

Im Falle eines Verzahnungsschadens wird das komplette Getriebe getauscht. Eine alleinige Erneuerung des betroffenen Zahnrades ist bei Planetengetriebe selten realisierbar, da der Ausfall in der Regel bereits zur Schädigung anderer Komponenten im Getriebe beigetragen hat. Infolgedessen stellt der Tausch des Getriebes in diesem Beispiel die wirtschaftlichste Lösung dar. Die Reparaturdichte wird für das Beispiel mit Hilfe einer zweiparametrischen Weibullverteilung mit der charakteristischen Lebensdauer $T = 48$ h und dem Formparameter $b = 3,5$ beschrieben, siehe Bild 6.11. Es wird angenommen, dass bei Ausfall eines Lagers dieses als auch das Öl und die Radialwellendichtringe vollständig erneuert werden. Die Erneuerung der Radialwellendichtringe ist auf Grund eventueller Beschädigungen bei der Demontage erforderlich. Bei dem Ausfall eines Radialwellendichtringes werden beide Radialwellendichtringe sowie das Öl getauscht. Die Reparaturdichte wird mit einer zweiparametrischen Weibullverteilung, die die charakteristische Lebensdauer $T = 100$ h und den Formparameter $b = 3,5$ besitzt, beschrieben, siehe Bild 6.11.

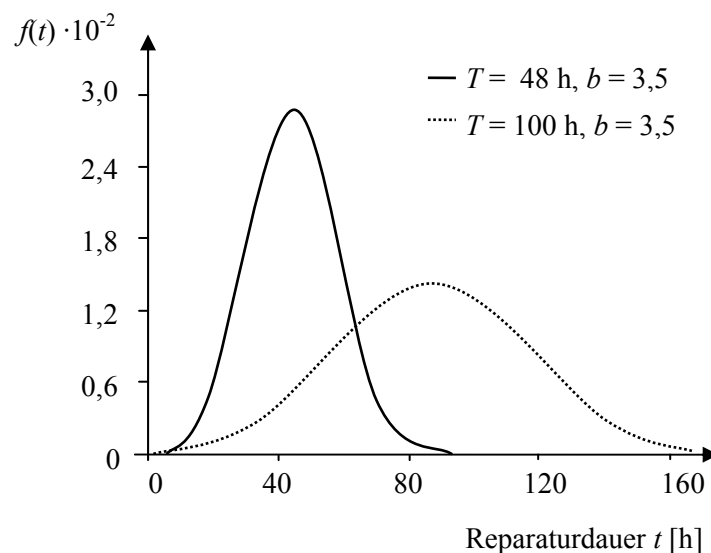


Bild 6.11: Reparaturdichte

Tabelle 6.4: Reparaturmaßnahmen und Kosten der kritischen Komponenten

<i>k</i>	Ausfall der Komponente:	Tausch von:	Reparaturdauer		Reparaturkosten	
			<i>T</i> [h]	<i>b</i>	Bauteil	Arbeitszeitkosten
1	Ritzel	Getriebe	48	3,5	800	50 €/h
2	Planetenrad 1	Getriebe	48	3,5	800	50 €/h
3	Planetenrad 2	Getriebe	48	3,5	800	50 €/h
4	Planetenrad 3	Getriebe	48	3,5	800	50 €/h
5	Hohlrad	Getriebe	48	3,5	800	50 €/h
6	Rillenkugellager	Rillenkugellager, RWDR 1+2, Öl	100	3,5	350	50 €/h
7	Kegelrollenlager	-	-	-	-	-
8	Nadellager 1	Nadellager 1, RWDR 1+2, Öl	100	3,5	300	50 €/h
9	Nadellager 2	Nadellager 2, RWDR 1+2, Öl	100	3,5	300	50 €/h
10	Nadellager 3	Nadellager 3, RWDR 1+2, Öl	100	3,5	300	50 €/h
11	RWDR am Antrieb	RWDR 1+2, Öl	100	3,5	150	50 €/h
12	RWDR am Abtrieb	RWDR 1+2, Öl	100	3,5	-	-
13	Öl	RWDR 1+2, Öl	100	3,5	150	50 €/h
14	Antriebswelle	-	-	-	-	-
15	Abtriebswelle	-	-	-	-	-

Die Angaben aus Tabelle 6.4 beschreiben die Reparaturmaßnahmen sowie die damit verbundenen Kosten. Die Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten sind somit vereinfacht beschrieben. Für die Garantiekostenprognose wird des Weiteren das Ausfallverhalten der kritischen Komponenten in Form von Lebensdauerverteilungen benötigt. Die Ermittlung der Lebensdauerverteilungen kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, siehe Kapitel 6.2.2. Im Folgenden werden fiktive Daten zu Grunde gelegt, die sich beispielsweise aus der Dokumentation von Felddaten ergeben könnten.

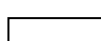
6.3.4 Ermittlung der Lebensdauervertellungen

Die Ermittlung der Lebensdauervertellungen der kritischen Komponenten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf Basis fiktiver Daten. Die Ausfallzeiten, grau hinterlegt, und die Zensierungszeiten sind in Tabelle 6.5 gegeben. Die Laufleistungen der Zensierungen und der Ausfälle sind in Stunden aufgeführt. Auf Grund des Übersetzungsverhältnisses erfahren die Komponenten im System unterschiedliche Belastungen. Die Angabe der Laufleistung in Lastwechseln wäre für die Simulation der Garantiekosten nicht aussagekräftig. Der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer in Lastwechseln und Betriebsstunden, der sich durch das Übersetzungsverhältnis ergibt, ist in Gleichung (6.8) dargestellt. Die Daten in Tabelle 6.5 beschreiben das Ausfallverhalten der Komponenten im System und sind für die Garantiekostenprognose bezüglich der Betriebsstunden des Planetengetriebes angegeben.

Tabelle 6.5: Felddaten der kritischen Komponenten im Planetengetriebe

Ritzel [h]	Planet [h]	Hohlrاد [h]	Lager 1 [h]	Nadellager [h]	RWDR1 [h]	RWDR2 [h]	Öl [h]
1752	1945	2067	2422	4836	6364	4366	3473
2296	2043	2450	3846	10785	8339	8079	5163
2549	2900	3125	5949	10925	9341	5551	5670
2797	3027	3391	4932	11395	10006	10948	5812
3359	3734	3436	5486	15569	10457	14483	6101
3561	3954	3589	5674	16563	10482	12931	6432
3820	4206	3848	5911	16726	10859	15101	6539
3982	4585	4162	6187	16880	11557	16442	6694
4000	5054	4255	7714	18604	11982	16762	6725
4133	5596	4258	8426	18938	12382	17435	7179
4495	5598	4463	6166	20628	12541	21146	8318
4714	5654	4489	9204	20882	12666	18459	9134
4784	5864	4508	10364	22435	13128	18682	9808
4806	6001	4676	11334	26055	13222	21366	9904
4892	6474	4824	16779	26468	13558	22038	9954
5031	6483	4983	12278	26782	14226	23164	9986
5455	6531	5085	12365	27820	14986	23687	10927
5576	6800	5355	14433	28585	16275	23980	11044
5925	7359	5542	14473	30473	16387	24550	11816
6022	7424	5779	15729	30958	17094	25050	12873
6154	7439	6158	16783	32961	17683	25930	15510
6541	7490	6515	17009	34182	18921	26437	17062
6586	7936	6550	18689	34884	19472	26983	18237
7438	8444	6670	17882	34979	19722	27760	18682
7826	8921	6726	18882	38853	20612	30753	20853
8058	9789	6777	19146	38958	22053	32073	22203
8631	10064	7274	30764	39315	22805	35134	24145
9630	10382	7639	22317	48263	23157	35295	28952
9748	11929	7952	23744	49815	25655	36752	33750
11412	16138	9325	28223	50531	30198	36890	38544

 Ausfall

 Zensierung

Es handelt sich hierbei um zensierte Daten ohne verlorene Einheiten. Die Analyse erfolgt mit der Maximum-Likelihood Methode nach [Law83] aus Kapitel 2.3.2, die die ausgefallenen als auch die zensierten Einheiten bei der Analyse berücksichtigt.

In Tabelle 6.6 sind die charakteristische Lebensdauern T und die Formparameter b der zweiparametrischen Weibullverteilung für die kritischen Komponenten angegeben. Die charakteristische Lebensdauer liegt für die verschiedenen Komponenten im Bereich von 11 085 h bis 47 565 h. Dabei bildet die Verzahnung das schwächste Glied des Planetengetriebes. Die Nadellager hingegen besitzen die größte charakteristische Lebensdauer im System bei einem Formparameter größer als zwei, und werden voraussichtlich den geringsten Einfluss auf die Garantiekosten ausüben. Der Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Systemverhalten sowie die daraus resultierenden Garantiekosten werden im Kapitel 6.3.8 untersucht.

Tabelle 6.6: Lebensdauerverteilungen der kritischen Komponenten

k	Komponente:	Weibullparameter	
		T [h]	b
1	Ritzel	11 085	3,49
2	Planetenrad 1	15 138	2,66
3	Planetenrad 2	15 138	2,66
4	Planetenrad 3	15 138	2,66
5	Hohlrad	12 754	2,13
6	Rillenkugellager	32 226	1,86
7	Kegelrollenlager	-	-
8	Nadellager 1	47 565	2,82
9	Nadellager 2	47 565	2,82
10	Nadellager 3	47 565	2,82
11	RWDR am Antrieb	28 247	2,62
12	RWDR am Abtrieb	38 259	2,72
13	Öl	35 935	2,39
14	Antriebswelle	-	-
15	Abtriebswelle	-	-

6.3.5 Berücksichtigung streuender Lebensdauerverteilungen

Die Laufleistung eines Planetengetriebes ist im Feldeinsatz häufig mit einer Unschärfe belastet. Es können keine präzisen Angaben über die Laufleistung der Ausfälle sowie der Zensierungen gemacht werden, da z.B. der genaue Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht bekannt ist und geschätzt werden muss. Durch diese vagen Angaben entstehen ungenaue Daten, die bei der Analyse gesondert betrachtet werden müssen. Im Kapitel 5 wurde eine Vorgehensweise zur Analyse ungenauer Daten vorgestellt. Mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation werden auf Basis der vorgegebenen Streuung verschiedene Stichproben erzeugt. Diese Stichproben werden im folgenden Beispiel mit der Maximum-Likelihood Methode aus Kapitel 2.3.2, analysiert und zwei Weibullverteilungen ermittelt, die die untere sowie obere Grenze ergeben. Die fiktiven Daten aus Kapitel 6.3.4 werden mit einer gleichverteilten Streuung von ± 12 h, ± 36 h, ± 50 h, ± 250 h und ± 500 h versehen. Die Ermittlung der unteren und oberen Grenze erfolgt gemäß Kapitel 5.3. Die Ergebnisse der Analyse sind für die kritischen Komponenten des Planetengetriebes in Tabelle 6.7, Tabelle 6.8 und Tabelle 6.9 aufgeführt. Die Streuung von ± 12 h sowie von ± 36 h bewirkt lediglich eine Änderung ab der zweiten Dezimalstelle des Formparameters b sowie eine geringe Abweichung der charakteristischen Lebensdauer T . Größere Abweichungen sind dagegen bei einer Streuung von ± 250 h erkennbar.

Tabelle 6.7: Streuende Weibullverteilungen der kritischen Komponenten (1)

k	Komponente:	Streuung ± 12 h			
		$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}
1	Ritzel	11 081	3,489	11 088	3,483
2	Planetenrad 1	15 131	2,664	15 150	2,659
3	Planetenrad 2	15 131	2,664	15 150	2,659
4	Planetenrad 3	15 131	2,664	15 150	2,659
5	Hohlrad	12 712	2,136	12 807	2,114
6	Rillenkugellager	32 199	1,861	32 251	1,855
8	Nadellager 1	47 560	2,819	47 574	2,816
9	Nadellager 2	47 560	2,819	47 574	2,816
10	Nadellager 3	47 560	2,819	47 574	2,816
11	RWDR Antrieb	28 237	2,620	28 259	2,615
12	RWDR Abtrieb	38 245	2,723	38 270	2,718
13	Öl	35 919	2,390	35 947	2,386

Tabelle 6.8: Streuende Weibullverteilungen der kritischen Komponenten (2)

<i>k</i>	Komponente:	Streuung ± 36 h				Streuung ± 50 h			
		$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}	$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}
1	Ritzel	11077	3,493	11 094	3,477	11 028	3,532	11 141	3,438
2	Planetenrad 1	15 115	2,670	15 170	2,652	15 064	2,685	15 229	2,633
3	Planetenrad 2	15 115	2,670	15 170	2,652	15 064	2,685	15 229	2,633
4	Planetenrad 3	15 115	2,670	15 170	2,652	15 064	2,685	15 229	2,633
5	Hohlrad	12 626	2,153	12 863	2,100	12 596	2,161	12 917	2,088
6	Rillenkugellager	32 141	1,866	32 307	1,850	32 104	1,869	32 345	1,847
8	Nadellager 1	47 534	2,823	47 596	2,813	47 526	2,827	47 593	2,811
9	Nadellager 2	47 534	2,823	47 596	2,813	47 526	2,827	47 593	2,811
10	Nadellager 3	47 534	2,823	47 596	2,813	47 526	2,827	47 593	2,811
11	RWDR Antrieb	28 207	2,626	28 281	2,690	28 198	2,630	28 304	2,606
12	RWDR Abtrieb	38 227	2,728	38 294	2,713	38 212	2,731	38 301	2,710
13	Öl	35 888	2,394	35 979	2,381	35 863	2,397	35 979	2,379

Tabelle 6.9: Streuende Weibullverteilungen der kritischen Komponenten (3)

<i>k</i>	Komponente:	Streuung ± 250 h				Streuung ± 500 h			
		$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}	$T_{b_{\max}}$ [h]	b_{\max}	$T_{b_{\min}}$ [h]	b_{\min}
1	Ritzel	10 823	3,645	11 350	3,291	10 629	3,945	11 337	3,178
2	Planetenrad 1	15 060	2,754	15 420	2,556	14 592	2,881	15 840	2,425
3	Planetenrad 2	15 060	2,754	15 420	2,556	14 592	2,881	15 840	2,425
4	Planetenrad 3	15 060	2,754	15 420	2,556	14 592	2,881	15 840	2,425
5	Hohlrad	11 978	2,323	13 390	2,001	11 659	2,447	14 752	1,801
6	Rillenkugellager	31 688	1,909	32 892	1,802	31 363	1,949	32 983	1,782
8	Nadellager 1	47 494	2,843	47 804	2,784	47 125	2,886	47 771	2,758
9	Nadellager 2	47 494	2,843	47 804	2,784	47 125	2,886	47 771	2,758
10	Nadellager 3	47 494	2,843	47 804	2,784	47 125	2,886	47 771	2,758
11	RWDR Antrieb	28 025	2,664	28 462	2,567	27 960	2,715	28 684	2,514
12	RWDR Abtrieb	37 989	2,769	38 472	2,678	37 886	2,810	38 706	2,629
13	Öl	35 663	2,423	36 169	2,351	35 484	2,444	36 554	2,304

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Garantiekosten ermittelt, die sich auf Basis scharfer Daten aus dem Feld ergeben. Weiterhin wird vereinfacht die Ersatzteilsituation simuliert, die sich während einer Garantiezeit von zwei Jahren für dieses Beispiel ergibt. Anschließend erfolgt die Untersuchung der Auswirkung ungenauer Felddaten auf die Garantiekosten. Hierbei wird eine obere sowie untere Grenze der Garantiekosten ermittelt, um eine optimistische und pessimistische Prognose zu gewährleisten.

6.3.6 Simulation der Garantiekosten

Die Monte-Carlo Simulation der Garantiekosten erfolgt nach der im Kapitel 5.1 erläuterten Vorgehensweise. Im ersten Schritt werden mit der Monte-Carlo Simulation für die $i = 1(1)k$ kritischen Komponenten aus Tabelle 6.6 Pseudozufallszahlen x_i im Intervall $]0,1[$ erzeugt. Um anschließend daraus Laufzeiten t_i zu generieren, muss die entsprechende Inverse $F_k^{-1}(x_i)$ nach der Inversionsmethode [VDI4008] berechnet werden. Die Berechnung der Lebensdauern der Komponenten des Planetengetriebes erfolgt mit der Inversen der Weibullverteilung. Die Lebensdauererteilungen der Komponenten des Planetengetriebes sind in Form von zweiparametrischen Weibullverteilungen gegeben, somit kann Gleichung (5.3) vereinfacht werden

$$t_i = F_k^{-1}(x_i) = T \cdot (-\ln(1 - x_i))^{\frac{1}{b}}. \quad (6.18)$$

Für den Fall, dass eine oder mehrere Komponenten bereits vorgeschädigt sind, muss die Alterung der jeweiligen Komponente $t_{i\text{alt}}$ unter Berücksichtigung der bedingten Wahrscheinlichkeit in Betracht gezogen werden [Jäg06]. Die bedingte Wahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen eines Ereignisses, hier der Komponentenausfall, unter der Bedingung, dass ein anderes Ereignis, hier die Vorschädigung bzw. Alterung der Komponente, bereits eingetreten ist. Somit ergibt sich die bedingte Verteilungsfunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung zu [Jäg06]

$$x_i = F_k(t_i | t_{i\text{alt}}) = 1 - \frac{1 - F_k(t_i)}{1 - F_k(t_{i\text{alt}})} = 1 - \frac{e^{-\frac{(t_i - t_0)^b}{(T - t_0)^b}}}{e^{-\frac{(t_{i\text{alt}} - t_0)^b}{(T - t_0)^b}}}. \quad (6.19)$$

Die Pseudozufallszahlen x_i wird anschließend in eine weibullverteilte Pseudozufallszahl t_i transformiert [Jäg06]

$$t_i = F_k^{-1}(x_i) = (T - t_0) \cdot \left(-\ln\left((1 - x_i) \cdot \left(1 - F_k(t_{i\text{alt}}) \right) \right) \right)^{\frac{1}{b}} + t_0. \quad (6.20)$$

Die Inverse der zweiparametrischen Weibullverteilung lautet:

$$t_i = F_k^{-1}(x_i) = T \cdot \left(-\ln\left((1-x_i) \cdot (1-F_k(t_{i,alt})) \right) \right)^{\frac{1}{b}}. \quad (6.21)$$

Das Bild 6.12 zeigt die ursprüngliche Verteilungsfunktion $F_k(t)$ einer Komponente, sowie die bedingte Verteilungsfunktion $F_k(t|t_{alt})$, da die Komponente bereits den Zeitpunkt t_{alt} überlebt hat.

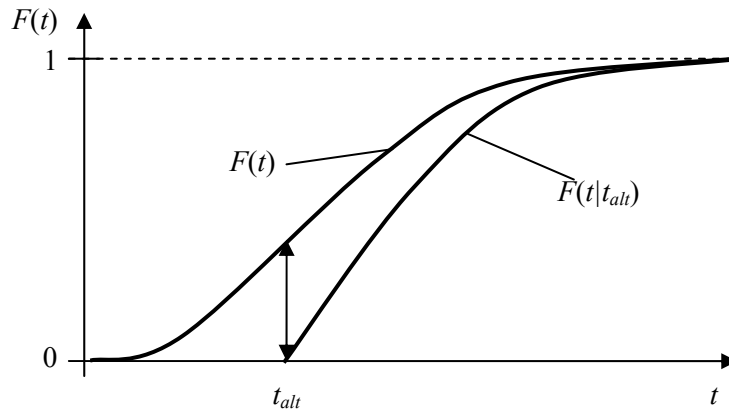


Bild 6.12: bedingte Verteilungsfunktion [Jäg06]

Im Falle eines Verzahnungsschadens muss im nachfolgenden Simulationsschritt $j+1$, wie im Bild 6.9 dargestellt, keine Vorschädigung der Komponenten berücksichtigt werden, da durch den Getriebetausch alle Komponenten erneuert werden. Des Weiteren erfährt das Öl keine Vorschädigung, da es bei jedem beliebigen Komponentenausfall erneuert wird. Es ergibt sich die Inverse der zweiparametrischen Weibullverteilung gemäß Gleichung (6.18). Bei Ausfall der Lager, der Radialwellendichtringe oder des Öls muss die Vorschädigung der nicht erneuerten Komponente im nachfolgenden Simulationsschritt berücksichtigt werden. Die Reparaturmaßnahmen der kritischen Komponenten im Planetengetriebe sind in Tabelle 6.4 aufgeführt.

Die Garantiekostensimulation, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, basiert auf fiktiven Daten. Im Kapitel 6.3.4 erfolgte die Ermittlung der Lebensdauer-Verteilungen der kritischen Komponenten im Planetengetriebe auf Basis fiktiver Felddaten. Im Kapitel 6.3.5 werden die Felddaten mit einer gleichverteilten Streuung von ± 12 h, ± 36 h, ± 50 h, ± 250 h sowie ± 500 h versehen. Die Ergebnisse der Analyse ungenauer Daten sind in Tabelle 6.8 aufgeführt. Im Folgenden werden die Garantiekosten unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten streuenden Lebensdauer-Verteilungen und der definierten Reparaturmaßnahmen mit Hilfe der Monte-Carlo Methode simuliert. Das Modell verfügt über eine eindimensionale Garantie mit der Zeit als Variablen. Die Garantiedauer beträgt zwei Jahre und ist nicht erneuerbar. Dies bedeutet, dass die ersetzte oder reparierte Komponente nicht derselben Garantie wie

die ursprünglich erworbene Komponente unterliegt. Bei der nicht erneuerbaren Garantie erstreckt sich der Deckungszeitraum nur über die verbleibende Garantiezeit der originalen Komponente. Die Laufleistung des Planetengetriebes während einer Garantiezeit von zwei Jahren beträgt 1 213 Stunden. Diese ergibt sich durch einen Zweischichtbetrieb mit einer realen Arbeitszeit von 14 Stunden am Tag, einer effektiven Laufzeit des Getriebes von 10 Minuten pro Stunde und 260 Arbeitstagen im Jahr.

Die Garantiekostensimulation wurde zunächst mit Hilfe der Lebensdauerverteilungen der kritischen Komponenten aus Tabelle 6.6 sowie der Reparaturmaßnahmen und Reparaturkosten aus Tabelle 6.4 durchgeführt. Anschließend wurde die Auswirkung streuender Lebensdauerverteilungen auf die Garantiekosten untersucht. Die Ergebnisse der Simulation können je nach Anzahl an Replikationen sehr stark streuen. Um im Spannungsfeld zwischen Rechengeschwindigkeit und Ergebnisqualität eine Abschätzung durchführen zu können, wurden die Garantiekosten vorerst mit unterschiedlichen Anzahlen an Replikationen simuliert. Das Bild 6.13 zeigt die Garantiekosten in Abhängigkeit der Anzahl an Replikationen.

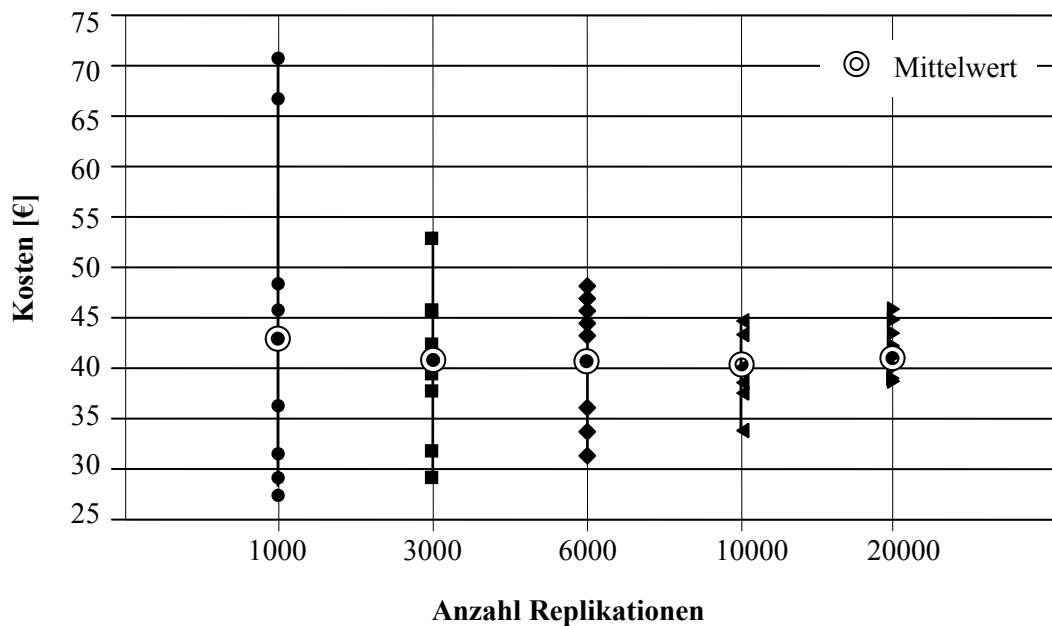


Bild 6.13: Variation der Anzahl an Replikationen

Die Garantiekostensimulationen, die mit 1000 Replikationen durchgeführt wurden, liefern kein eindeutiges Ergebnis, da die Streuung sehr groß ist. Bereits ab 3000 Replikationen nimmt die Ergebnisstreuung sehr stark ab. Gute Ergebnisse können mit 10 000 Replikationen oder mehr erzielt werden. Weitere Simulationen werden mit 20 000 Replikationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation liefern einen Mittelwert der anfallenden Garantiekosten in Höhe von 41,25 € pro ausgeliefertem Getriebe mit einem Verkaufspreis von 800 € je Stück.

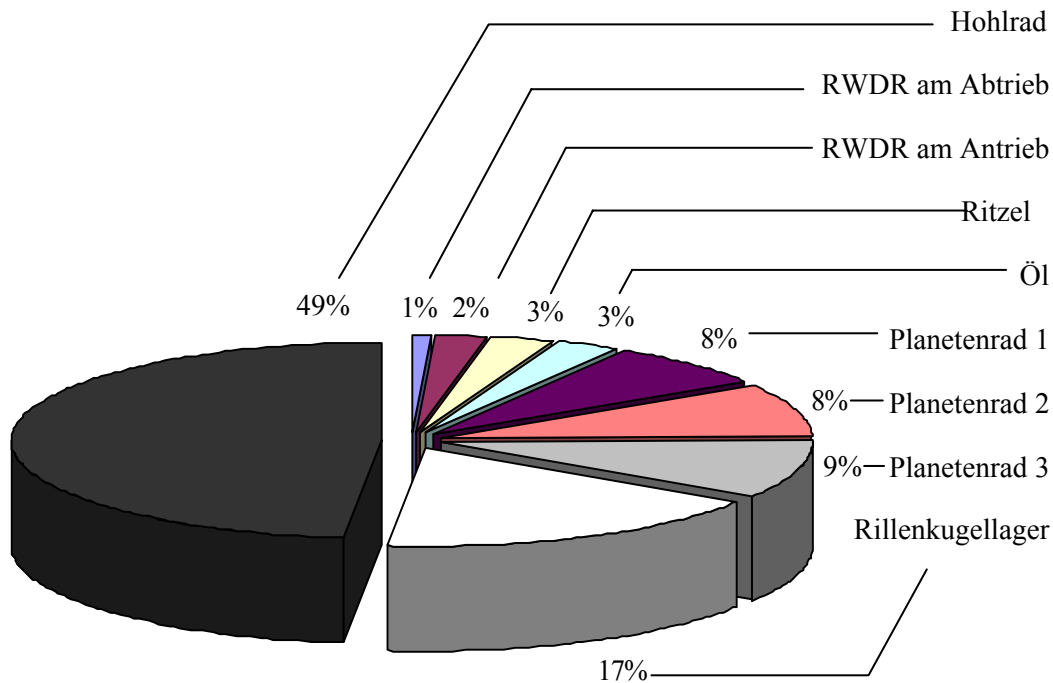


Bild 6.14: Anteile der schadhaften Komponenten

Die Simulation ermöglicht die Analyse der schadhaften Komponenten im Planetengetriebe. Ist eine Reduzierung der Garantiekosten anzustreben, so können die Komponenten mit der größten Ausfallhäufigkeit im System ermittelt werden und gezielt Optimierungsmaßnahmen in der Entwicklung von Nachfolgeprodukten eingeleitet werden. Die Häufigkeit der schadhaften Komponenten ist im Bild 6.14 aufgeführt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt während einer zweijährigen Garantiezeit 1,348 %. 77 % der Ausfälle ereignen sich auf Grund von Verzahnungsschäden, die einen sofortigen Tausch des Planetengetriebes zur Folge haben. Hierbei ist das Hohlrad die schwächste Komponente im System und verursacht 49 % der Ausfälle. Die zweitschwächste Komponente ist das Rillenkugellager, mit einem Anteil von 17 %. Dabei werden das Rillenkugellager, die Radialwellendichtringe und das Öl erneuert. Die Anteile der Planetenräder beträgt je Planetenrad ca. 9 %. Da das Planetengetriebe jedoch drei Planetenräder besitzt, ist dies nicht zu unterschätzen. Die Radialwellendichtringe und das Öl haben einen geringen Einfluss auf das Ausfallverhalten des Planetengetriebes. Sie besitzen einen Anteil von insgesamt nur 6 %. Das Ritzel hat trotz der niedrigsten charakteristischen Lebensdauer im System einen sehr geringen Einfluss auf das Systemverhalten. Der Grund dafür liegt am Formparameter b , der im Gegensatz zu den Formparametern der anderen Komponenten im System einen relativ großen Wert besitzt. Wie bereits im Kapitel 5.4 gezeigt, ist für die Garantiekostenprognose der vordere Bereich der Lebensdauervertelung bis zum Garantieende von Bedeutung, weniger die charakteristische Lebensdauer, die sich bei einer Ausfallwah-

scheinlichkeit von 63,2 % ergibt. Die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit und Verfügbarkeit kann am effektivsten durch die Optimierung des Hohlrades erzielt werden. Des Weiteren kann die Steigerung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit durch die Erhöhung der Lebensdauer der Planetenräder sowie des Rillenkugellagers erzielt werden.

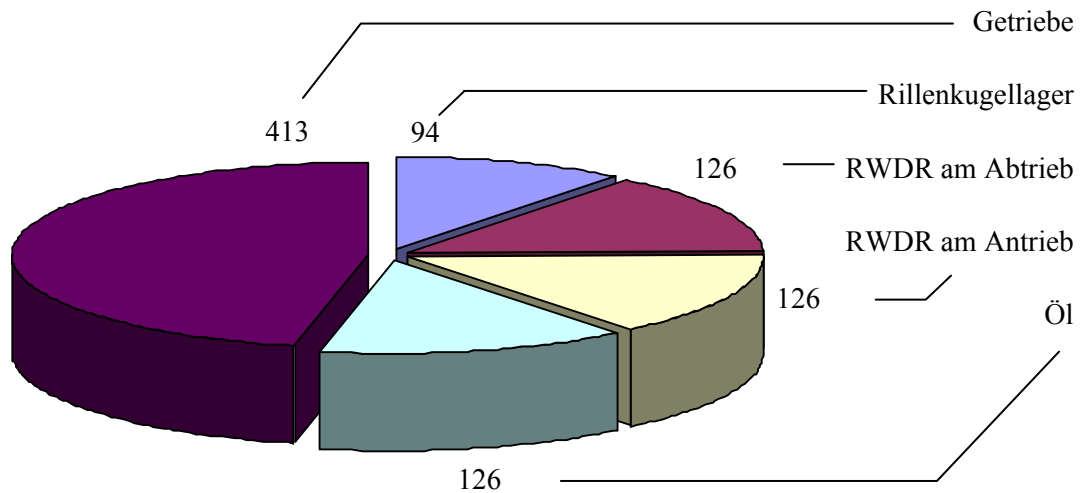


Bild 6.15: Anzahl Ersatzteile für eine Grundgesamtheit von 40 000 Planetengetrieben

Mit Hilfe der Simulationsergebnisse ist ebenfalls eine Abschätzung des Ersatzteilbedarfs möglich. Die Ersatzteile, die bei der Reparatur des Planetengetriebes innerhalb der Garantiezeit von zwei Jahren benötigt werden, sind für eine Grundgesamtheit von 40 000 Planetengetrieben in Bild 6.15 aufgezeigt. Befinden sich 40 000 Planetengetriebe im Feld, so werden insgesamt 1,348 % der Getriebe, somit 539 Stück, innerhalb der Garantiezeit von zwei Jahren auf Grund eines Komponentenausfalls zurückgeliefert. Infolgedessen müssen 413 neue Planetengetriebe, 126 Radialwellendichtringe antriebs- sowie abtriebsseitig sowie 94 Rillenkugellager während der Garantiezeit im Ersatzteillager vorhanden sein.

Die Simulation der Garantiekosten wurde ebenfalls unter Berücksichtigung der streuenden Lebensdauerverteilungen aus Kapitel 6.3.5 durchgeführt, um die Auswirkung ungenauer Felddaten zu analysieren. Es hat sich gezeigt, dass die Streuung von ± 12 h keinen Einfluss und die Streuung von ± 36 h sowie ± 50 h nur einen sehr geringen Einfluss auf die zu erwartenden Garantiekosten für eine zweijährige Garantie haben, siehe Bild 6.16. Eine Streuung von ± 250 h und größer bewirkt in diesem Beispiel sehr große Schwankungen in den Ergebnissen. Die Streuung von ± 500 h liefert eine untere Grenze der Garantiekosten von 26 € und eine obere Grenze von 59 €.

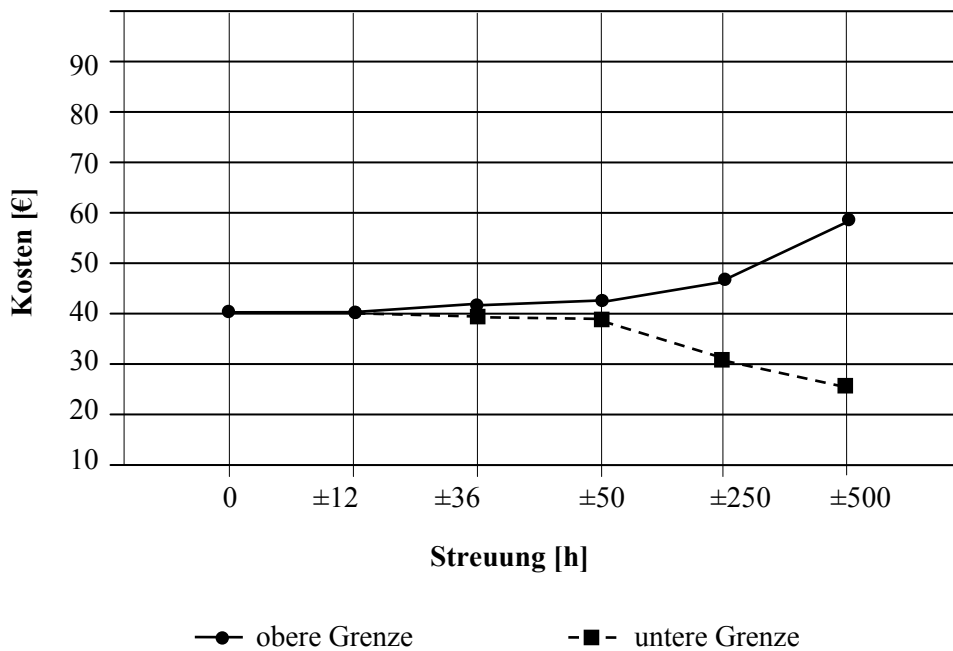


Bild 6.16: Streuung der Kosten bei einer Garantiezeit von zwei Jahren

An Hand der Beispiele hat sich gezeigt, dass eine Vernachlässigung dieser Ungenauigkeit bei der Analyse inakzeptabel ist, da sie zu falschen Prognosen führen kann. Es ist wichtig eine derartige Ungenauigkeit der Daten bei der Analyse mit abzubilden, so dass ein Bereich der zu erwartenden Garantiekosten ermittelt werden kann. Dies ist insbesondere für den Fall einer Garantieverweiterung bedeutend, da sich der Bereich zwischen der oberen sowie der unteren Grenze der Garantiekosten erheblich ausdehnen kann. Im Folgenden Abschnitt werden streuende Garantiekosten für unterschiedliche Garantiedauern und Streuungen der Laufzeiten aufgezeigt.

6.3.7 Garantieverweiterungen

Auf dem heutigen Markt spielt die Produktgarantie eine wichtige Rolle. Sie ist ein Zeichen für Qualität und spiegelt die Anforderung der Gesellschaft an das Produkt wider. Die Garantie ist auch ein Element der Marketingstrategie und kann je nach Kunde und Einsatzgebiet um einen bestimmten Zeitraum erweitert werden. Hierbei muss jedoch im Vorfeld die Wirtschaftlichkeit der Garantieverweiterung durch den Hersteller untersucht werden. Folgende Beispiele zeigen die Auswirkung unterschiedlicher Garantieverweiterungen auf die zu erwartenden Kosten, siehe Bild 6.17. Die Ausfallhäufigkeit des Planetengetriebes ist in Bild 6.18 für verschiedene Garantiezeiträume gegeben.

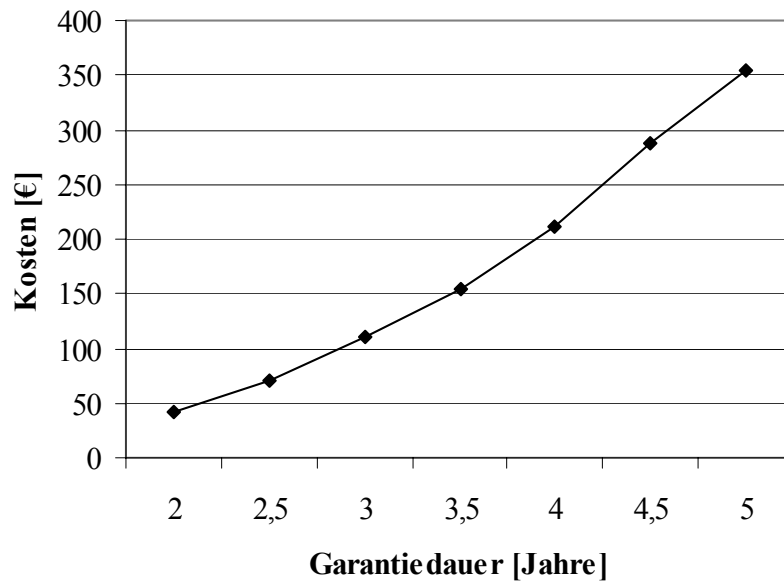


Bild 6.17: Garantiekosten bei Garantieerweiterung

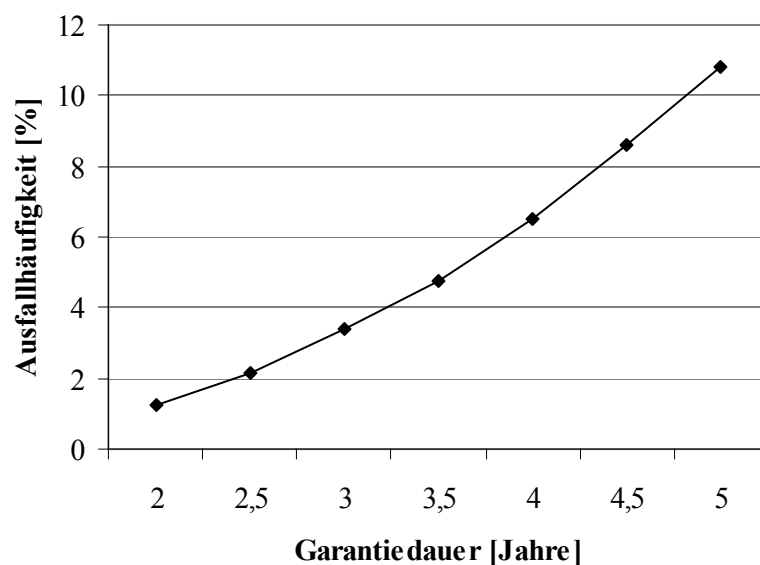


Bild 6.18: Ausfallhäufigkeit des Planetengetriebes bei Garantieerweiterung

Eine Erweiterung der Garantie von zwei auf zweieinhalb Jahre führt bei diesem Beispiel zu einer Erhöhung der Garantiekosten um 73 %. Der Anstieg der Garantiekosten bei einer Garantieerweiterung größer als zweieinhalb Jahre ist im Gegensatz zur Garantieerweiterung von zwei auf zweieinhalb Jahre entsprechend niedriger. Je höher die Garantiedauer, desto niedriger der relative Anstieg der Kosten. Der Anstieg der Ausfallhäufigkeit des Planetengetriebes ist vergleichbar mit dem Anstieg der Kosten über der Garantiedauer.

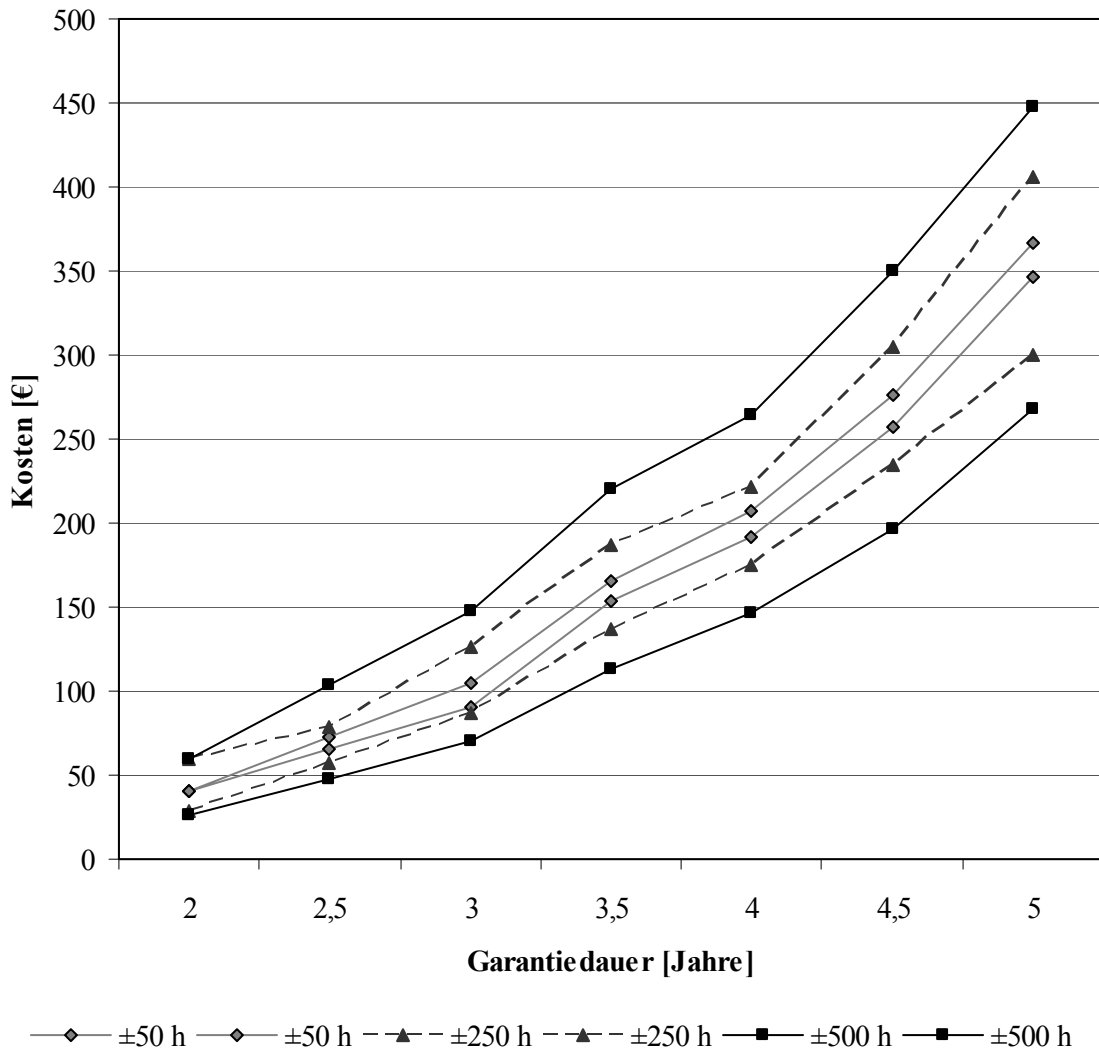


Bild 6.19: Streuung der Garantiekosten

Das Bild 6.19 zeigt den Verlauf der Garantiekosten im Bezug auf unterschiedliche Garantiedauern sowie unterschiedliche Streuungen der Felddaten. Eine Garantieverweigerung von zwei auf vier Jahre führt, bezogen auf eine Datenbasis mit einer Streuung von ± 250 h, zu einer Erhöhung der Garantiekosten um das 2,8 bzw. 5,3-fache. Die Ungenauigkeit, die sich hierbei in der Garantiekostensimulation ergibt ist sehr hoch. Präzisere Angaben können für eine Streuung von ± 50 h gemacht werden. Hier bewegen sich die Garantiekosten für eine Garantieverweigerung auf fünf Jahre auf Grund der Streuung im Bereich von 346 € und 367 €. Die Berücksichtigung der Unschärfe zeigt, dass je nach Streuung der Daten eine große Ungenauigkeit in den Ergebnissen der Garantiekostensimulation entstehen kann. Diese Ungenauigkeit, d.h. der Bereich zwischen der oberen und der unteren Grenze der Garantiekosten, steigt erheblich mit der Erhöhung der Garantiedauer. Eine Vernachlässigung ungenauer Daten bei der Analyse kann je nach Streubereich und Garantiedauer zu falschen Prognosen führen. Die Berücksichtigung dieser Ungenauigkeit ist demnach bei der

Analyse zwingend notwendig. Mit Hilfe der Ergebnisse der Garantiekostensimulation, die die zu erwartenden Kosten im Falle einer Garantieverweiterung unter Berücksichtigung von ungenauen Daten ermitteln kann, ist es für den Hersteller möglich, das notwendige Anfangskapital zu berechnen [Loc91] sowie den Verkaufspreis des Planetengetriebes entsprechend anzugleichen. Die Anpassung des Verkaufspreises kann hierbei optimistischer oder pessimistischer erfolgen, je nachdem ob für die anfallenden Kosten der obere oder der untere Grenzwert verwendet wird.

6.3.8 Kostenreduzierung

Die Reduzierung der Garantiekosten kann durch die Optimierung der Komponenten erfolgen, die die größte Ausfallhäufigkeit im System besitzen. Die Ergebnisse der Simulation haben gezeigt, dass das Hohlrads auch für den Fall einer Garantieverweiterung auf fünf Jahre die schwächste Komponente im System ist.

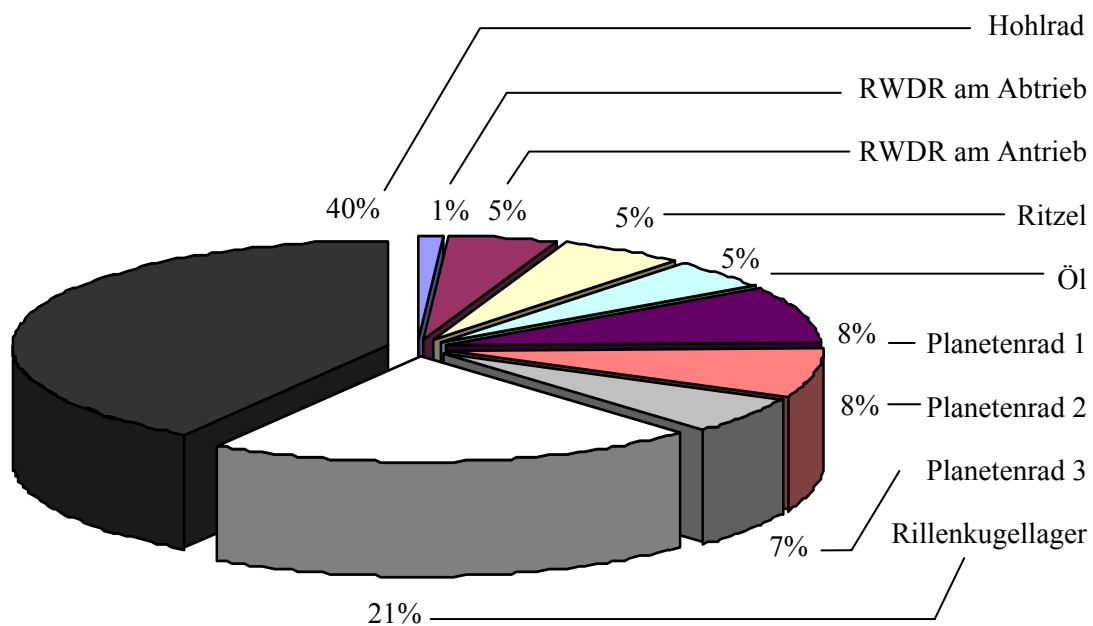


Bild 6.20: Anteile der schadhaften Komponenten nach der Optimierung

Des Weiteren haben das Rillenkugellager sowie die Planetenräder einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten. Die Steigerung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Planetengetriebes sowie die Reduzierung der Garantiekosten werden im Folgenden zunächst durch die Optimierung des Hohlrades sowie des Planetenrades erzielt. Die Lebensdauer des Hohlrades wird um den Faktor 1,5 erhöht. Somit ergibt sich für das Hohlrads eine neue charakteristische Lebensdauer von $T = 19\,131$ h. Der Formparameter b der Weibullverteilung kann als konstant angenommen werden, da

sich das Ausfallverhalten der Komponenten nicht ändert. Die Lebensdauer der Planetenräder wird um den Faktor 1,2 erhöht. Somit ergibt sich die charakteristische Lebensdauer mit $T = 18\,166$ h.

Die Ergebnisse der Simulation haben gezeigt, dass die Kosten durch die Optimierung des Hohlrades sowie der Planetenräder um 37,5 % und die Ausfallwahrscheinlichkeit des Planetengetriebes von 1,348 % auf 0,86 % reduziert werden konnten. Es ergibt sich ein Mittelwert der Garantiekosten von 25,79 € je Getriebe. Das Bild 6.20 zeigt die Anteile der schadhaften Komponenten für das optimierte Planetengetriebe. Der Vergleich der Ergebnisse der Analyse des ursprünglichen und des optimierten Planetengetriebes zeigt, dass der Einfluss des Hohlrades bezüglich des Ausfallverhaltens von 49 % auf 40 % reduziert werden kann. Es ergeben sich nur geringfügige Unterschiede bezüglich der Ausfallhäufigkeit der Planetenräder. Dagegen ist der Einfluss des Rillenkugellagers auf das Systemverhalten deutlich gestiegen.

Die Ergebnisse der Garantiekosten in Abhängigkeit der Garantiedauer im Bild 6.21 zeigen, dass die Garantiekosten verglichen mit denen des ursprünglichen Planetengetriebes auch für eine Garantierweiterung um Rund 37 % reduziert werden konnten.

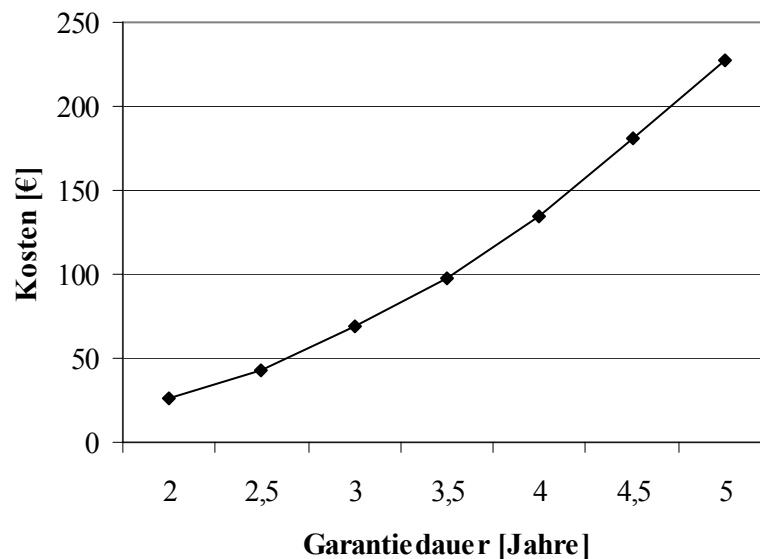


Bild 6.21: Reduzierte Garantiekosten

Eine weitere Optimierung des Planetengetriebes könnte z.B. durch die Steigerung der Zuverlässigkeit des Rillenkugellagers erzielt werden. Im Folgenden wird der Einfluss des Rillenkugellagers auf die Garantiekosten näher untersucht. Die Simulation erfolgt durch die Erhöhung der Lebensdauer des Rillenkugellagers um den Faktor 1,3. Somit ergibt sich eine charakteristische Lebensdauer von $T = 41\,894$ h; der Formparameter bleibt konstant und beträgt gemäß Tabelle 6.6 $b = 1,86$. Die Ausfallwahrscheinlichkeit

des Planetengetriebes konnte lediglich auf 0,74 % und die Kosten auf 22,2 € reduziert werden. Der Vergleich mit der Optimierung durch das Hohlräder sowie der Planetenräder zeigt, dass durch diese Maßnahme keine erheblichen Verbesserungen erzielt werden können. Die Anteile der schadhaften Komponenten im Bild 6.22 zeigen, dass durch die Optimierung des Rillenkugellagers, der Einfluss der Verzahnungskomponenten geringfügig steigt. Die Dichtringe, das Öl sowie die Nadellager besitzen, wie bereits bei den zuvor durchgeführten Simulationen, nur einen sehr geringen oder sogar keinen Einfluss auf das Ausfallverhalten des Planetengetriebes.

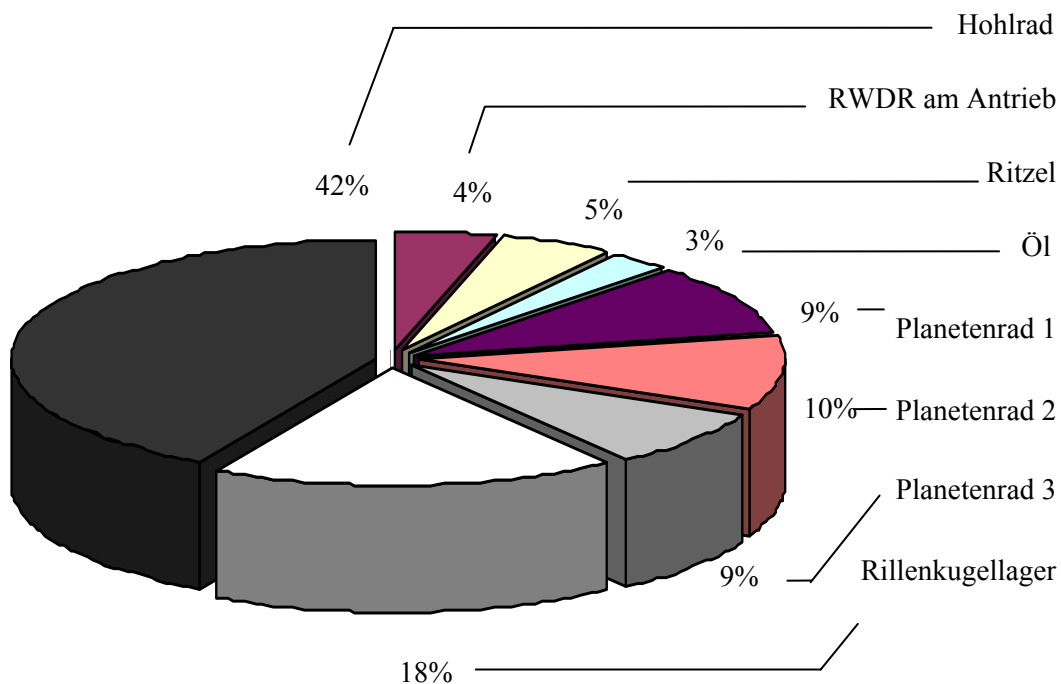


Bild 6.22: Anteile der schadhaften Komponenten nach der Optimierung des Rillenkugellagers

Die Erhöhung der charakteristischen Lebensdauer des Rillenkugellagers auf $T = 48\,339$ h hat gezeigt, dass keine weitere Reduzierung der Garantiekosten erzielt werden kann. Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Planetengetriebes beträgt wie zuvor 0,74 % und der Mittelwert der Garantiekosten Rund 22 €. Die Steigerung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Planetengetriebes sowie die Reduzierung der Garantiekosten können in diesem Beispiel am effektivsten durch die Optimierung des Hohlrades sowie der Planetenräder erfolgen.

6.3.9 Zusammenfassende Bewertung des Garantiekostenprognosemodells

Im Kapitel 6.3 wurde ein Modell vorgestellt, das auf Basis der Monte-Carlo Simulation in der Lage ist, das Systemverhalten eines Planetengetriebes sowie die damit verbundenen Garantiekosten abzubilden. Dabei können Berechnungen bezüglich des Ersatzteilbedarfs durchgeführt werden als auch Untersuchungen zur Kostenentwicklung im Fall einer Garantieerweiterung. Ein weiterer Fokus war die Beurteilung der Ungenauigkeit der Felddaten. Bei diesem Beispiel hat sich gezeigt, dass die Ungenauigkeit der Felddaten je nach Streuung der Daten und Garantiedauer einen erheblichen Einfluss auf die Kosten haben können. Für eine robuste Zuverlässigkeitsanalyse und Garantiekostenprognose ist die Berücksichtigung ungenauer Daten, speziell bei großen Streuungen, unabdingbar.

Das Modell ermöglicht auch eine einfache Schwachstellenanalyse, bei der beispielsweise der Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Systemverhalten analysiert wird und anschließend entsprechende Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden können, die eine effektive Reduzierung der Garantiekosten ermöglichen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein ganzheitliches Zuverlässigkeitsmanagementsystem beinhaltet das Zusammenwirken unterschiedlicher Zuverlässigkeitsmethoden über alle Lebensphasen eines Produkts hinweg. Eine effektive Rückführung von Informationen in die Produktentwicklung muss erfolgen, um frühzeitig Risiken zu erkennen und Maßnahmen ergreifen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein praxisgerechtes Zuverlässigkeitsmanagementsystem aufgebaut, das eine robuste Prognose der Lebensdauer sowie der zu erwartenden Garantiekosten eines reparierbaren Systems ermöglicht. Hierbei wurden qualitative und quantitative Methoden zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess eingesetzt und entsprechend erweitert. Die Vorgehensweise wurde am Beispiel eines Planetengetriebes verdeutlicht.

Die klassische Vorgehensweise bei der Auswertung von Daten aus der Erprobung sowie dem Feld wurde erläutert und um Methoden zur Analyse unvollständiger Daten erweitert. Die Methoden wurden gegenübergestellt und Vorteile bzw. Defizite aufgezeigt. Durch eine Erweiterung der Methoden konnten die Ergebnisse verbessert und robuste Zuverlässigkeitsprognosen trotz unvollständiger Daten erzielt werden. Da Felddaten häufig mit einer Ungenauigkeit behaftet sind, wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die die Berücksichtigung ungenauer Daten bei der Analyse mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation ermöglicht.

Die Methoden zur Analyse unvollständiger, ungenauer Felddaten bilden die Grundlage für die Erstellung des Zuverlässigkeitsmanagementsystems. Zu Beginn der Zuverlässigkeitsanalyse des Beispielsystems Planetengetriebe wurden die kritischen Komponenten ermittelt. Anschließend wurde aufgezeigt, wie die Lebensdauerberechnung der Komponenten gemäß den Grundsätzen der Betriebsfestigkeit erfolgt. Zur Verifizierung der Ergebnisse bedarf es an Lebensdauererprobungen, die sehr zeit- und kostenaufwendig sind. Um den finanziellen Aufwand so gering wie möglich zu halten, werden diese zeitraffend durchgeführt. Die Ermittlung von Raffungsfaktoren und der Korrelation zwischen Feld und Erprobung wurde auf Basis der aus der Literatur bekannten Methoden zusammengestellt. Des Weiteren wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, wie mittels Diagnoseverfahren Lastkollektive ermittelt werden können und folglich die aktuelle Zuverlässigkeit des Planetengetriebes im Feld bestimmt werden kann. Diagnosesysteme können aus Kostengründen nicht immer eingesetzt werden. Zur Bestimmung des Ausfallverhaltens im Feld ist die Dokumentation und Analyse von Felddaten unabdingbar. Die Anpassung und Verbesserung existierender Produkte bei der

Neuentwicklung setzt voraus, dass die aus der Produktnutzung gewonnenen Informationen über das Gebrauchsverhalten und Fehlergeschehen in die Planung zurückgeführt werden. Die Analyse von Felddaten ermöglicht im Gegensatz zur reinen Versuchsdurchführung eine Betrachtung der Frühausfälle, die durch Bedienungsfehler, eine falsche Konfiguration oder auch durch eine inadäquate Betriebsweise verursacht werden. Durch die Nutzung dieser Informationen an vergleichbaren Produkten kann eine optimierte Ursachenanalyse erfolgen und entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden. Des Weiteren kann der Bereich der Frühausfälle erfasst und dargestellt werden. Ein weiteres Thema dieser Arbeit bildet die Untersuchung der zu erwartenden Garantiekosten des Planetengetriebes. In diesem Zusammenhang wurde ein Modell entwickelt, das das Planetengetriebe als reparierbares System behandelt, und mit Hilfe dessen die Abhängigkeiten beim Reparaturverhalten berücksichtigt werden können. Das Ausfall- und Reparaturverhalten wurde mit der zweiparametrischen Weibullverteilung beschrieben. Da es sich hierbei um zeitabhängige Übergangsraten zur Beschreibung des Ausfall- und Reparaturverhaltens handelt sowie Abhängigkeiten zwischen den Komponenten vorhanden sind, wurde das Modell auf Basis der Monte-Carlo Simulation erstellt. Bei der Simulation wurden ungenaue Daten berücksichtigt, die zu streuenden Garantiekosten führten. Unterschiedliche Beispiele verdeutlichen die Auswirkung streuender Eingangsparameter auf die Garantiekosten sowie deren Auswirkung bei einer Garantieverlängerung. Bei der Optimierung einzelner Komponenten im Planetengetriebe hat sich gezeigt, wie eine Reduzierung der Garantiekosten am effektivsten erfolgen kann.

Die mit dieser Arbeit abgeschlossenen Untersuchungen bezüglich der Analyse von Felddaten wurden auf Basis fiktiver Daten untersucht. Weitergehende Untersuchungen sollten die Anwendbarkeit der hier aufgeführten Methoden mit realen Daten absichern. Des Weiteren sollten weiterführende Analysen bezüglich der Methoden, die eine Laufleistungsverteilung zu Grunde legen, durchgeführt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Kostenprognosemodell beschränkt sich auf die zu erwartenden Garantiekosten. Eine Prognose der Lebenszykluskosten sowie deren Minimierung würden die Untersuchungen abrunden.

Literatur

- [Ass99] Assakkaf, I.A.; Ayyub, B. M.: Reliability Based Design for Fatigue of Marine Structures, Third International Workshop on Very Large Floating Structures, VLFS 1999, Honolulu, 1999
- [Ass02] Assakkaf, I.A.; Ayyub, B. M.; Kihl, D. P.; Siev, M. W.: Reliability Based Design Guidelines for Fatigue of Ship Structures, Naval Engineers Journal 114, 2002
- [Ave99] Aven, T.; Jensen, U.: Stochastic Models in Reliability. New York: Springer, 1999
- [Bac03] Backhaus, K.: Industriegütermarketing. 7. Aufl. München: Vahlen, 2003
- [Beb05] Bebbington, M.; Lai, C.-D.; Zitikis, R.: Estimating the Turning Points of Failure Rate and Mean Residual Life Functions. International Symposium on Stochastic Models in Reliability, Safety, Security and Logistics, SMRSSL 2005, College of Engineering, Beer-Sheva, Israel, 2005
- [Bec94] Beckmann, G.; Marx, D.: Instandhaltung von Anlagen – Konzepte, Strategien, Planung. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1994
- [Bei95] Beichelt, F.: Stochastik für Ingenieure: Eine Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Mathematische Statistik. Stuttgart: Teubner, 1995
- [Ber89] Bertsche, B.: Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten. Dissertation, Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre, Universität Stuttgart, 1989
- [Ber04] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Berlin: Springer, 2004
- [Bir91] Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Berlin: Springer, 1991
- [Bli94] Blischke, W. R.; Murthy D. N. P.: Warranty Cost Analysis. New York: Marcel Dekker, 1994

- [Bög80] Böge, A.: Die Mechanik der Planetengetriebe. Unter Mitarb. von Walter Schlemmer. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1980
- [Bor90] Borenius, G.: Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1990
- [Cam98] Campean, I.F.; Osypiw, D.; Popescu, I.: Survival Probability Predictions from Incomplete Field Data. Probabilistic Safety Assessment and Management. New York: Springer, 1998
- [Cam01] Campean, I.F.; Kühn, F.P.; Khan, M.K.: Reliability Analysis of Automotive Field Failure Warranty Data. Proc. ESREL 2001, Torino, Italy, 2001
- [Cer00] Ceron, P.; Summit, R.: The Cost of Extending a New Car Warranty. <http://www.Ise.nus.edu.sg/proceedings/apors2000/fullpaper>, 2000
- [Con90] O'Connor, P. D. T.: Zuverlässigkeitstechnik: Grundlagen und Anwendung. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1990
- [Cot92] Cottin, D.; Puls, E.: Angewandte Betriebsfestigkeit. 2., neubearb. und erw. Aufl. München, Wien: Hanser, 1992
- [Del05a] Delonga, M.; Bertsche B.: Comparison of parametric and nonparametric estimations of lifetime distributions from incomplete warranty data. Proc. ESREL 2005, Gdansk, Polen, 2005
- [Del05b] Delonga, M.; Bertsche B.: Incorporation of reliability management in the design process. Proc. ICED 05 Melbourne, Australia, 2005
- [DGQ11-4] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.): DGQ-Schrift 11-04: Begriffe zum Qualitätsmanagement. Berlin: Beuth, 1995.
- [DIN31051] DIN31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth, Entwurf, 2001
- [Dub00] Dubi, A.: Monte-Carlo Applications in System Engineering. New York: Wiley, 2000
- [Dub86] Dubi, A.: Monte-Carlo Calculations for Nuclear Reactor. Handbook of Nuclear Reactor Calculations, CRC Press, 1986

- [Dub96] Dubi, A.; Gurvitz, N.: Aging, Availability and Maintenance Models in the System Transport Equations. Department of Nuclear Engineering, Ben Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, 1996
- [Dub97] Beitz, W.; Grote, K.-H.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. völlig Neubearb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997
- [Dub99] Dubi, A.: Monte-Carlo Applications in System Engineering. New York: Wiley, 1999
- [Ebn96] Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten. Dissertation, Technische Universität München. Berlin: Springer, 1996
- [Eck77] Eckel, G.: Bestimmung des Anfangsverlaufs der Zuverlässigkeitsfunktion von Automobilteilen. Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrg. 22, Heft 9, 1977, S. 206–208
- [Edl01] Edler, A.: Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2001
- [Fri01] Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001
- [Gov82] Govil, K.K.; Aggarwal, K.K.: Modeling Early, Chance and Wearout Failures by a Single Failure Rate Equation. Reliability Engineering Vol. 3, No. 5, 1982
- [Hah82] Hahn, G. D.: Pitfalls and Practical Considerations in Product Life Analysis-Part II: Mixtures of Product Population and More General Models. Journal of Quality Technology Vol. 14, No. 4, 1982
- [Hai02] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2002
- [Här81] Härtler, G.: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin: Springer, 1981
- [Het03] Hettich, R.: Verfahren für Zuverlässigkeitsprognosen mittels Garantiedaten. Studienarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2003

- [Hjo80] Hjorth, U.: A Reliability Distribution with Increasing, Decreasing, Constant and Bath-Tub Shaped Failure Rate Equation. *Technometrics* Vol. 22, No. 1, 1980
- [IEC60605] IEC 60605-6 Ed.3.0: Equipment reliability testing – Part 6, Tests for validity of the constant failure rate or constant failure intensity assumptions, 2006
- [Jäg06] Jäger, P.; Trost, M.; Bertsche, B.: A New Approach to Evaluate The Worthiness of Repair. *Proc. RAMS 2006*, Newport Beach, USA, 2006
- [Jia97] Jiang, R.; Murthy, D.: Two Sectional Models Involving Three Weibull Distributions. *Quality and Reliability Engineering International* Vol. 13, 1997
- [Joa98] Joan Hu, X.; Lawless, J.F.; Suzuki, K.: Nonparametric Estimation of a Lifetime Distribution when Censoring Times are Missing, *Technometrics* Vol. 40, No.1, 1998
- [Joh64] Johnson, L. G.: *The Statistical Treatment of Fatigue Experiments*. Amsterdam, London, New York: Elsevier publishing Company, 1964
- [Kal80] Kalbfleisch, J.D.; Prentice, R.L.: *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. New York: Wiley, 1980
- [Kal88] Kalbfleisch, J.D.; Lawless J.F.: Estimation of Reliability in Field-Performance Studies. *Technometrics* 30/4, 1988
- [Kap58] Kaplan, E.L.; Meier, P.: Nonparametric Estimation from Incomplete Observation. *Journal of American Statistical Association* 53, 1958
- [Kec71] Kececioglu, D.; Starsman, R. R.: Reliability Life Testing of Mixed Early, Chance and Wearout Subpopulations. *Transaction of the 25th Annual ASQC Technical Conference*, Chicago, 1971
- [Kim91] Kim, J. S.; Proschan, F.: Piecewise Exponential Estimator of Survivor Function. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 40, No. 2, 1991
- [Kis96] Kistner, W.: FMEA noch besser anwenden. *Qualität und Zuverlässigkeit*, Jahrg. 41, Heft 2, 1996, S. 827–830
- [Kle04] Kleyner, A.; Sandborn, P.; Boyle, J.: Minimization of Life Cycle Costs Through Optimization of the Validation Program - A Test Sample Size and Warranty Cost Approach. *Proc. RAMS 2004*, Los Angeles, USA, 2004

- [Kro01] Krolo, A.; Fritz, A.; Bertsche, B.: Correlation Between the Failure Behavior of Automotive Components Under Taxi & Field Operating Conditions. Proc. RAMS 2001, Philadelphia, USA, 2001
- [Kro04] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2004
- [Küh01] Kühlmeyer, M.: Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure. Berlin: Springer, 2001
- [Lai01] Lai, C.D.; Xie, M.; Murthy, D. N. P.: Bathtub shaped failure rate life distributions. Handbook of Statistics, New York, 2001
- [Las02] Lasić, A.: Parameter Calibration und Simulation von Pfaden für das stochastic-volatility jump diffusion Optionsbewertungsmodell von Bakshi. Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2002
- [Law82] Lawless, J. F.: Statistical models and methods for lifetime data. New York: Wiley, 1982
- [Law83] Lawless, J.F.: Statistical Methods in Reliability with Discussion. Technometrics 25/4, 1983
- [Loc91] Locarek, H.: Finanzmathematik. Lehr- und Übungsbuch. München: Oldenbourg, 1991
- [Lor98] Lorenz, P.: ASIM-Fachtagung Plenumsvortrag: Simulationstechnik 1998: Chancen und Herausforderungen. Plenumsvortrag, 8. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 1998
- [Luk99] Luko, S. N.: A Review of the Weibull Distribution and Selected Engineering Applications. SAE-Paper 1999-01-2859, 1999
- [Mai76] Maibaum, G.: Wahrscheinlichkeitstheorie und mathematische Statistik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, 1976
- [Mai05a] Maisch, M.; Bertsche, B.: An Approach for Online Reliability Evaluation and Prediction of Mechanical Transmission Components. Proc. ESREL 2005, Gdansk, Polen, 2005
- [Mai05b] Maisch, M.; Bertsche, B.: Analysis of the Staircase Method Considering the Bayes Theorem. Proc. RAMS 2005, Alexandria, USA, 2005

- [Mar02] Marzeguerra, M.; Zio, E.: Basics of the Monte Carlo Method with Application to System Reliability. Hagen: LiLoLe Verlag, 2002
- [Mat98] Matsumoto, M.; Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations: Special Issue on Uniform Random Number Generation, Vol. 8, No. 1, 1998
- [Mee98] Meeker, W. Q.; Escobar, L. A.: Statistical Methods for Reliability Data. New York: Wiley, 1998
- [Mel05] Meltzer, G.; Nguyen, P. D.: Eine informative visuelle Darstellungsform für die Ergebnisse der Verzahnungsdiagnostik. Dresdner Maschinenelemente Kolloquium 2005. Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Technische Universität Dresden, 2005
- [Mes86] Messerschmidt-Bölkow-Blohm: Technische Zuverlässigkeit. Problematik, Mathematische Grundlagen, Untersuchungsmethoden, Anwendungen. 3. neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 1986
- [Met49] Metropolis, N.; Ulam, S.: The Monte-Carlo method. Journal of the American Statistical Association Vol. 44, 1949, S. 335-341
- [Mey00] Meyna, A.; Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für Kfz-Komponenten bei unvollständigen Daten. Automobiltechnische Zeitschrift, Heft 12, 2000
- [Mey03] Meyer, M.: Methoden zur Analyse von Garantiedaten für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprognose von Komponenten und Baugruppen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Universität Wuppertal, 2003
- [MIL95] Department of Defence Washington DC 20301: Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment, MIL-HDBK-217-F notice 2, 1995
- [Mül02] Müller, P.; Ruppert, H.; Bertsche, B.: Auxiliary Means for Specific Prioritisation and a Practical Approach of the FMECA for Automotive Systems. Proc. ESREL 2002, Lyon, France, 2002
- [Neb06] Nebel, S.: Entwicklung eines Monte-Carlo Simulationsprogramms zur Analyse von verbundenen Systemmodellen. Diplomarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2006

- [Nel82] Nelson, W.: Applied Life Data Analysis. New York: Wiley, 1982
- [NPR85] Rome Air Development Center Griffiss AFB NY 13441-5700, Nonelectronic Parts Reliability Data, NPRD-3, 1985
- [NSW94] Naval Surface Warfare Center – Carderock, NSWC, Division Handbook of reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, 1994
- [Pau98] Pauli, B.; Meyna, A.: Ein praxisorientierter Ansatz zur Bestimmung von kumulierten und durchschnittlichen Ausfallraten. Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrg. 100, 1998
- [Poz01] Pozsgai, P.: Konzeption eines umfassenden Systemmodells zur Verfügbarkeitsanalyse. Diplomarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001
- [Poz06] Pozsgai, P.: Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2004
- [Sac99] Sachs, L.: Angewandte Statistik: Anwendung stochastischer Methoden. 9. überarb. Aufl. Berlin: Springer, 1999
- [Sch03] Schüppenhauer, L.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2003
- [Sch04] Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin: Springer, 2004
- [Sob85] Sobol, I. M.: Die Monte-Carlo Methode. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 1985
- [Suz85a] Suzuki, K.: Estimation of Lifetime Parameters from Incomplete Field Data. Technometrics Vol. 27, No. 3, 1985
- [Suz85b] Suzuki, K.: Nonparametric Estimation of Lifetime Distribution from a Record of Failures and Follow-ups. Journal of American Statistical Association Vol. 80, 1985.
- [VDA3.2] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Teil 2, 3. überarb. und erw. Aufl., Frankfurt: VDA-QMC, 2000

- [VDI4001] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4001 Blatt 2: Grundbegriffe zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit. Düsseldorf, 1986
- [VDI4008] VDI-Richtlinie 4008, Blatt 6: Monte-Carlo-Simulation. Berlin: Beuth, 1985
- [Vog02] Vogt, M.; Neu, H. R.: Auswertungsverfahren zur Korrelation von Felddaten und Erprobungsbedingungen von Kfz-Komponenten. Zuverlässige Produkte: Basis für hohe Kundenzufriedenheit, VDI-Berichte 1713, Düsseldorf: VDI, 2002, S. 161-174
- [Voß02] Voß, W.: Taschenbuch der Statistik. Leipzig: Fachbuchverlag, München: Hanser, 2000
- [Wal98] Walz, A.: Maple V. Rechnen und Programmieren mit Release 4. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1998
- [Web92] Weber, H.: Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. 3. Aufl., Stuttgart: Teubner, 1992
- [Wei51] Weibull, W.: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, S. 293 - 297
- [Wol05] Wolters, K.; Söffker, D.: An approach to affect the probability of failure by changed operation modes. *Proc. ESREL 2005*, Gdansk, Polen, 2005
- [Xie95] Xie, M.; Lai, C.D.: Reliability analysis using additive Weibull model with bathtub-shape failure rate function. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 52, 1995
- [Zuc06] Zucchini, W.; Böker, F.; Stadie, A.: Statistik III. Institut für Statistik und Ökonometrie, Georg-August-Universität Göttingen, 2006

Lebenslauf

Melani Delonga, geb. Krolo

geboren am 04. März 1976 in Bruchsal

Schulbildung

1982 – 1986	Grundschule, Calw
1986 – 1992	Gymnasium, Calw
1993 – 1994	High School, Wisconsin, USA
1992 – 1996	Gymnasium, Nagold

Studium

10/96 – 04/02	Maschinenbau an der Universität Stuttgart Hauptfächer: - Konstruktionstechnik - Technologiemanagement Abschluss: Dipl.-Ing.
---------------	---

Beruf

05/02 – 04/06	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMA
seit 05/06	Zuverlässigkeitsingenieurin im Bereich Diesel Systems bei der Robert Bosch GmbH, Stuttgart

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 Radialwellendichtungen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzählter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines 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, Gegenlauffläche 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