

Thomas Herzig

Anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests

D 93
ISBN 978-3-948308-03-2

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

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

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

Anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests

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

Vorgelegt von

Thomas Herzig

aus Aalen

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick
Vorsitz:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Remlinger
Tag der mündlichen Prüfung:	14.10.2021

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2021

Für R

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart. Sie wurde selbstständig und mit keinen anderen, als den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln erstellt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, welcher mir diese Arbeit ermöglichte. Wissenschaftliche Freiheiten, ein sehr angenehmes Institutsklima und das große entgegengebrachte Vertrauen waren die von ihm gelegten Grundsteine für die tägliche Institutsarbeit, was so nicht selbstverständlich ist.

Ganz herzlichen Dank auch an Herrn Prof. Hannes Hick, für die Übernahme des Mitberichts, die Anregungen und den fachlichen Austausch.

Außerdem auch ein herzliches Dankeschön an Prof. Wolfram Remlinger für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bedanken möchte ich mich zudem beim Bereichsleiter Zuverlässigkeitstechnik, Dr.-Ing. Martin Dazer, dessen Dissertation und Begeisterung für die Testplanung den fachlichen Grundstein für meine Arbeit gelegt hat. Seine stetige Förderung und Unterstützung waren unverzichtbar.

Mein herzlicher Dank gilt allen aktiven und ehemaligen Mitarbeiter*innen des Instituts für Maschinenelemente für die Kollegialität und Hilfsbereitschaft. Auch danke ich allen Studienarbeiter*innen und Hiwis, die mich bei der Bearbeitung der verschiedenen Themenfelder unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	IX
Kurzfassung	XII
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielkonflikt der heutigen Produktentwicklung	1
1.2 Übergeordnete Ziele der Arbeit	3
1.3 Allgemeiner Aufbau der Arbeit.....	3
2 Stand der Technik und Forschung	5
2.1 Begriffe und Definitionen.....	5
2.1.1 Grundbegriffe der Zuverlässigkeitstechnik	5
2.1.2 Grundbegriffe zur Lebensdauermodellierung	6
2.2 Auswertung von Lebensdauerdaten.....	6
2.3 Quantitative Methoden zur Parameterschätzung	11
2.4 Arten von Zuverlässigkeitstests.....	12
2.4.1 Success-Run-Test.....	13
2.4.2 End-of-Life-Test	13
2.5 Beschleunigte Tests	14
2.5.1 Grundlagen beschleunigter Tests.....	14
2.5.2 Stand der Forschung der Planung beschleunigter Lebensdauertests	15
2.5.3 Optimalität.....	18
2.5.4 Wöhlerversuch und Wöhlerdiagramm	21
2.5.5 Lebensdauermodelle	24
2.5.6 Auswerteverfahren von Wöhlerversuchen	25
2.6 Probability of Test Success.....	25
2.6.1 Konzept der Probability of Test Success	26

2.6.2	Stand der Forschung Probability of Test Success	27
2.7	Numerische Verfahren zur Simulation und Rechenzeitverkürzung...	28
2.7.1	Monte-Carlo-Simulation	28
2.7.2	Latin-Hypercube-Sampling.....	29
2.7.3	Neuronale Netze.....	29
2.8	Methoden der anforderungsgerechten Produktauslegung.....	32
2.8.1	Design for X.....	32
2.8.2	Zuverlässigkeitsbasierte Optimierung	35
3	Konkretisierung der Ziele der Arbeit	37
3.1	Bewertung des Stands der Forschung und Technik.....	37
3.2	Ziele der Arbeit und abgeleitete Lösungsansätze	41
3.3	Vorgehensweise	43
4	Planung beschleunigter Zuverlässigkeitstests mit Probability of Test Success	45
4.1	Begriffserklärungen zur Testplanung mit Probability of Test Success	45
4.1.1	Begriffserklärungen: Zuverlässigkeitstestplanung	46
4.1.2	Begriffserklärungen: erweitertes Konzept.....	48
4.2	Probability of Test Success für beschleunigte Tests.....	50
4.2.1	Erweitertes Konzept der Probability of Test Success	50
4.2.2	Randbedingungen des Konzepts.....	60
4.3	Optimalität und Effizienz	63
4.3.1	Optimalitätskriterien in der Zuverlässigkeitstestplanung mit Probability of Test Success.....	63
4.3.2	Optimalitätskriterien	66
4.3.3	Anwendung der Optimalitätskriterien.....	71
4.4	Parameterstudien zum erweiterten Konzept der Probability of Test Success	83
4.4.1	Variation des Vorwissens	84
4.4.2	Variation des erweiterten Zuverlässigkeitsziels	88
4.4.3	Variation einzelner Parameter der Testkonfiguration	93
4.5	Ansätze zur Reduktion der Simulationsdauer.....	103
4.5.1	Reduktion der Simulationsdauer durch ein Konvergenzkriterium	104
4.5.2	Reduktion der Simulationsdauer durch Implementierung eines neuronalen Netzes	105

4.6 Handlungsempfehlungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests	113
5 Anforderungsgerechte Produktauslegung mit Probability of Test Success	117
5.1 Anforderungsgerechte Produktauslegung.....	117
5.2 Randbedingungen der Anwendung der Vorgehensweise	119
5.3 Anwendungen der anforderungsgerechten Produktauslegung	120
5.3.1 Einfaches Beispiel „Wählerprobe“	121
5.3.2 Anwendungsbeispiel „Zahnradbreite“	136
5.4 Zusammenfassung und Fazit	141
6 Zusammenfassung & Ausblick	143
Literaturverzeichnis	147
Lebenslauf	155

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

b3EoL	beschleunigter End-of-Life-Test mit drei Lastniveaus
bEoL	beschleunigter End-of-Life-Test
bSRT	beschleunigter Success-Run-Test
bxEoL	beschleunigter End-of-Life-Test mit x Lastniveaus
bzEoL	beschleunigter zensierter End-of-Life-Test
BR	Bayesian Regularization
DfR	Design for Reliability
DfX	Design for X
EoL	End-of-Life-Test
KNN	Künstliches neuronales Netz
L	Likelihood-Funktion
LHS	Latin-Hypercube-Sampling
LM	Levenberg-Marquardt-Algorithmus
logL	Log-Likelihood-Funktion
LSM	Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. least squares method)
MCS	Anzahl Monte-Carlo-Simulation
MLE	Maximum-Likelihood-Schätzung (engl. maximum likelihood estimation)
MSE	mittlerer quadratischer prozentualer Fehler (engl. mean squared error)
MTTF	Mean Time To Failure
PSV	Perlenschnurverfahren
RBDO	zuverlässigkeitsbasierte Optimierung (engl. reliability-based design optimization)

X Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

RED	Risk-In-Early-Design Methode
ReLU	Rectified Linear Unit-Aktivierungsfunktion
SRT	Success-Run-Test
VB	Vertrauensbereich
zEoL	zensierter End-of-Life-Test

Indizes

0	Feldlastniveau
cens	zensiertes beschleunigtes Lastniveau
dem	nachgewiesen (engl. demonstrated)
H	hohes beschleunigtes Lastniveau
L	niedriges beschleunigtes Lastniveau
M	mittleres beschleunigtes Lastniveau
p	Prüflastniveau
q	Quantil
s	Feldniveau
b	beschleunigt
z	zensiert

Formelzeichen

b	Weibull-Formparameter
b_{gem}	gemeinsame Zahnradbreite
d	Wöhlerprobendurchmesser
f	Frequenz
$f(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
F	Fisher-Informationsmatrix
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit
F_{nom}	Feldbelastung (Kraftamplitude)
k	Wöhlerexponent
k_h	Herstellungskosten

k_m	Materialkosten [€ / mm ³]
k_n	Prüflingskosten
k_t	Testzeitkosten
$k_{tot,max}$	Erprobungskostenbudget
λ	Eigenwert
load	Lastniveau
n	Prüflingszahl
N	Lastwechselzahl Wöhler
N_D	Ecklastschwingspielzahl
n_v	Anzahl verkaufter Einheiten
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit
P_{ts}	Probability of Test Success
φ	Aktivierungsfunktion (auch: Transferfunktion)
R	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß
$R(t)$	Zuverlässigkeit
$r_{Wöhler}$	Raffungsfaktor des Wöhler-Lebensdauermodells
σ	Bauteilspannung
σ_D	Bauteilspannung ab der Dauerfestigkeit besteht
t	Zeit
t_0	ausfallfreie Zeit
t_{dem}	Nachweiszeitpunkt (engl. demonstrated lifetime)
$t_{dem,min}$	geforderte Nachweiszeitpunkt
$t_{tot,max}$	Erprobungsdauerbudget
T	charakteristische Lebensdauer
θ	zu schätzender Parameter
z	inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Kurzfassung

Zentraler Kernpunkt des Zielkonflikts in der heutigen Produktentwicklung sind die immer weiter steigenden Kundenanforderungen bei einer gleichzeitig geforderten Reduktion der Entwicklungskosten. Beschleunigte Lebensdauertests sind daher für die Erprobung und den Zuverlässigkeitsnachweis unverzichtbar.

Die vorliegende Arbeit betrachtet die *Probability of Test Success* als entscheidenden Parameter des erweiterten Zuverlässigkeitsziels, bei dem die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Zuverlässigkeitsnachweises durch Planung effizienter Zuverlässigkeitstests maximiert werden kann. Damit ist es möglich, die Grenzen des Zuverlässigkeitsnachweises und damit auch die Grenzen der Auslegung unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu finden und Leichtbauanwendungen kostenoptimal auszulegen und gleichzeitig zuverlässigkeitstechnisch abzusichern.

Die praxisrelevanten beschleunigten *End-of-Life-Tests* wurden in dieser Arbeit in das Konzept der *Probability of Test Success* integriert, um Handlungsempfehlungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests abzuleiten. Diese umfassen Empfehlungen zur Wahl und Verteilung der Prüflinge und der Lage der beschleunigten Lastniveaus, zur Berücksichtigung von beschleunigten *Success-Run-Tests* sowie zu Zensierungsstrategien und zusätzlichen beschleunigten Lastniveaus.

Darüber hinaus wurde eine Einordnung des erweiterten Konzepts in die Produktauslegung vorgenommen. Für die untersuchten Anwendungen konnte gezeigt werden, dass das erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* und die Vorgehensweise zur anforderungsgerechten Produktauslegung das Potenzial besitzt, die Zuverlässigkeitstestplanung bereits in der Produktauslegung zu berücksichtigen, die minimal mögliche Dimensionierung zu finden und dabei die Gesamtkosten zu reduzieren. Dieses Potenzial besteht insbesondere für Leichtbauanwendungen, bei welchen minimale Dimensionierung zentral ist, die Erfüllung der Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen jedoch gewährleistet sein muss. Die Nachweisbarkeit eines Zuverlässigkeitsziels unter Berücksichtigung der *Probability of Test Success* kann mit dem erweiterten Konzept nun erstmals auch für die praxisrelevanten beschleunigten *End-of-Life*-Erprobungsstrategien berücksichtigt und quantifiziert werden.

Abstract

Requirements-driven product design by planning of efficient accelerated reliability tests

The key points of the conflict in today's product development are the ever-increasing customer requirements with the simultaneous demand for a reduction of the development costs. Accelerated lifetime tests are therefore indispensable for testing and reliability demonstration.

This thesis considers the *Probability of Test Success* as a crucial parameter of the extended reliability goal, where the probability of a successful reliability demonstration can be maximized by planning efficient reliability tests. This makes it possible to find the limits of the reliability demonstration and thus also the limits of the reduction of the dimensioning of a component, taking into account the boundary conditions, and to design lightweight applications in a cost-optimized manner while ensuring reliability at the same time.

In this work, the practice-relevant accelerated end-of-life tests were integrated into the concept of the *Probability of Test Success* in order to derive recommendations for the general planning of efficient reliability tests. These include recommendations on the choice and distribution of tested specimen and the location of accelerated load levels, on the consideration of accelerated success-run tests as well as on censoring strategies and additional accelerated load levels.

In addition, the extended concept was integrated into the product design. For the investigated applications, it was shown that the extended concept of *Probability of Test Success* and the procedure for test-oriented product design have the potential to take reliability test planning into account in the early product design stage, to find the minimum possible dimensioning, and to reduce overall costs. This potential exists especially for lightweight applications, where minimal dimensioning is central, but the fulfillment of reliability and lifetime requirements must be guaranteed. With the extended concept, the verifiability of a reliability target under consideration of the *Probability of Test Success* can now for the first time also be considered and quantified for the practice-relevant accelerated end-of-life testing strategies.

1 Einleitung

Neue Produkte müssen auf dem hart umkämpften Markt drei Anforderungen erfüllen:

- Besser - sie müssen eine höhere Funktionalität, neue Innovationen, höhere Leistung, bessere Qualität und höhere Zuverlässigkeit aufweisen.
- Schneller - sie müssen schneller auf den Markt kommen
- Billiger - sie müssen niedrigere Kosten für die Entwickler/Hersteller und Preise für die Kunden haben.

Diese drei Anforderungen schließen sich zunächst aus, da es sehr schwierig ist, bessere Produkte schneller und billiger anzubieten. Insbesondere hohe Lebensdaueranforderungen, welche in einer hohen geforderten Zuverlässigkeit resultieren, sind mit niedrigen Kosten und verkürzten Entwicklungsphasen nur schwer zu realisieren.

1.1 Zielkonflikt der heutigen Produktentwicklung

Zentraler Kernpunkt des Zielkonflikts in der heutigen Produktentwicklung sind die immer weiter steigenden Kundenanforderungen bei einer gleichzeitig geforderten Reduktion der Entwicklungskosten, was primär durch kurze Entwicklungszyklen erreicht werden soll. Kurze Entwicklungszyklen sind wiederum mit verkürzten Erprobungsphasen zur Validierung verknüpft, die wenig Raum für Iterationsschleifen lassen.

In der Vergangenheit waren mehrjährige Entwicklungszyklen üblich, in denen die Kosten durch Anpassungen, Verbesserung der Effizienz und der Zuverlässigkeit und der Fertigung in Iterationsschleifen gesenkt werden konnten. In der Praxis und Wissenschaft hat sich daraus eine im Entwicklungsprozess spät stattfindende Erprobung und Absicherung etabliert. Schlägt dieser späte Zuverlässigkeitsnachweis fehl, sind iterative Entwicklungsschleifen notwendig, welche aufwendig sind und meist in größerer Entwicklungszeit oder in hohen Garantie- und Kulanzkosten münden. Das spät im Entwicklungsprozess noch vorhandene Potenzial für Änderungen im Produkt besteht zudem hauptsächlich in der Auslegung der kritischen Ausfallmechanismen. Zum Bestehen der Nachweistests werden in der Praxis meist Überdimensionierungen der

Produkte vorgenommen, welche zum Nachweis der Einhaltung der Lebensdaueranforderungen führen, jedoch mit höherem Materialeinsatz und Testaufwand verbunden sind.

Heutzutage sind diese Entwicklungszyklen, aber meist auch die Gebrauchsdauer von Produkten, stark verkürzt. Dadurch können nur wenige Änderungen während des Entwicklungszyklus vorgenommen werden, wobei Produkte ihre volle Funktionalität und Leistungsfähigkeit bei hoher Qualität und Zuverlässigkeit direkt von Beginn an zeigen müssen, um am Markt zu bestehen.

Die Erprobung ist für den Nachweis der Zuverlässigkeits- und Lebensdauerziele der Kundenanforderungen von Produkten vor dem Markteintritt unverzichtbar. Da es unmöglich ist, alle kritischen Ausfallmechanismen physikalisch zu beschreiben, wird in der Zuverlässigkeitstestplanung und -analyse die tatsächliche Zuverlässigkeit von Produkten mit Hilfe empirischer Daten aus Lebensdauertests bestimmt und bewertet. Damit können schon vor dem Markteintritt Prognosen über die zu erwartenden Ausfälle im Feld getroffen werden. Obwohl die Theorie der Statistik verlangt, dass eine große Anzahl von Einheiten bis zum Ausfall getestet wird, kann in der Praxis aus Kosten- und Zeitgründen nur eine kleine Anzahl von Tests zum Zuverlässigkeitsnachweis durchgeführt werden. Um die heutigen Anforderungen zu erfüllen, müssen Tests daher verkürzt werden. Unter Kosten- und Zeitdruck ist es oft erwünscht, das Erreichen des Zuverlässigkeitsziels auf der Basis einer kleinen Anzahl von Tests nachzuweisen und diese Tests zeitlich zu beschleunigen. Neben effizienten Produktentwicklungsphasen vom Konzept bis hin zur Serienfertigung besteht also auch bei der Planung der Erprobung das Potenzial, die Effizienz durch geeignete und vor allem Erfolg versprechende Erprobungsstrategien zu verbessern, welche auch tatsächlich das geforderte Ziel nachweisen.

Die Vielfalt möglicher technischer Lösungen bedeutet allgemein, dass auch die Zuverlässigkeitstestplanung mit einer Fülle an unterschiedlichen Randbedingungen konfrontiert ist. Für kostenintensive Prototypen stehen beispielsweise nur sehr wenige Prüflinge zur Verfügung, während Massenprodukte zu Hunderten getestet werden können. Hinzu kommen zeitliche Randbedingungen zur verfügbaren Erprobungsdauer zum Nachweis der Zuverlässigkeitsanforderungen. Die verbesserte Effizienz der Erprobung umfasst neben einem gezielteren Einsatz von Prüflingen und kürzeren Erprobungsdauern durch beschleunigte Tests bei erhöhter Last auch die Berücksichtigung der statistischen Herausforderungen im Test. Dies beinhaltet die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Nachweises der Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen und der besseren Prognostizierbarkeit des Erprobungsaufwands bei gleichzeitigem effizienten Ressourceneinsatz.

Dies alles erfordert effiziente Methoden und deren intelligente Verknüpfung, um das Spannungsfeld der heutigen Produktentwicklung, die immer weiter steigenden

Kundenanforderungen bei einer gleichzeitig geforderten Reduktion der Entwicklungskosten, zu entschärfen.

1.2 Übergeordnete Ziele der Arbeit

Aus dem Zielkonflikt der heutigen Produktentwicklung ergeben sich die übergeordneten Ziele der vorliegenden Arbeit. Diese beziehen sich zum einen auf die effiziente Erprobungsplanung, zum anderen auf die Verknüpfung der Produktauslegung und der Erprobungsplanung, um die geforderte Reduktion der Entwicklungskosten und die Erfüllung der steigenden Anforderungen an ein Produkt sicherzustellen:

- Weiterentwicklung bestehender Methoden in der Zuverlässigkeitstestplanung, um Nachweistests randbedingungsabhängig zu planen und die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Nachweistests zu erhöhen.
- Berücksichtigung von Methoden zur zeitlichen Reduktion des Erprobungsaufwands.
- Verbesserung der Effizienz von Erprobung und Erprobungsplanung, um mit den bestehenden Ressourcen und dem vorhandenen Budget den Nutzen von Nachweistests zu maximieren.
- Ableiten von Handlungsempfehlungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests.
- Anwendungsnahe Berücksichtigung der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen bereits in der Produktauslegung zur Entschärfung des Zielkonflikts aus weiter steigenden Kundenanforderungen bei gleichzeitig geforderter Reduktion der Entwicklungskosten.
- Reduktion von Überdimensionierung zur effizienten und nachhaltigen Nutzung von Ressourcen bei gleichzeitiger Erfüllung der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen.

1.3 Allgemeiner Aufbau der Arbeit

Der allgemeine Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 grafisch dargestellt. Nach der Beschreibung des zentralen Zielkonflikts und der übergeordneten Ziele der Arbeit, welche in der Einleitung vorgestellt werden, wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung dargestellt. Kapitel 3 beinhaltet die Zusammenfassung des Forschungsbedarfs, die Konkretisierung des Ziels der Arbeit und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen. In Kapitel 4 werden Methoden vorgestellt, welche im Bereich

Zuverlässigkeitstestplanung verwendet und weiterentwickelt wurden, um das Erreichen der übergeordneten Ziele der Arbeit zu ermöglichen. Kapitel 5 beinhaltet die Vorstellung einer anforderungsgerechten Produktauslegung, welche die Zuverlässigkeitstestplanung und die Produktauslegung verknüpft und damit eine anwendungsnahe Vorgehensweise zur Lösung des Zielkonflikts aus steigenden Kundenanforderungen und geringen Entwicklungskosten ermöglicht. Abschließend fasst Kapitel 6 die Vorgehensweise der Arbeit und die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen im Bereich Zuverlässigkeitstestplanung und erprobungsgerechter Produktauslegung.

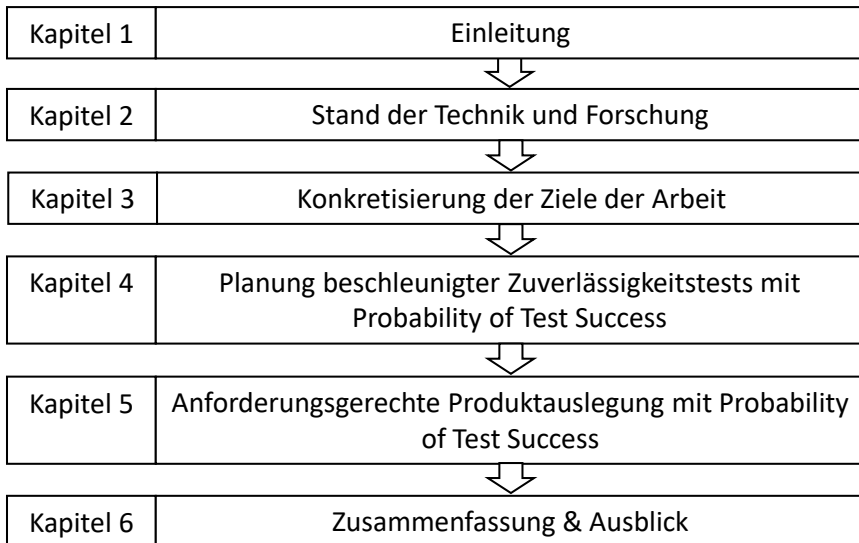


Abbildung 1.1: Allgemeiner Aufbau der Arbeit

2 Stand der Technik und Forschung

Im Folgenden werden die Grundbegriffe zur Zuverlässigkeitstestplanung vorgestellt und Grundlagen für die Planung und Auswertung beschleunigter Lebensdauertests gelegt. Anschließend wird der Stand der Forschung dargestellt und diskutiert, wobei bereits in Ansätzen eine erprobungsorientierte Produktauslegung betrachtet wird. Hierbei werden bestehende Ansätze vorgestellt und kritisch betrachtet, um den Forschungsbedarf aufzuzeigen. Betrachteter Schwerpunkt ist auch die Vorstellung der am Institut für Maschinenelemente durchgeführten Forschung zur *Probability of Test Success*, auf welcher diese Arbeit basiert.

2.1 Begriffe und Definitionen

Im folgenden Kapitel werden die Grundbegriffe der Zuverlässigkeitstechnik und der Hintergrund der Lebensdauermodellierung erläutert, um ein einheitliches Verständnis für die vorliegende Arbeit zu schaffen.

2.1.1 Grundbegriffe der Zuverlässigkeitstechnik

Ausfallzeiten einer Komponente können als zufallsverteilte Ereignisse angesehen werden, weshalb Methoden aus der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet werden, um diese Ausfallzeiten und das Ausfallverhalten einer Komponente einheitlich zu beschreiben [1].

Die **Zuverlässigkeit** $R(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer t unter gegebenen Randbedingungen nicht ausfällt. Das Komplement zur Zuverlässigkeit ist die **Ausfallwahrscheinlichkeit** $F(t)$ als Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt bis zum Zeitpunkt t ausgefallen ist:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.1)$$

Beide Größen entsprechen dabei Summenhäufigkeiten von Ausfällen bzw. noch intakten Einheiten.

Die **Dichtefunktion** $f(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zum Zeitpunkt t . Sie kann über die Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Eine der wichtigsten statistischen Maßzahlen zur einfachen Beschreibung von Messwerten ist der **Median**. Er ist dabei ein Maß für den Mittelwert, der genau in der Mitte aller Messwerte liegt. Für die Ermittlung dieses Mittelwerts kann der Median in Abhängigkeit der Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden:

$$F(t_{Median}) = 0,5 \quad (2.3)$$

Durch seine Lage in der Mitte aller Messwerte ist er robust gegen Ausreißer nach oben und nach unten und eignet sich damit besonders für die Beschreibung und den Vergleich von Ausfallzeiten [1].

2.1.2 Grundbegriffe zur Lebensdauermodellierung

Ursache für die stark streuenden Ausfallzeiten ist zum einen die streuende Belastbarkeit und zum anderen die streuende Belastung. Die **Belastbarkeit**, oder auch Widerstandsfähigkeit eines Bauteils, bezieht sich hauptsächlich auf den Werkstoff und seine Eigenschaften, welche durch Inhomogenitäten bzw. Fehlstellen beeinflusst werden. Die streuende **Belastung** dagegen auf nichtkonstante Lastprofile und -kollektive. Liegt die Belastbarkeit eines Werkstoffs unterhalb der Belastung, fällt das Bauteil aus. Dieses als „**Stress-Strength-Interference**“ bezeichnete Verhalten wird zur Darstellung eines Ausfalls typischerweise verwendet.

2.2 Auswertung von Lebensdauerdaten

Oftmals können in einem Test oder im Feld Ausfallzeiten ermittelt werden. Zur einfachen Beschreibung dieser Ausfallzeiten eignet sich insbesondere bei mechanischen Systemen die Weibullverteilung, da diese auch sehr unterschiedliche Ausfallverhalten gleichermaßen abbilden kann. Sie ermöglicht die Charakterisierung und den Vergleich verschiedener Ausfallverhalten mit Hilfe zweier Parameter, der **charakteristischen Lebensdauer** T und dem **Weibull-Formparameter** b .

Die charakteristische Lebensdauer ist dabei ein Lageparameter des Ausfallverhaltens, welchem eine Ausfallwahrscheinlichkeit von

$$F(T) \approx 0,632 \quad (2.4)$$

zugeordnet wird. Der Weibull-Formparameter dagegen beschreibt die Form der Weibullverteilung und ist dabei eine Maßzahl für die Streuung der Daten. Die Flexibilität der Weibullverteilung lässt sich am besten grafisch zeigen, siehe Abbildung 2.1. Typisch ist der S-förmige Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit über der Zeit, welcher in der unteren Darstellung gezeigt wird.

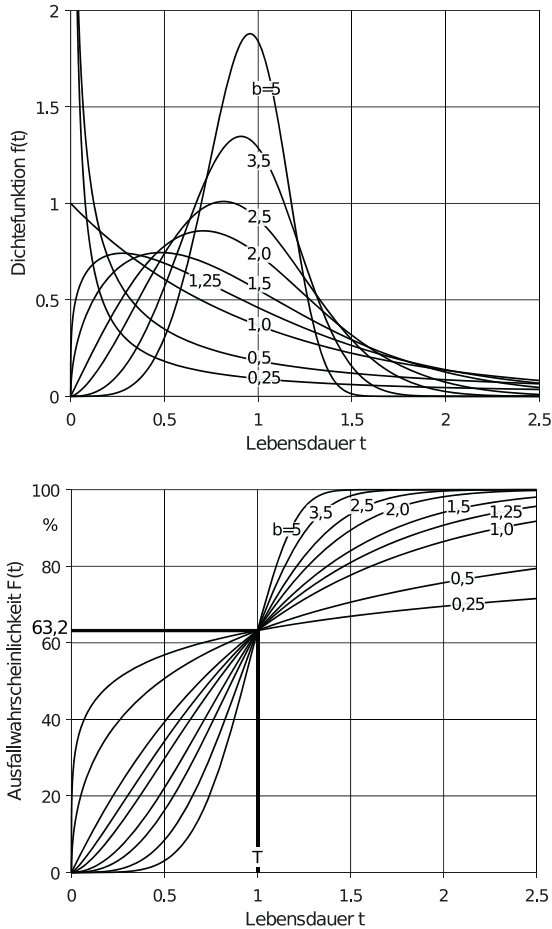


Abbildung 2.1: Weibullverteilungen für unterschiedliche Formparameter [1]

Die Gleichungen zur Ermittlung der Zuverlässigkeit $R(t)$, der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und der Dichtefunktion $f(t)$ sind:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \tag{2.5}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \tag{2.6}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \tag{2.7}$$

Gleichungen (2.5) bis (2.7) gelten nur für die **zweiparametrische Weibullverteilung** (T, b) . Die dreiparametrische Weibullverteilung berücksichtigt zusätzlich eine ausfallfreie Zeit t_0 , welche in dieser Arbeit nicht verwendet wird, siehe Unterkapitel 4.2.2. Durch geeignete Skalierung der Achsen ist es möglich, den S-förmigen Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit als Gerade $(y = mx + c)$ im „**Weibullwahrscheinlichkeitspapier**“ darzustellen.

$$x = \ln(t) \tag{2.8}$$

$$y = \ln(-\ln(1 - F(t))) \tag{2.9}$$

Die Steigung dieser Weibullgeraden m entspricht dem Formparameter b , der Schnittpunkt mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % der charakteristischen Lebensdauer T . Dies ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

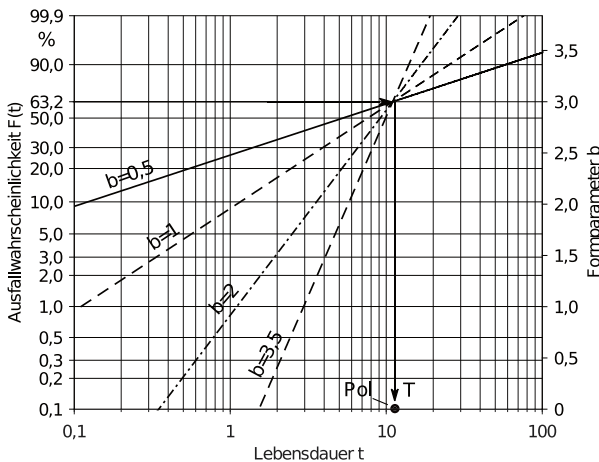


Abbildung 2.2: Weibullwahrscheinlichkeitspapier [1]

Zur Beschreibung der verschiedenen Ausfallverhalten in den verschiedenen Abschnitten des Lebensdauerzyklus einer Komponente eignet sich das grafische Modell der

„**Badewannenkurve**“, wobei sich diese in drei Bereiche unterteilen lässt (siehe Abbildung 2.3). Die Weibullverteilung eignet sich dabei insbesondere deshalb, da sie sowohl Frühausfälle als auch Zufallsausfälle und Ermüdungsausfälle beschreiben kann. Für die Arbeit relevant sind die Ermüdungsausfälle (Bereich 3 der Badewannenkurve), da diese das in der Testplanung betrachtete und im Test abgesicherte Ausfallverhalten im Feld am besten abdecken.

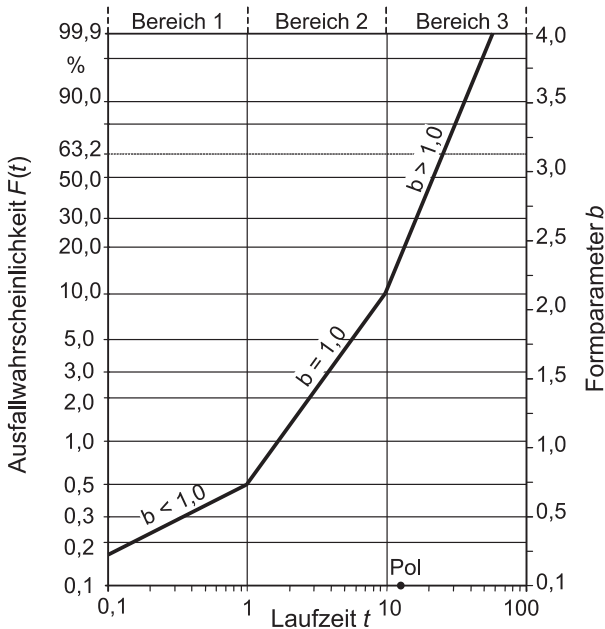


Abbildung 2.3: Badewannenkurve im Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier nach [1]

Um eine einfache Beschreibung bestimmter Lebensduranforderungen zu ermöglichen, verwendet man die **B_q -Lebensdauer**. Dabei repräsentiert das q das Quantil, zu welchem die entsprechende Lebensdauer bezeichnet werden soll. Beispielsweise entspricht die B_{10} -Lebensdauer der Lebensdauer, welcher eine Ausfallwahrscheinlichkeit $F(B_{10}) = 10\%$ auf der Weibullgeraden zugeordnet werden kann. Geläufig sind außerdem die B_1 , die B_5 - und die $B_{63,2}$ -Lebensdauer, welche der charakteristischen Lebensdauer entspricht.

Die Weibullparameter von Ausfalldaten einer Komponente können durch grafische Methoden [1] oder auch durch etablierte Parameterschätzverfahren wie die Maximum-Likelihood-Schätzung (siehe Teilkapitel 2.3) ermittelt werden. Um eine Aussage nicht nur über eine begrenzte Stichprobe, sondern über die Gesamtpopulation eines

Bauteils treffen zu können, muss dabei die Zufälligkeit des Ausfallverhaltens berücksichtigt werden. Diese lässt sich vereinfacht dadurch darstellen, dass die jeweiligen Ausfallzeiten zweier Stichproben immer unterschiedlich sind. Zur Berücksichtigung dieser Zufälligkeit wird ein beidseitiger Vertrauensbereich verwendet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Weibullgerade dem Median des Ausfallverhaltens entspricht (Medianrangverfahren).

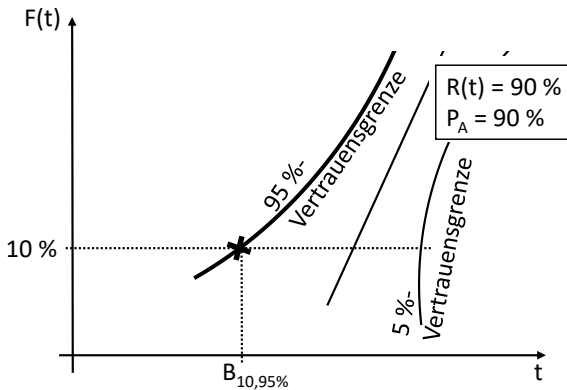


Abbildung 2.4: Grafische Interpretation der $B_{10,95\%}$ -Lebensdauer im Weibullwahrscheinlichkeitspapier

Der zu berücksichtigende beidseitige Vertrauensbereich kann über die **Aussagewahrscheinlichkeit** P_A beschrieben werden, welche neben der Zuverlässigkeitsanforderung immer Teil eines Zuverlässigkeitsziels in der Testplanung sein muss. Typische geforderte Ausagewahrscheinlichkeiten sind $P_A = 90\%$, $P_A = 95\%$ und $P_A = 99\%$, wobei $P_A = 1 - \alpha$ immer der Ausagewahrscheinlichkeit zwischen der oberen und der unteren Vertrauensgrenzen $\alpha/2$ bzw. $1 - \alpha/2$ entspricht. Sie ist damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Ausfallverhalten der Grundgesamtheit innerhalb der Vertrauensgrenzen befindet. Die obere Vertrauensgrenze wird dafür verwendet, die Lebensdauer einer Komponente zur konservativen Seite hin abzusichern, d. h. sie wird typischerweise als Zuverlässigkeitsanforderung verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird die Ausagewahrscheinlichkeit direkt in die Bezeichnung des geforderten Lebensdauerquantils integriert und somit das klassische Zuverlässigkeitsziel vereinfacht als B_q -Lebensdauer bezeichnet. Damit wird also die Lebensdauer beschrieben, welche bei beidseitigem Vertrauensbereich mit einer Ausagewahrscheinlichkeit von P_A die geforderte Zuverlässigkeit von $R(B_q) = 1 - q [\%]$ nachweisen kann. Dies ist in Ab-

bildung 2.4 dargestellt. Repräsentativ wird in dieser Arbeit meist die $B_{10,95\%}$ -Lebensdauer verwendet, welches der Übersetzung der Zuverlässigkeitsanforderung ($F(t) = 10\%$, $R(t) = 90\%$, $P_A = 90\%$) in eine Lebensdaueranforderung entspricht.

2.3 Quantitative Methoden zur Parameterschätzung

Zur Parameterschätzung werden in der Zuverlässigkeitsanalyse neben der grafischen Schätzung üblicherweise die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. least squares method, LSM) und die **Maximum-Likelihood-Schätzung** (engl. maximum likelihood estimation, MLE) verwendet. Die grafische Methode und LSM bestehen durch ihre einfache Anwendbarkeit für Ausfalldaten. Der Vorteil bei der Anwendung der MLE ist die Fisher-Informationsmatrix, welche für die nachfolgende Berechnung der oberen Vertrauensgrenze erforderlich ist. Diese Matrix kann direkt aus der MLE abgeleitet werden. In der vorliegenden Arbeit wird durchgängig die MLE zur Parameterschätzung verwendet. Diese besitzt für große Stichproben eine sehr hohe Genauigkeit der Parameterschätzung, jedoch wird für kleine Stichproben der Weibull-Formparameter als zu groß geschätzt [2], [3].

Die MLE basiert auf der Idee, den Schätzwert für einen Parameter auszuwählen, der die Wahrscheinlichkeit maximiert, eine vorhandene Ausfallzeit am plausibelsten wiederzugeben. Für einen einzelnen Parameter gilt:

$$L(t; \theta) = \prod_i f_i(t_i; \theta) \quad (2.10)$$

Der beste Schätzwert $\hat{\theta}$ ist dabei der, welcher $L(t; \theta)$ maximiert. Überträgt man diese Vorgehensweise auf mehrere Ausfallzeiten und ihre Dichtfunktionen, erhält man die Likelihood-Funktion als Produkt der Dichtfunktionen:

$$\begin{aligned} L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k) &= \prod_i L_i \\ &= \prod_{i=1}^n f_i(t_i; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Auch hierfür gilt, dass die am besten geeigneten Schätzwerte die Likelihood-Funktion L maximieren. Dies ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Aus praktikablen Gründen wird die Likelihood-Funktion logarithmiert und mit -1 multipliziert. Dies führt dazu, dass nur noch die Summe der Log-Likelihood-Funktion betrachtet und weiterhin die Summe minimiert werden muss, um die beste Parameterschätzung zu finden. Für die

zweiparametrische Weibullverteilung ist dies analytisch möglich, indem die erste Ableitung der Log-Likelihood-Funktion null gesetzt wird und weiterhin die Eigenschaften der zweiten Ableitung betrachtet werden [2], [3].

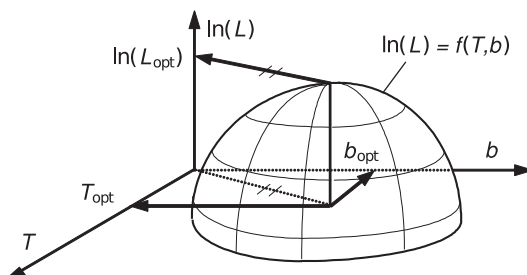


Abbildung 2.5: Grafische Interpretation der Maximierung der Likelihood-Funktion [1]

Die zweite Ableitung der Log-Likelihood-Funktion kann im Weiteren dazu verwendet werden, den **Fisher-Vertrauensbereich** der Parameterschätzung zu bestimmen. Dabei wird die Matrix, welche die zweiten Ableitungen enthält, invertiert und die enthaltenen Informationen über die Varianzen und über die Kovarianzen der Parameterschätzung weiterverarbeitet [3].

2.4 Arten von Zuverlässigkeitstests

In einem Produktentstehungsprozess werden viele verschiedene Tests durchgeführt. Diese unterscheiden sich unter anderem im Ablauf, in den zu berücksichtigenden Testbedingungen, dem Ziel der Tests, der Belastungsart und den Produktentstehungsphasen, in denen sie durchgeführt werden. Ziel von Zuverlässigkeitstests ist unter anderem der Nachweis der vorgegebenen Zuverlässigkeitsanforderungen, welcher erforderlich ist, wenn das Ausfallverhalten abhängig von relevanten Auslegungsparametern qualitativ und quantitativ untersucht werden soll. Die daraus gewonnenen Informationen werden anschließend genutzt, um abzuschätzen, wie sich ein Produkt während seiner Lebensdauer verhalten wird, um die Lebensdauer des Produkts zu verlängern, die Garantiekosten zu senken und schlussendlich auch die Kundenzufriedenheit zu erhöhen [4]–[6].

Abhängig vom Ziel des Tests gibt es zwei Testarten, die Tests ohne Ausfälle und die Tests mit Ausfällen. Erstere werden auch als **Success-Run-Tests** bezeichnet und dienen dem reinen Nachweis von Zuverlässigkeitsanforderungen, ohne quantitative Erkenntnisse über das Ausfallverhalten zu generieren. **End-of-Life-Tests** bezeichnet alle Teststrategien, welche mit Ausfällen geplant werden. Diese werden angewendet,

um neben dem Zuverlässigkeitsnachweis auch quantitative Kenngrößen wie eine Ausfallverteilung zu bestimmen.

2.4.1 Success-Run-Test

In der Praxis werden häufig Tests durchgeführt, bei denen kein Ausfall erwartet wird. Für eine bestimmte Lebensdauer t weisen Success-Run-Tests (SRT) eine geforderte Mindestzuverlässigkeit nach, also ob die Grundgesamtheit die geforderte Zuverlässigkeit mit einer Aussagewahrscheinlichkeit P_A erreicht oder nicht [7]. Die Auswertung von SRT basiert auf der Binomialverteilung. Dabei wird untersucht, ob ein Prüfling eine festgelegte Lebensdauer und die definierte Zuverlässigkeit erreicht, ohne dabei auszufallen.

Success-Run-Tests werden verwendet, da in der Praxis häufig neben bestimmten Zuverlässigkeitsanforderungen auch feste Erprobungsdauern vorgegeben werden. Diese umfasst beispielsweise eine Mindestzuverlässigkeit bei einer bestimmten Lebensdauer oder einer Aussagewahrscheinlichkeit (üblicherweise 80 %, 90 % oder 95 %). Durch einen Success-Run kann bei ausreichendem Stichprobenumfang und/oder Testzeit die Mindestzuverlässigkeit mit einer bestimmten Aussagewahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Jedoch ist auf Grund fehlender Ausfälle bzw. Ausfallzeiten keine quantitative Aussage über das Ausfallverhalten möglich [8], [9]. Es existieren Verfahren zur Berücksichtigung von Ausfällen im Success-Run-Test, siehe [9]. Für die hier vorliegende Arbeit werden diese nicht weiter betrachtet.

2.4.2 End-of-Life-Test

Im Gegensatz zu einem Success-Run-Test werden bei der Teststrategie des End-of-Life-Tests (EoL) die Prüflinge so lange belastet, bis Ausfälle vorliegen, was jedoch meist mit höherem Prüfaufwand verbunden ist [1]. Hierbei wird zwischen vollständigen End-of-Life-Tests und unvollständigen (zensierten) End-of-Life-Tests unterschieden.

Bei **vollständigen End-of-Life-Tests** werden alle Prüflinge einer Stichprobe so lange getestet, bis sie ausgefallen sind. Dadurch werden Ausfallzeiten erzeugt, welche sich über den gesamten Lebensdauerbereich erstrecken und den größten statistischen Informationsgehalt bieten. Allerdings erfordert der Test auch den größten zeitlichen und finanziellen Aufwand. Es ergeben sich lange Prüfzeiten, insbesondere bei Komponenten mit einer hohen Lebensdauer. Durch quantitative Analyse der Ausfallzeiten können Parameter des Ausfallverhaltens beispielsweise durch die Maximum-Likelihood-Schätzung ermittelt werden.

Eine Möglichkeit, Testzeit einzusparen ist es, den Test abubrechen, bevor alle Prüflinge einer Stichprobe ausgefallen sind. Es handelt sich dann um einen zensierten Test. Wird der Test nach einer definierten Zeit abgebrochen, ist von einem **Typ-I-zensierten Test** (zeitzensiert) die Rede. Vorteile dieser Strategie ergeben sich aus der guten Planbarkeit durch die vorgegebene Erprobungsdauer. Die Anzahl der Ausfälle ist vor dem Versuch jedoch nicht bekannt. Es handelt sich dabei um eine Zufallsgröße, weshalb die Typ-I-zensierten Teststrategien in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

Beim **Typ-II-zensierten Test** (ausfallzensiert) wird der Versuch nach Erreichen einer definierten Anzahl von Ausfällen beendet, nicht nach einer vorgegebenen Zeit. Vor dem Versuch ist also nicht abzusehen, welche Erprobungsdauer bis zum Testende benötigt wird. Es handelt sich bei der Zeit bis zum letzten berücksichtigten Ausfall um eine Zufallsgröße. Die Analyse der unvollständigen End-of-Life-Tests kann ebenfalls über einen MLE-Schätzer erfolgen, durch welchen die quantitative Beschreibung des Ausfallverhaltens ermöglicht wird [1].

2.5 Beschleunigte Tests

Tests unter Normalbedingungen sind häufig zeitaufwendig und teuer [1]. Bei Produkten mit einer hohen Lebensdauer sind unter Normalbedingungen Ausfälle bei unbeschleunigten Tests meist nicht realisierbar, wodurch auch keine Aussage über die tatsächliche Zuverlässigkeit möglich ist. Daher werden in der Praxis hauptsächlich beschleunigte Lebensdauerests genutzt, d. h. Tests unter erhöhter Belastung, um den zeitlichen und finanziellen Aufwand von Tests zu verringern.

2.5.1 Grundlagen beschleunigter Tests

Ein beschleunigter Lebensdauerest dient dazu, Zuverlässigkeitskenngrößen, wie Ausfallwahrscheinlichkeiten, Ausfallraten und Parameter von Ausfallverteilungen bei normalen Betriebsbedingungen des Systems zu schätzen und somit Rückschlüsse auf die erwartete Lebensdauer unter Normalbelastung einer Einheit ziehen zu können. Ein beschleunigter Lebensdauerest kann dabei auf allen Systemebenen durchgeführt werden. Hierbei gelten wichtige Voraussetzungen, um aus den Ergebnissen des Tests die Zuverlässigkeitsparameter bestimmen zu können. Dazu gehört, dass die Stichprobe mehrere zufällig ausgewählte, aber gleichartige Einheiten enthalten muss, welche zu Beginn des Tests funktionsfähig und nicht reparierbar sind. Außerdem müssen

während des Tests alle Einheiten der gleichen Belastungsart ausgesetzt sein, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten [5], [8], [10], [11].

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, Zuverlässigkeitstests zu beschleunigen, wobei das gebräuchliche Verfahren die Beschleunigung durch Belastungserhöhung (auch: Überlastungsbeschleunigung) ist, bei dem die Prüflinge mit einem höheren Belastungsniveau als unter Normalbedingungen belastet werden. Dadurch werden Ausfallmechanismen schneller angeregt und die Lebensdauer der betrachteten Einheiten verkürzt. Unter Anwendung eines physikalisch sinnvollen Modells wird anschließend von den Ausfallzeiten auf beschleunigtem Lastniveau auf die Ausfallzeit bei Feldniveau geschlossen. Dabei liegen die Belastungsniveaus üblicherweise zwischen den Spezifikations- und Betriebsgrenzen. Diese Beschleunigungsart ist unter der Voraussetzung möglich, dass durch die Laststeigerung keine Veränderung des Ausfallmechanismus auftritt und das Belastungsniveau nicht so hoch ist, dass physikalische oder chemische Eigenschaften des Prüflings verändert werden und es zu Ungenauigkeiten in der Extrapolation kommt [5], [8], [11].

Eine Möglichkeit, die Beschleunigung in einem Test zu quantifizieren, ist der Rafungsfaktor, welcher sich aus dem Verhältnis des Bauteilverhaltens in Test und Feld bestimmen lässt. Bei genauer Kenntnis des Lebensdauermodells kann er in der Testplanung verwendet werden, um die Testlastniveaus zu wählen. Allgemein ist er definiert als „Verhältnis zwischen der Lebensdauer unter normalen Betriebsbedingungen und der Lebensdauer bei zeitraffenden Prüfbedingungen, unter der Voraussetzung, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit identisch ist“ [12], [13].

Bei einem beschleunigten Lebensdauertest wird auf mindestens zwei erhöhten Belastungsniveaus getestet, wobei bis zum Ausfall belastet und die Ausfallzeit sowie die angelegte Belastung aufgezeichnet werden. Somit kann ein Lebensdauermodell parametrisiert werden, mit dem aus den Ergebnissen des beschleunigten Tests auf die Feldlebensdauer geschlossen werden kann [3].

2.5.2 Stand der Forschung der Planung beschleunigter Lebensdauertests

Grundlegende Untersuchungen und Erkenntnisse zur Planung, Durchführung und Auswertung beschleunigter Tests werden beispielsweise in [14], [15] und [16] zusammengefasst. Als größte Gefahren beim Einsatz beschleunigter Tests wird dabei zum einen das gleichzeitige Auftreten mehrerer Ausfallmechanismen genannt, welches zu einer fehlerhaften Auswertung führen kann. Zudem führt die fehlerhafte oder fehlende Berücksichtigung von Randbedingungen im Test dazu, dass die Ergebnisse eines beschleunigten Tests nicht zur Berechnung der Zuverlässigkeit im Feld verwendet werden dürfen. Modarres et al. [17] fasst das klassische Vorgehen zur Optimierung

bei der Planung beschleunigter Zuverlässigkeitstests zusammen und illustriert dies mit Hilfe typischer Anwendungsbeispiele.

Meeker und Escobar [13] beschreiben u. a. allgemeine Kriterien, nach welchen beschleunigte Lebensdauertests geplant werden sollen und Methoden, mit welchen die Planung und die Analyse dieser Tests durchgeführt werden können. Für die Tests werden auch Ansätze betrachtet, durch welche es möglich ist, die minimale Prüflingszahl zum Nachweis einer Lebensdauer mit Hilfe der geschätzten Parameter aus einer Maximum-Likelihood-Schätzung zu bestimmen.

Gerokostopoulos et al. untersuchen die Genauigkeit vollständiger Lebensdauertests [18]. Als Bewertungskriterium wird dafür die Vertrauensbereichsbreite verwendet. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen wird für bereits bekannte Weibullparameter derjenige Stichprobenumfang ermittelt, der die gewünschte Vertrauensbereichsbreite erreicht. Wirtschaftliche Betrachtungen sind dabei nicht enthalten. Van der Weil und Meeker [19] untersuchen die Genauigkeit des Vertrauensbereichs für beschleunigte zensierte Tests. Sie empfehlen die Nutzung von Vertrauensgrenzen, welche auf dem *Likelihood Ratio* basieren.

Ma und Meeker [20] stellen eine Strategie für die Planung von beschleunigten Tests mit geringer Stichprobengröße vor. Fokus der Arbeit liegt dabei auf dem Finden praxistauglicher Testpläne, auf der Analyse trotz fehlender Ausfälle im Test und auf den Auswirkungen fehlerhaften Vorwissens auf die Testplanung.

Denkmayr et. al [21] verwenden für ihre Darstellungen den Physics-of-Failure-Ansatz, welcher die Lebensdauermodelle sowie die Erprobung eng mit einzelnen Ausfallmechanismen verknüpft und so die „globalen Beschleunigungsfaktoren“, d. h. die reine Betrachtung der Erprobung auf Systemebene, vermeidet. Zentrales Element ist dabei die Load-Matrix, welche die Zuverlässigkeitsabsicherungen auf Komponenten- und Systemebene abhängig von Ausfallmechanismus, Systemebene und Teststrategie verknüpft, um die Systemzuverlässigkeit abzusichern. Dabei können gleichzeitig Labortests und reale Fahrversuche, sowie Neuheitsgrad und geänderte Belastungen einer Komponente zum Vorgängerprodukt berücksichtigt werden. In Modarres et. al [17] wird dieser Ansatz aufgegriffen und für einzelne Schädigungsmechanismen anwendungsbezogen ein Konzept zur Analyse von beschleunigten Lebensdauertests auf zwei Lastniveaus vorgestellt. Anhand von Ausfalldaten auf zwei beschleunigten Lastniveaus werden für konkrete Lebensdauermodelle die Weibullparameter auf dem Feldlastniveau berechnet. Modarres et al. konzentrieren sich dabei auf die Analyse von Ausfalldaten bei gleichzeitiger Schätzung des Ausfallverhaltens und der Lebensdauermodellparameter für unterschiedliche Methoden der Parameterschätzung.

In der Grundlagenliteratur wird häufig auf mehreren Lastniveaus getestet, wobei Nelson und Meeker [22] sowie Meeker [23] für jedes Lastniveau die gleichen Zensierungszeiten wählen. Dies kann die Praxis nicht immer ausreichend abdecken, weshalb

auch Untersuchungen zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Zensierungszeiten für jedes Lastniveau durchgeführt wurden, siehe Yang [24]. Progressive Typ-I zensierte Tests stehen im Fokus der Arbeit von Huang und Wu [25], wobei die regelmäßige Beobachtung über eine Kostenfunktion ausgewertet wird und sich die Zuverlässigkeitsanalyse auf die Exponentialverteilung konzentriert. In Wang et al. [26] wird eine Methode für beschleunigte Typ-II zensierte Tests mit konstanter Last diskutiert. Die Ergebnisse zeigen gute Parameterschätzwerte insbesondere für kleine Stichprobengrößen und können auch weitere Zensierungsstrategien mitberücksichtigen.

Gao et al. [27] beschreiben ein Vorgehen, um einen Testplan gegenüber den zu Beginn der Testplanung erforderlichen Annahmen über das Ausfallverhalten aus Vorwissen robust auszulegen. Zudem werden Unsicherheit und die Fehler erster und zweiter Ordnung mitberücksichtigt.

Ziel der Methode nach Arizono et al. [28] ist es, mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation Sudden-Death-Konfigurationen zu ermitteln, um die Mean Time To Failure (MTTF) am wirtschaftlichsten zu schätzen. Die Auswertung der Lebensdauerdaten ist auf die Exponentialverteilung und die MTTF beschränkt. Die anwendungsnahe Zuverlässigkeitstestplanung erfordert jedoch insbesondere die Betrachtung kleiner Ausfallwahrscheinlichkeiten. Die Kosten eines Lebensdauertests sind im Fokus von Ahmed und Chateauf [29]. Die Zuverlässigkeit wird dabei nicht mit Hilfe einer Weibullauswertung ermittelt, sondern auf Basis der Stress-Strength-Interference, die dabei als hinreichend bekannt vorausgesetzt wird. Tsai et al. [30] betrachten Typ II-zensierte Tests unter begrenzter Testinfrastruktur. Die Kosten werden mit Hilfe einer Kostenfunktion bewertet, wodurch die zu erwartenden Garantiekosten verglichen werden können.

Weitere Untersuchungen zu einer möglichen Zeitersparnis durch Anwendung von Sudden-Death-Tests werden von Vlcek et al. [31] vorgestellt. Die durchschnittliche Dauer eines vollständigen und Typ-II zensierten Tests wird von Hsieh [32] thematisiert. Die Erwartungswerte werden für die Gesamttestdauer eines vollständigen sowie Typ-II zensierten Tests berechnet und miteinander verglichen. Dabei werden die Zeitvorteile von Typ-II zensierten Tests herausgearbeitet.

Auch weitere bestehende Ansätze von McCool, Schneider sowie Fertig und Mann beschreiben ähnliche Vorgehensweisen, sind aber im Umfang möglicher Teststrategien oder in der Berücksichtigung des Spannungsfelds von Genauigkeit, Kosten und Zeit eingeschränkt [33]–[35].

2.5.3 Optimalität

In der Forschung werden verschiedene Ziele der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests untersucht. Nelson [36] liefert einen umfangreichen Überblick über Veröffentlichungen zur Testplanung. Ziel ist es dabei, die Auswahl geeigneter Testpläne zu unterstützen und eine Übersicht über Literatur zu den wichtigsten Randbedingungen zu geben. Berücksichtigt werden dabei u. a. die Robustheit, vorhandene Softwarewerkzeuge, Zensierungsstrategien sowie verschiedene Optimalitätskriterien. Meeker et al. [37] untersucht die beschleunigte Testplanung im Hinblick auf die prognostizierte Zuverlässigkeit auf Feldniveau. Dabei berücksichtigen sie variierende Belastungen in der realen Anwendung. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse wird anhand eines Systems mit zwei konkurrierenden Ausfallmechanismen gezeigt.

Die Grundlagenwerke von Nelson [38] sowie Meeker und Escobar [13] geben Leitlinien für die Planung von beschleunigten Lebensdauertests. Als Zielgröße wird dabei die Genauigkeit der Tests, d. h. die Varianz betrachtet. Anhand dieses Kriteriums werden Richtlinien zur Verteilung der Prüflinge auf die beschleunigten Lastniveaus erstellt, mit denen eine statistisch optimale Lebensdauerprognose auf Feldniveau abgeleitet werden kann. Die Gesamtkosten und die Gesamterprobungsdauer der Tests werden nur erwähnt, um den Zielkonflikt zu thematisieren, aber keine umfängliche Lösung hierfür geliefert. Elsayed und Zhang [39] untersuchen die Planung von beschleunigten Lebensdauertests mit dem Ziel, die Genauigkeit der Zuverlässigkeitsprognose zu erhöhen. Das typische Ziel bei der Entwicklung von optimalen Testplänen, die Minimierung der Varianz der Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE) der mittleren Lebensdauer auf Feldniveau wird u. a. auch von Miller und Nelson [40] als Optimalitätskriterium verwendet. Damit ist es möglich, die Genauigkeit der Schätzung auf Feldniveau zu maximieren. Auch in Park und Yum [41] sowie Guo et al. [42] ist dies zentral. Park und Yum haben das Ziel, die asymptotische Varianz der geschätzten mittleren Lebensdauer auf Feldniveau zu minimieren und vorhandene Testausrüstung dabei möglichst effizient zu auszunutzen, berücksichtigt allerdings nur exponentialverteilte Ausfallzeiten [41]. Grundlegende Richtlinien zur Reduzierung der Varianz einzelner Zuverlässigkeitsparameter, um die Genauigkeit der Zuverlässigkeitsaussage auf Feldniveau zu erhöhen entstammen hierzu unter anderem aus Meeker und Hahn [43]. Nelson und Meeker [22] untersuchen in diesem Zusammenhang den Einfluss von beschleunigten Lebensdauertests auf die asymptotische Varianz der prognostizierten Zuverlässigkeit auf Feldniveau. Guo et al. [42] entwickeln für lognormalverteilte Ausfallzeiten elektronischer Komponenten optimale Testpläne. Auch Fedorov [44] gibt eine umfangreiche Übersicht über verschiedene Ansätze zur statistischen Optimierung von beschleunigten Lebensdauertests und ihre Ursprünge. Dabei werden sowohl

die Grundprinzipien der Optimierung als auch klassische Optimalitätskriterien vorgestellt. Zusätzlich leitet er aktuelle Herausforderungen und Forschungsthemen für optimale Testpläne ab. Viele dieser Testpläne sind zwar optimal, jedoch verlieren sie diese Eigenschaft schnell, wenn Lebensdauermodellparameter oder die Verteilungsparameter ungenau geschätzt werden, siehe Yang [24].

Für zwei beschleunigte Lastniveaus wurde das Finden eines statistisch optimalen Testplans in zahlreichen Veröffentlichungen untersucht, beispielsweise in Nelson und Meeker [22] und Meeker [23]. Die Verteilung der Prüflinge auf den beschleunigten Lastniveaus kann dafür optimiert werden, wobei Nelson und Meeker beschreiben, dass auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau die Mehrzahl der Prüflinge getestet werden sollen. Eine Methode zur Ermittlung einer optimalen Prüflingsverteilung bei zwei beschleunigten Lastniveaus wurde in Nelson [3] vorgestellt. Es werden jedoch weder Testzeit noch Testkosten berücksichtigt. Die optimale Verteilung der Prüflinge n_L auf dem niedrigen Lastniveau $load_L$ und n_H , derjenigen auf dem hohen beschleunigten Lastniveau $load_H$, werden mit den folgenden Gleichungen ermittelt.

$$\xi_0 = \frac{load_H - load_0}{load_H - load_L} \quad (2.12)$$

$$p^* = \frac{\xi_0}{(2 \cdot \xi_0 - 1)} \quad (2.13)$$

$$n_L = n_{tot} \cdot p^* \quad (2.14)$$

$$n_H = n_{tot} \cdot (1 - p^*) \quad (2.15)$$

Nach [3] ist demnach die optimale Verteilung der Gesamtstichprobe n_{tot} von den Lastniveaus $load_0$ (Feldlastniveau), $load_L$ (niedriges beschleunigtes Lastniveau) und $load_H$ (hohes beschleunigtes Lastniveau) abhängig. Diese optimale Verteilung geht ebenfalls davon aus, dass alle Prüflinge mit dem gleichen Ausfallmechanismus versagen. Gleichungen zur Bestimmung des Optimums bei mehr als zwei beschleunigten Lastniveaus werden nicht gegeben.

Es kann ein weiteres drittes Lastniveau eingeführt werden, durch welches Abweichungen vom Lebensdauermodell besser berücksichtigt werden können und die Robustheit von Testplänen gegenüber Parameterunsicherheiten erhöht werden kann. Dies gilt insbesondere auch für nichtlineare Lebensdauermodelle. Daher sind sie für die praktische Anwendung sinnvoll, ihre Genauigkeit ist im Allgemeinen jedoch niedriger [24]. Auch Meeker und Escobar [45] weisen nach, dass Testpläne mit zwei beschleunigten Lastniveaus statistisch optimal sind. Allerdings können zusätzliche Lastniveaus die Robustheit und die Parameterschätzungen verbessern. Um die Gültigkeit des quadratischen Lebensdauermodells zu überprüfen, reichen zwei Lastniveaus nicht aus, siehe Meeker und Escobar [13]. Das optimale Prüflingsverhältnis für drei

beschleunigte Lastniveaus ist laut Meeker und Hahn [43] 4:2:1. Dabei sollen im Schnitt vier von sieben Prüflingen auf dem niedrigen und zwei auf dem mittleren beschleunigten Lastniveau getestet werden. Tang und Yang [46] bestimmen jedoch über verschiedene Ansätze annähernd optimale Prüflingsverteilung von schätzungsweise 5:3:2, d. h. 50 % der Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. Tang et al. [47] zeigen, dass es möglich ist, mit drei Lastniveaus durch Optimierung der Lage des mittleren Lastniveaus und der Prüflingsverteilung annähernd die asymptotische Varianz eines optimalen Testplans mit zwei beschleunigten Lastniveaus zu erreichen. Dabei wird vor allem die 4:2:1-Prüflingsverteilung und die Lage des mittleren Lastniveaus genau in der Mitte zwischen den anderen angepasst. Für Systeme mit Lebensdauermodellen, welche viele zu schätzende Parameter beinhalten, ist es laut Yang [24] notwendig, auch mit mehr als drei Lastniveaus zu planen. Auch Tang et al. [47] und Wu und Huang [48] untersuchen ein drittes beschleunigtes Lastniveau zur Bestimmung der optimalen Lage der Lastniveaus. Dabei werden von Wu und Huang drei Optimalitätskriterien untersucht, während Tang et al. auch die optimale Prüflingsverteilung bei drei Lastniveaus, mit dem Ziel der exakten Parametrisierung des zugrundeliegenden Lebensdauermodells, betrachten. Yang führt ein viertes Lastniveau ein und untersucht den Einfluss dessen auf die Genauigkeit und die Robustheit möglicher Erprobungspläne. Dabei werden auch zensierte Prüflinge berücksichtigt. Schwerpunkt ist der Vergleich von Testplänen mit 3 bzw. 4 Lastniveaus und u. a. die Gesamttestdauer und die Robustheit dieser Testpläne [24].

Typischerweise wird das höchste Lastniveau in allen Veröffentlichungen auf die maximal ertragbare Belastung des betrachteten Schädigungsmechanismus gelegt, d. h. dass gerade noch der gleiche Ausfallmechanismus wie auf Feldniveau angeregt wird, siehe Tang et al. [47] sowie Miller und Nelson [40]. Meeker und Escobar [45] bestätigen dies und verweisen auf die gleichzeitig damit einhergehende höhere Genauigkeit der Parameterschätzung. Die Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus kann demnach variiert werden, um einen optimalen Testplan zu finden.

Ein weiteres Kriterium ist die Minimierung der Testlänge und die Einhaltung eines vorgegebenen Erprobungsbudgets, wie beispielsweise bei Yang [24]. Tang und Xu [49] erweitern die klassische Optimalitätsbetrachtung neben der Genauigkeit auf die Kosten eines beschleunigten Tests, um die Testplanung auf konkurrierende Zielkriterien zu erweitern. Es wird gezeigt, dass die Testkosten unter bestimmten Bedingungen ohne große Einbußen an Genauigkeit der Parameterschätzungen reduziert werden können. Yang [50] betrachtet beschleunigte Testpläne mit Berücksichtigung der prognostizierten Garantiekosten. Diese werden für beschleunigte Lebensdauertests auf drei Lastniveaus untersucht, wobei hauptsächlich das niedrige beschleunigte Lastniveau variiert wird.

Zusätzlich gibt es eine Vielzahl von Optimalitätskriterien, welche meist auf Eigenschaften der Fisher-Informationsmatrix und ihrer Inversen abzielen, indem einzelne oder mehrere Varianzen und Kovarianzen in verschiedener Kombination minimiert werden, siehe Ng et al. [51], Chan et al. [52] und Ka et al. [53]. Beispiele hierfür sind die A-, D-, E-, I- und T-Optimalität. Für eine anwendungsbezogene Beschreibung und Interpretation ausgewählter Kriterien sei auf Kapitel 4.3.2 verwiesen. Weitere klassische Optimierungskriterien sind hierbei die Minimierung der Testdauer, die Einhaltung von Erprobungsbudgets [24], die Anzahl zu berücksichtigender Lastniveaus und die Robustheit einer Teststrategie gegenüber Unsicherheiten von Eingangsparametern des Modells, siehe Tang und Yang [46].

Nebenziele der Testplanung, nach welchen in der Literatur optimiert wird, sind zum Beispiel die Erhöhung der Robustheit einer Teststrategie gegenüber Unsicherheiten in den Lebensdauermodell- und Verteilungsparametern, siehe Yang [24]. Dies geschieht unter anderem durch Hinzufügen von Lastniveaus und die Berücksichtigung von zensierten Prüflingen.

Bai et al. [54] vergleichen optimale Testpläne für einfache beschleunigte Step-Stress-Tests. Optimierungsziel ist dabei die asymptotische Varianz der mittleren geschätzten Lebensdauer auf Feldniveau. Zusätzlich werden Nomogramme geliefert, mit welchen sich optimale Testpläne grafisch ermitteln lassen. Auch die Robustheit fehlerhaften Vorwissens wird untersucht.

2.5.4 Wöhlerversuch und Wöhlerdiagramm

Der Wöhlerversuch nach DIN 50100 [55] dient der grundlegenden Untersuchung von Werkstoffproben unter dauerschwingenden Belastungen. Ein Wöhlerversuch ist ein beschleunigter Lebensdauertest, bei dem die Grenze der Dauerfestigkeit sowie die Ermüdungslebensdauer bestimmt werden. Hierfür wird eine Stichprobenmenge einer gleichförmigen, zyklischen Belastung ausgesetzt [4], [56]. Aus den Ergebnissen der Stichprobenversuche wird mit statistischen Methoden auf die Grundgesamtheit der Bauteile geschlossen und so die Wöhlerlinie bestimmt, siehe Abbildung 2.6, [1] sowie [56].

Bei der Durchführung des Versuchs werden mehrere Proben eines Werkstoffs mit einheitlicher Oberflächenbeschaffenheit bei konstanter Mittelspannung bzw. konstantem Spannungsverhältnis mit unterschiedlichen Spannungsamplituden (Lastniveaus) bis zum Ausfall belastet [57], [58]. Der dabei angeregte Schädigungsmechanismus strukturmechanische Ermüdung wird durch wiederholte Belastungen verursacht und führt zu einer Schädigung, also einer Verschlechterung der Leistungsparameter einer Einheit [56], [57]. Durch die Schädigung wird mit zunehmenden Lastwechseln die Festigkeit des Werkstoffs gesenkt, bis es zu einer Rissbildung und schließlich zu

einem Bruch kommt. Dies wird mit mehreren Proben auf mehreren Lastniveaus wiederholt, um so die Belastbarkeit der getesteten Einheiten zu bestimmen und die Belastbarkeit der Gesamtpopulation abzuleiten [4]. Es wird also für jede Probe die Lebensdauer bis zum Ausfall durch Zählen der Bruchschwingspielzahlen ermittelt.

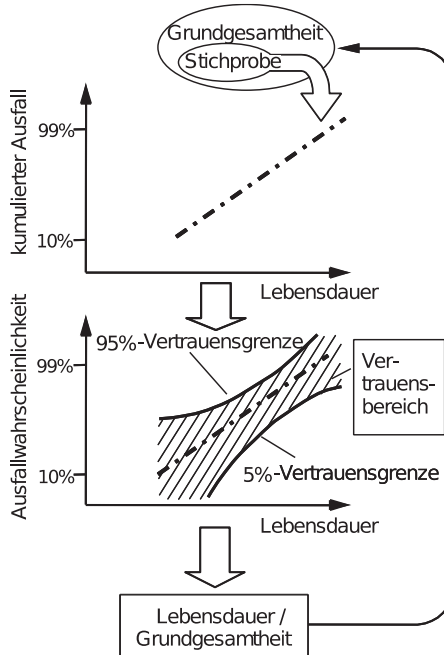


Abbildung 2.6: Schluss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit [1]

Bei kleinem Stichprobenumfang und vielen Parametern, die die Schädigung beeinflussen, streuen die Versuchsergebnisse stark. Deshalb ist eine Mindestanzahl an Proben, sowie eine statistische Planung und Auswertung notwendig. In der Praxis werden daher Proben auf bis zu fünf Belastungsniveaus mit je 6-10 identischen Einheiten bis zum Ausfall belastet [58], wodurch ein Streuband von Ausfalldaten im Diagramm aufgetragen werden kann. Anschließend können die Versuchsergebnisse ausgewertet werden und dadurch die Wöhlerlinie für eine bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Durch statistische Verfahren können nachfolgend Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen werden [4], [58]. Für die Bestimmung der Ausfallverteilung wird ein doppellogarithmisches Diagramm verwendet, welches das Belastungsniveau über die Lebensdauer (meist: $\ln(\text{Spannungsamplitude})$ über $\ln(\text{Anzahl Schwingspiele})$) aufrägt [56], [59], [60]. Die so entstehende Kurve wird Wöhlerlinie

genannt, welche den Zusammenhang zwischen dem auftretenden Belastungsniveau und der Anzahl an ertragbaren Schwingungen (also der Lebensdauer) der Einheit darstellt [1], [4], [57]. Die Wöhlerlinie kann in drei Abschnitte unterteilt werden, Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit, welche sich durch einen jeweils charakteristischen Verlauf identifizieren lassen. Die Kurzzeitfestigkeit ist die maximal zulässige Belastung der Einheit [59], bei der es durch die hohen Belastungsniveaus zu schnellen Ausfällen kommt [60]. Die Zeitfestigkeitslinie bildet die Grenze zwischen intakten Einheiten (unter der Wöhlerlinie) und ausgefallenen Einheiten (über der Wöhlerlinie) [1], [4]. Die Belastungen im Dauerfestigkeitsbereich werden auch als (theoretisch) beliebig oft ertragbare Belastungen bezeichnet, welche eine unbegrenzte Lebensdauer ergeben [56], [59], [60].

Die Steigung des linearen Verlaufs im Zeitfestigkeitsbereich wird als Wöhlerexponent k bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der entsprechenden Schwingungszahl N im Zeitfestigkeitsbereich und der Dauerfestigkeitsspannung σ_D sowie der Dauerschwingungszahl N_D lautet

$$r_{\text{Wöhler}} = \frac{N}{N_D} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad (2.16)$$

$r_{\text{Wöhler}}$ beschreibt dabei den Raffungsfaktor des Wöhler-Lebensdauermodells bei der vorliegenden Belastung. N bezeichnet die Lastwechselzahl, wie lange die Wöhlerprobe im Test belastet wird und N_D die Lastwechselzahl, ab welcher Dauerfestigkeit angenommen wird (Ecklastschwingungszahl). σ bezeichnet die Bauteilspannung und σ_D die Bauteilspannung ab der Dauerfestigkeit besteht. k ist der Wöhlerexponent oder -koeffizient. Durch die Annahme eines konstanten Wöhlerexponenten ist sichergestellt, dass sich für ein und dieselbe beschleunigte Bauteilspannung, bei konstantem Feldlastniveau, immer derselbe Raffungsfaktor ergibt.

Experimentell kann beobachtet werden, dass eine zunehmende Bauteilgröße die Dauerfestigkeit stark abnehmen lässt. Dies wird als Größeneffekt bezeichnet. Abbildung 2.7 zeigt diesen Einfluss schematisch. Der Wöhlerexponent der kleinen Probe ist größer als bei den anderen beiden Proben. Die Probe mit kleinem Durchmesser weist eine höhere Dauer- sowie Schwingfestigkeit im Vergleich den anderen Proben auf. Diese Verschiebung der Dauer- sowie Schwingfestigkeit kann unter anderem auf den statistischen Größeneinfluss zurückgeführt werden. Dieser beschreibt die höhere Wahrscheinlichkeit, dass ein großes Volumen einer Probe auch eine höhere Anzahl an Fehlstellen aufweist, welche als Ausgangspunkt einer Rissinitiierung und damit eines Dauerbruchs fungieren. Castillo und Fernandez-Canteli modellieren für einen stark vereinfachten Fall die Ausfallwahrscheinlichkeit eines längeren Bauteils als unabhängiges serielles System, welches mit größerer Bauteilgröße zusätzliche Einzelemente gewinnt, welche die Zuverlässigkeit des seriellen Systems verringern [61].

Unter dem technologischen Größeneinfluss versteht man Einflüsse aufgrund fertigungsbedingter Besonderheiten. Das führt dazu, dass die Bauteile unterschiedlicher Größe verschiedene Gefügeausbildungen und Spannungszustände und damit auch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen können [58].

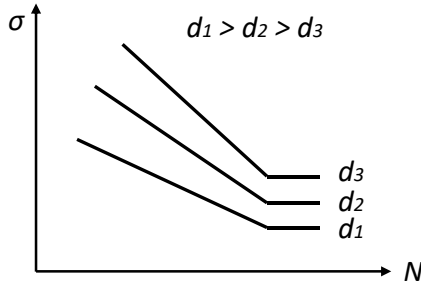


Abbildung 2.7: Schematischer Verlauf der Wöhlerlinie in Abhängigkeit der Probengröße d , nach [58]

Die Dauerfestigkeit und die Ecklastschwingspielzahl werden des Weiteren durch den Werkstoff, die Beanspruchungsart, den Größeneinfluss, die Kerbwirkung, die Oberflächenbeschaffenheit, Umgebungseinflüsse sowie durch die anliegende Mittelspannung beeinflusst. Ursachen wie Werkstoffinhomogenitäten, Abweichungen in der Wärmebehandlung, in der Oberflächenqualität der Probe und Einflüsse aus dem Fertigungsprozess sorgen für eine sehr starke Streuung der Schwingfestigkeitswerte einer Wöhlerprobe.

2.5.5 Lebensdauermodelle

Beim Lebensdauertest mit Beschleunigung durch Belastungserhöhung gibt es verschiedene physikalische bzw. chemische Modelle, mit denen der Raffungsfaktor berechnet werden kann. Diese Lebensdauermodelle beschreiben den Zusammenhang zwischen Belastungsniveau und Ausfallverhalten für unterschiedliche Schädigungsmechanismen [57]. Gängige Lebensdauermodelle sind die Lebensdauermodelle nach Wöhler, Arrhenius und Coffin-Manson. Diese eignen sich zur Modellierung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen. In der vorliegenden Arbeit wird nur das Wöhlermodell betrachtet, die Übertragbarkeit auf andere Modelle ist jedoch durchgängig gewährleistet. Das allgemeine Lebensdauermodell nach Wöhler eignet sich insbesondere zur Beschreibung im Falle des dominierenden Schädigungsmechanismus strukturelles Versagen oder Bruch. Es besagt, dass bei zeitvarianter Beanspruchung einer Komponente die Zeit bis zum Ausfall von der wirkenden Mittelspannung

und der Spannungsamplitude abhängig ist [62]. Damit lässt sich die Lebensdauer eines Bauteils (in Lastwechseln) in Abhängigkeit der Belastung darstellen.

2.5.6 Auswerteverfahren von Wöhlerversuchen

Die Zeitfestigkeitsgerade kann nach [55] über das Perlenschnur- oder über das Horizontenverfahren ermittelt werden. Beim in der vorliegenden Arbeit verwendeten Perlenschnurverfahren (PSV) können Versuche, welche auf verschiedenen Lastniveaus ($load_2$ und $load_1$, Abbildung 2.8) durchgeführt wurden, gemeinsam ausgewertet werden, indem durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LSM, siehe 2.3) eine geeignete Regressionsgerade mit der Steigung k gesucht wird. Alle Ausfalldaten werden parallel zu dieser Geraden auf ein Lastniveau ($load_2$, Abbildung 2.8) verschoben und anschließend über eine Weibull-Analyse die Parameter des Ausfallverhaltens geschätzt. Dabei wird angenommen, dass das Ausfallverhalten lastunabhängig ist, d. h. der Weibull-Formparameter ist konstant.

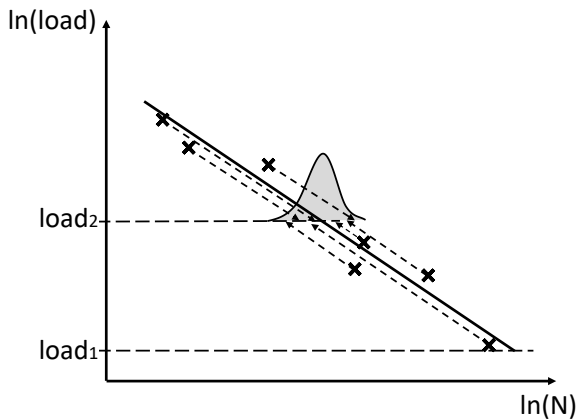


Abbildung 2.8: Perlenschnurverfahren in Anlehnung an DIN 50100 [55]

2.6 Probability of Test Success

Ziel von Lebensdauertests ist es, für ein Bauteil eine geforderte Zuverlässigkeit $R(t)$ mit einer Aussagewahrscheinlichkeit P_A für eine bestimmte Lebensdauer t nachzuweisen. Wird ein Lebensdauertest mehrfach durchgeführt, unterscheiden sich die Ausfallzeiten und damit die in der Weibullanalyse nachgewiesene Zuverlässigkeit,

was dazu führt, dass ein Zuverlässigkeitsziel bei gleichem Testaufbau und Testdurchführung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erfolgreich nachgewiesen werden kann. In der Praxis muss ein Lebensdauertest in der Lage sein, den Zuverlässigkeitsnachweis mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erbringen. Diese Wahrscheinlichkeit kann über die Teststrategie und deren Konfiguration (Prüflingszahl, Testzeiten etc.) beeinflusst werden. Für diesen Zweck wurde von Dazer [63] erstmals die *Probability of Test Success* P_{ts} eingeführt.

2.6.1 Konzept der Probability of Test Success

Die *Probability of Test Success* bewertet die Qualität der Lebensdauertests und ermöglicht den Vergleich verschiedener Teststrategien und Testkonfigurationen. Zusätzlich ermöglicht sie neben der Berücksichtigung des Fehlers 1. Art, welcher über die Ausgawahrscheinlichkeit in die Zuverlässigkeitstestplanung eingebunden ist, auch die Integration des Fehlers 2. Art, siehe Grundler et al. [64]. Die *Probability of Test Success* basiert dabei auf einer wiederholten Generierung virtueller Ausfallzeiten anhand gegebenen Vorwissens. Diese werden analysiert und in jedem Simulationsschritt die obere Vertrauensgrenze mit der Lebensdaueranforderung verglichen. Damit berechnet sie sich aus dem Verhältnis der Anzahl erfolgreicher Tests, welche die Lebensdaueranforderung erfüllt haben und der simulierten Gesamtzahl der Testdurchläufe:

$$P_{ts} = \frac{\text{Anzahl erfolgreicher Tests}}{\text{Gesamtzahl der Testdurchläufe}} \quad (2.17)$$

Dabei kann bei gleichen Randbedingungen einer Testkonfiguration eine eindeutige *Probability of Test Success* zugeordnet werden, welche simulativ ermittelt werden kann, indem eine Vielzahl virtueller Tests analysiert wird und nach Gleichung (2.17) ausgewertet wird. Für jeden analysierten virtuellen Test und seine festgelegte Testkonfiguration werden dafür anhand von Vorwissen Ausfallzeiten generiert. Dies ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

Für die Testplanung eines End-of-Life-Tests werden für die zufällig anhand des Vorwissens generierten Ausfallzeiten anschließend der Formparameter b und die charakteristische Lebensdauer T geschätzt und der dazugehörige 90%-Fisher-Vertrauensbereich berechnet. Dadurch ergibt sich die Lebensdauer $B_{10, virt, 95\%}$. Ein erfolgreicher Test ist erbracht, wenn die geschätzte virtuelle B_{10} -Lebensdauer unter Berücksichtigung des Vertrauensbereichs größer als die nachzuweisende Lebensdauer ist. Die nachzuweisende Lebensdauer ergibt sich aus $(1-S) \cdot B_{10, wahr}$. Es handelt sich dabei um die wahre B_{10} -Lebensdauer unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes S . Dieser Sicherheitsabstand, als Differenz von Lebensdauerziel und inhären-

tem Ausfallverhalten, erlaubt den Vergleich von Zuverlässigkeitsnachweisen unterschiedlicher Testkonfigurationen. Da die zu überprüfenden $B_{10, virt, 95\%}$ -Lebensdauern aus zufällig erzeugten Ausfallzeiten bestimmt werden, unterliegen sie einer gewissen Schwankung. Der Sicherheitsabstand erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die nachzuweisende Lebensdauer nachgewiesen werden kann. Durch einen größeren Sicherheitsabstand wird die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Test erhöht.

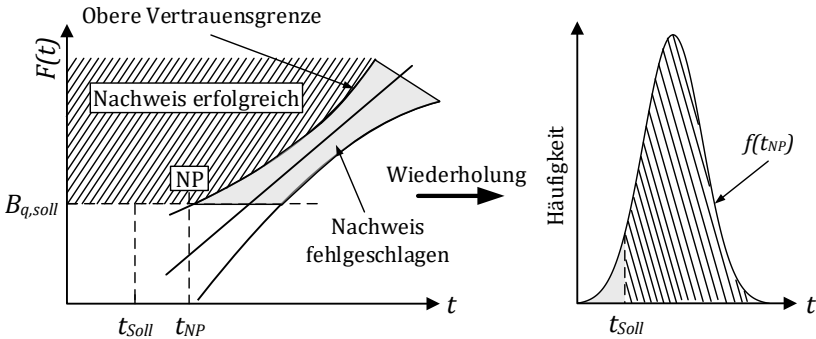


Abbildung 2.9: *Probability of Test Success* bei End-of-Life-Tests [65]

Bei der Testplanung mit Success-Run-Test wird die Größe der Stichprobe anhand der Binomialgleichung durch die nachzuweisende Mindestzuverlässigkeit und Aussagewahrscheinlichkeit bestimmt. Die zu testende Prüfdauer ergibt sich aus der nachzuweisenden Lebensdauer des Bauteils. Der Nachweis ist erbracht, wenn innerhalb der Prüfdauer jedes virtuellen Tests kein Prüfling ausfällt.

2.6.2 Stand der Forschung *Probability of Test Success*

Die *Probability of Test Success* wird als zentrale Größe verwendet, als diejenige Wahrscheinlichkeit mit der ein Lebensdauertest in der Lage ist, die gestellten Anforderungen nachzuweisen, siehe Dazer et al. [63] und [66]. Dabei werden, basierend auf dem Vorwissen über das zu untersuchende Produkt, anhand einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) virtuelle Ausfallzeiten generiert und ein Sicherheitsabstand zur Beschreibung der Überdimensionierung eingeführt. In [65] wird die Umsetzung des Konzepts von Dazer an einem realen Produkt angewandt, wobei die Übertragung auf die praxisrelevanten beschleunigten Lebensdauertests hier nicht vorgenommen wurde. Das Vorwissen wird dabei unter individuellen Randbedingungen als Basis für die Zuverlässigkeitstestplanung unterschiedlicher Teststrategien verwendet, um die Eignung der

Teststrategien für die Erfüllung gestellter Anforderungen festzustellen [63], [66]. Dazer et al. [66] beschreibt den Zusammenhang von *Probability of Test Success* und Sicherheitsabstand im Falle vollständiger und zensierter Lebensdauertests sowie für Sudden-Death-Tests. Dabei wird insbesondere untersucht, warum ein Anstieg der Stichprobengröße zu einer Verringerung der *Probability of Test Success* führen kann.

Aus den Ergebnissen lassen sich die Korrelationen zwischen den betrachteten Parametern und den Zielgrößen bestimmen. Durch eine Regressionsanalyse ergeben sich in Dazer [65] Polynome, mit welchen eine optimale Testkonfiguration für den individuellen Anwendungsfall bestimmt werden können. Für den universellen Einsatz der Methode wurden die Randbedingungen mit Hilfe des Design of Experiments untersucht. Berücksichtigung finden auch unterschiedliche Auslegungssicherheiten, um unterschiedliche Auslegungskonzepte in der Produktentwicklung im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsabsicherung zu vergleichen. Ebenso wird in [65] die *Probability of Test Success* zwischen LSE- und MLE-Schätzer untersucht und festgestellt, dass der LSE im Bereich kleiner Lebensdauerquantile konservativere Werte liefert, während die Ergebnisse der Maximum-Likelihood-Schätzung teilweise zu hoch ausfallen.

2.7 Numerische Verfahren zur Simulation und Rechenzeitverkürzung

Der quantitative Vergleich der in der Arbeit implementierten Methoden basiert auf Parameterstudien, bei denen die zu untersuchenden Parameter über den in der Anwendung üblichen Parameterbereichen betrachtet werden. Hierfür ist es üblich, jeden der betrachteten Parameter einzeln und in Kombination mit den anderen zu variieren. Dies erfordert umfangreiche Simulationen und Vorgehensweisen, diese aufgrund der Parametervielfalt zeitlich zu beschleunigen.

2.7.1 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Sampling-Verfahren, bei dem durch Generierung von Zufallszahlen als Eingangsparameter ein Modell mehrfach mit verschiedenen Parameterkombinationen simuliert wird, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausgangsparameter eines Modells zu schätzen [67]–[69]. Sie lässt sich damit zur Bestimmung einer approximativen Lösung verwenden [70].

Die Monte-Carlo-Simulation basiert also auf wiederholtem Simulieren von zufällig gezogenen Parametern aus dem jeweiligen betrachteten Parameterbereich. Diese Zufallszahlen dienen für jeden Simulationsschritt als Eingangsdaten für ein Modell, welches abhängig davon Ausgangswerte erzeugt. Diese Ausgangswerte sind für jede neue Kombination an zufällig gezogenen Eingangsparametern unterschiedlich. Durch vielfaches Wiederholen werden viele Ausgangswerte erzeugt, welche statistisch ausgewertet werden können [71].

Für eine große Anzahl an Simulationen n konvergiert die relative Häufigkeit der Ausgangswerte gegen ihre tatsächliche Verteilung und damit gegen den Erwartungswert. Dies lässt sich über das Gesetz der großen Zahlen zeigen [72]. Die Konvergenzrate der Monte-Carlo-Simulation ist $1/\sqrt{n}$. Von Nachteil ist das dadurch verursachte Problem der langen Rechenzeiten komplexer Modelle und die Ungenauigkeit der Ausgangswerte bei geringer Simulationsanzahl [67].

2.7.2 Latin-Hypercube-Sampling

Latin-Hypercube-Sampling (LHS) ist eine Sampling-Methode, welche von McKay [73] eingeführt und durch Stein [74] und Owen [75] weiter untersucht wurde. LHS kann dazu verwendet werden, die Varianz der Ausgangsparameter in einer Monte-Carlo-Simulation bei gleichzeitiger Reduktion der Simulationsanzahl zu verringern [68], [74], [76].

Im LHS wird der Parameterraum dafür in gleichteilige quadratische Bereiche eingeteilt, in denen jeweils, wie im lateinischen Quadrat, eine Stichprobe bzw. eine Kombination aus Eingangsparametern aus jedem dieser Bereiche generiert wird [77], [78]. In der praktischen Anwendung entspricht dies einer effizienteren Abdeckung des zu untersuchenden Parameterraums und damit einer Möglichkeit, eine Vielzahl an Simulationen bei gleichbleibender Varianz der approximierten Lösung einzusparen. Für eine umfassende Betrachtung der LHS sei auf Glassermann [79] und Janssen [80] verwiesen.

2.7.3 Neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind nichtlineare statistische Modelle und werden für die Modellierung, aber auch in der Datenanalyse, eingesetzt. Das Grundprinzip hat dabei die Informationsverarbeitung eines Gehirns zum Vorbild, siehe Martini [68]. Auf Basis gegebener Daten ist es einem KNN möglich, beim überwachten Lernen Zusammenhänge zu erkennen, welche komplex, aber auch algebraisch nicht oder nicht sinnvoll formulierbar sind, wie in Hastie et al. beschrieben [81]. Neuronale Netze ermitteln

durch „Training“ den Zusammenhang zwischen Variablen, deren Wirkungsbeziehungen nicht ersichtlich sind [82]. Nachteil der Verwendung von neuronalen Netzen ist, dass die einzelnen Zusammenhänge zwischen den Variablen i. d. R. nicht aufgezeigt werden [68].

Grundelemente neuronaler Netze sind mit Synapsen verbundene Neuronen, welche in Schichten angeordnet sind. Diese Neuronen verrechnen gewichtete und aufsummierte Eingangswerte x mit einem konstanten Betrag (*Bias*) und bilden diese über eine Aktivierungsfunktion (auch: Transferfunktion) φ zu einem Ausgangswert y ab. Wichtige Unterscheidungsmerkmale dieser Funktionen sind ihre Differenzierbarkeit, Beschränktheit und Injektivität (Umkehrbarkeit). Die Grundelemente und ihre Eigenschaften sind näher in Backhaus et al. [82], Fausett [83] sowie Aggarwal [84] beschrieben.

Die einfachste Form eines neuronalen Netzes ist dabei ein einzelnes Perzeptron, welches aus einer Eingabe- und Ausgabeschicht und einer dazugehörigen Aktivierungsfunktion mit Gewichten besteht. Dies ist in Gentle et al. [69] sowie Henß und Bertsche [85] beschrieben. Input des Perzeptrons können Parameter sein, welche wie beschrieben über die Aktivierungsfunktion den Output generieren. Ein einfaches Perzeptron kann für lineare Problemstellungen angewendet werden. Zur Lösung komplexerer Problemstellungen werden Mehrschicht-Perzeptrone eingesetzt, wobei sich durch Verbindung vieler Perzeptrone ein komplexeres KNN mit mehreren *Hidden Layers* (Zwischenschichten) bildet. Die Grundstruktur der künstlichen neuronalen Netze besteht damit allgemein aus einer Eingabeschicht (Input-Layer), einer oder mehreren verdeckten Schichten (Hidden-Layer), einer Ausgabeschicht (Output-Layer) und den verbindenden Kanten [68].

Je nach Einsatzzweck bzw. Art der untersuchten Daten unterscheidet man zwischen überwachtem, teilüberwachtem oder nicht-überwachtem Lernen. Die in dieser Arbeit betrachteten neuronalen Netze werden mit bekannten Zielgrößen trainiert und ermitteln eine kontinuierliche Ausgangsgröße. Daher wird im Weiteren nur das überwachte Lernen betrachtet.

Die Grundlagen des Lernens eines neuronalen Netzes liegen in der iterativen Anpassung der Gewichte, sodass der Fehler zwischen den realen Ausgangsgrößen und den geschätzten Ausgangsvariablen der Ausgabeschicht so klein wie möglich wird [82]. Die ermittelte Abweichung wird in einer Fehlerrückführung (Backpropagation) zum Update der Gewichte der Kanten sowie des *Bias* der Neuronen genutzt. Das Training wiederholt sich, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Das trainierte Modell wird anschließend genutzt, um auch für bisher nicht gesehene Inputs den unbekanntem Output zu bestimmen. Vertiefende Informationen zur Fehlerrückführung und zum *Bias* sind in Gentle et al. [69], Aggarwal [84] sowie Henß und Bertsche [85] zu finden.

Im Trainingsprozess werden die Kantengewichte und *Biases* ermittelt. Dabei wird ein Datensatz mit bekannten Eingangs- und Ausgangsparametern in Trainings- und Validierungsdatensatz aufgeteilt. Für manche Lern- oder Trainingsalgorithmen wird zusätzlich ein Testdatensatz entnommen. Iterativ berechnet der gewählte Lernalgorithmus die Abweichung zwischen dem vom Netz ermittelten Ausgangswert und dem tatsächlichen Zielwert. Diese Abweichung wird durch Anpassung der Parameter minimiert. Dabei muss *Overfitting* vermieden werden, d. h. das neuronale Netz darf die Trainingsdaten nicht auswendig lernen. Dafür können beispielsweise *Bottleneck*-Architekturen verwendet werden. Der Trainingsprozess wird abgebrochen, sobald ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Andere Abbruchkriterien sind ebenfalls möglich, z. B. Grenzwertunterschreitung (min. Fehler, max. Trainingswiederholungen, max. Zeit) oder einsetzendes *Overfitting*. Die Trainingsdaten werden in mehreren Epochen verwendet, wobei eine Epoche einem kompletten Durchgang durch den Datensatz entspricht. Dies verbessert die Konvergenz, da es im Allgemeinen mehrere lokale Minima der Fehlerfunktion gibt, die nicht dem globalen Minimum entsprechen. Für weitere Details zum *Overfitting* sei auf Aggarwal [84], Bishop [86] sowie Tishby und Zaslavsky [87] verwiesen.

Performanceindikatoren dienen der Bewertung eines neuronalen Netzes. Dafür lassen sich klassische Regressionsindikatoren wie der mittlere quadratische prozentuale Fehler (*MSE*, engl. *mean squared error*) und der Korrelationskoeffizient R bzw. das Bestimmtheitsmaß R^2 verwenden. Die Verwendung des *MSE* als Kriterium hat den Vorteil, dass der Einfluss jedes Datenpunkts auf den Performanceindikator unabhängig von der Größe des Zielwertes ist und *MSE* damit auch bei nichtlinearen Zusammenhängen ein verlässlicher Indikator für die Güte ist. Dies kann beispielsweise durch Normierung aller Ausgangs- und Zielgrößen mit dem betragsmäßig größten Wert geschehen. R^2 ist eine dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ausgangs- und Zielgrößen, wobei $R^2 = +1$ einer vollkommenen Proportionalität entspricht. Diese Performanceindikatoren sind detailliert in Aggarwal [84] und Bishop [86] beschrieben.

Der Lernalgorithmus hat die Aufgabe, die Kantengewichte und *Biases* zu finden, welche die höchste Güte des zu trainierenden neuronalen Netzes ermöglichen. Beim überwachten Lernen wird dabei meist das *Backpropagation*-Verfahren verwendet. Der dabei rückgeführte Fehler wird genutzt, um beispielsweise über ein Gradientenverfahren die Abweichung zu minimieren, wobei das Minimum entlang des Gradienten des Fehlers gesucht wird. Der Lernalgorithmus selbst beeinflusst Konvergenzgeschwindigkeit und Dämpfungsfaktoren. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LM) berücksichtigt hierbei die Integration der zweiten Ableitung in den Lernprozess, während die in dieser Arbeit verwendete Methode *Bayesian Regularization* (BR) den LM-

Algorithmus um einen weiteren, von den Kantengewichten abhängigen Term erweitert. Dieser bestraft *Overfitting*. Zu näheren Informationen über verschiedene Lernalgorithmen sei auf Ripley [88], Levenberg [89], Marquardt [90] sowie Hagan und Menhaj [91] verwiesen.

2.8 Methoden der anforderungsgerechten Produktauslegung

Mit den Überbegriffen Design for X und zuverlässigkeitsbasierte Optimierung stehen bereits zwei Forschungsbereiche in der Schnittstelle zwischen der Zuverlässigkeitstechnik und der Produktauslegung. Daher sollen beide vorgestellt und die vorliegende Arbeit eingeordnet und abgegrenzt werden.

2.8.1 Design for X

„Der Begriff **Design for X** (DfX) steht für die Bestrebungen in der Produktentwicklung die in den meisten Fällen widersprüchlichen Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt gleichzeitig zu berücksichtigen und den bestmöglichen Kompromiss zwischen ihnen zu finden.“, siehe Stöber et al. [92]. DfX verfolgt dabei den Ansatz, neben der Funktionserfüllung auch weitere zentrale Anforderungen in der Produktentwicklung zu berücksichtigen, welche sich je nach Anwendung unterscheiden. Diese zusätzlichen Anforderungen sind bei Zielkonflikten immer der Funktionserfüllung untergeordnet, weshalb sie auch als nicht funktionsrelevante Forderungen bezeichnet werden. Diese können neben den Kosten beispielsweise auch die Zuverlässigkeit sein, wobei dann wie in Ehrlenspiel und Meerkamm auch von *Design for Reliability* gesprochen wird [93].

Design for Reliability (DfR) umfasst Vorgehensweisen der Zuverlässigkeitstechnik und ordnet ihre Anwendung in den Produktentwicklungszyklus ein. Es umfasst damit den gesamten Lebensdauerzyklus eines Produkts inkl. Ideen- und Konzeptphase und Obsoleszenz. DfR kann dabei als eine Vorgehensweise beschrieben werden, wie unter anderem bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung die Zuverlässigkeit als Anforderung integriert werden kann. Dadurch ist es möglich, sicherzustellen, dass die Kundenanforderungen zur Zuverlässigkeit eines Systems oder Bauteils in der Nutzungsphase des Produkts erfüllt werden können. DfR ist meist nicht exakt definiert, siehe Silverman und Kleyner [94]. Huang und Jin [95] definieren DfR als strukturierte Designmethodik, welche die Designentscheidung durch parametri-

sche Zuverlässigkeitsmodelle unterstützt, um quantitative Zuverlässigkeitsanforderungen oder -ziele in allen Phasen der Produktentwicklung zu erfüllen. Crowe [96] beschreibt Design for Reliability als einen der wichtigsten Bausteine eines Zuverlässigkeitsabsicherungsprogramms. Dadurch ist es früh im Entwicklungsprozess möglich, potentielle Probleme zu vermeiden. Methoden, welche das DfR unterstützen, sind dabei unter anderem klassische qualitative Methoden, wie die FMEA und Zuverlässigkeitstests zur Validierung, aber auch Physics-of-Failure-Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge im Material, welche zu einem Ausfall oder zu Degradation führen. Taylor [97] gibt hierfür einen einfachen Überblick, wie mit den Grundlagen der Zuverlässigkeitstechnik ein Produkt qualitativ verbessert werden kann, um beispielsweise sicherheitskritische Ausfälle zu vermeiden. Taylor verwendet dabei Methoden wie die Pareto-Analyse, um Ausfälle zu priorisieren und das Vorkommen der häufigsten Fehler zu verringern. Silverman und Kleyner [94] ordnen DfR als Gegenpol zum klassischen Vorgehen „Testen – Analysieren und Beheben“ ein. Sie empfehlen die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in jeder Entscheidung in einem Unternehmen, um schlussendlich das Produkt zu verbessern, die Lebensdauerzykluskosten zu senken und die Kundenzufriedenheit zu erhöhen. Auch Mettas [98] betont die systematische Anwendung der zahlreichen Zuverlässigkeitsmethoden, um die Kundenerwartungen an die Zuverlässigkeit eines Produkts zu erfüllen. Er grenzt DfR vom Design for Six Sigma insbesondere durch den zeitlichen Aspekt ab, da Design for Six Sigma hauptsächlich nur die Fertigung betrachtet, nicht aber das Langzeitverhalten.

Ireson und Combs [99] stellen eine Liste von Richtlinien für Design for Reliability zur Verfügung. Diese sind u. a.

- die Einfachheit der Systeme, um die Anzahl der Komponenten und Fehlermodi zu reduzieren,
- die Verwendung von bewährten Komponenten und bevorzugten Ausführungen, um den Zuverlässigkeitsnachweis zu beschleunigen,
- eine fundierte Belastungs- und Festigkeitsauslegung,
- Verwendung von Redundanzen,
- die Berücksichtigung der Umgebung, um alle Belastungen auf ein System kontrollieren zu können und
- die Identifikation und Eliminierung kritischer Fehlermodi.

DfR-Methoden werden seit Jahren entwickelt und weiterentwickelt, beispielweise von Crowe [96], Nikolaidis et al. [100] sowie El-Haik und Suh [101]. Crowe gibt dabei eine umfangreiche methodische Einordnung des DfR in den Produktentwicklungsprozess und in die Erfüllung der Zuverlässigkeitsanforderungen. Sie stellt zusätzlich Methoden zum Verstehen und Ableiten der Kundenanforderungen, aber auch zahlreiche Testmethoden vor, um die Erfüllung der Anforderungen zu überprüfen. Nikolaidis et

al. fasst DfR-Vorgehensweisen aus zahlreichen Untersuchungen zusammen und stellt anwendungsbezogene Herausforderungen aus der Praxis vor. El-Haik und Suh betrachten die Beziehungen zwischen DfR, Design for Six Sigma und axiomatischem Design und verknüpft diese unter dem Begriff *Axiomatic Quality*. Damit bezeichnen sie einen umfassenden Ansatz zur Betrachtung der Qualität von Produkten und Prozessen, aber auch ihrer Zuverlässigkeit, welche über die Erfüllung funktionaler Anforderungen gesteigert wird.

Laut Huang [102] besteht eine signifikante Lücke zwischen den beiden Disziplinen Produktentwicklung und Zuverlässigkeitstechnik, sowohl in Forschung als auch in der industriellen Anwendung. Diese umfasst zum einen die Vernachlässigung quantitativer Zuverlässigkeitsparameter, welche sich beispielsweise aus verschiedenen Produktalternativen ergeben, aber auf Grund fehlender Methoden oder Motivation nicht ermittelt werden. Zum anderen umfasst diese Lücke auch den Produktentwicklungsprozess selbst, wobei insbesondere die Schnittstelle von Konzeptphase zur Ausarbeitungsphase nicht fließend ist und daher ermittelte Zuverlässigkeitsinformationen in der Ausarbeitungsphase nicht ausreichend genutzt werden. Paganin und Borsato [103] geben einen Überblick über aktuelle Forschungsgebiete im Bereich des DfR. Diese werden aus einer umfangreichen Literaturanalyse abgeleitet. Forschungsbedarf liegt demnach u. a. in der Analyse historischer Testdaten, um die Wirksamkeit von Zuverlässigkeitsmethoden zu untersuchen und in der Erarbeitung einer umfassenden und gesamtheitlichen Methodik zum DfR.

Die Grundidee der Verknüpfung von Produktauslegung und Zuverlässigkeit ist bereits in der Idee der Stress-Strength-Interference, beispielsweise in Lee [104] vorhanden. Darauf aufbauend wurde die Methodik der Probabilistic Design Analysis (PDA) entwickelt, siehe Augusti et al. [105], welche den Einfluss von Zufallsvariablen auf die Leistungsfähigkeit bestimmter Funktionen eines Systems beschreibt. Werden Grenzwerte bestimmter Eigenschaften überschritten, steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Bauteilversagens.

Taguchi [106] beschreibt ein Konzept, wie die Robustheit eines Produkts gesteigert werden kann, was indirekt auch die Zuverlässigkeit erhöht. Allerdings steht diese dabei nicht explizit im Fokus und wird daher nicht quantifiziert. Lough et al. [107] stellen die Methode Risk-In-Early-Design (RED) vor, bei der die konzeptionelle Design-Risikobewertung betrachtet wird. RED ermöglicht es, anhand von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen Funktionen eines Produkts anhand historischer Ausfallinformationen anzupassen. Die Untersuchungen von Mehr und Tumer [108] haben das Ziel, verfügbare Ressourcen möglichst optimal auf die ausstehenden Designaktivitäten zu verteilen, um die Zielfunktion Ausfallwahrscheinlichkeit zu senken.

In Silverman und Kleynner [94] wird ein allgemeiner Sechs-Schritte-Plan vorgestellt, wie der Zuverlässigkeitsnachweis in die Produktentwicklung integriert und in

jedem Schritt berücksichtigt werden kann. Einer dieser Schritte ist der Test des Produkts unter Feldbedingungen zum Nachweis der Produktionsreife, wobei in der Praxis aufgrund knapper Entwicklungszeitpläne die Zuverlässigkeit mit dem Success-Run-Test nachgewiesen wird, um die testzeitabhängigen Kosten gering zu halten. [94] vernachlässigt dabei die Planung und Durchführung der Lebensdauertests. Diese ist jedoch abhängig von der Produktauslegung und kann daher nicht unabhängig davon betrachtet werden. Askari und Nourani [109] stellen einen Design-for-Reliability-Ansatz zur selektiven Überdimensionierung elektrischer Schaltkreise vor, wobei durch gezieltes Überdimensionieren ausgewählter Teilkomponenten mit großem Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit das Produkt verbessert wird. Dazu zählt auch die Verwendung von Redundanzen. Die Nachweisbarkeit der Systemzuverlässigkeit im Test und die Kosten durch die selektive Überdimensionierung werden nicht betrachtet. Kuo et al. [110] gibt einen Überblick über verschiedene Ansätze des DfX, wobei für DfR die Budgetierung der Systemzuverlässigkeit auf die einzelnen Komponenten im Vordergrund steht. Diese kann genutzt werden, um die Gesamtzuverlässigkeit eines Systems durch Erhöhung einzelner Komponentenzuverlässigkeiten zu steigern, was bereits im Entwicklungsprozess möglich ist. Die Testplanung wird nicht betrachtet.

Als **Design for Test** wird ein Gestaltungsansatz bezeichnet, der eine einfache Prüfung von Produkten zum Ziel hat. Dieser Ansatz wird u. a. in Tant et al. [111] angewendet. Dabei sollen Produkte zuverlässig und mit einfachen Methoden in kurzer Zeit getestet werden können. Die Planung effizienter Tests wird nicht betrachtet. Auf der einen Seite können dadurch Produkte teurer werden, da sie aufwendig sind, andererseits können aufgrund der einfacheren Absicherbarkeit die Gesamtkosten reduziert werden, siehe Coppola [112] und Lovelace [113].

2.8.2 Zuverlässigkeitsbasierte Optimierung

Der Begriff **zuverlässigkeitsbasierte Optimierung** (Reliability-Based Design Optimization, RBDO) umfasst zahlreiche Arbeiten im Bereich Optimierung von Systemen, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Auswirkungen von Unsicherheiten auf das System. Diese beinhalten Erwartungswerte und Auftretenswahrscheinlichkeiten. Valdebenito und Schueller [114] geben einen umfassenden Gesamtüberblick über aktuelle Veröffentlichungen, theoretische Grundlagen und häufig berücksichtigte Randbedingungen in der Optimierung. Als übliches Zielkriterium werden dabei die erwarteten Lebensdauerzyklus-Kosten genannt.

Die Untersuchungen von Nikolaidis et al. [100] haben das Ziel, einzelne Funktionen, wie beispielsweise Kosten, Funktionalität oder Gewicht des Produkts, durch Berücksichtigung von Randbedingungen der Zuverlässigkeit zu verbessern. Eamon und

Rais-Rohani [115] stellen ein Konzept zur computergestützten, zuverlässigkeitsbasierten Designoptimierung vor. Dabei werden deterministische Randbedingungen und die Zuverlässigkeitskennwerte einzelner Komponenten unter Verwendung integrierter Finite-Elemente-Analysen ermittelt, Wahrscheinlichkeitsrandbedingungen abgeleitet und der Verlauf bestimmt. Bei Konvergenz dieses Verlaufs liegt ein optimal zuverlässigkeitsorientiertes Design vor. Dieses besitzt eine geringere Masse und höhere Steifigkeit als ein deterministisches Design. Dabei wird das Design einer komplexen Struktur durch Anpassung einzelner Teilelemente hinsichtlich der Lebensdauer der Struktur optimiert, jedoch Kosten, die erforderliche Zuverlässigkeitstestplanung und die Nachweisbarkeit der Zuverlässigkeitsziele nicht berücksichtigt. Askari und Nourani [109] gehen dabei einen Schritt weiter und überdimensionieren einzelne Schädigungsmechanismen, um die Zuverlässigkeit und die Leistung des Gesamtsystems zu steigern. Ahmed und Chateauf [29] betrachten zusätzlich die Validierung eines Produkts mit dem Ziel, die Kosten des Produktdesigns und der nachfolgenden Validierung gleichzeitig zu berücksichtigen. In den Ansatz integriert sind dabei die Produktkosten, die Kosten durch einen Ausfall und die Testkosten. Darüber kann die minimale Prüflingszahl für den Nachweistest bestimmt werden. Nicht berücksichtigt wird dabei allerdings der Fehler 2. Art.

3 Konkretisierung der Ziele der Arbeit

Aus dem Stand der Technik und Forschung ergibt sich der Forschungsbedarf. Dieser wird nachfolgend vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Ziele der Arbeit konkretisiert und aus dem Forschungsbedarf abgeleitete Lösungsansätze vorgestellt, welche in der Arbeit umgesetzt werden.

3.1 Bewertung des Stands der Forschung und Technik

Der Stand der Forschung und Technik bezieht sich zum einen auf die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests, zum anderen auf die anforderungsgerechte Produktauslegung. Für die Testplanung gibt Tabelle 3.1 einen Überblick über ausgewählte Forschungsschwerpunkte, übliche Vorgehensweisen und Annahmen bei der Berücksichtigung dieser Schwerpunkte und abgeleitetem Bedarf zur Abdeckung bestehender Lücken. Der Stand der Forschung und der daraus abgeleitete Forschungsbedarf des Schwerpunkts Produktauslegung wird in

Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Übersicht über aktuelle Forschung und den Forschungsbedarf im Bereich Zuverlässigkeitstestplanung

Forschungsbe- reich	Stand der Forschung	Forschungsbedarf
Zielkonflikt Kosten – Zeit – Genauigkeit	Keine ganzheitliche Betrachtung der Planung von Zuverlässigkeitstests im Spannungsfeld von Genauigkeit, Kosten und Zeit, mit Ausnahme des Konzepts der <i>Probability of Test Success</i>	Nicht berücksichtigt werden bisher die beschleunigten Teststrategien. Eine allgemeine Vorgehensweise, wie alle praxisrelevanten Teststrategien in die Testplanung integriert werden können und welche das Ergebnis eines Test von Beginn an berücksichtigt, fehlt.

Forschungsbe- reich	Stand der Forschung	Forschungsbedarf
Teststrategien	In der Anwendung: Lebensdauer- testplanung basierend auf Suc- cess-Run-Test	Durch zugelassene Ausfälle im Test lassen sich statistisch abgesicherte Informationen über das Ausfallverhalten der Prüflinge und der Gesamtpopulation des Bauteils ableiten. Vorwissen kann im Test verifiziert werden.
Beschleunigte Tests	Beschleunigte Testverfahren für ausfallbasierte Tests, ergänzende Planung der Lastniveauhöhen und der Prüflingsverteilung Richtlinien für die Planung von beschleunigten Lebensdauer-test	Für beschleunigte Lebensdauer-tests exis- tiert keine umfassende Betrachtung der Pla- nung effizienter Zuverlässigkeitstests mit Er- folgswahrscheinlichkeiten, also der Quantifizierung des Erfolgs eines Tests in Kombination mit einer effizienten Zuverläs- sigkeitstestplanung. Richtlinien sind meist nicht allgemeingültig. Die Vielfalt der Testparameter und dazuge- hörige Wechselwirkungen werden nicht um- fassend berücksichtigt.
Optimalität	Festlegung eines Optimalitätskri- teriums zu Beginn der Planung Betrachtung von Ausschnitten der Vielzahl möglicher Zensie- rungsstrategien und Verteilungs- typen hinsichtlich Optimalität	Die Anwendung dieser Optimalitätskriterien muss mit dem Erprobungsziel abgestimmt werden. Es bedarf daher einer anwendungs- bezogenen Interpretation für die Testpla- nung. Die Sinnhaftigkeit der betrachteten Tests, beispielsweise von beschleunigten <i>Success- Run-Tests</i> , und die Eignung der Planung von Test mit Zensierung zum Nachweis der Zu- verlässigkeitsziele werden hinsichtlich der Effizienz nicht ausreichend betrachtet.
Effizienz	Optimalitäts- anstelle von Effi- zienzbetrachtungen Richtlinien zur Planung optimaler Lebensdauer-tests existieren	Der effiziente Einsatz von Prüflingen und vorhandenem Budget erfordert bei den in- dividuellen Randbedingungen vertiefte Kenntnisse über das zu testende System und eine Ausnutzung aller verfügbaren Res- ourcen und Einhaltung der Budgets. Eine praxisnahe Optimalitäts- und Effizienz- betrachtung wird nur eingeschränkt vorge- nommen.

Forschungsbe- reich	Stand der Forschung	Forschungsbedarf
	Maximierung einzelner Erpro- bungsziele	Eine anwendungsbezogene Abweichung von einem schwach ausgeprägten Optimum zur Reduzierung des Aufwands wird nicht aus- reichend untersucht.
Umsetzung der Vorgehensweise	Beschreibung der verwendeten Methoden	Eine Zusammenfassung mit Leitlinien zur Unterstützung der simulativen Umsetzung der Methoden fehlt.
	Keine Betrachtung der Simulati- onszeit der Optimierung	Methoden zur Vereinfachung der Vorge- hensweise und zur Reduktion der Simulati- onszeit werden nicht vorgestellt.

Tabelle 3.2: Übersicht über aktuelle Forschung und den Forschungsbedarf im Bereich anforderungsgerechte Produktauslegung

Forschungsbe- reich	Stand der Forschung	Forschungsbedarf
Design for Reliabi- lity	Berücksichtigung von Anforde- rungen in die verschiedenen Pha- sen der Produktentwicklung, um bereits in frühen Phasen u. a. die Produktzuverlässigkeit zu erhö- hen. Qualitative Erhöhung der Zuver- lässigkeit durch Anwendung qua- litativer Methoden	Der erfolgreiche Nachweis der sich aus dem Design ergebenden Zuverlässigkeit wird nicht betrachtet. Es ist nicht klar, ob die Pro- duktzuverlässigkeit überhaupt nachgewie- sen werden kann, mit welchem Aufwand und mit wie vielen Iterationsschleifen. Qualitative Methoden eignen sich vor allem zur Vermeidung von Früh- und Zufallsausfäl- len. Quantitative Methoden ermöglichen die Berücksichtigung von Ermüdungsausfäl- len und Untersuchungen zur Einhaltung der Lebensduranforderungen eines Bauteils.
Design for Test	Das Design eines Produkts wird angepasst, um kritische Schädig- ungsmechanismen auf einem Prüfstand besser testen zu kön- nen.	Die Planung von Lebensdauertests zum Nachweis dieser Produktzuverlässigkeit steht nicht im Fokus.

Forschungsbe- reich	Stand der Forschung	Forschungsbedarf
Zuverlässigkeits- basierte Optimie- rung	Anpassung einzelner Schädigungs- mechanismen zur Erhöhung der Zu- verlässigkeit Optimierung zur Reduktion kriti- scher Schwachpunkte	Die Nachweisbarkeit des Zuverlässigkeits- ziels wird nicht ausreichend betrachtet. Die Auswirkungen auf Lebensdauer und ihren Nachweis werden nicht betrachtet.
Lebensdauerzyk- luskosten	Aufwendige Kostenmodelle	Keine gesonderte Berücksichtigung der Gesamterprobungskosten und deren Ein- fluss insbesondere bei Bauteilen mit ge- ringer Überdimensionierung
Schädigungsme- chanismen	Qualitative Anpassung ausgewähl- ter Schädigungsmechanismen	Welche Auswirkungen sich auf die Le- bensdauer und Zuverlässigkeit eines Bau- teils ergeben, wird nicht betrachtet. In- wiefern eine Änderung einzelner Schädig- ungsmechanismen den Erprobungsauf- wand erhöht oder sogar den Zuverlässig- keitsnachweis unmöglich macht, wird nicht umfassend untersucht.
Ableitung von Vorwissen für die Testplanung	Ableitung von Parametern für die Auslegung nach Norm	Keine geeignete quantitative Ableitung von für die Testplanung erforderlichem Vorwissen.
Auslegung	Getrennte Betrachtung von Dimen- sionierung, Materialaufwand und Erprobungsaufwand	Die Produktdimensionierung als zentraler Stellhebel zwischen Materialaufwand und erforderlichem Erprobungsaufwand wird bisher nicht umfassend betrachtet.
Überdimensionie- rung	Einsatz qualitativer Methoden zur Erhöhung der Lebensdauer	Quantitativer Einfluss von Überdimensio- nierung auf Zuverlässigkeit und Lebens- dauer wird nicht ausreichend untersucht.
Integration der Erprobungspla- nung in die Pro- duktauslegung	Zuverlässigkeitsanalyse in der Be- wertungsphase des Produktent- wicklungsprozesses	Die Zuverlässigkeit kann durchgehend und damit bereits beim ersten Entwurf und der ersten Vordimensionierung be- trachtet werden.

Zusammenfassen lässt sich der Forschungsbedarf auf

- die ganzheitliche Betrachtung der Planung von Zuverlässigkeitstests im Spannungsfeld von Genauigkeit, Kosten und Zeit,
- die Integration beschleunigter Lebensdauertests in die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests zur Betrachtung der Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Tests,
- die Ableitung der Sinnhaftigkeit der Vielzahl möglicher Teststrategien,
- Effizienzbetrachtungen in der Testplanung,
- die anwendungsnahe Einordnung und den Vergleich klassischer Optimalitätskriterien und Erprobungsziele,
- die Ableitung von abgesicherten anwendungsnahen Handlungsempfehlungen für die Testplanung und für die Simulation,
- die umfassende Berücksichtigung der Zuverlässigkeitstestplanung in der Produktauslegung,
- die Berücksichtigung des Einflusses von Überdimensionierung auf die Zuverlässigkeit,
- die Auswirkungen von Überdimensionierung auf die Nachweisbarkeit der Zuverlässigkeitsanforderungen durch effiziente Lebensdauertests sowie
- die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests in Abhängigkeit der Überdimensionierung des Produkts.

3.2 Ziele der Arbeit und abgeleitete Lösungsansätze

Aus der Bewertung des Stands der Forschung und Technik ergeben sich für die Arbeit die beiden zentralen Forschungsfragen:

Wie kann eine effiziente und ganzheitliche Betrachtung der Planung von beschleunigten Zuverlässigkeitstests im Spannungsfeld von Genauigkeit, Kosten und Zeit aussehen?

Wie kann eine anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests unterstützt werden?

Ausgehend von den zentralen Forschungsfragen können folgende sechs untergeordnete Fragestellungen, Ziele und geplante Lösungsansätze abgeleitet werden:

1. Wie können beschleunigte Testkonfigurationen in das bestehende Konzept der *Probability of Test Success* integriert werden?

Für die Entschärfung des Zielkonflikts aus weiter steigenden Kundenanforderungen bei gleichzeitig geforderter Reduktion der Entwicklungskosten soll in der vorliegenden Arbeit zunächst untersucht werden, wie sich beschleunigte Erprobungsstrategien in das Konzept der *Probability of Test Success* integrieren lassen. Dabei kann das bestehende Konzept als Ausgangspunkt des erweiterten Konzepts verwendet werden und beschleunigte Testkonfigurationen und Lebensdauermodelle im Maximum-Likelihood-Schätzer mitberücksichtigt werden.

2. Inwiefern eignet sich die *Probability of Test Success* als Optimalitätskriterium, um effiziente Testkonfigurationen zu finden?

In der Zuverlässigkeitstestplanung beschleunigter Tests werden optimale Testkonfigurationen meist durch Anwendung von Optimalitätskriterien gefunden. Die gängigsten Optimalitätskriterien sollen mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit verglichen werden, um die Leistungsfähigkeit dieser gängigen Optimalitätskriterien und des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success* in der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests zu bewerten. Grundlage hierfür sind umfangreiche Parameterstudien zur Optimalität dieser Kriterien und den Einflussparametern auf die Kriterien.

3. Wie lassen sich effiziente Testkonfigurationen schnell und mit wenig Rechenaufwand ermitteln?

Die Anwendung des Konzepts der *Probability of Test Success* hat sich als sehr rechenzeitintensiv erwiesen. Die Berücksichtigung beschleunigter Erprobungsstrategien vergrößert dabei die zur Verfügung stehende Parametervielfalt und damit den zur Abdeckung des gesamten Parameterraums erforderlichen Rechenaufwand in der Simulation noch weiter. In der vorliegenden Arbeit soll daher untersucht werden, wie eine effiziente Testkonfiguration schnell und mit wenig Rechenaufwand gefunden werden kann, um die Anwendbarkeit des erweiterten Konzepts zu gewährleisten. Zum einen kann hier ein geeignetes Konvergenzkriterium zur Begrenzung der Anzahl an Monte-Carlo-Iterationen implementiert werden. Zum anderen kann über umfangreiche Parameterstudien ein neuronales Netz trainiert werden, um einen hochgenauen Nachweispunktschätzer zu erstellen, welcher mit Hilfe eines Metamodells die Simulation ergänzt.

4. Welche Handlungsempfehlungen lassen sich für die Praxis ableiten?

Die in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen und umfangreichen Parameterstudien zur Anwendung des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success* ermöglichen die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Erprobungsplanung effizienter Zuverlässigkeitstests. Diese sollen zusammengetragen werden, um anwendungsnahe Hinweise zur Planung dieser Tests zu geben.

5. Wie kann die Erprobungsplanung sinnvoll in die Produktauslegung integriert werden?

Die Erprobungsplanung basiert auf dem in der Produktauslegung festgelegten Vorwissen. Dieses soll als Schnittstelle beider Fachbereiche genutzt werden, ein umfassendes Konzept der anforderungsgerechten Produktauslegung zu erstellen. Methoden zur Ableitung des Vorwissens in Abhängigkeit von Auslegungsparametern können dabei mit dem erweiterten Konzept der *Probability of Test Success* kombiniert werden.

6. Was sind die Potenziale der anforderungsgerechten Produktauslegung?

Eine Reduktion der Überdimensionierung und damit eine Auslegung von Produkten nahe der Auslegungsgrenze ist erstrebenswert. Die Nachweisbarkeit muss gleichzeitig gewährleistet sein. Das Potenzial der Einordnung des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success* in die Produktauslegung soll abgeschätzt werden, um eine Betrachtung des Optimums aus Erprobungsaufwand und Materialkosten eines Produkts, insbesondere für geringe Überdimensionierung, zu ermöglichen. Dabei dienen Parameterstudien als Basis für die Abschätzung des Potenzials. Dieses soll praxisbezogen in Anwendungsbeispielen beschrieben werden.

3.3 Vorgehensweise

In Kapitel 4 wird unter anderem das erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* vorgestellt. Dabei wird auf Grundlage des bestehenden Konzepts die Vielfalt der implementierten Erprobungsstrategien erweitert und eine Vorgehensweise zur Reduktion der erforderlichen Simulationszeit vorgeschlagen. Zusätzlich werden Optimalitätskriterien betrachtet und das erweiterte Konzept in die entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitsauslegung eingeordnet. Zudem werden abgeleitete Handlungsempfehlungen für die Erprobungsplanung mit *Probability of Test Success* vorgestellt. Kapitel 5 beinhaltet die anforderungsgerechte Produktauslegung mit *Probability of Test*

Success, welche Anwendungen des erweiterten Konzepts beinhaltet. Dabei wird auch das Potenzial des erweiterten Konzepts als entwicklungsbegleitende Vorgehensweise vorgestellt. Kapitel 6 fasst die Vorgehensweise der Arbeit und die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen im Bereich *Probability of Test Success* und anforderungsgerechter Produktauslegung.

4 Planung beschleunigter Zuverlässigkeitstests mit Probability of Test Success

Das vorliegende Kapitel führt ein erweitertes Konzept zur Planung effizienter Zuverlässigkeitstests mit Berücksichtigung der *Probability of Test Success* P_{TS} ein. Zunächst werden hierfür in Teilkapitel 4.1 für das Verständnis der Arbeit erforderliche Begriffserklärungen eingeführt. Anschließend wird die Erweiterung des Konzepts der *Probability of Test Success* für die dort bisher nicht betrachteten beschleunigten und zensierten Testkonfigurationen vorgestellt und in die Zuverlässigkeitstestplanung integriert.

Das erweiterte Konzept soll nachfolgend dazu verwendet werden, unter gegebenen Randbedingungen eine möglichst optimale Testkonfiguration zur Maximierung des Nachweiszeitpunkts zu finden. Dafür wird in Teilkapitel 4.3 ein Überblick über berücksichtigte Optimalitätskriterien gegeben und deren Bedeutung in der angewandten Zuverlässigkeitstestplanung vorgestellt. Teilkapitel 4.4 stellt die Umsetzung des erweiterten Konzepts der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests mit *Probability of Test Success* vor, wobei die Ergebnisse umfangreicher Parameterstudien vorgestellt und strukturelle Erweiterungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests verschiedener Testkonfigurationen abgeleitet werden. Ergänzt wird das Kapitel mit Vorgehensweisen zur Reduktion der Simulationszeit (Teilkapitel 4.5). Abschließend werden in 4.6 Handlungsempfehlungen vorgestellt, welche aus den Untersuchungen für die Zuverlässigkeitstestplanung effizienter Nachweistests abgeleitet wurden.

4.1 Begriffserklärungen zur Testplanung mit Probability of Test Success

Nachfolgend werden Begriffserklärungen vorgestellt. Diese unterteilen sich in Begriffserklärungen zur Zuverlässigkeitstestplanung und in Begriffserklärungen zum erweiterten Gesamtkonzept.

4.1.1 Begriffserklärungen: Zuverlässigkeitstestplanung

Ziel des erweiterten Konzepts ist der Vergleich einer Vielzahl unterschiedlicher Testkonfigurationen. In der Literatur werden diese und ähnliche Begrifflichkeiten nicht einheitlich verwendet. Daher wird im folgenden Kapitel eine Beschreibung vorgestellt, um ein einheitliches Verständnis in der Zuverlässigkeitstestplanung zu ermöglichen.

Eine Testkonfiguration umfasst Testart, Testtyp, Beschleunigungsart, Teststrategie und Testrandbedingungen. Für die in dieser Arbeit betrachteten Testkonfigurationen wird dies in Abbildung 4.1 verdeutlicht. Nachfolgend werden alle Begriffe, die für das Verständnis des vorgestellten Gesamtkonzepts wichtig sind, erklärt. Darüber hinaus sind Erweiterungen beispielsweise für zusätzliche Systemebenen, zugelassene Ausfälle beim Success-Run-Test und andere Zensierungsstrategien denkbar, werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet und daher auch nicht in Abbildung 4.1 berücksichtigt.

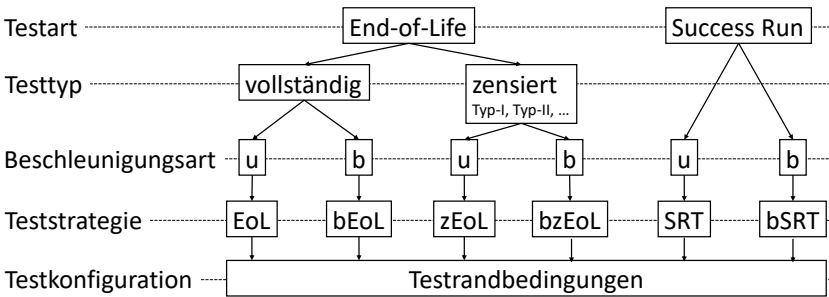


Abbildung 4.1: Einordnung: Testart - Testtyp - Beschleunigungsart (u... unbeschleunigt, b... beschleunigt) - Teststrategie - Testkonfiguration - Testrandbedingungen

Testart

Ziel des Gesamtkonzepts ist es, eine optimale Testkonfiguration zu finden. Als Ausgangspunkt muss dabei in der Zuverlässigkeitstestplanung die geeignete Testart ausgewählt werden. Diese sind

- End-of-Life-Test (EoL) und
- Success-Run-Test (SRT).

Diese Testarten lassen sich durch die Anzahl der im Test vorgesehenen Ausfälle unterscheiden. Der End-of-Life-Test bezeichnet dabei einen Lebensdauertest, während dessen Durchführung einer oder mehrere Prüflinge ausfallen. Der Success-Run-Test repräsentiert dagegen den Nachweistest ohne geplante Ausfälle.

Testtyp

Der Testtyp spezifiziert das Resultat eines Tests weiter und beschreibt, ob der Test bis zum Ausfall aller getesteten Komponenten durchgeführt wird, oder ob vor Ausfall aller Komponenten der Test abgebrochen wird. Der EoL lässt sich damit in vollständige und zensierte (unvollständige) Tests unterteilen. Zensierte Tests lassen sich noch weiter unterteilen. Kriterium dafür ist die Zensierungsstrategie. Üblich sind Typ-I (zeitzensiert) und Typ-II (ausfallzensiert), aber auch multiple Zensierungen. In dieser Arbeit werden nur Typ-II-zensierte Tests betrachtet. Typ-I, multiple Zensierungen, *Sudden Death* sowie linkszensierte, intervallzensierte, hybride und progressive Zensierungen dagegen nicht.

Beschleunigungsart

Jeder Test kann beschleunigt und unbeschleunigt umgesetzt werden. Für die Testplanung von beschleunigten Tests werden Informationen über das vorliegende Lebensdauermodell und die dazugehörigen Lebensdauermodellparameter benötigt. Grundsätzlich können hier alle in [116] beschriebenen Lebensdauermodelle und weitere verwendet werden. Thermische Ausfälle werden dabei häufig mit Hilfe des Arrhenius-Modells beschrieben, thermomechanische mit Hilfe des Coffin-Manson-Modells und strukturmechanische mit dem Wöhlermodell.

Teststrategie

Die Teststrategie umfasst die Testart, den Testtyp und die Beschleunigungsart, wodurch der Testablauf und die Vorgehensweise zur Analyse festgelegt sind. Diese sind

- unbeschleunigter vollständiger End-of-Life-Test (EoL),
- beschleunigter vollständiger End-of-Life-Test (bEoL),
- unbeschleunigter zensierter End-of-Life-Test (zEoL),
- beschleunigter zensierter End-of-Life-Test (bzEoL),
- unbeschleunigter vollständiger Success-Run-Test (SRT) und
- beschleunigter vollständiger Success-Run-Test (bSRT).

Testkonfiguration & Testrandbedingungen

Eine Testkonfiguration enthält alle Informationen, die berücksichtigt werden können, also die Teststrategie inklusive aller berücksichtigten Randbedingungen, welche den geplanten Test definieren. Diese Randbedingungen beinhalten unter anderem die Anzahl an Prüflingen, nähere Informationen über die jeweilige Zensierungsstrategie, die Anzahl der berücksichtigten Lastniveaus und deren Lage und die jeweils geplante Prüflingsverteilung. In der vorgestellten Planung von Zuverlässigkeitstests wird im

Weiteren die Testkonfiguration variiert, um die anwendungsspezifisch effizienteste zu finden.

4.1.2 Begriffserklärungen: erweitertes Konzept

Für gegebene Eingangsgrößen lässt sich jeweils eine effizienteste Testkonfiguration finden, welche ein festzulegendes Optimalitätskriterium unter den gegebenen Randbedingungen am besten erfüllt. Die hier verwendeten Eingangsgrößen sind

- Vorwissen,
- erweitertes Zuverlässigkeitsziel,
- Testbudget,
- Kostenparameter und
- Testinfrastruktur.

Vorwissen

Das Vorwissen besteht in dieser Arbeit aus dem Ausfallverhalten der Komponente, welches weibullverteilt beschrieben wird. Dabei wird nur die zweiparametrische Weibullverteilung verwendet, welche die im Maschinenbau am meisten verwendete Ausfallverteilung ist [1]. Das in das erweiterte Konzept einfließende Vorwissen wird daher durch die charakteristische Lebensdauer T und den Formparameter b der Weibullverteilung beschrieben.

Erweitertes Zuverlässigkeitsziel

Das klassische Zuverlässigkeitsziel beinhaltet die geforderte Zuverlässigkeit $R(t_{dem})$ zum Nachweiszeitpunkt t_{dem} (*engl. demonstrated lifetime*), sowie eine zugehörige Ausfallwahrscheinlichkeit P_A . Zusätzlich wird in dieser Arbeit die *Probability of Test Success* P_{TS} verwendet, welche von [63] eingeführt wurde, um die Wahrscheinlichkeit zu quantifizieren, dass ein durchgeführter Test das in der Planung vorgesehene Zuverlässigkeitsziel auch nachweisen kann. Die P_{TS} erweitert das Zuverlässigkeitsziel in der Testplanung, indem sie die statistischen Schwankungen eines Zuverlässigkeitsnachweises berücksichtigt. Sie wird als zusätzliche Anforderung in die Zuverlässigkeitsabsicherung integriert, um neben der Einhaltung der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen auch eine effiziente Testplanung zu gewährleisten.

Kostenparameter

Unter den Kostenparametern werden alle für das Kostenmodell benötigten Informationen zusammengefasst, welche für die Bestimmung der Gesamterprobungskosten

notwendig sind. Basis hierfür ist in dieser Arbeit das in Gl. (4.1) beschriebene Kostenmodell aus [63]. In diesem sind die Testzeitkosten k_t , also die Kosten, welche von der Testdauer abhängig sind (Kosten pro Stunde), und die Prüflingskosten k_n , welche die Kosten pro Prüfling quantifizieren, enthalten. Insbesondere das Verhältnis aus Testzeitkosten und Prüflingskosten ist für die Wahl einer effizienten Testkonfiguration relevant.

$$k_{tot} = k_t \cdot t_{tot} + k_n \cdot n_{tot} \quad (4.1)$$

Testbudget

Das verfügbare Testbudget beinhaltet Randbedingungen, welche als harte Grenzen bei der Wahl der Testkonfiguration dienen. Damit ist es ein entscheidender anwendungsspezifischer Einflussfaktor auf die möglichen Testkonfigurationen. Es besteht aus dem Erprobungskostenbudget $k_{tot,max}$, also den für den durchgeführten Test maximal erlaubten Gesamtkosten, und aus dem Erprobungsdauerbudget $t_{tot,max}$. Dieses beziffert die maximal erlaubte Gesamttestdauer und kann aus den Entwicklungszeitplänen entnommen werden. Ein zusätzliches hartes Kriterium ist der geforderte Nachweiszeitpunkt $t_{dem,min}$, welcher einer nachzuweisenden Mindestlebensdauer entspricht, weshalb es als Teil des Testbudgets bezeichnet wird.

Das Testbudget muss zu Beginn in den Anforderungen der Testplanung festgelegt werden und wird im vorliegenden Konzept als hartes Kriterium zur Wahl der effizientesten Testkonfiguration gewählt. Das heißt, eine Testkonfiguration, welche die maximalen Erprobungskosten $k_{tot,max}$ oder die maximale Gesamttestdauer überschreitet, ist nicht geeignet. Entsprechend stellt der geforderte Nachweiszeitpunkt $t_{dem,min}$ eine harte Untergrenze für die Wahl der Testkonfiguration dar und führt damit zur Ablehnung einer Testkonfiguration, welche $t_{dem,min}$ nicht erfüllt.

Testinfrastruktur

Der Begriff Testinfrastruktur umfasst alle weiteren Randbedingungen, welche durch die Prüfstände in der Erprobung beeinflusst werden können. Dazu gehört die Anzahl an Prüfständen, welche in einem Test parallel verwendet werden können, aber auch die Prüfstandperformance, welche beispielsweise die einstellbaren Temperaturen eines beschleunigten Lastniveaus bei Temperaturwechseln einschränken. Auf diese Randbedingungen wird im weiteren Verlauf nicht eingegangen, da sich diese in der Anwendung stark unterscheiden und deshalb allgemeine Aussagen nicht möglich sind.

4.2 Probability of Test Success für beschleunigte Tests

In Unterkapitel 4.2.1 wird zunächst das erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* für beschleunigte Tests vorgestellt. Dieses dient als Grundlage für die zusätzlichen Erweiterungen für mehrere Lastniveaus und Zensierungsstrategien. Außerdem wird die Übertragung des Konzepts für Success-Run-Tests mit Beschleunigung (bSRT) beschrieben. Randbedingungen für die Anwendung (Unterkapitel 4.2.2) beschließen das Kapitel.

4.2.1 Erweitertes Konzept der Probability of Test Success

Das Konzept der *Probability of Test Success* (Teilkapitel 2.5.2) wird im vorliegenden Unterkapitel erweitert, um die Lasterhöhung zur zeitlichen Raffung von Zuverlässigkeitstests mit zu berücksichtigen.

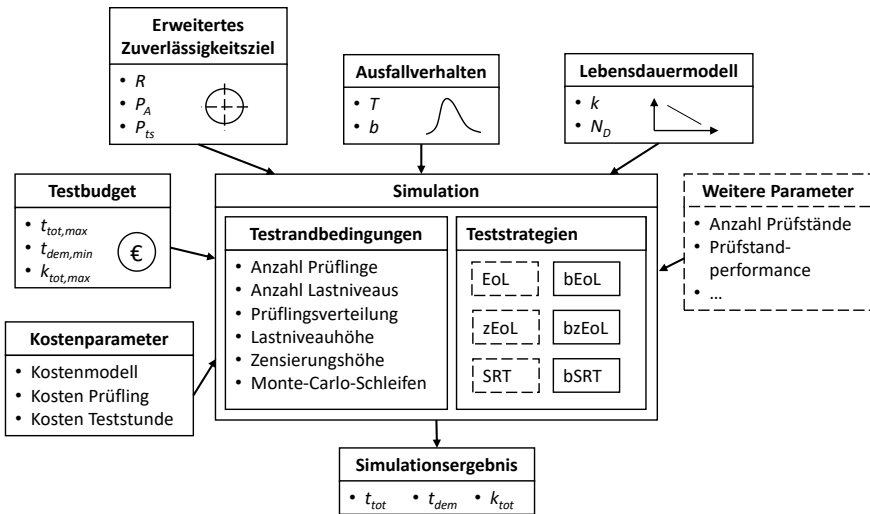


Abbildung 4.2: Übersicht über die berücksichtigten Parameter in der Simulation einer Testkonfiguration

Die beschleunigten Testkonfigurationen können in das Konzept der *Probability of Test Success* integriert werden, indem das erforderliche Vorwissen um Informationen über das vorliegende Lebensdauermodell ergänzt wird. Damit können in der Simulation virtuelle Ausfälle auf verschiedenen Lastniveaus erzeugt werden. Eine Gesamtüber-

sicht der möglichen Eingangsinformationen der Simulation, der Simulationsparameter und der Simulationsergebnisse für eine Testkonfiguration sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Gestrichelt dargestellte Elemente sind dabei nicht explizit Teil der vorliegenden Arbeit. Ziel der Arbeit ist es, die Berücksichtigung aller dargestellten Informationen zur Bestimmung einer effizienten Testkonfiguration zu ermöglichen.

Probability of Test Success als planbare Konstante

Das Konzept der *Probability of Test Success* wurde entwickelt, um in der Testplanung die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Tests als Kriterium zur Auswahl einer geeigneten Testkonfiguration zu verwenden. Dabei wird zu Beginn der Zuverlässigkeitstestplanung die Lebensdauer- und die Zuverlässigkeitsanforderung der Komponente auf Feldniveau festgelegt und für jede mögliche Konfiguration die *Probability of Test Success* simulativ bestimmt.

Im Gegensatz zu vorhergehenden Arbeiten wird hier nicht die *Probability of Test Success* P_{ts} einer Testkonfiguration bestimmt, während der Nachweiszeitpunkt t_{dem} festgelegt ist, sondern die *Probability of Test Success* eines Tests im Vorhinein festgelegt (typischerweise $P_{ts} = 90\%$). Der daraus resultierende erreichbare Nachweiszeitpunkt t_{dem} wird als P_{ts} -Quantil der oberen Vertrauensgrenzen der B_q -Lebensdauern aller Simulationsschritte bestimmt. Das Vorgehen zur Bestimmung des Nachweiszeitpunkts in Abhängigkeit der *Probability of Test Success* wird in Abbildung 4.3 schematisch für eine kleine Anzahl Monte-Carlo-Replikationen ($MCS = 6$) dargestellt. Die durch wiederholte Simulation ermittelten B_q -Lebensdauern werden anhand des P_{ts} -Quantils ausgewertet und ergeben den Nachweiszeitpunkt der Testkonfiguration.

Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung der *Probability of Test Success* als zusätzliche Zuverlässigkeitsanforderung und kann damit von Beginn an als planbare Konstante als Teil des erweiterten Zuverlässigkeitsziels in der Zuverlässigkeitstestplanung verwendet werden. Hauptkriterium zur Wahl einer Testkonfiguration ist dadurch die Höhe des ermittelten Nachweiszeitpunkts t_{dem} , d. h. die nachweisbare Lebensdauer einer Komponente auf Feldniveau. Damit ist es möglich, Testkonfigurationen anhand des Nachweiszeitpunkts direkt miteinander zu vergleichen und den zeitlichen Unterschied prozentual über die Nachweiszeitpunktänderung (Δt_{dem}) zu quantifizieren. Im ursprünglichen Konzept, Vorgabe des Nachweiszeitpunkts und eines Sicherheitsabstands als Anforderungen, wird die erreichbare *Probability of Test Success* der Testkonfiguration ermittelt. Dabei wird beispielsweise eine bessere Testkonfiguration durch zusätzliche Prüflinge nur über ein P_{ts} bzw. ΔP_{ts} charakterisiert, was in der Anwendung schwer zu interpretieren ist. Die Verwendung von P_{ts} als planbare Konstante ist damit für die Anwendung und für den Vergleich von Testkonfigurationen von Vorteil. Die Berücksichtigung von P_{ts} als Teil des erweiterten Zuverlässigkeitsziels ermöglicht also die statistische Berücksichtigung des Risikos, dass ein

durchgeführter Test das Zuverlässigkeitsziel und die Lebensdauernanforderungen nicht erfüllt.

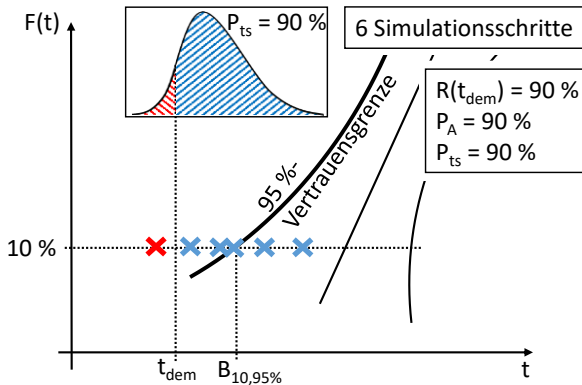


Abbildung 4.3: Ermittlung des Nachweiszeitpunkts t_{dem} in Abhängigkeit der *Probability of Test Success* P_{ts} und der ermittelten $B_{10,95\%}$ -Lebensdauern (hier: $MCS = 6$)

Ziel des Konzepts in der vorliegenden Arbeit ist also bei gegebenem erweiterten Zuverlässigkeitsziel (R , P_A , P_{ts}) zunächst das Bestimmen eines Nachweiszeitpunkts für jede Testkonfiguration und nachfolgend Optimalitätsbetrachtungen zum Nachweiszeitpunkt.

Vorgehensweise des erweiterten Konzepts der Probability of Test Success

Das erweiterte Konzept zur Bestimmung des Nachweiszeitpunkts t_{dem} einer Testkonfiguration ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Dieses wurde im Rahmen der Arbeit in Matlab implementiert, um die für die nachfolgenden Untersuchungen notwendigen Simulationsergebnisse zu erzeugen.

Ausgangspunkt ist dabei zunächst das Vorwissen (1), welches vor allem durch die Eigenschaften der zu untersuchenden Komponente, die Test-Infrastruktur und den/die Produktentwickler*in vorgegeben ist. Für die Simulation werden nachfolgend eine Testkonfiguration festgelegt (2) und für jeden Prüfling und seine beschleunigten Lastniveaus Pseudo-Zufallszahlen aus der Verteilung des Ausfallverhaltens (T , b) der Komponente in Matlab erzeugt (3). Eine Maximum-Likelihood-Schätzung dient dazu, sowohl das Ausfallverhalten der Komponente auf den beschleunigten Lastniveaus als auch die Parameter des Lebensdauermodells (k , N_D) zu schätzen (4).

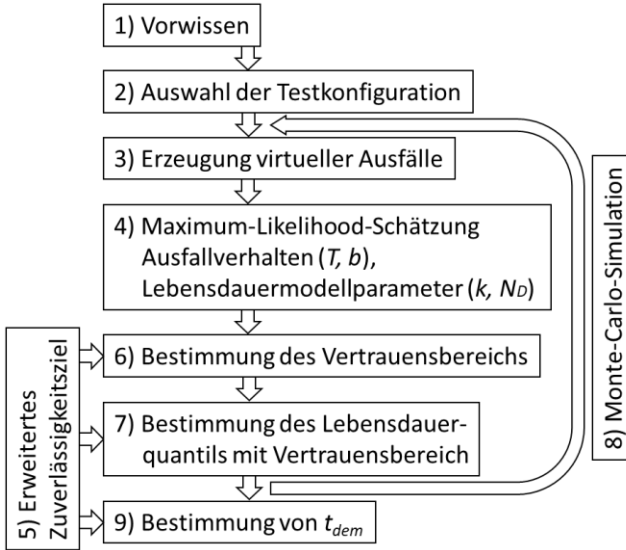


Abbildung 4.4: Struktur des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success*

Die hier vorgestellte Erweiterung um beschleunigte Testkonfigurationen über erhöhte Testlastniveaus basiert auf dem Lebensdauermodell nach Wöhler, welches bei logarithmischer Achsentransformation eine lineare Beschreibung des Lebensdauermodells ermöglicht:

$$\ln(T) = \ln(N_D) + k \cdot \frac{1}{\ln(\text{load})} \quad (4.2)$$

Die beschleunigten Lastniveaus werden in (4.2) im Vektor

$$\text{load} = \begin{bmatrix} \text{load}_L \\ \text{load}_H \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

zusammengefasst. In der Visualisierung, nach der Achsentransformation, entspricht $\ln(N_D)$ dem Ordinatenabschnitt und k der Steigung der Geraden, welche das Lebensdauermodell beschreibt.

Zur Ermittlung der Lebensdauermodellparameter wird ein Maximum-Likelihood-Schätzer verwendet, welcher neben den Lebensdauerparametern auch die Parameter des Ausfallverhaltens schätzt. Der Maximum-Likelihood-Schätzer beruht hierbei auf der Maximierung der in Gl. (4.4) dargestellten Log-Likelihood-Funktion, in der die charakteristische Lebensdauer T der Dichtefunktion der Weibullverteilung durch das Lebensdauermodell entsprechend Gl. (4.2) ersetzt wurde, siehe [17]. Dies entspricht

einer linearen Interpolation des Lebensdauermodells zwischen den charakteristischen Lebensdauern der Weibullverteilungen auf den beschleunigten Lastniveaus.

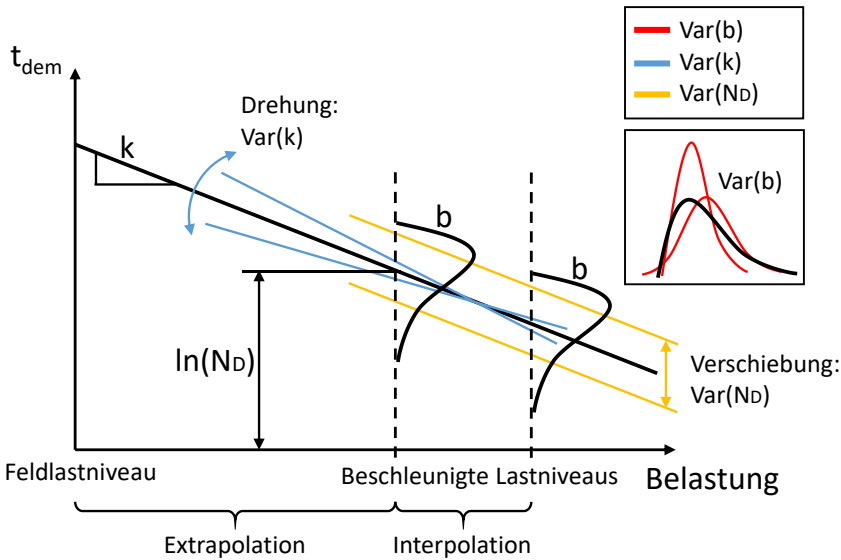


Abbildung 4.5: Darstellung der Interpolation und Extrapolation des Lebensdauermodells zur Bestimmung des Ausfallverhaltens auf Feldlastniveau.

Annahme hierbei ist der lastunabhängige Weibull-Formparameter b , was einer gleichbleibenden Form der Verteilungen auf beiden beschleunigten Lastniveaus und auf dem Feldlastniveau entspricht. Dadurch sind sowohl die Interpolation zwischen den beschleunigten Lastniveaus als auch die nachfolgenden Schritte unabhängig von der gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit (hier: $F(T) = 63,2\%$). n entspricht hier, analog dem Vektor $load$, den Prüflingszahlen auf den beschleunigten Lastniveaus.

$$\log L = \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{b}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_i}}} \cdot \left(\frac{t_i}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_i}}} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t_i}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_i}}} \right)^b} \right) \quad (4.4)$$

Basierend auf der vorgestellten Log-Likelihood-Funktion können Ausfalldaten bei vollständigen beschleunigten Lebensdauertests (bEoL) auf den erhöhten Lastniveaus analysiert werden, um die Parameter des Lebensdauermodells (k und N_D) sowie des Ausfallverhaltens (b und $T = f(k, N_D)$) zu schätzen, indem die Log-Likelihood-Funktion

global maximiert wird. Dieses Vorgehen ermöglicht die Ermittlung der geeignetsten Schätzwerte für alle berücksichtigten Parameter und zusätzlich die lineare Extrapolation des Lebensdauermodells bis zum Feldlastniveau, siehe Abbildung 4.5. Anschließend wird die Fisher-Informationsmatrix ermittelt, welche mit Hilfe der geschätzten Parameter ausgewertet wird, entsprechend Gl. (4.5) und [17]:

$$\begin{aligned}
 F &= \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \log L}{\partial b^2} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial b \partial N_D} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial b \partial k} \\ -\frac{\partial^2 \log L}{\partial N_D \partial b} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial N_D^2} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial N_D \partial k} \\ -\frac{\partial^2 \log L}{\partial k \partial b} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial k \partial N_D} & -\frac{\partial^2 \log L}{\partial k^2} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \widehat{Var}(\hat{b}) & \widehat{Cov}(\hat{b}, \widehat{N}_D) & \widehat{Cov}(\hat{b}, \hat{k}) \\ \widehat{Cov}(\widehat{N}_D, \hat{b}) & \widehat{Var}(\widehat{N}_D) & \widehat{Cov}(\widehat{N}_D, \hat{k}) \\ \widehat{Cov}(\hat{k}, \hat{b}) & \widehat{Cov}(\hat{k}, \widehat{N}_D) & \widehat{Var}(\hat{k}) \end{bmatrix}^{-1}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Diese wird nachfolgend invertiert und als Varianz-Kovarianz-Matrix dazu verwendet, um entsprechend [117] den jeweiligen Fisher-Vertrauensbereich der geschätzten Parameter und nach Extrapolation auf Feldlastniveau den geforderten Vertrauensbereich der gesuchten Lebensdauer zu bestimmen (6), siehe Gl. (4.6). Stellvertretend für die geschätzten Parameter kann damit der Vertrauensbereich VB von $\widehat{B}_{q,PA}$ auf Feldlastniveau über

$$VB = \widehat{B}_{q,PA} \cdot \exp \left(\frac{\pm z_{\frac{1-\alpha}{2}} \sqrt{\widehat{Var}(\widehat{B}_{q,PA})}}{\widehat{B}_{q,PA}} \right) \tag{4.6}$$

ermittelt werden, wobei $z_{\frac{1-\alpha}{2}}$ dabei der inversen Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung und $\frac{1-\alpha}{2}$ dem zu ermittelnden Vertrauensbereichsquantil aus dem erweiterten Zuverlässigkeitsziel entspricht.

Damit ist der Fisher-Vertrauensbereich bestimmt und die obere Vertrauensgrenze des geforderten nachzuweisenden Zuverlässigkeitsquantils auf Feldlastniveau (7) berechnet. Dieser Simulationsschritt wird ab der Erzeugung der Pseudo-Zufallszahlen aus der Verteilung des Ausfallverhaltens (T, b) der Komponente vielfach wiederholt (Monte-Carlo-Simulation, (8)) und die dadurch ermittelten oberen Vertrauensgrenzen (hier: $B_{10,95\%}$) vektoriell gespeichert. Dieses iterative Vorgehen zur Berücksichtigung der Varianz der MLE-Schätzung wird entsprechend [118] durchgeführt.

Durch Vorgabe der geforderten *Probability of Test Success* im erweiterten Zuverlässigkeitsziel kann nachfolgend der Nachweiszeitpunkt t_{dem} als P_{ts} -Quantil des Vektors mit den oberen Vertrauensgrenzen jedes Simulationsschritts berechnet werden. Eine hohe Anzahl Simulationsschritte gewährleistet dabei nach dem Gesetz der großen Zahlen die Konvergenz des Nachweiszeitpunkts (9). Ergebnis der Simulation ist daher ein Nachweiszeitpunkt jeder simulierten Testkonfiguration.

Probability of Test Success bei beschleunigten Tests mit mehreren Lastniveaus

Für eine genaue Abschätzung der Lebensdauerparameter und für die Bestimmung robuster Testkonfigurationen wird in der Literatur ein zusätzliches drittes beschleunigtes Lastniveau empfohlen (b3EoL), siehe [36]. Dies ist innerhalb des Maximum-Likelihood-Ansatzes des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten erweiterten Konzepts möglich und erfordert keine weiteren Ergänzungen des Simulationsablaufs. Jedoch müssen mit Einführung eines mittleren beschleunigten Lastniveaus sowohl die Lastniveauhöhe $load_M$ als auch die Prüflingszahl auf eben diesem Lastniveau n_M mitberücksichtigt werden, was zu einer höheren Komplexität der Simulation führt. Auch weitere beschleunigte Lastniveaus sind hier noch möglich (bxEoL).

Probability of Test Success bei beschleunigten, zensierten Tests

Für eine umfassende Zuverlässigkeitsanalyse müssen auch überlebende Prüflinge innerhalb eines Tests in die Analyse integriert werden, um die Information nutzen zu können, dass bestimmte Proben während des Tests nicht ausgefallen sind. Dies kann ebenfalls auf Basis des vorgestellten MLE erfolgen. Für die Planung von Zuverlässigkeitstests können zensierte Testergebnisse den zeitlichen Testaufwand zum Teil enorm reduzieren. Zur Bestimmung des Nachweiszeitpunkts t_{dem} einer zensierten beschleunigten Testkonfiguration (bzEoL) kann das vorliegende Konzept zusätzlich erweitert werden. Mit Berücksichtigung der Anwendung zensierter Tests wird dabei vereinfacht davon ausgegangen, dass alle zensierten Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau ($load_L = load_{cens}$) anfallen, da hier die Testzeiten offensichtlich länger sind als auf dem hohen beschleunigten Lastniveau. Damit ist für die Simulation mit der Prüflingszahl zensierter Prüflinge n_{cens} nur ein weiterer Parameter erforderlich.

Diese Erweiterung des zensierten End-of-Life-Tests um beschleunigte Testkonfigurationen wird in der vorgeschlagenen Vorgehensweise hauptsächlich durch den Maximum-Likelihood-Schätzer zur gleichzeitigen Schätzung des Ausfallverhaltens und der Lebensdauermodellparameter in jedem Simulationsschritt realisiert. Eine zusätzliche Ergänzung der Log-Likelihood-Funktion um nicht ausgefallene Prüflinge ermöglicht diese Berücksichtigung beschleunigter Testkonfigurationen mit zensierten

Ausfällen, wofür die dabei zu maximierende Log-Likelihood-Funktion in Gl. (4.7) dargestellt ist. Dabei wird die Log-Likelihood-Funktion aus (4.4) um die hintere Teilfunktion erweitert und nachfolgend die gesuchte Lebensdauer auf Feldlastniveau und über die Fisher-Informationsmatrix der gesuchte Vertrauensbereich für jeden Simulationsschritt der MCS bestimmt.

$$\log L = \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{b}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_i}}} \cdot \left(\frac{t_i}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_i}}} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t_i}{e^{\frac{k}{load_i}}} \right)^b} \right) + \sum_{j=1}^{n_{cens}} \left(\frac{t_{cens,j}}{N_D \cdot e^{\frac{k}{load_{cens,j}}}} \right)^b \quad (4.7)$$

Schritt (3) der in Abbildung 4.4 vorgestellten Vorgehensweise, die Erzeugung virtueller Ausfälle, muss für die Berücksichtigung zensierter beschleunigter Testkonfigurationen ebenfalls angepasst werden, um die Datenbasis (virtuelle Testzeiten) für die Maximum-Likelihood-Schätzung zu liefern. In dieser Arbeit werden nur Typ-II-zensierte Konfigurationen verwendet. Auf weitere Zensierungsstrategien wird im Abschnitt „Testbezogene Randbedingungen“ in Unterkapitel 4.2.2 eingegangen.

Zunächst werden mit Hilfe des Vorwissens (T, b) unter Berücksichtigung der beschleunigten Lastniveaus $n_L + n_{cens}$ weibullverteilte Zufallszahlen generiert, wovon die n_{cens} größten Zufallszahlen als zensierte Testzeiten mit der $(n_{cens}-1)$ -ten überschrieben werden, wie in Abbildung 4.6 dargestellt.

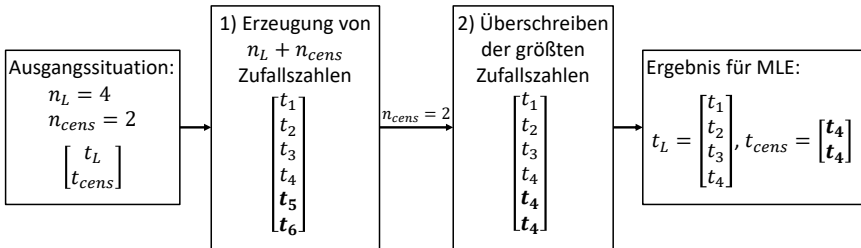


Abbildung 4.6: Vorgehensweise zur Erzeugung zensierter (Typ-II) virtueller Testdaten auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau

Die Anzahl an Lastniveaus kann auch hier erhöht werden, was zu einer weiteren Erhöhung der Parameteranzahl führt und damit auch die Komplexität der Simulation weiter erhöht.

Probability of Test Success bei beschleunigten Success-Run-Tests

Das Basiskonzept aus [63] ermöglicht die Berücksichtigung sowohl von End-of-Life-Tests (EoL) als auch von Success-Run-Tests (SRT). Für den unbeschleunigten Fall ohne geplante Ausfälle im Test (SRT) kann die *Probability of Test Success* einer Testkonfiguration in Abhängigkeit der erforderlichen Prüflingszahl über die Binomialgleichung [65] mit Hilfe des Formparameters, der Zuverlässigkeits- und der Aussagewahrscheinlichkeitsanforderung bestimmt werden.

Dabei wird zunächst auf Basis von Gl. (4.8) die erforderliche Prüflingszahl n für den Nachweis der Zuverlässigkeits- und der Aussagewahrscheinlichkeitsanforderung zum Zeitpunkt t_s bestimmt, was der nachzuweisenden Lebensdauer auf Feldniveau entspricht (Index: s). Entsprechend dem Basiskonzept aus [63] werden anschließend n virtuelle Ausfallzeiten mit Hilfe des Vorwissens (T_s, b) generiert. Sofern die kleinste der generierten Ausfallzeiten größer ist als der im Test abzusichernde Zeitpunkt t_s , gilt der Test als erfolgreich, da somit die theoretischen Ausfallzeitpunkte über der Testdauer liegen. Dieses Vorgehen wird wiederholt, um gemäß dem Gesetz der großen Zahlen eine *Probability of Test Success* als Verhältnis von erfolgreichen, simulierten Tests und der Gesamtanzahl der Simulationen zu bestimmen.

$$P_A = 1 - R(t_s)^n \quad (4.8)$$

Diese Vorgehensweise ist für beschleunigte Success-Run-Tests (bSRT) adaptierbar. Entsprechend den vorhergehenden Kapiteln sind zusätzlich zum Vorwissen über das Ausfallverhalten auf Feldlastniveau (T_s, b) Informationen über das Lebensdauermodell (hier: Wöhlerparameter N_D, k) erforderlich. Diese können dazu genutzt werden, um für jedes beschleunigte Lastniveau einen Raffungsfaktor zu bestimmen, welcher das Verhältnis der charakteristischen Lebensdauern auf beschleunigtem Lastniveau (Index: p) und Feldlastniveau beschreibt (siehe Gl. (4.9)), wobei dieses Verhältnis aus dem Lebensdauermodell ermittelt werden kann.

$$r = \frac{N_D \cdot \left(\frac{load_s}{load_D}\right)^{-k}}{N_D \cdot \left(\frac{load_p}{load_D}\right)^{-k}} = \left(\frac{load_s}{load_p}\right)^{-k} = \frac{T_s}{T_p} \quad (4.9)$$

Zur Bestimmung der *Probability of Test Success* werden mit Hilfe des auf ein beschleunigtes Lastniveau umgerechneten Ausfallverhaltens anschließend virtuelle Ausfallzeiten auf dem beschleunigten Lastniveau erzeugt. Diese werden mit der Testdauer auf beschleunigtem Lastniveau t_p verglichen. Sofern mindestens eine der umgerechneten virtuellen Ausfallzeiten der n Prüflinge unter der nachzuweisenden Lebensdauer liegt, gilt der Test als nicht erfolgreich, was durch viele Wiederholungen zur Bestimmung der *Probability of Test Success* genutzt werden kann.

Aus der Success-Run-Gleichung für beschleunigte Tests mit dem Lebensdauerverhältnis $L_v = 1$

$$P_A = 1 - R(t_s)^{r^{b \cdot n}} = 1 - \left(R(t_s)r^b\right)^n = 1 - R(t_p)^n \quad (4.10)$$

nach [12] ergibt sich, dass bei gleicher Prüflingszahl n die nachgewiesene Zuverlässigkeit auf beschleunigtem Lastniveau gleich der im unbeschleunigten Fall ist. Dies gilt unter Berücksichtigung der zu diesem Zeitpunkt nachzuweisenden Zuverlässigkeit auf Feldniveau R_s inklusive Aussagewahrscheinlichkeit P_A , dem gegebenen Formparameter b aus Vorwissen und dem Raffungsfaktor r , welcher sich aus dem Lebensdauermodell ergibt. Dies führt dazu, dass sich sowohl die Ausfallzeiten aus dem Ausfallverhalten ($T_p = T_s/r$, $b_p = b$), als auch die Anforderung t_p (Testdauer ohne Ausfälle) im Test ($t_p = t_s/r$) mit dem Raffungsfaktor transformieren.

Problematisch ist an dieser Vorgehensweise für die Zuverlässigkeitstestplanung, dass die Anforderung und die Erzeugung der virtuellen Ausfallzeiten gleichermaßen mit dem Raffungsfaktor transformiert werden. Dies entspricht einer exakten Rückrechnung aller zur Verfügung stehenden Informationen auf den Ausgangszustand, wodurch die *Probability of Test Success* nicht durch Variation der Höhe des beschleunigten Lastniveaus beeinflusst werden kann. Ein beschleunigter Success-Run-Test (bSRT) hat demnach immer die gleiche *Probability of Test Success* und damit auch immer den gleichen Nachweiszeitpunkt t_{dem} wie ein unbeschleunigter SRT, bei gleichen Zuverlässigkeitsanforderungen. Dies ist in Abbildung 4.7 visualisiert.

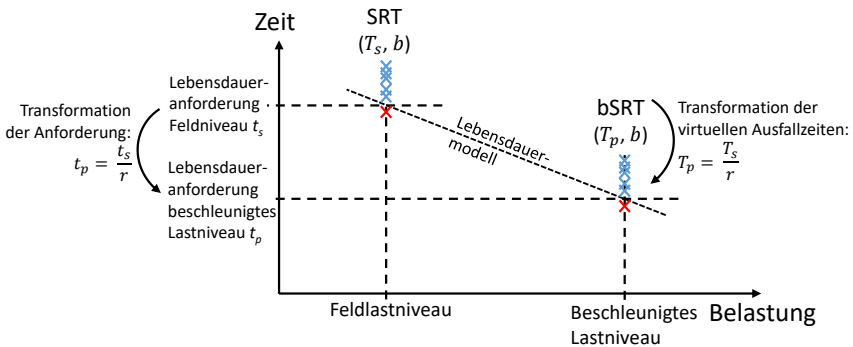


Abbildung 4.7: Verdeutlichung der Problematik bei der Auswertung beschleunigter Success-Run-Tests

Betrachtet man den bSRT im Zusammenhang mit der effizienten Erprobung, so muss eine effiziente Testkonfiguration neben hohem Nachweiszeitpunkt auch niedrige Gesamterprobungskosten und eine niedrige Gesamterprobungsdauer vorweisen. Durch

die Unabhängigkeit des beschleunigten Lastniveaus vom Nachweiszeitpunkt ist die effizienteste Testkonfiguration des bSRT immer die, bei der das beschleunigte Lastniveau so hoch wie möglich liegt. Da der beschleunigte Success-Run-Test vollständig auf dem Vorwissen basiert und während des Tests keine Ausfalldaten analysiert werden können, kann in der Analyse das Vorwissen nicht validiert werden. Die Zuverlässigkeitstestplanung ist also nur abhängig von der Wahl des Vorwissens. Bei einer Abweichung des im Konzept berücksichtigten Vorwissens vom tatsächlichen Ausfallverhalten der Komponente wird die geforderte Testdauer ohne Ausfall fehlerhaft berechnet, was sich insbesondere bei hohen beschleunigten Lastniveaus negativ auswirkt. Der effizienteste bSRT, auf möglichst hohen beschleunigten Lastniveaus, ist also sehr sensitiv gegenüber fehlerhaftem Vorwissen und ist deshalb nur bei sehr genauer und gesicherter Kenntnis des Ausfallverhaltens und des Lebensdauermodells verlässlich.

Zusammenfassend kann der beschleunigte Success-Run-Test nicht empfohlen werden, da dieser ausschließlich auf dem Vorwissen basiert. Dieses Vorwissen kann im Test nicht validiert werden, da keine Ausfälle auftreten. Der Nachweiszeitpunkt und die Einhaltung des erweiterten Zuverlässigkeitsziels sind dadurch nur von den zu Beginn der Zuverlässigkeitstestplanung verwendeten Informationen abhängig. Daher wird der bSRT in der weiteren Arbeit nicht berücksichtigt.

4.2.2 Randbedingungen des Konzepts

Das vorgestellte Konzept unterliegt Randbedingungen, welche die Simulation einschränken. Diese orientieren sich zum Teil an [65], wobei einzelne Randbedingungen aufgelöst wurden, andere jedoch aus praktischer Sicht im Zusammenhang mit der berücksichtigten Anzahl der Prüfstände hinzugefügt wurden.

Allgemeine Randbedingungen

- Einzelne Ausfallmechanismen: Als Prüflinge werden im hier vorgestellten Konzept nur Komponenten mit einem Ausfallmechanismus betrachtet. Mehrere unabhängige oder sogar konkurrierende Ausfallmechanismen einer Komponente sind im vorgestellten Konzept nicht implementiert. Grundlage des Konzepts sind Lebensdauermodelle, welche sich nach Achsentransformierung als Gerade darstellen lassen. Eine Ausweitung auf die Gesamtheit aller Ausfallmechanismen ist nicht ohne weiteres möglich.
- Unsicherheit des Vorwissens: Die als Vorwissen gelieferten Eingangsinformationen werden als wahr angenommen und sind nicht mit einer Unsicherheit beaufschlagt (scharfes Vorwissen).

- Gleiche Systemebene: Eine Unterscheidung der Systemebene verschiedener Komponenten wird nicht getroffen.
- Zweiparametrische Weibullverteilung: Als Vorwissen wird die zweiparametrische Weibullverteilung verwendet. Solange kein Vorwissen über eine ausfallfreie Zeit der Komponente vorliegt, ist die Annahme der zweiparametrischen Weibullverteilung vor allem für die betrachteten großen Zuverlässigkeitsquantile eine konservative Annahme. Auch andere Verteilungsarten sind nicht implementiert.
- Lastunabhängiger Formparameter: Der Weibull-Formparameter wird als lastunabhängig angenommen. Dies ermöglicht die einfache gleichzeitige Schätzung des Formparameters sowie der Lebensdauermodellparameter im MLE. In der Praxis ist das Vorwissen über den Zusammenhang zwischen Formparameter und Belastung meist nicht ausreichend genau, weshalb die Annahme dieser Randbedingung vertretbar ist. Die Lastunabhängigkeit des Formparameters entspricht beim Lebensdauermodell von Wöhler der Nutzung des Perlschnurverfahrens.
- Bias der MLE-Schätzung: Die Maximum-Likelihood-Schätzung schätzt einzelne Parameter für kleine Stichprobengrößen mit einem *Bias*. Dieser wurde von [65] umfassend untersucht. Zur Reduzierung desselben gibt es verschiedene Ansätze. Diese werden hier jedoch nicht implementiert. Sollten statistische Auffälligkeiten aufgrund eines *Bias* vorhanden sein, werden diese im Ergebnisteil dieser Arbeit kritisch diskutiert. Allgemein reduziert sich jedoch der Einfluss des *Bias* für beschleunigte Tests, da der Nachweiszeitpunkt auf Feldniveau durch Extrapolation des Lebensdauermodells nicht sensitiv auf den MLE-*Bias* reagiert.
- Normierung der charakteristischen Lebensdauer: Die generierten und ermittelten Zeiten und Zeitpunkte werden in der Arbeit durchgängig mit der charakteristischen Lebensdauer T aus dem Vorwissen normiert. Durch Simulation generierte Nachweiszeitpunkte geben demnach immer das Verhältnis der nachgewiesenen zur charakteristischen Lebensdauer an.
- Normierung der Lastniveaus: Alle beschleunigten und unbeschleunigten Lastniveaus werden in der Arbeit durchgängig mit dem hohen beschleunigten Lastniveau normiert, was dazu führt, dass das hohe beschleunigte Lastniveau immer auf $load_H = 1$ gesetzt wird und alle weiteren anteilig davon angegeben werden. Das hohe beschleunigte Lastniveau wird dabei immer so gewählt, dass es an der oberen Grenze des Schädigungsmechanismus liegt, das heißt, es tritt gerade so kein anderer Schädigungsmechanismus auf. Grundlage für diese Annahme sind unter anderem Untersuchungen in [22], wobei gezeigt wird, dass der Interpolationsbereich in der Schätzung des Lebensdauermodells (siehe Abbildung 4.5) möglichst groß gehalten werden sollte, was durch die Maximallastannahme für das hohe beschleunigte Lastniveau $load_H$ realisiert werden kann.

- Simulation bis zur Konvergenz des Nachweiszeitpunkts: Die Monte-Carlo-Simulationen werden, sofern nicht anders angegeben, immer solange durchgeführt bis ein vorher spezifiziertes Konvergenzkriterium erreicht ist. Dieses wird in Unterkapitel 4.5.1 vorgestellt.

Testbezogene Randbedingungen

- Mindestprüflingszahl: Die Parameterschätzung mit Hilfe einer Maximum-Likelihood-Schätzung ist aus statistischer Sicht für Prüflingszahlen $n < 3$ nicht sinnvoll. Dies gilt jeweils für alle Lastniveaus. Für den beschleunigten End-of-Life-Test auf zwei beschleunigten Lastniveaus sind hier also sechs Prüflinge erforderlich, um den Nachweiszeitpunkt zu bestimmen.
- Zensierung Typ-II: In der vorliegenden Arbeit wird nur die Typ-II-Zensierung betrachtet, da die Ergebnisse leicht auf andere Typen übertragen werden können. Diese erfordert in der Simulation nur die Eingangsparameter Prüflinge auf zensiertem Lastniveau n_{cens} und Lastniveauhöhe $load_{cens}$, wobei hier angenommen wird, dass $load_{cens} = load_L$ ist. Damit eignet sich diese Zensierungsstrategie für die umfangreichen rechenzeitintensiven Parameterstudien. Eine Realisierung einer Typ-II-zensierten Testkonfiguration ist jedoch, nur möglich, sofern jeder Prüfling auf einem eigenen Prüfstand getestet wird. Der Autor ist sich über die Problematik der in der Simulation umgesetzten Typ-II-Zensierung bei nur einem Prüfstand bewusst.

Die in der Praxis häufigste Zensierungsstrategie Typ-I-Zensierung erfordert keine Prüflingszahl auf zensiertem Lastniveau n_{cens} , dafür neben der Lastniveauhöhe $load_{cens}$ zusätzlich ein zeitliches Abbruchkriterium. Die Variation dieses Kriteriums ist stark anwendungsspezifisch, weshalb die Planung von Typ-I-zensierten Tests zur Ableitung allgemeingültiger Handlungsempfehlungen nicht geeignet ist. Typ-I-Zensierung und weitere Zensierungsstrategien können implementiert werden, erfordern zum Teil aber zusätzliche Informationen über die Test-Infrastruktur, -Logistik und die Prüfstandsbelegung.

- Success-Run-Test mit Ausfällen: Für den Success-Run-Test wird die Möglichkeit nachträglich Prüflinge nachzuschieben, nicht berücksichtigt. Dieser Fall wurde in [65] untersucht.
- Anzahl Prüfstände: Es wird nur ein Prüfstand berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass Prüflinge immer nur sequentiell getestet werden können, was zu einer Summation der Testdauern aller Prüflinge führt. Stillstandszeiten und Wechselzeiten werden nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung weiterer Prüfstände führt zu der Frage nach einer optimalen Belegung und Bestückung der Prüfstände, welche in dieser Arbeit nicht von zentraler Bedeutung sind.

- Prüfstandsperformance: Diese muss individuell in der Simulation berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere die Höhe der beschleunigten Lastniveaus. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass das hohe beschleunigte Lastniveau an der oberen Grenze des Schädigungsmechanismus realisiert werden kann. Zusätzlich ist das niedrige beschleunigte Lastniveau variabel zwischen Feldlastniveau und hohem beschleunigten Lastniveau einstellbar. Ist dies nicht der Fall, muss dies in der Simulation berücksichtigt werden. Die aus der Arbeit abgeleiteten Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen sind jedoch weiterhin gültig.

4.3 Optimalität und Effizienz

In der Praxis der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests wird meist zu Beginn ein Optimalitätskriterium ausgewählt und alle untersuchten Testkonfigurationen anhand dessen bewertet. Üblicherweise wird dabei die beste Bewertung als Referenz-Konfiguration genommen, um die Effizienz der anderen Testkonfigurationen prozentual zu diesem Optimum zu beziffern. Beispielsweise verwendet [41] hier die *relative efficiency*, um Testkonfigurationen zu vergleichen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Mehrparameteroptimum aus maximalem Nachweiszeitpunkt, minimalen Erprobungskosten und minimaler Erprobungszeit angestrebt, wodurch sich die klassische Effizienz-Definition nicht anwenden lässt.

Bei der Wahl des geeigneten Optimalitätskriteriums wird häufig das eigentliche Ziel des Tests vernachlässigt. Exemplarisch minimieren einige Optimalitätskriterien die Varianz der geschätzten Parameter, was im Falle eines übergeordneten Erprobungsziels „exakte Parametrisierung des Lebensdauermodells“ zielführend ist. Die Erprobungsziele „Maximierung der nachgewiesenen Lebensdauer“, „Minimierung der Gesamterprobungskosten“ oder „Minimierung der Gesamterprobungsdauer“ erfordern dagegen individuelle angepasste Optimalitätskriterien.

4.3.1 Optimalitätskriterien in der Zuverlässigkeitstestplanung mit Probability of Test Success

Im folgenden Kapitel wird zunächst Effizienz als für die Arbeit entscheidende Optimierungsgröße definiert. Anschließend werden die weiteren Grundlagen für das Verständnis und die Anwendung von Optimalitätskriterien beschrieben.

Definition Effizienz und Optimalität

In dieser Arbeit wird die effizienteste Testkonfiguration als eine Art Mehrgrößenoptimum aus maximalem Nachweiszeitpunkt, minimaler Gesamterprobungsdauer und minimalen Gesamterprobungskosten unter Berücksichtigung aller gegebenen Randbedingungen bezeichnet. Dabei ist es nicht möglich, eine Testkonfiguration bezüglich aller drei Zielgrößen gleichzeitig zu optimieren, da sich beispielsweise die Maximierung des Nachweiszeitpunkts und die Minimierung der Gesamterprobungsdauer direkt widersprechen. Die gegebenen Anforderungen in der Zuverlässigkeitstestplanung, hier das verfügbare Gesamterprobungskostenbudget, das verfügbare Gesamterprobungsdauerbudget und die nachzuweisende Lebensdauer, müssen durch eine effiziente Testkonfiguration in jedem Fall eingehalten werden (harte Kriterien). Des Weiteren kann es zusätzliche anwendungsspezifische Randbedingungen geben, welche berücksichtigt werden müssen.

Gibt es mehrere mögliche Testkonfigurationen, welche alle gegebenen Anforderungen erfüllen, wird in dieser Arbeit die Testkonfiguration, welche die höchste Lebensdauer auf Feldniveau unter Berücksichtigung des erweiterten Zuverlässigkeitsziels (R, P_A, P_{TS}) nachweisen kann, als optimale Testkonfiguration bezeichnet. Dieses zweistufige Vorgehen wird auch im Vergleich der klassischen Optimalitätskriterien angewandt. Es müssen also jederzeit alle Randbedingungen und anwendungsspezifischen Anforderungen in der Zuverlässigkeitstestplanung eingehalten werden.

Grundlage der Optimalitätskriterien

Grundlage für fast alle der hier betrachteten Optimalitätskriterien ist die Bestimmung der Fisher-Informationsmatrix, welche bei der Anwendung der Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE) als Parameterschätzmethode zur Bestimmung der Weibull-Verteilung (T, b) und der Lebensdauermodellparameter (k, N_D) dient. Die Fisher-Informationsmatrix ist die Inverse der Varianz-Kovarianz-Matrix der Log-Likelihood-Funktion und daher eng mit den zweiten Ableitungen der Log-Likelihood-Funktion verwandt. Geometrisch entspricht sie damit einer Art Krümmung der Log-Likelihood-Funktion. Die Fisher-Informationsmatrix wird daher typischerweise verwendet, um die Qualität und die Genauigkeit einer Parameterschätzung zu bestimmen.

Für die hier vorgestellte Suche nach effizienten beschleunigten Testkonfigurationen müssen zum einen das Ausfallverhalten eines Bauteils und zum anderen die Parameter des Lebensdauermodells bestimmt werden. Insgesamt müssen im MLE also drei Parameter bestimmt werden (b, k, N_D) . Dies führt zu einer 3x3-Fisher-Informationsmatrix der Parameterschätzung für jede Testkonfiguration. Für die geometrische Visualisierung der Fisher-Informationsmatrix beziehungsweise der Varianz-Kovarianz-Matrix kann der zweiparametrische Fall (2x2-Matrix) als Konfidenzellipse der Parameterschätzungen interpretiert werden, siehe [119], [120] und [121].

Für den in dieser Arbeit vorliegenden dreiparametrischen Fall entspricht dies einem Konfidenzellipsoid. Die Hauptdiagonale der inversen Fisher-Informationsmatrix ist mit den Varianzen belegt. Daneben sind auch die Kovarianzen in mehreren Optimalitätskriterien enthalten. Sie bilden die Nebendiagonalen der inversen Fisher-Informationsmatrix und beschreiben, wie sehr zwei geschätzte Parameter korrelieren. Eine große Kovarianz entspricht dabei einer hohen Korrelation. Bei einer kleinen Kovarianz ist die Konfidenzellipse für normierte Varianzen eher kreisförmig, für eine große Kovarianz eher ellipsenförmig. Außerdem führen Kovarianzen grafisch gesehen zu einer Rotation der Konfidenzellipse. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 4.8 für drei verschiedene Varianz-Kovarianz-Matrizen und den zweidimensionalen Fall visualisiert.

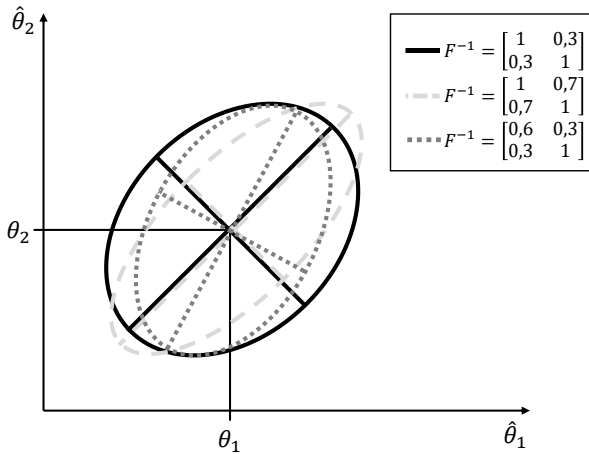


Abbildung 4.8: Darstellung verschiedener Konfidenzellipsen und der Varianz-Kovarianz-Matrizen für zwei geschätzte Parameter nach [122]

Da die Bestimmung der Einträge der Fisher-Informationsmatrix einer Testkonfiguration aufgrund der Streuung ihrer Ausfälle nicht mit einer einzigen Iteration ausreichend genau geschätzt werden kann, ist ein Bootstrapping-Ansatz erforderlich, um das konvergierende Verhalten der Einträge der Fisher-Informationsmatrix zu bestimmen. Auf diese Weise kann eine genauere Schätzung der Varianzen und Kovarianzen der Log-Likelihood-Funktion vorgenommen werden, siehe [123].

Für alle Optimalitätskriterien, welche direkt von Einträgen der Fisher-Informationsmatrix oder ihrer Inversen abhängen, lässt sich daher durch Minimieren einzelner oder Kombinationen mehrerer Varianzen und Kovarianzen die optimale Testkonfiguration bestimmen.

4.3.2 Optimalitätskriterien

Nachfolgend werden alle in der Arbeit untersuchten Optimalitätskriterien vorgestellt. Dabei orientiert sich diese Arbeit an den in der Zuverlässigkeitstestplanung gängigen Kriterien. Tabelle 4.1 fasst die hier betrachteten Kriterien zusammen, welche im Anschluss vorgestellt und in das erweiterte Konzept eingeordnet werden.

Tabelle 4.1: Übersicht über die untersuchten Optimalitätskriterien

Optimalitätskriterium	Zielgröße
Maximierung des Nachweiszeitpunkts	$\max(t_{dem})$
Minimierung der Gesamterprobungsdauer	$\min(t_{tot})$
Minimierung der Gesamterprobungskosten	$\min(k_{tot})$
A-Optimalität	$\min(\text{spur}(F^{-1}))$
D-Optimalität	$\min(\det(F^{-1}))$
E-Optimalität	$\min(\max(\text{eig}(F^{-1})))$
I-Optimalität	$\min(\text{Var}(B_{q, P_A, P_{TS}}))$
Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Formparameters des Ausfallverhaltens	$\min(\text{Var}(b))$
Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten des Lebensdauermodells	$\min(\text{Var}(k))$

Maximierung des Nachweiszeitpunkts

Das übergeordnete Erprobungsziel einer t_{dem} -optimalen Testkonfiguration ist die Maximierung des Nachweiszeitpunkts t_{dem} . Dies entspricht der Maximierung der extrapolierten nachgewiesenen Lebensdauer jedes Simulationsschritts des erweiterten Konzepts. Dabei wird die Genauigkeit der Schätzung des Ausfallverhaltens und der Lebensdauermodellparameter vernachlässigt, das heißt auch eine große Streuung der geschätzten Modellparameter ist für eine t_{dem} -optimale Testkonfiguration zulässig.

Die Bestimmung des Nachweiszeitpunkts t_{dem} einer Testkonfiguration erfolgt entsprechend der in Teilkapitel 4.2.1 vorgestellten Struktur des erweiterten Konzepts. Auf diese Weise ist es möglich, alle ermittelten Nachweiszeitpunkte t_{dem} der simulierten Testkonfigurationen zu vergleichen und die optimale Testkonfiguration unter Berücksichtigung des erweiterten Zuverlässigkeitsziels (R, P_A, P_{TS}) zu finden.

Vorteil der Anwendung dieses Optimalitätskriteriums ist, dass nach Bestimmung des Nachweiszeitpunkts jeder Testkonfiguration diese direkt miteinander vergleichbar sind, da die nachgewiesene Lebensdauer als zeitliche Größe in der angewandten Zuverlässigkeitstestplanung eine leicht verständliche Größe darstellt. Zusätzlich kann der Nachweiszeitpunkt sehr einfach dazu verwendet werden, verschiedene Designs

(mit unterschiedlichem Ausfallverhalten) und ihr Potenzial im Feld direkt zu vergleichen und die Leistungsfähigkeit zu quantifizieren.

Minimierung der Gesamterprobungsdauer

Die Gesamterprobungsdauer t_{tot} ist bei einer geringen Anzahl verfügbarer Prüfstände und/oder hohen Testzeitkosten k_t (zeitabhängige Kosten) ein entscheidendes Kriterium in der Zuverlässigkeitstestplanung. Bei gegebenem Gesamterprobungsdauerbudget (verfügbare Testzeit) muss eine effiziente Testkonfiguration dieses Budget als hartes Kriterium einhalten.

Die Gesamterprobungsdauer berechnet sich im beschleunigten End-of-Life-Test mit zwei beschleunigten Lastniveaus als Summe aller generierten virtuellen Ausfallzeiten, für zensierte Testkonfigurationen unter Berücksichtigung der Zensierungszeiten. Diese werden in jedem Monte-Carlo-Simulationsschritt summiert und der Median dieser Summen ermittelt. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Der Median entspricht der Gesamterprobungsdauer der Testkonfiguration. Aus dieser Auswertung folgt, dass in 50 % der Simulationen die Gesamterprobungsdauer tatsächlich höher als t_{tot} ist. Für den Fall, dass eine konservativere Abschätzung der zu erwartenden Erprobungsdauer gefordert ist, lässt sich dieses Quantil dementsprechend anpassen.

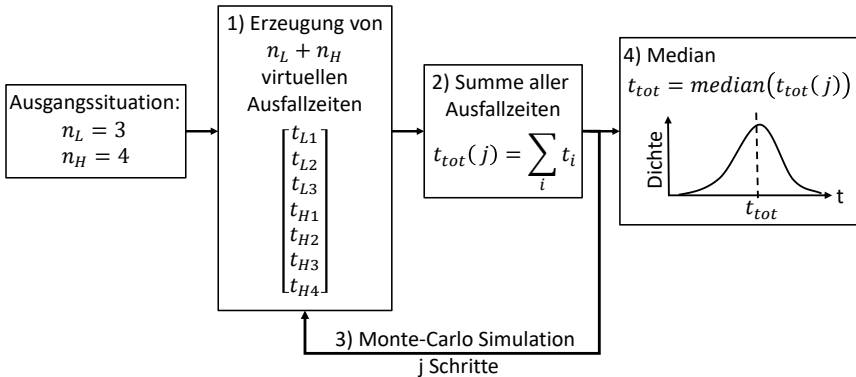


Abbildung 4.9: Ermittlung der Gesamterprobungsdauer

Die reine Optimierung einer Testkonfiguration bezüglich der Gesamterprobungsdauer ist in der Anwendung nicht zielführend, da in diesem Fall der Nachweiszeitpunkt vollständig vernachlässigt wird. Im Rahmen der Effizienzbetrachtungen ist eine Berücksichtigung als sekundäres Optimierungsziel allerdings empfehlenswert, falls

ein Produkt beispielsweise kurz vor der Markteinführung steht, aber der Lebensdauernachweis noch aussteht.

Minimierung der Gesamterprobungskosten

Die Gesamterprobungskosten sind in der Praxis meist einer der treibenden Faktoren in der Zuverlässigkeitstestplanung. In der vorliegenden Arbeit wird zur Berechnung das in Gl. (4.1) beschriebene Kostenmodell angewendet, welches bereits von [63] verwendet wurde. Es ermöglicht die einfache Berücksichtigung zeitabhängiger und stichprobenabhängiger Kosten.

Entsprechend dem vorangehenden Abschnitt wird auch für die zeitabhängigen Kosten der Median der Gesamterprobungsdauer verwendet, was dazu führt, dass auch die Gesamterprobungskosten nur den Median der prognostizierten Kosten repräsentieren. Auch hier können für weitere Untersuchungen zum einen das Kostenmodell erweitert und zum anderen auch andere Quantile der prognostizierten Gesamterprobungsdauern verwendet werden.

Die Optimierung einer Testkonfiguration hinsichtlich der Gesamterprobungskosten ist möglich, führt jedoch meist zur Wahl von Konfigurationen mit geringem Nachweiszeitpunkt und verschwendeter Materialressourcen. Als sekundäres Optimierungsziel unter Einhaltung aller Randbedingungen ist die Minimierung der Gesamterprobungskosten allerdings empfehlenswert, um eine kostengünstige Testkonfiguration zu finden, welche die nachzuweisende Lebensdauer erfüllt. Verbunden ist dies meist mit einer geringen Stichprobengröße und/oder einer geringen Gesamterprobungsdauer. Der Vergleich verschiedener Testkonfigurationen mit unterschiedlichen Gesamterprobungskosten ermöglicht es, die nachgewiesene Lebensdauer direkt mit dem dazu erforderlichen Mehraufwand an Kosten in Verbindung zu bringen.

A-Optimalität

Zur Verbesserung der Aussage einer Parameterschätzung kann die Konfidenzellipse (Abbildung 4.8) verkleinert werden. Zur Verringerung der Fläche der Konfidenzellipse gibt es verschiedene Ansätze. Zum einen kann die Gesamtfläche an sich verringert werden (D-Optimalität). Zum anderen können die Hauptachsen der Konfidenzellipse verkürzt werden. Da die reziproken Eigenwerte der Fisher-Informationsmatrix proportional zu den dazugehörigen Längen der Hauptachsen der Konfidenzellipse sind [124], können die Hauptachsen verkleinert werden, indem entweder die durchschnittliche Länge der Achsen minimiert wird oder die jeweils längste Achse verkleinert wird. Ziel des A-Optimalitätskriteriums ist dabei die Minimierung der durchschnittlichen (A: Abkürzung für engl. *average*) Länge der Hauptachsen.

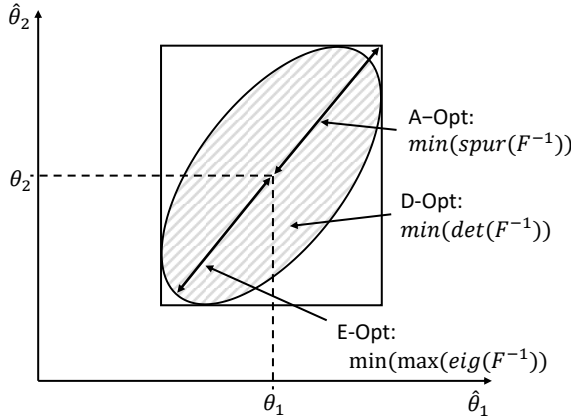


Abbildung 4.10: Konfidenzellipse für 2 geschätzte Parameter mit Visualisierung ausgewählter Optimalitätskriterien nach [122]

Das A-Optimalitätskriterium ist somit ein Maß für die mittlere Varianz der Parameterschätzungen ohne Berücksichtigung der Korrelation zwischen diesen Schätzungen. Daher wird zur Bestimmung der A-optimalen Testkonfiguration die Summe der Varianzen der Schätzung bestimmt und minimiert, siehe Rady et al. [125]. Dies entspricht einer Minimierung der Spur der inversen Fisher-Informationsmatrix, siehe Chernoff [126], welcher dieses Optimalitätskriterium einführte. Die Kovarianzen werden dabei nicht berücksichtigt. Grafisch lässt sich das Kriterium für zwei geschätzte Parameter als Minimierung der größten Diagonalen der Konfidenzellipse unter Berücksichtigung der aufgespannten Fläche interpretieren, siehe Abbildung 4.10. Damit ist es laut [51] ein Maß für die Gesamtvarianz.

Für die Anwendung in der Zuverlässigkeitstestplanung bedeutet dies eine Minimierung der mittleren Varianz aller geschätzten Parameter. Dies führt zu einer Schärfung der Extrapolation durch Belohnung kleiner Varianzen und dadurch auch zu einer Schärfung der Schätzung des Ausfallverhaltens auf Feldniveau.

D-Optimalität

Wald [127] führte die D-Optimalität als Kriterium ein, um die Genauigkeit von Parameterschätzungen zu erhöhen. Die Bezeichnung dafür wurde von [128] zuerst verwendet. Sie ist das am häufigsten verwendete Optimalitätskriterium [125]. Das D-Optimalitätskriterium basiert auf der Determinante der Inversen der Fisher-Informationsmatrix. Diese soll für eine D-optimale Testkonfiguration minimal sein. Dies entspricht gleichzeitig einer Maximierung der Determinante der Fisher-Informa-

tionsmatrix und ist somit ein allgemeines Maß für die Größe der Fisher-Informationsmatrix, welches sowohl Varianzen als auch Kovarianzen berücksichtigt. Geometrisch kann das D-Optimalitätskriterium als Fläche der Konfidenzellipse bzw. Volumen des Konfidenzellipsoids interpretiert werden, siehe [125], [129] sowie [130].

Das D-Optimalitätskriterium kann zur Minimierung der asymptotischen Varianzen der Maximum-Likelihood-Schätzungen verwendet werden. Die reine Minimierung der Fläche der Konfidenzellipse erlaubt jedoch längliche Ellipsen mit sehr geringer Breite, falls eine Varianz sehr groß und die andere sehr klein ist, siehe [131]. So kann beispielsweise eine schlechte Schätzung der charakteristischen Lebensdauer T durch eine sehr gute Schätzung des Formparameters b ausgeglichen werden.

E-Optimalität

Ziel des E-Optimalitätskriteriums ist es, die Fläche der Konfidenzellipse durch Minimierung des maximalen Eigenwerts der inversen Fisher-Informationsmatrix zu verringern. Dadurch minimiert sich auch die maximale Varianz der möglichen Linearkombinationen der Parameterschätzung, siehe [125]. Geometrisch kann das E-Optimalitätskriterium als eine Minimierung der längsten Diagonale/Hauptachse der Konfidenzellipse dargestellt werden, siehe [129] und Abbildung 4.10.

Für die Anwendung führt die Verwendung des E-Optimalitätskriteriums zur Reduzierung der größten Varianz aller Schätzungen. Dies entspricht der Minimierung der größten Breite der Vertrauensbereiche der Parameterschätzungen [130]. Kleine Varianzen und Kovarianzen werden dadurch nicht betrachtet.

I-Optimalität

Die Anwendung des I-Optimalitätskriteriums führt zu einer Minimierung der integrierten Varianz der Prädiktion, siehe [125] und [132]. Dies bedeutet, dass eine genaue Vorhersage der Antwort über den Designraum wichtiger ist als präzise Parameterschätzungen. Die Minimierung der Fläche des Konfidenzellipsoids erfolgt hierbei über ein quadratisches Modell, welches sich aus den quadrierten Varianzen der inversen Fisher-Informationsmatrix und den Wechselwirkungen erster Ordnung der Kovarianzen ergibt. Für die Anwendung in der Zuverlässigkeitstestplanung entspricht dies einer noch stärkeren Bestrafung großer Varianzen und Kovarianzen bei der Ermittlung des I-Optimalitätskriteriums gegenüber dem linearen D-Optimalitätskriterium, siehe [130] und [133].

Maximierung der Genauigkeit des Formparameters des Ausfallverhaltens auf Feldniveau

Ausgangspunkt des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success* ist unter anderem das Vorwissen, welches weibullverteilt beschrieben wird. Die in dieser Arbeit vorgestellte Planung effizienter Zuverlässigkeitstests mit *Probability of Test Success* basiert auf der genauen Kenntnis dieses Vorwissens. Ist das übergeordnete Ziel der Zuverlässigkeitstestplanung die exakte Bestimmung desselben, kann dies auch als Optimalitätskriterium verwendet werden. Dabei wird die tatsächliche Lage des Nachweiszeitpunkts vernachlässigt, aber die Kenntnis über das Ausfallverhalten des Produkts im Feld erhöht. Eine Lage eines Testlastniveaus nahe am Feldlastniveau schärft bei gleichbleibenden anderen Testparametern die Aussage über das Feldlastniveau. Gleichzeitig erhöht sich die Gesamterprobungsdauer. Ein weiteres Anwendungsszenario zur Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Formparameters b des Ausfallverhaltens auf Feldniveau ist die damit einhergehende Möglichkeit, Garantie- und Kulanzkosten exakter zu prognostizieren.

Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten des Lebensdauermodells

Für einzelne Anwendungen ist eine genaue Kenntnis über das Lebensdauermodell erforderlich. Dies gilt insbesondere, wenn das Verhalten einer Komponente unter verschiedenen Belastungen im Fokus liegt, was beispielsweise für die Schadensakkumulation bei unterschiedlichen Lastkollektiven der Fall ist. Diese Ermittlung einer genauen Schätzung der Parameter des Lebensdauermodells erfordert dabei eine Optimierung hinsichtlich der Minimierung der Streuung der einzelnen Modellparameter. Im in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten Wöhlermodell (k, N_D) ist die Varianz des Wöhlerexponenten k besonders relevant, da dieser das Lebensdauer-Belastungsverhalten sehr stark beeinflusst.

4.3.3 Anwendung der Optimalitätskriterien

Die Effizienz von Testkonfigurationen wurde mit Hilfe umfangreicher Parameterstudien untersucht. Eine effiziente Testkonfiguration setzt dabei voraus, dass alle Randbedingungen bzgl. des Testbudgets eingehalten werden, d. h. das Optimum entspricht beispielsweise der Testkonfiguration mit der maximal nachweisbaren Lebensdauer t_{dem} , die alle Randbedingungen (hier: Kosten- und Zeitbudget) erfüllt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudie für alle untersuchten Optimalitätskriterien aus Unterkapitel 4.3.2 vorgestellt. Diese werden jeweils für verschiedene Stich-

probengrößen n_{tot} und Prüflingsverteilungen n_L/n_{tot} dargestellt. Die Referenz-Testkonfiguration für die Parameterstudie zu den Optimalitätskriterien ist in Tabelle 4.2 angegeben. Davon ausgehen werden nachfolgend jeweils einzelne Parameter variiert.

Tabelle 4.2: Referenz-Testkonfiguration für die Parameterstudie zu den Optimalitätskriterien

	Name des Parameters	Variable	Parameterhöhe Referenzkonfiguration
Vorwissen	Weibull-Formparameter	b	3
	Ecklastschwingspielzahl Wöhler	N_b	10^6
	Wöhlerexponent	k	4
Erweitertes Zuverlässig- keitsziel	Zuverlässigkeit	R	90 %
	Aussagewahrscheinlichkeit	P_A	90 %
	<i>Probability of Test Success</i>	P_{ts}	90 %
Parameter der Testkonfi- guration	Gesamtanzahl Prüflinge	n_{tot}	10, 30, 50, 70
	Höhe niedriges beschleunigtes Lastniveau	$load_L$	0,5
	Höhe hohes beschleunigtes Lastniveau	$load_H$	1
	Höhe Feldlastniveau	$load_{nom}$	0,25

Die Lage der Lastniveaus wird so festgelegt, dass, wie in den Randbedingungen beschrieben, wobei das hohe beschleunigte Lastniveau zur Normierung dient und daher bei $load_H = 1$ liegt. Dies entspricht der maximalen Belastung, bei der sich der Ausfallmechanismus gerade so nicht ändert. Das Feldlastniveau wird für die Parameterstudien auf $load_{nom} = 0,25$ gelegt. Das Belastungsverhältnis von $load_H/load_{nom} = 4$ eignet sich gut, um in der Anwendung realisierbare Raffungsfaktoren zu untersuchen. Die Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus $load_L = 0,5$ resultiert in einer großen Interpolationsweite für das Lebensdauermodell, ermöglicht aber eine Testzeitverkürzung durch Raffung und die Untersuchung zur Variation der Lage in beide Richtungen. Die Wahl der Höhe der Parameter der Referenzkonfiguration muss in der Interpretation von Parameterstudien, bei welchen einzelne Parameter variiert werden, berücksichtigt werden, da Wechselwirkungen der Parameter untereinander hier nicht erkannt werden können.

Maximierung des Nachweiszeitpunkts

Abbildung 4.11 zeigt eine Variation der Stichprobengröße n_{tot} und des Anteils an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. Mit größerer Stichprobengröße

kann allgemein ein höherer Nachweiszeitpunkt gefunden werden, wobei der mit steigender Stichprobenzahl geringer werdende vertikale Abstand der Verläufe zeigt, dass insbesondere für kleine Stichprobengrößen eine große Steigerung des Nachweiszeitpunkts durch wenige zusätzliche Prüflinge möglich ist. Das Maximum der Verläufe liegt bei allen Verläufen bei ca. 70 % Prüflingsanteil auf niedrigem beschleunigten Lastniveau. Für hohe Prüflingsanteile nimmt die Höhe des Nachweiszeitpunkts ab.

Die Krümmung der vier dargestellten Verläufe ist im Bereich links des Optimums annähernd gleich, d. h. die Verläufe verlaufen in gleichem vertikalen Abstand. Die Erhöhung des Prüflingsverhältnisses n_L/n_{tot} wirkt sich damit in diesem Bereich für alle Stichprobengrößen gleichermaßen auf die absolute Steigerung des Nachweiszeitpunkts aus.

Alle dargestellten Verläufe zeigen, dass das Optimum robust gegenüber Änderungen im Prüflingsverhältnis ist. Daher lässt sich die Anzahl an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau bei annähernd gleichbleibendem Nachweiszeitpunkt für alle Stichprobengrößen reduzieren. Der flache Verlauf in der Nähe des Optimums lässt demnach unter Effizienzbetrachtungen eine Verschiebung zugunsten Prüflingen auf hohem beschleunigten Lastniveau und damit geringer Gesamterprobungsdauer zu. Daraus folgen geringere Gesamterprobungskosten bei nur gering verringertem Nachweiszeitpunkt.

Für hohe Anteile an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau zeigen die oberen Verläufe ein absinkendes Verhalten, d. h. einen geringeren Nachweiszeitpunkt. Die von Dazer in [65] beschriebenen Effekte zum Bias der Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE) sind dafür ursächlich. Ein hoher Anteil n_L/n_{tot} geht einher mit einer geringen Anzahl Prüflinge auf dem hohen beschleunigten Lastniveau, deren Anzahl in der Simulation nach unten auf $n_H = 3$ begrenzt ist.

Bei der Anwendung des MLE wird insbesondere für diese kleinen Prüflingszahlen der Weibull-Formparameter zu groß geschätzt. Dies wirkt sich auf die Schätzung des Ausfallverhaltens und damit auch auf die Schätzung der Parameter des Lebensdauermodells aus. Das Ausfallverhalten wird dabei auf dem hohen beschleunigten Lastniveau für die relevanten Ziel-Zuverlässigkeiten ($R > R(T)$) tendenziell als zu groß geschätzt, wodurch der Wöhlerexponent für kleine n_H zu flach geschätzt wird. Dadurch entsteht grafisch eine Verkippung des inter- und extrapolierten Lebensdauermodells. Dies führt zu einem sinkenden Nachweiszeitpunkt. Dieser Effekt tritt auch für kleine n_L/n_{tot} auf, wobei er hier nur einen geringen Einfluss auf den ermittelten Nachweiszeitpunkt hat. Der tatsächliche (*unbiased*) Verlauf der t_{dem} -optimalen Testkonfigurationen kann mit dem klassischen MLE daher nicht ermittelt werden.

Bei kleinen Prüflingszahlen ($n_{tot} = 10$) ist der beschriebene Effekt nicht sichtbar. Ursache ist das gleichzeitige Auftreten eines MLE-Bias, welcher auf beiden beschleunigten Lastniveaus zu einer zu großen Schätzung des Formparameters und damit des

Ausfallverhaltens führt. Dies führt tendenziell zu einer parallelen Verschiebung des Lebensdauermodells und damit nicht zu einer Verringerung des ermittelten Nachweiszeitpunkts.

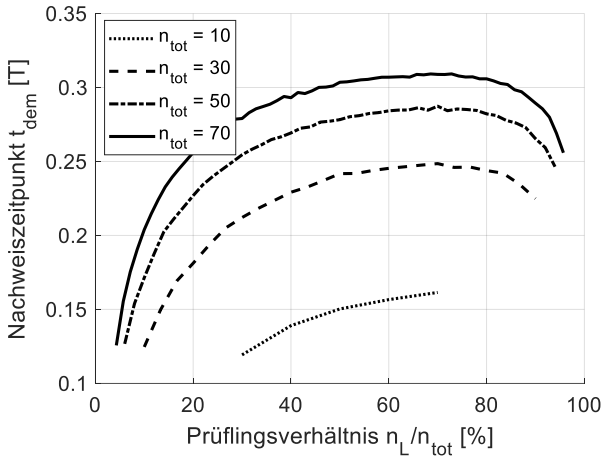
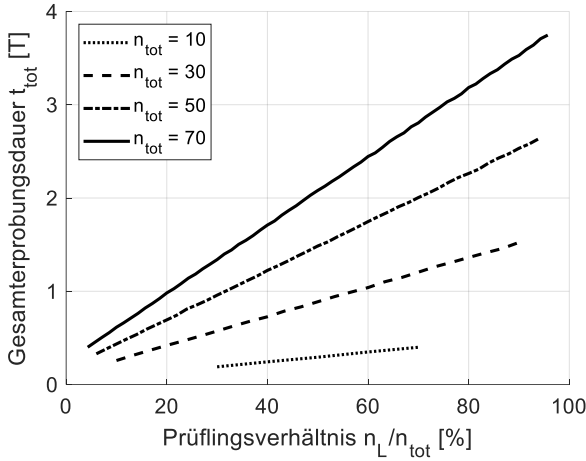


Abbildung 4.11: t_{dem} -optimale Testkonfigurationen

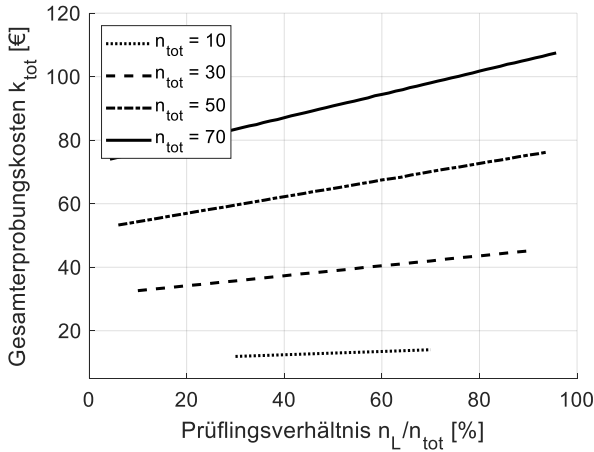
Wird die Effizienz von Testkonfigurationen unter Berücksichtigung der Gesamterprobungsdauer und -kosten betrachtet, wird ein kleines Verhältnis n_L/n_{tot} angestrebt, um das in der Anwendung meist begrenzte Budget einzuhalten. Die extremen Prüflingsverteilungen $n_L/n_{tot} \rightarrow 0$ sind jedoch wegen des geringen Nachweiszeitpunkts in der Anwendung nicht relevant. Damit sind die vom MLE-Bias betroffenen Testkonfigurationen unkritisch.

Minimierung der Gesamterprobungsdauer

Abbildung 4.12 basiert auf den gleichen Testkonfigurationen wie Abbildung 4.11. Ein höherer Anteil an Prüflingen auf dem niedrigen Lastniveau n_L/n_{tot} führt zu einer Erhöhung der Gesamterprobungsdauer, da bei reduzierter Belastungshöhe eines Prüflings auch der Raffungsfaktor des jeweiligen getesteten Prüflings sinkt. Dies führt zu längeren Erprobungsdauern dieses Prüflings und damit auch zu einer höheren Gesamterprobungsdauer. Diese erhöht sich auch mit steigender Gesamtzahl an Prüflingen. Eine t_{tot} -optimale Testkonfiguration hat einen hohen Anteil an Prüflingen auf dem hohen beschleunigten Lastniveau bei einer geringen Gesamtzahl an Prüflingen.

Abbildung 4.12: t_{tot} -optimale Testkonfigurationen

Minimierung der Gesamterprobungskosten

Abbildung 4.13: k_{tot} -optimale Testkonfigurationen

Entsprechend der Minimierung der Gesamterprobungsdauer aus Abbildung 4.12 zeigt Abbildung 4.13 die dazugehörigen Gesamterprobungskosten der untersuchten Testkonfigurationen. Mit steigendem Anteil an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau steigt die Gesamterprobungsdauer und damit auch die Gesamttestzeitkosten, die sich laut Kostenmodell aus Gl. (4.1) proportional verhalten.

Außerdem müssen im Kostenmodell die Prüflingskosten addiert werden, was zusätzlich zu einer Vertikalverschiebung der Verläufe führt. Eine k_{tot} -optimale Testkonfiguration hat demnach eine geringe Stichprobengröße und einen hohen Anteil an Prüflingen auf dem hohen beschleunigten Lastniveau (geringe Gesamterprobungsdauer). Dies stimmt mit dem Kostenmodell aus Gl. (4.1) überein.

A-Optimalität

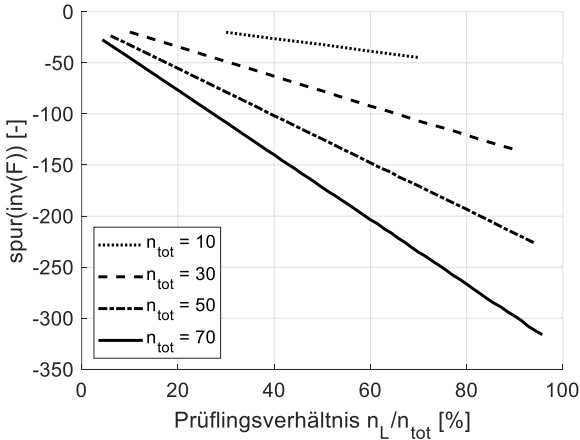


Abbildung 4.14: A-optimale Testkonfigurationen

Abbildung 4.14 zeigt für die in diesem Abschnitt verwendeten Gesamtstichprobengrößen den Verlauf der Spur der Inversen der Fisher-Matrix. Eine geringe Spur, als Maß für die Höhe der mittleren Varianz, ist damit gleichbedeutend mit einer hohen Genauigkeit der Parameterschätzungen ohne Berücksichtigung der Kovarianzen. Die dargestellten Verläufe nehmen für alle Prüflingszahlen mit größerem Anteil an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau streng monoton ab. Damit sinkt auch die mittlere Varianz aller Parameterschätzungen. Keinen Einfluss auf die Spur und damit auf das die A-optimale Testkonfiguration haben die Kovarianzen der Inversen der Fisher-Matrix, also die Wechselwirkungen zwischen den geschätzten Parametern.

D-Optimalität

Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse der Parameterstudie zur D-Optimalität. Alle Verläufe zeigen ein ähnliches Verhalten. Dabei ist stets ein Maximum etwa in der Mitte des Parameterbereichs der x-Achse erkennbar.

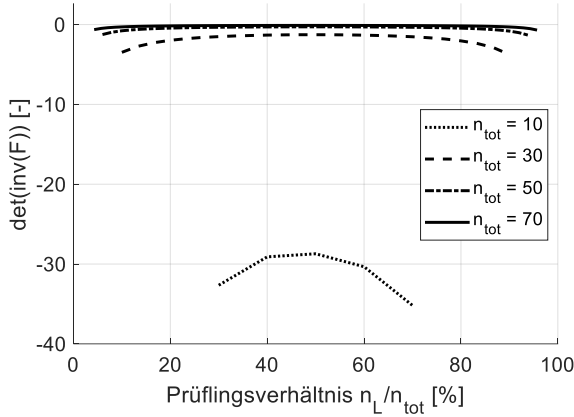


Abbildung 4.15: D-optimale Testkonfigurationen

Das für das Kriterium ausschlaggebende Minimum ist jeweils rechts, also bei großen Anteilen an Prüflingen auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. Jedoch ist auch ein ausgeprägtes Randminimum am linken Ende des Parameterbereichs zu sehen. Diese beiden Verhalten entsprechen der bereits erwähnten länglichen Konfidenzellipse aus [131]. Dies zeigt anschaulich den Nachteil des D-Optimalitätskriteriums, da eine gleichmäßige Verringerung der Varianzen und Kovarianzen vom Kriterium nicht gefordert wird.

E-Optimalität

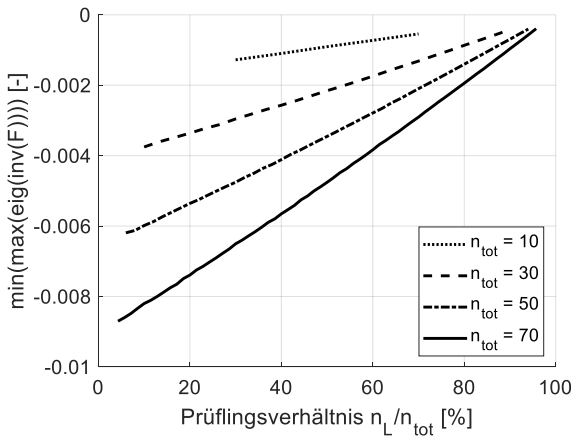


Abbildung 4.16: E-optimale Testkonfigurationen

Das in Abbildung 4.16 gezeigte Verhalten zeigt einen streng monoton steigenden Verlauf für größere n_L/n_{tot} . Damit ist für alle gezeigten Verläufe unterschiedlicher Gesamtprüflingszahlen diejenige Testkonfiguration E-optimal, welche am wenigsten Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau erfordert.

I-Optimalität

Abbildung 4.17 zeigt den Verlauf der nach dem I-Optimalitätskriterium ausgewerteten Testkonfigurationen. Alle Verläufe zeigen Randmaxima für sehr große und sehr kleine n_L/n_{tot} . Das jeweilige Minimum liegt jeweils bei ca. $n_L/n_{tot} = 50-60\%$ und damit in ähnlicher Größenordnung wie die Maxima der t_{dem} -optimalen Testkonfigurationen aus Abbildung 4.11. Das zugrundeliegende Modell aus der Summe quadrierter Varianzen und Kovarianzen erster Ordnung der inversen Fisher-Informationsmatrix zeigt demnach in den untersuchten Parameterbereichen ein sehr gutes Optimierungsverhalten bezüglich eines hohen Nachweiszeitpunkts einer Testkonfiguration. Diese Minimierung der integrierten Varianz der Prädiktion ($\min(\text{Var}(B_{q,PA,Pts}))$) eignet sich also als Optimalitätskriterium in der Betrachtung.

Der MLE-Bias, welcher bereits zur t_{dem} -Optimalität beobachtet wurde, muss auch hier berücksichtigt werden. Das ausgeprägte Minimum für $n_{tot} = 10$ weist allerdings darauf hin, dass im Gegensatz zu Abbildung 4.11, auch für geringe Prüflingszahlen in der I-Optimalitätsbetrachtung kein entscheidender Einfluss des MLE-Bias erkennbar ist.

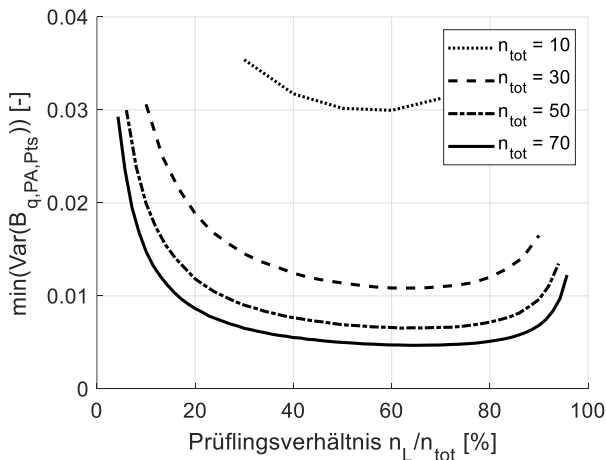


Abbildung 4.17: I-optimale Testkonfigurationen

Gesamtübersicht der klassischen Optimalitätskriterien

Abbildung 4.18 zeigt eine Gesamtübersicht über die Ergebnisse der in dieser Arbeit betrachteten Optimalitätskriterien. Dabei wurden für alle simulierten Gesamtstichprobengrößen die jeweiligen Optima markiert. Der sehr hohe erforderliche Simulationsaufwand ist für das verrauschte Verhalten der beiden mittleren Verläufe verantwortlich. Nichtsdestotrotz sind vier Verläufe unterscheidbar, wobei der obere und der untere Verlauf den simulierten Parameterbereich vollständig abdecken.

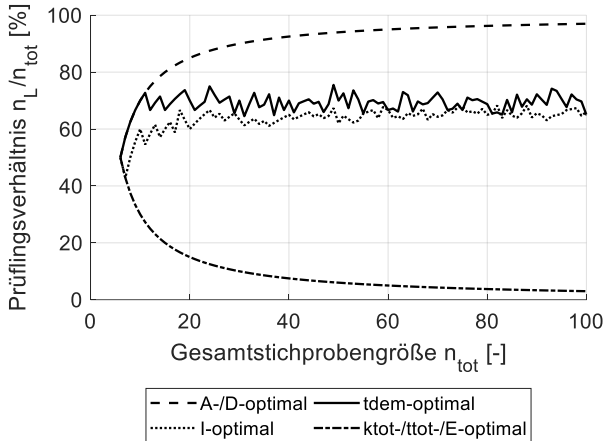


Abbildung 4.18: Gesamtübersicht über die klassischen Optimalitätskriterien

A- und D-optimale Testkonfigurationen (gestrichelt) erfordern so viele Prüflinge wie möglich auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. E-, k_{tot} - und t_{tot} -optimale Konfigurationen (Strichpunktklinie) haben einen gespiegelten Verlauf und erfordern wenige Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. Für alle diese Optimalitätskriterien kann aus Abbildung 4.11 nur ein vergleichbar niedriger Nachweiszeitpunkt der Testkonfigurationen bestimmt werden (Randminimum).

Der durchgezogene dargestellte Verlauf (t_{dem} -Optimalität) und das I-Optimalitätskriterium (gepunktet) zeigen ähnliches Verhalten und liegen nahe zusammen. Zur Bestimmung einer optimalen Testkonfiguration, welche ein erweitertes Zuverlässigkeitsziel mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweist, eignen sich also nur diese beiden der untersuchten Optimalitätskriterien.

Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Formparameters des Ausfallverhaltens

Die Abhängigkeit der Schätzung des Weibull-Formparameters b von der Prüflingsverteilung auf den beiden beschleunigten Lastniveaus wird in Abbildung 4.19 grafisch dargestellt. Erkennbar ist, dass eine höhere Gesamtstichprobengröße n_{tot} zu einer genaueren Schätzung des Vorwissens ($b = 3$) führt. Für kleines $n_{tot} = 10$ weicht die Schätzung mit $b_{n=10} = 3,6$ deutlich vom Vorwissen ab. Auch hier zeigt sich der bereits in Teilkapitel 4.2.2 erwähnte Effekt des Bias der MLE-Schätzung.

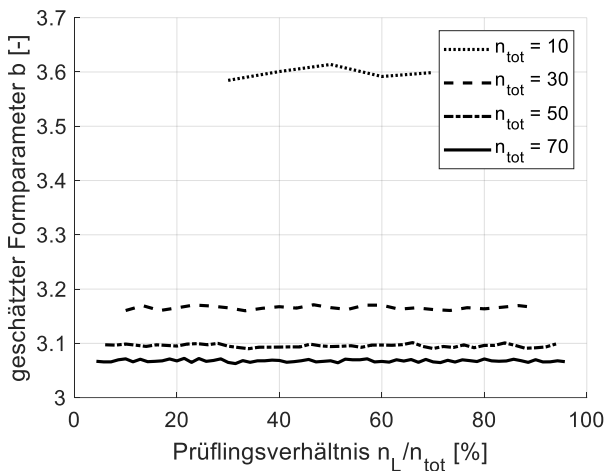


Abbildung 4.19: Genauigkeit der Schätzung des Formparameters des Ausfallverhaltens auf Feldniveau in Abhängigkeit der Prüflingsverteilung

Offensichtlich hat die Prüflingsverteilung der untersuchten Gesamtstichproben aber keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Schätzung des Weibull-Formparameters. Die Parameterschätzung des Ausfallverhaltens kann demnach nicht durch eine geänderte Prüflingsverteilung verbessert werden, sondern nur durch zusätzliche Prüflinge. Dies relativiert den Effekt des MLE-Bias in den Optimalitätsbetrachtungen der t_{dem} -optimalen und der I-optimalen Testkonfigurationen.

Die Genauigkeit der Schätzung des Weibull-Formparameters wird ergänzend in Abbildung 4.20 in Abhängigkeit der Höhe des niedrigen beschleunigten Lastniveaus ($load_L = 0,2 - 0,9$) dargestellt. Die dargestellten Verläufe mit konstanter Prüflingsverteilung zeigen einen annähernd gleichbleibenden Formparameter bei Variation des niedrigen beschleunigten Lastniveaus. Die Genauigkeit der Schätzung des Weibull-Formparameters kann also weder durch eine verbesserte Prüflingsverteilung noch durch Verschieben des niedrigen beschleunigten Lastniveaus erhöht werden.

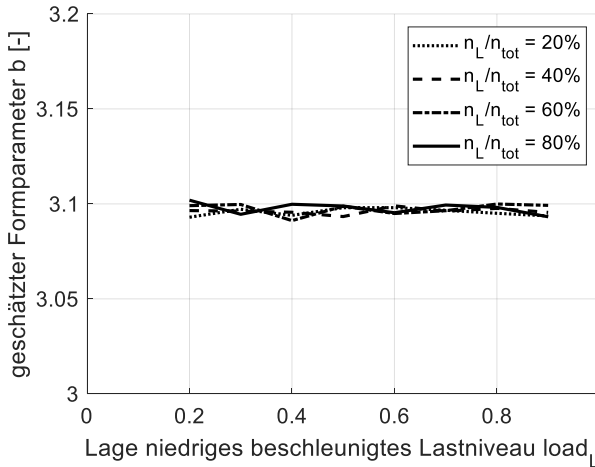


Abbildung 4.20: Genauigkeit der Schätzung des Formparameters des Ausfallverhaltens auf Feldniveau in Abhängigkeit der beschleunigten Lastniveaus mit $n_{tot} = 50$

Zur Generierung des Vorwissens für die Lebensdauerestplanung ist folglich auch die hier vorgestellte Planung effizienter Zuverlässigkeitstests nicht zielführend. Gutes und exaktes Vorwissen kann nur durch viele Ausfälle und damit durch Erhöhen der Prüflingszahl generiert werden. Allerdings können diese ohne Einbußen in der Genauigkeit bei bekanntem Lebensdauermodell auch stark beschleunigt erzeugt werden.

Maximierung der Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten des Lebensdauermodells

Die Ergebnisse der Parameterstudie zur Erhöhung der Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten sind in Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 dargestellt. Abbildung 4.21 stellt die Höhe des Wöhlerexponenten über der Variation der Prüflingsverteilung dar. Gemeinsam ist dabei für alle Stichprobengrößen ein streng monoton steigender kubischer Verlauf, wobei der im Vorwissen gegebene Wöhlerexponent ($k = 4$) bei $n_L/n_{tot} \approx 50\%$ am genauesten geschätzt wird. Dies ist für alle Verläufe der Fall. Für eine genaue Schätzung des Lebensdauermodells ist also eine gleichmäßige Verteilung der getesteten Prüflinge erforderlich. Für große Gesamtprüflingszahlen ab $n_{tot} \geq 30$ ist die Abweichung des Wöhlerexponenten für Prüflingsverhältnisse kleiner $n_L/n_{tot} \approx 20\%$ und größer $n_L/n_{tot} \approx 80\%$ jedoch sehr gering ($\Delta k < 0,5\%$). Bei 10 Prüflingen ist die Schätzung nur für eine gleichmäßige Verteilung exakt.

Die Verschiebung der Schätzungen der Ausfallverhalten auf den beschleunigten Lastniveaus durch den MLE-Bias bei kleinen Prüflingszahlen führen zu einer Verkipfung der Inter- bzw. Extrapolation des Lebensdauermodells. Je nachdem, ob auf niedrigem oder hohem Lastniveau mit wenigen Prüflingen getestet wird, verstärkt dies das in Abbildung 4.21 dargestellte Verhalten an den Rändern der Verläufe.

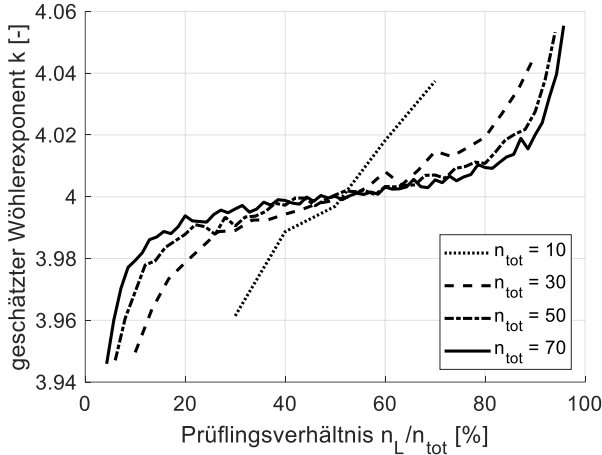


Abbildung 4.21: Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten des Lebensdauermodells in Abhängigkeit der Prüflingsverteilung

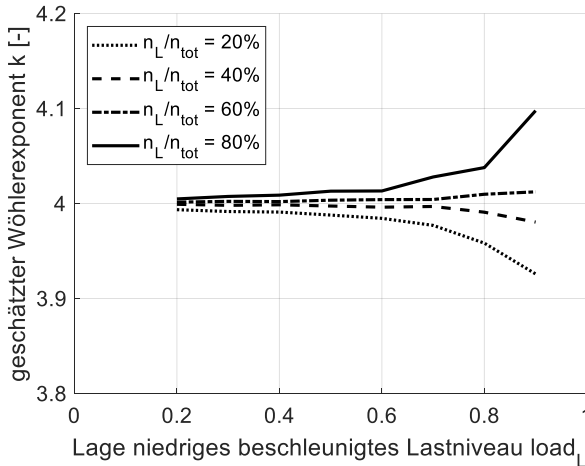


Abbildung 4.22: Genauigkeit der Schätzung des Wöhlerexponenten des Lebensdauermodells in Abhängigkeit der beschleunigten Lastniveaus mit $n_{tot} = 50$

Abbildung 4.22 zeigt ergänzend für verschiedene Gesamtprüflingszahlen den Einfluss der Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus ($load_L = 0,2 - 0,9$) auf den Wählerexponenten. Dabei ist für kleine $load_L$ eine sehr gute Schätzung des Wählerexponenten, unabhängig der Prüflingsverteilung, möglich. Für große $load_L$ divergieren insbesondere die extremen Prüflingsverteilungen, was zu einer Über- bzw. Unterschätzung des Parameters führt. Auch dieses Verhalten lässt sich über den MLE-Bias begründen. Die aus Abbildung 4.21 abgeleitete Notwendigkeit ausgeglichener Prüflingszahlen auf den beschleunigten Lastniveaus bestätigt sich damit. Zusätzlich ist ein großer Interpolationsbereich von Vorteil, welcher durch kleines $load_L$ erreicht werden kann.

4.4 Parameterstudien zum erweiterten Konzept der Probability of Test Success

Die Implementierung des erweiterten Konzepts in Matlab basiert im Wesentlichen auf der vielfachen Erzeugung virtueller Ausfallzeiten für verschiedene Testkonfigurationen und der anschließenden Maximum-Likelihood-Schätzung, um deren Nachweiszeitpunkt zu bestimmen. Im Folgenden werden Ergebnisse verschiedener durchgeführter Parameterstudien vorgestellt, um den Einfluss der wichtigsten Parameter einer Testkonfiguration aufzuzeigen und allgemeine Rückschlüsse auf die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests abzuleiten. Dabei wurde, sofern nicht anders angegeben, im gesamten Teilkapitel jeweils ein Parameter variiert, wobei jeweils übliche Parameterbereiche abgedeckt wurden.

Ausgangspunkt der Parameterstudien ist eine Referenz-Testkonfiguration eines beschleunigten Tests mit zwei beschleunigten Lastniveaus (bEoL), mit der alle Konfigurationen der Parameterstudie verglichen werden. Ergänzende Parameter zur Referenzkonfiguration aus Tabelle 4.2 sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Tabelle 4.3: Referenz-Testkonfiguration für die Parameterstudie

	Name des Parameters	Vari- able	Parameterhöhe Re- ferenzkonfiguration
Parameter der Testkonfi- guration	Anzahl Prüflinge niedriges beschleunigtes Lastniveau	n_L	20
	Anzahl Prüflinge hohes beschleunigtes Lastniveau	n_H	30
	Höhe niedriges beschleunigtes Lastniveau	$load_L$	0,4
	Höhe mittleres beschleunigtes Lastniveau	$load_M$	0,5
	Höhe hohes beschleunigtes Lastniveau	$load_H$	1
	Höhe Feldlastniveau	$load_{nom}$	0,2

4.4.1 Variation des Vorwissens

Das Vorwissen wird in der Zuverlässigkeitstestplanung zu Beginn vorausgesetzt, so dass das Ausfallverhalten (T, b) einer Komponente ausreichend genau beschrieben werden kann. Im erweiterten Konzept sind zusätzlich die Lebensdauermodellparameter (k, N_D) als Vorwissen vorausgesetzt, um eine realitätsnahe Simulation zu gewährleisten. In der Anwendung der Zuverlässigkeitstestplanung muss das Vorwissen vorgegeben werden. Im vorliegenden Unterkapitel wird eine Variation einzelner Parameter des Vorwissens untersucht, um zu verdeutlichen, was die Konsequenzen fehlerhaften Vorwissens sind.

Variation des Weibull-Formparameters

Der Weibullparameter b beschreibt die Form des Ausfallverhaltens der betrachteten Komponente. Durch fehlendes oder unscharfes Vorwissen ist es möglich, dass die aus der Vorgehensweise resultierende effiziente Testkonfiguration nicht robust gegenüber Eingangparameteränderungen ist. Dies wurde als Teil der vorliegenden Parameterstudie untersucht, wobei hier für den üblichen Verschleißausfallbereich der Badewannenkurve ($1,1 < b < 8$) die Auswirkungen auf den Nachweiszeitpunkt im Fokus stehen. In der Anwendung ist der Formparameter b durch das Bauteil bestimmt und kann daher nicht beliebig gewählt werden. Die Parameterstudie zur Variation von b wurde trotzdem durchgeführt, um die hohe Relevanz der Wahl des Vorwissens in der Testplanung zu zeigen und für das Vorwissen Handlungsempfehlungen abzuleiten.

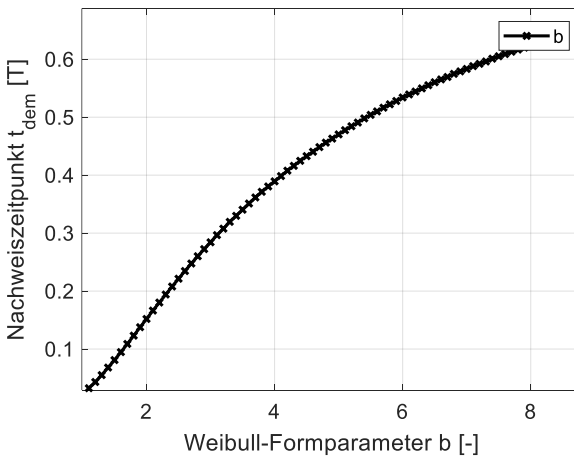


Abbildung 4.23: Allgemeiner Einfluss einer Variation des Weibull-Formparameters b auf den Nachweiszeitpunkt

Abbildung 4.23 zeigt einen ansteigenden konkaven Verlauf, bei dem der Nachweiszeitpunkt über dem Weibull-Formparameter aufgetragen ist. Für Zuverlässigkeitsquantile $R > 36,8\%$ ($F < 63,2\%$) nimmt also der Nachweiszeitpunkt mit steigendem Formparameter zu.

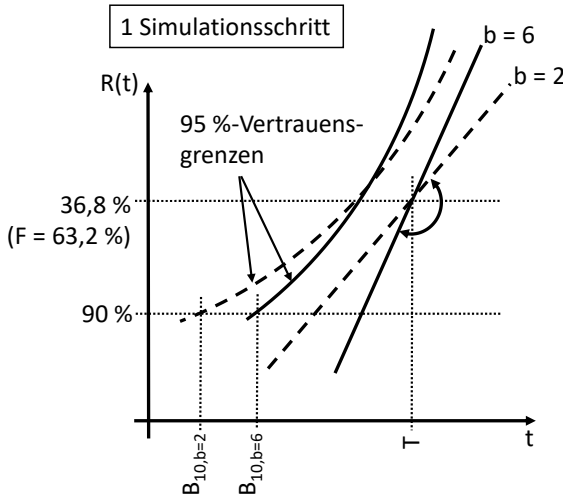


Abbildung 4.24: Visualisierung des Einflusses unterschiedlicher Formparameter auf die nachgewiesene Lebensdauer in der Weibullanalyse

Ursache ist die Aufhängung der Weibullgeraden an der charakteristischen Lebensdauer T , wie in Abbildung 4.24 dargestellt. Der Weibull-Formparameter b entspricht dabei der Steigung der Weibullgeraden. Ein größeres b führt deshalb dazu, dass die Weibullgerade steiler wird bzw. sich gegen den Uhrzeigersinn um die charakteristische Lebensdauer dreht. Damit erhöhen sich der Median der durch die Weibullanalyse ermittelten B_q -Lebensdauer und gleichzeitig die obere und untere Vertrauensgrenze. Dadurch erhöht sich auch der Nachweiszeitpunkt.

Die Variation des Weibull-Formparameters beeinflusst den Nachweiszeitpunkt demnach stark. In der Anwendung des erweiterten Konzepts muss daher bei ungesichertem Vorwissen eine konservative Abschätzung des Formparameters garantiert werden.

Variation des Wähler-Lageparameters N_D

Der Lageparameter des Wählermodells N_D wird auch als Ecklastspielzahl bezeichnet. Eine Variation der Ecklastspielzahl führt zu einer Verschiebung der Wählerlinie (siehe

Abbildung 4.25) entlang der Abszisse. In der vorliegenden Arbeit werden alle Zeiten mit der charakteristischen Lebensdauer normiert, was dazu führt, dass eine Variation der von der charakteristischen Lebensdauer direkt abhängigen Ecklastspielzahl keinen Einfluss auf den Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration hat. Daher findet hier auch keine nähere Betrachtung desselbigen statt.

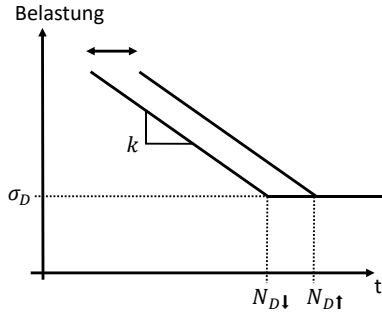


Abbildung 4.25: Visualisierung des Einflusses unterschiedlicher Ecklastschwingspielzahlen auf die Lage der Wöhlerlinie

Variation des Wöhlerexponenten k

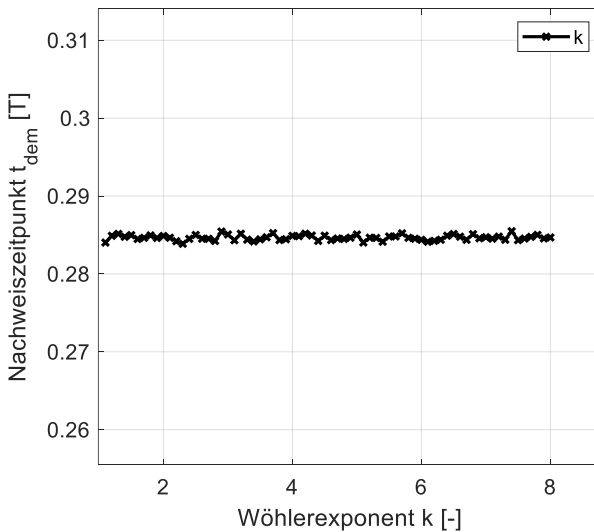


Abbildung 4.26: Allgemeiner Einfluss einer Variation des Wöhlerexponenten k auf den Nachweiszeitpunkt

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen, dass der Wöhlerexponent k den Nachweiszeitpunkt nicht beeinflusst. Diese Ergebnisse werden in Abbildung 4.26 gezeigt, wobei der annähernd gleichbleibende Nachweiszeitpunkt für unterschiedliche k ($1 < k < 8$) dargestellt ist. Die geringen Schwankungen um $k = 0,285$ lassen sich durch nicht vollständig konvergierte Simulationen begründen.

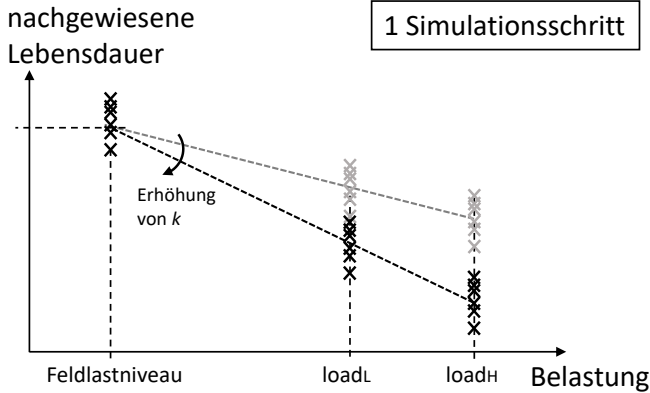


Abbildung 4.27: Visualisierung der Abhängigkeit des Nachweiszeitpunkts von der Wahl des Wöhlerexponenten für einen Simulationsschritt

Mit der schematischen Darstellung in Abbildung 4.27 lässt sich dieser Zusammenhang erklären. Die Generierung virtueller Ausfallzeiten erfordert Vorwissen, bestehend aus dem Ausfallverhalten und aus dem Lebensdauermodell. Für jeden Simulationsschritt werden daraus weibullverteilte Ausfallzeiten auf den beschleunigten Lastniveaus gezogen und daraus das Ausfallverhalten und das Lebensdauermodell geschätzt.

Für die Lage der ermittelten B_q -Lebensdauer spielt die Höhe des Wöhlerexponenten dabei keine Rolle. Anschaulich erklären lässt sich dieser Zusammenhang durch das Eliminieren des Einflusses bei der Generierung der Ausfallzeiten, gefolgt von einer Rückwärtsrechnung bei der Lebensdauermodellparametrisierung. Einen Einfluss auf die Streuung des gefitteten Lebensdauermodells gibt es daher nicht. Für die Zuverlässigkeitstestplanung bedeutet dies, dass die Testkonfiguration, welche den Nachweiszeitpunkt maximiert, unabhängig vom Wöhlerexponenten ist. Scharfes Vorwissen über k muss allerdings vorliegen, wenn Gesamttestdauer und Gesamterprobungskosten genau bestimmt werden sollen.

Zusammenfassung

Neben dem Wöhlerexponenten besitzt auch der weitere Wöhlermodellparameter, die Ecklastschwingspielzahl, keinen Einfluss auf den Nachweiszeitpunkt. Damit sind

beide Parameter N_D und k für das erweiterte Konzept zunächst nicht relevant und müssen zur Maximierung des Nachweiszeitpunkts nicht im Vorwissen mitberücksichtigt werden, d. h. es können in diesem Fall beliebige Werte angenommen werden. In der praktischen Anwendung ist für die Zuverlässigkeitstestplanung also die optimale Testkonfiguration bei gegebenen Randbedingungen nicht vom Lebensdauermodell abhängig, sondern nur vom Ausfallverhalten. Werden neben dem maximalen Nachweiszeitpunkt auch Gesamterprobungskosten und -dauer betrachtet, hat die Wahl dieser Parameter jedoch einen entscheidenden Einfluss, da sowohl Ecklastschwingspielzahl als auch Wöhlerexponent die Testdauer direkt beeinflussen. Dagegen reagiert der Nachweiszeitpunkt sehr sensibel auf eine Änderung des Weibull-Formparameters b . Dieser muss zu Beginn der Testplanung demnach exakt bekannt sein, oder bei Vorliegen von unscharfem Vorwissen konservativ (klein) geschätzt werden.

Die charakteristische Lebensdauer T , als Aufhängung der Weibullgeraden, dient in den vorliegenden Untersuchungen als Normierungsparameter für alle zeitabhängigen Parameter. Der resultierende Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration kann mit der charakteristischen Lebensdauer multipliziert werden, um die tatsächliche nachgewiesene Lebensdauer mit P_{ts} zu bestimmen. Eine Parameterstudie hierzu ist nicht erforderlich.

4.4.2 Variation des erweiterten Zuverlässigkeitsziels

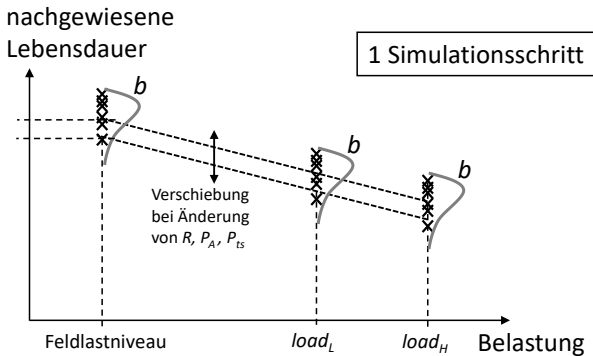


Abbildung 4.28: Verschiebung auf beschleunigten Lastniveaus führt zu Verschiebung auf Feldlastniveau

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der Variation des erweiterten Zuverlässigkeitsziels (R , P_A , P_{ts}) auf den Nachweiszeitpunkt für beschleunigte Tests (bEoL) ge-

zeigt, wobei auf alle drei Bestandteile des Zuverlässigkeitsziels individuell eingegangen wird und das Verhalten des Nachweiszeitpunkts über anwendungstypische Parameterbereiche grafisch dargestellt und begründet wird.

Da sich das erweiterte Zuverlässigkeitsziel unter Annahme des lastunabhängigen Weibull-Formparameters gleichzeitig auf die Weibullanalyse der Ausfälle auf allen beschleunigten Lastniveaus auswirkt, führt eine Veränderung ebendieser Parameter auch zu einer gleichzeitigen Verschiebung der MLE-Schätzung auf allen beschleunigten Lastniveaus. Dies führt damit gleichermaßen zu einer Verschiebung der in jedem Simulationsschritt ermittelten B_q -Lebensdauer auf Feldlastniveau.

Variation der Ziel-Zuverlässigkeit

Mit höherer geforderter Zuverlässigkeit (d. h. bei kleineren Ausfallwahrscheinlichkeitsquantilen) weitet sich der Vertrauensbereich in der Weibullanalyse, welche im MLE auf beiden beschleunigten Lastniveaus in jedem Simulationsschritt durchgeführt wird. Dadurch verschiebt sich die obere Vertrauensgrenze hin zu kleineren Zeiten.

Abbildung 4.29 stellt den Einfluss einer Änderung der nachzuweisenden Zuverlässigkeit auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem} einer Testkonfiguration für $50\% < R < 99\%$ dar. Das in der Simulation zunächst fast linear abnehmende, mit steigender Anforderung stark abnehmende und konkave Verhalten des Nachweiszeitpunkts ist plausibel und korreliert mit den theoretischen Überlegungen aus Abbildung 4.30.

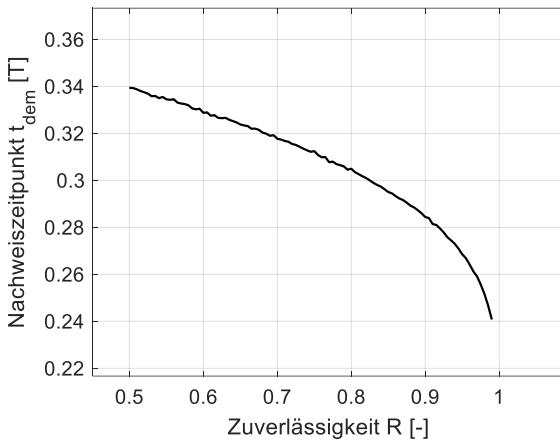


Abbildung 4.29: Einfluss der Zuverlässigkeit R auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem}

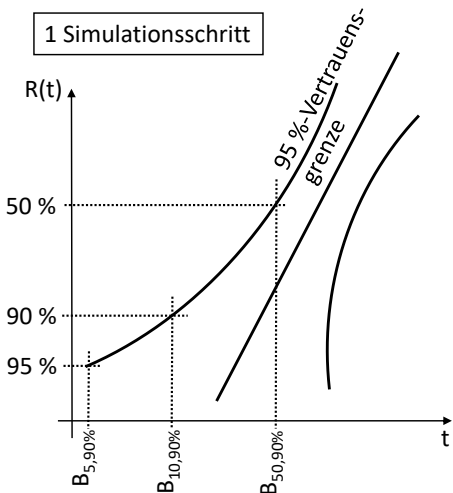


Abbildung 4.30: Visualisierung des Einflusses der nachzuweisenden Zuverlässigkeit R in der Weibullanalyse für einen Simulationsschritt

Abbildung 4.30 zeigt die Bestimmung der oberen Vertrauensgrenze in der Weibullanalyse für einen Simulationsschritt. Für eine vollständige Simulation verhalten sich die Nachweiszeitpunkte für verschiedene nachzuweisende Zuverlässigkeiten entsprechend.

Variation der Ziel-Aussagewahrscheinlichkeit

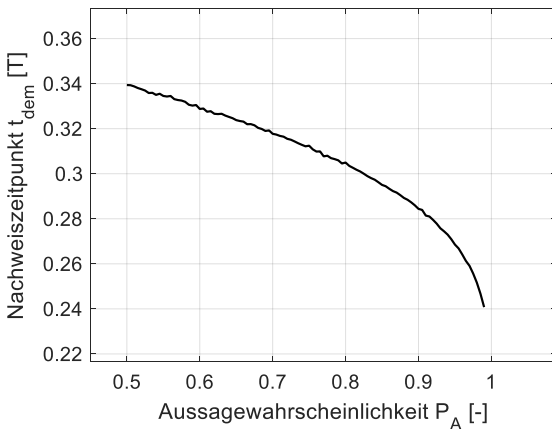


Abbildung 4.31: Einfluss der Aussagewahrscheinlichkeit P_A auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem}

Eine Variation der Aussagewahrscheinlichkeit führt zu einem ähnlichen Verhalten des Nachweiszeitpunkts wie die Variation der nachzuweisenden Zuverlässigkeit.

Der Verlauf, welcher in Abbildung 4.31 für $50\% < P_A < 99\%$ dargestellt ist, zeigt einen konkav-abnehmenden Nachweiszeitpunkt bei größerer Aussagewahrscheinlichkeit.

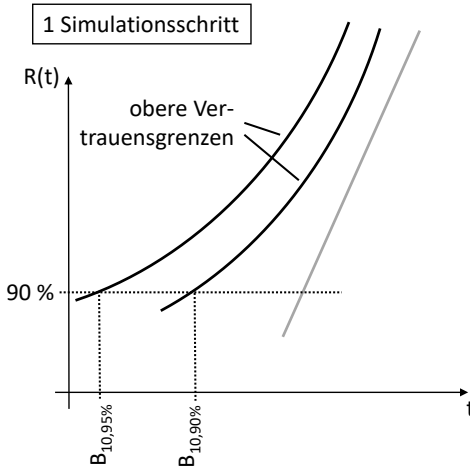


Abbildung 4.32: Visualisierung des Einflusses der Aussagewahrscheinlichkeit P_A in der Weibullanalyse für einen Simulationsschritt

Dieser Verlauf ist plausibel, da mit größerer Aussagewahrscheinlichkeit der Vertrauensbereich in der Weibullanalyse größer wird, was einer Linksverschiebung der oberen Vertrauensgrenze und Rechtsverschiebung der unteren Vertrauensgrenze entspricht. Dies wird in Abbildung 4.32 für einen Simulationsschritt schematisch gezeigt. Durch die Linksverschiebung der oberen Vertrauensgrenze verschiebt sich bei einer vollständigen Simulation auch der Nachweiszeitpunkt hin zu kleineren Zeiten.

Variation der Ziel-Probability of Test Success

Mit höherer geforderter *Probability of Test Success* ($50\% < P_{TS} < 99\%$) sinkt der Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration. Der Verlauf ist für größere P_{TS} konkav abnehmend, siehe Abbildung 4.33.

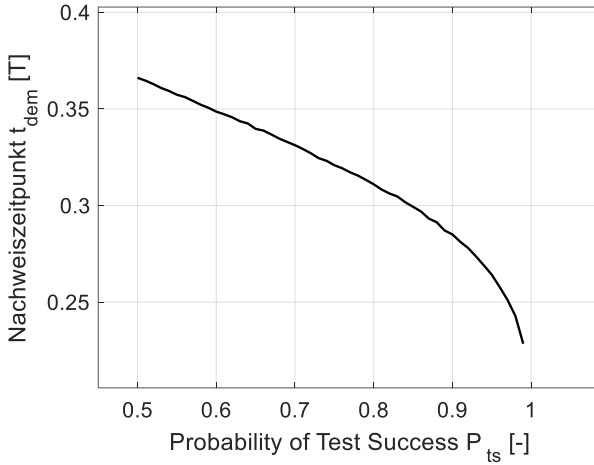


Abbildung 4.33: Einfluss der *Probability of Test Success* P_{ts} auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem}

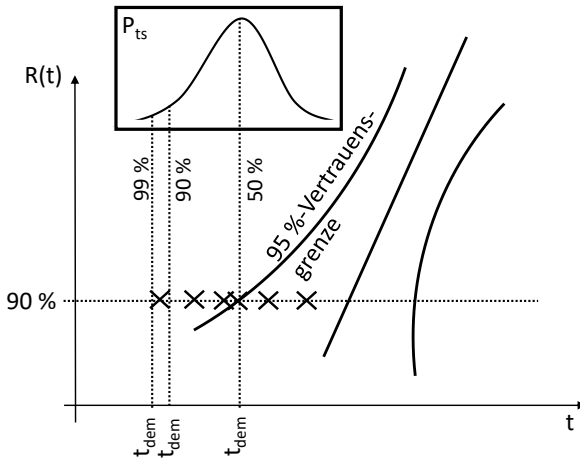


Abbildung 4.34: Visualisierung des Einflusses der *Probability of Test Success* P_{ts} in der Weibullanalyse für eine Simulation mit 6 Simulationsschritten

Eine Erhöhung der geforderten *Probability of Test Success* P_{ts} einer Testkonfiguration entspricht der Vergrößerung des Quantils der Verteilung der oberen Vertrauensgrenzen. Dadurch verschiebt sich der Nachweiszeitpunkt für große *Probability of Test Success* hin zu kleineren Zeiten. Für 6 Simulationsschritte sind die ermittelten oberen Vertrauensgrenzen (als schwarze Kreuze) sowie die sich daraus ergebende Verteilung

der P_{TS} in Abbildung 4.34 schematisch dargestellt. Die mit höherer P_{TS} zunehmende Krümmung des Verlaufs des Nachweiszeitpunkts erklärt sich mit dem Abflachen der Verteilung der oberen Vertrauensgrenzen für hohe P_{TS} .

Zusammenfassung

Eine Variation jedes der drei Parameter des erweiterten Zuverlässigkeitsziels zeigt einen großen Einfluss auf den Nachweiszeitpunkt. Insbesondere für sehr große Quantile ($R, P_A, P_{TS} \rightarrow 1$) verringert sich der Nachweiszeitpunkt stark. Die in der Anwendung relevanten Ziel-Zuverlässigkeiten $R = 50 \%$, $R = 90 \%$ und $R = 95 \%$, kombiniert mit den klassischen Aussagewahrscheinlichkeiten $P_A = 50 \%$, $P_A = 90 \%$ und $P_A = 95 \%$ sollten durch ähnlich große *Probability of Test Success* $P_{TS} = 50 \%$, $P_{TS} = 90 \%$ oder $P_{TS} = 95 \%$ zum erweiterten Zuverlässigkeitsziel ergänzt werden.

4.4.3 Variation einzelner Parameter der Testkonfiguration

In der Anwendung ist in der Anforderungsliste meist das erweiterte Zuverlässigkeitsziel spezifiziert. Klassische Aufgabe der Zuverlässigkeitstestplanung ist in diesem Fall das Finden einer effizienten Testkonfiguration, welche das erweiterte Zuverlässigkeitsziel unter Berücksichtigung aller Randbedingungen nachweist. Um zu zeigen, welcher Testparameter den Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration wie beeinflusst, wird auf alle berücksichtigten Testparameter eingegangen. Schwerpunkt ist dabei jeweils der Einfluss auf den Nachweiszeitpunkt, sofern nicht anders angegeben, da dieser für jede Testkonfiguration objektiv durch Simulation bestimmt werden kann. Gesamtkosten- oder Gesamterprobungsdauer-optimale Testkonfigurationen werden in den nachfolgenden Teilkapiteln betrachtet.

Variation der Stichprobengröße

Abbildung 4.35 zeigt für den beschleunigten End-of-Life-Test (bEoL), dass der Nachweiszeitpunkt durch Variation der Prüflingszahl auf beiden beschleunigten Testlastniveaus beeinflusst werden kann. Grundsätzlich kann mit steigender Anzahl Prüflinge auf beiden beschleunigten Testlastniveaus der Nachweiszeitpunkt t_{dem} erhöht werden. Insbesondere eine Steigerung der Prüflingszahl auf dem niedrigen Lastniveau n_L bei gleichbleibendem n_H ist dabei von Vorteil. Beispielhaft ist dies für eine Testkonfiguration mit $t_{dem} \approx 0,225$ über Pfeile in der Abbildung dargestellt, bei der fünf zusätzliche Prüflinge auf dem hohen beschleunigten Lastniveau zu annähernd keiner Steigerung des Nachweiszeitpunkts führen ($t_{dem} \approx 0,23$). Das Einsetzen zusätzlicher fünf Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau dagegen führt zu einer großen

Steigerung auf $t_{dem} \approx 0,25$, was einer Erhöhung um über 10 % entspricht. Dieser Nachweiszeitpunkt kann auch mit $n_H = 50$ Prüflingen auf dem hohen beschleunigten Lastniveau nicht erreicht werden.

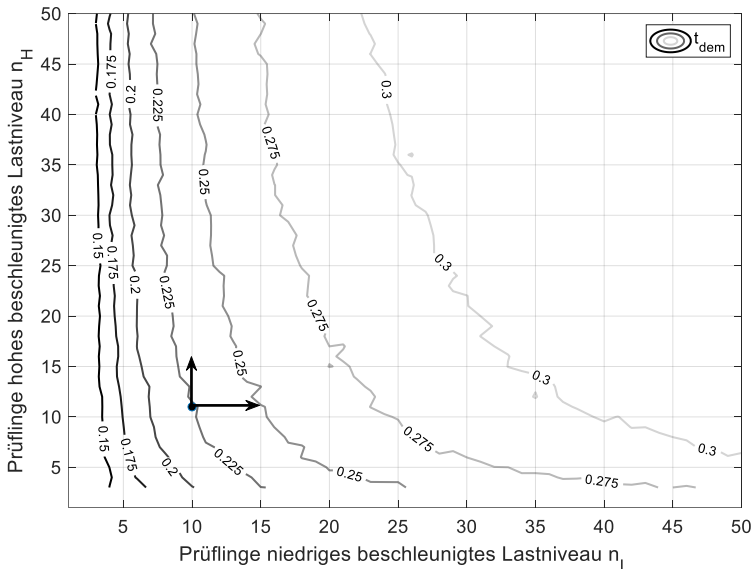


Abbildung 4.35: Einfluss der Anzahl Prüflinge auf niedrigem und hohem beschleunigten Lastniveau auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem}

Aus dieser Betrachtung ergibt sich die Frage, welche Kombination an Prüflingen auf den beschleunigten Testlastniveaus für den Nachweis eines geforderten Zuverlässigkeitsziels optimal hinsichtlich Kosten und Zeit ist und wie die beschleunigten Lastniveaus gelegt werden sollen.

Variation der Lastniveauhöhe

Durch Verschiebung der Höhe der beschleunigten Lastniveaus lässt sich die Breite der Interpolations- und Extrapolationsintervalle (siehe Abbildung 4.5) verändern. Im Folgenden wird das höhere beschleunigte Lastniveau weiterhin auf $load_H = 1$ festgelegt, was der maximalen Belastung entspricht, bei der sich der betrachtete Ausfallmechanismus geradeso noch nicht ändert, siehe Abschnitt 4.2.2. Für das niedrige beschleunigte Lastniveau $load_L$ gilt daher, dass eine Verringerung der Lastniveauhöhe zu einer Verkleinerung des Extrapolationsintervalls führt.

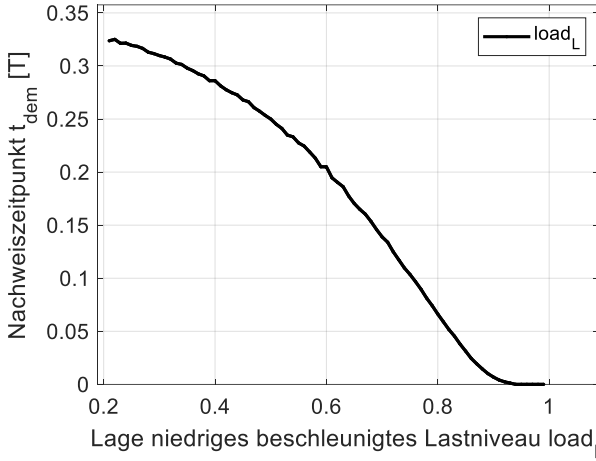


Abbildung 4.36: Einfluss der Höhe des niedrigen beschleunigten Lastniveaus auf den Nachweiszeitpunkt t_{dem}

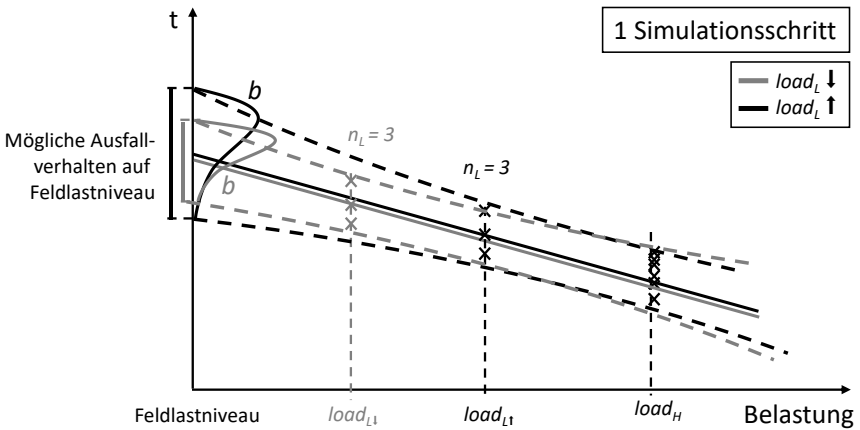


Abbildung 4.37: Schematische Darstellung möglicher Ausfallverhalten auf Feldlastniveau für einen Simulationsschritt in Abhängigkeit der Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus $load_L$

In Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 wird der Einfluss der Verschiebung von $load_L$ auf den Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration gezeigt. Der Verlauf ist dabei konkav abnehmend für $0,2 < load_L < 0,8$. Für sehr hohe $load_L$ nahe $load_H$ strebt der Nachweiszeitpunkt asymptotisch gegen $t_{dem} = 0$. Dieser Verlauf lässt sich damit erklären,

dass ein kleines Interpolationsintervall für festes $load_H = 1$ gleichbedeutend mit einem großen Extrapolationsintervall ist. Das Interpolationsintervall ist hier so klein, dass in der MLE-Schätzung kein sinnvolles Lebensdauermodell mehr geschätzt werden kann. Die aus Tests nahe der Feldbelastung generierten Informationen (d. h. kleines Extrapolationsintervall) sind vertrauenswürdiger, was zu einer geringen Streuung in der Extrapolation führt.

Durch die Variation der Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus lässt sich die Streubreite der MLE-Schätzung auf Feldlastniveau und der Nachweiszeitpunkt demnach stark beeinflussen. Folge eines niedrigen beschleunigten Lastniveaus nahe der Feldbelastung ist jedoch eine Vergrößerung der Ausfallzeiten der Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau und dadurch auch eine Vergrößerung der Gesamterprobungsdauer, was für die Auslegung einer effizienten Testkonfiguration mit limitiertem Kosten- und Zeitbudget in der Anwendung nicht immer realisiert werden kann. Berücksichtigt man die damit einhergehende Gesamterprobungsdauer und Gesamterprobungskosten einer Testkonfiguration, erklärt sich auch hier die Notwendigkeit der Optimalitätsbetrachtung in der Zuverlässigkeitstestplanung.

Variation der Prüflingsverteilung

Stand der Technik der optimalen Verteilung der Prüflinge auf zwei beschleunigten Lastniveaus ist das Grundlagenwerk von Nelson [3], welches insbesondere durch eine einfache Berechnungsvorschrift besticht und eine empfohlene Prüflingsverteilung bei gegebener Stichprobengröße und gegebenen Lastniveauhöhen bestimmt (siehe Abschnitt 2.5.3). Dabei ist in [3] jedoch nicht die Maximierung des Nachweiszeitpunkts zentral, sondern die Minimierung der asymptotischen Varianz, auf die im weiteren Verlauf eingegangen wird.

Abbildung 4.38 zeigt Ergebnisse einer Studie, in der für verschiedene Höhen des niedrigen beschleunigten Lastniveaus die Nachweiszeitpunkte (Ordinate) über der Prüflingsverteilung (Abszisse) aufgetragen wurden. Die Prüflingsverteilung wird dabei als Verhältnis der Prüflinge auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau n_L zur Gesamtstichprobengröße $n_{tot} = n_L + n_H$ angegeben. Ein geringeres Verhältnis n_L/n_{tot} entspricht dem Fall, dass mehr Prüflinge auf dem hohen beschleunigten Lastniveau getestet werden und führt dadurch zwangsweise zu einer kürzeren Erprobungsdauer und geringeren Testkosten. Die Verläufe für die verschiedenen Lastniveaus sind in der Abbildung dargestellt und um das Ergebnis der Berechnungsvorschrift von Nelson ergänzt.

Die Parameterstudie bestätigt dabei die Arbeit von [3], was durch die Lage der berechneten optimalen Prüflingsverteilung im jeweiligen Maximum der gezeigten Verläufe erkennbar ist. Die in den Gleichungen (2.12) - (2.15) beschriebene Berechnungsvorschrift liefert also für alle untersuchten Testkonfigurationen die optimale

Prüflingsverteilung. Diese gilt für die Zuverlässigkeitstestplanung mit dem Ziel der Maximierung des Nachweiszeitpunkts.

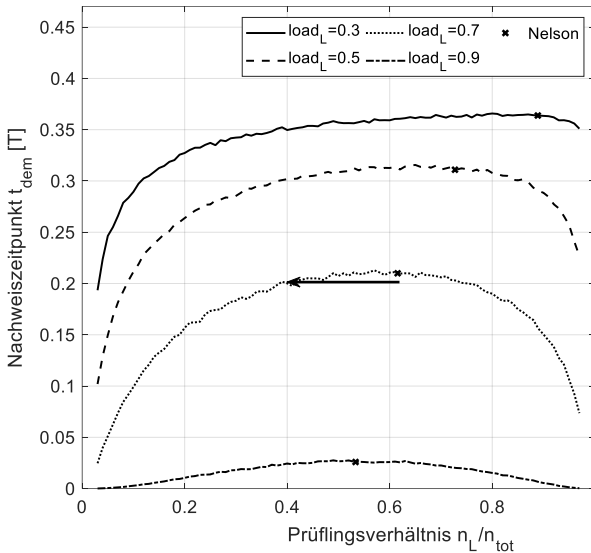


Abbildung 4.38: Einfluss der Prüflingsverteilung auf den Nachweiszeitpunkt

Allerdings ist die Lage der Optima nicht stark ausgeprägt, d. h. der Nachweiszeitpunkt ist robust gegen Änderungen von n_L/n_{tot} . Dadurch ist es möglich, auch für z. T. starke Abweichungen vom Optimum einen annähernd optimalen Nachweiszeitpunkt zu erreichen. Beispielsweise kann, wie in Abbildung 4.38 dargestellt, für $load_L = 0,7$ die Prüflingsverteilung vom Nelson-Optimum $n_L/n_{tot} = 0,615$ auf $n_L/n_{tot} = 0,4$ gesenkt werden. Bei annähernd gleichbleibendem Nachweiszeitpunkt $t_{dem} = 0,2$ kann ca. 21,5 % der Gesamtprüflingszahl auf hohem, anstelle des niedrigen Lastniveaus getestet werden. Dies führt zu stark verringerten Gesamterprobungsdauer und Gesamterprobungskosten des Lebensdauertests.

Diese Beobachtung bedeutet für eine Planung effizienter Zuverlässigkeitstests, dass im Vergleich zu [3] im bEoL deutlich mehr Prüflinge auf dem hohen beschleunigten Lastniveau getestet werden können, ohne den Nachweis stark zu beeinflussen. Dies führt immer zu einer deutlichen Verkürzung der Erprobungsdauer, was sich auf die Gesamterprobungskosten positiv auswirkt.

Der in [3] gezeigte Ansatz zur Bestimmung der optimalen Prüflingsverteilung hat unter Optimalitätsbetrachtungen seine Gültigkeit. Für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests müssen allerdings neben dem Nachweis auch die Gesamterprobungskosten und die Gesamterprobungsdauer berücksichtigt werden, was die randbedingungsabhängig effizienteste Prüflingsverteilung von der optimalen z. T. deutlich abweichen lässt. Das Nelson-Optimum sollte daher nur als Best-Case-Abschätzung verwendet werden. In der Praxis kann hiervon zum Teil, ohne starke Reduzierung des Nachweiszeitpunkts einer Testkonfiguration, stark abgewichen werden.

Variation der Anzahl an Lastniveaus

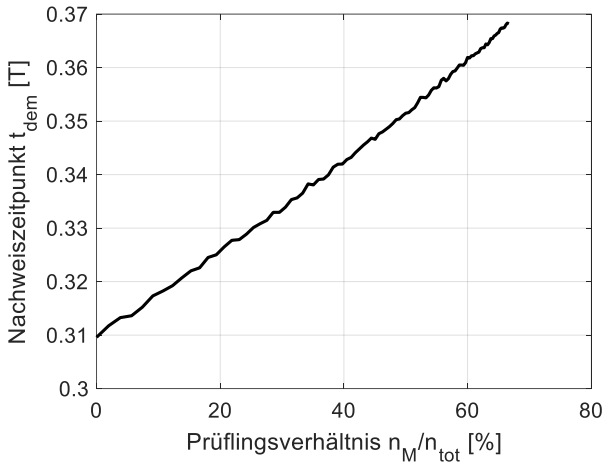


Abbildung 4.39: Einfluss von zusätzlichen Prüflingen auf einem dritten beschleunigten Lastniveau auf den Nachweiszeitpunkt

Ein zusätzliches drittes beschleunigtes Lastniveau wird in der Literatur empfohlen, falls eine gegen Unsicherheiten robuste Testkonfiguration oder eine exakte Parametrisierung des Lebensdauermodells im Fokus der Testplanung liegen, siehe [3], [5] und [13]. Zur Betrachtung des Einflusses eines dritten beschleunigten Lastniveaus (b3EoL) auf die Höhe des Nachweiszeitpunkts werden zunächst die Ergebnisse einer Parameterstudie in Abbildung 4.39 dargestellt, bei der ausgehend von einer bEoL-Referenzkonfiguration der Anteil der Prüflinge auf dem mittleren beschleunigten Lastniveau und der jeweils resultierende Nachweiszeitpunkt dargestellt werden. Der Verlauf ist wie zu erwarten stetig ansteigend, da durch im Test erzeugte Ausfälle der Vertrauensbereich verengt wird, was zu einer Rechtsverschiebung der oberen Vertrauensgrenze und damit zu einem höheren Nachweiszeitpunkt führt.

Grundsätzlich kann der Nachweiszeitpunkt einer bEoL-Testkonfiguration also durch Hinzufügen von Prüflingen auf einem mittleren Lastniveau und damit einhergehender Erhöhung der Gesamtprüflingszahl erhöht werden. Durch den in dieser Arbeit betrachteten Zielkonflikt und der daraus abgeleiteten Erfordernis nach einer effizienten Testkonfiguration muss jedoch neben einem hohen Nachweiszeitpunkt auch das vorhandene Budget für die Erprobungsdauer und die Erprobungskosten berücksichtigt werden. Dieses muss mitberücksichtigt werden, da beispielsweise ein Restbudget im Test einen zusätzlichen Prüfling ermöglichen kann, welcher auf einem mittleren beschleunigten Lastniveau getestet wird. Je nach Höhe der Kosten des zusätzlichen Prüflings und der dazugehörigen Testzeitkosten kann dieses Restbudget unterschiedlich ausgenutzt werden.

Da die Auswertung daher keine eindeutige und verallgemeinerbare Tendenz erkennen lässt, ob das dritte Lastniveau den Nachweiszeitpunkt bei gleichbleibendem Budget erhöht, wurde für eine Vielzahl unterschiedlicher maximaler Erprobungskosten jeweils der optimale bEoL mit dem optimalen b3EoL verglichen. Abbildung 4.40 basiert hierfür auf einer umfangreichen Parameterstudie, bei der Prüflinge auf verschiedenen mittleren beschleunigten Lastniveaus platziert wurden.

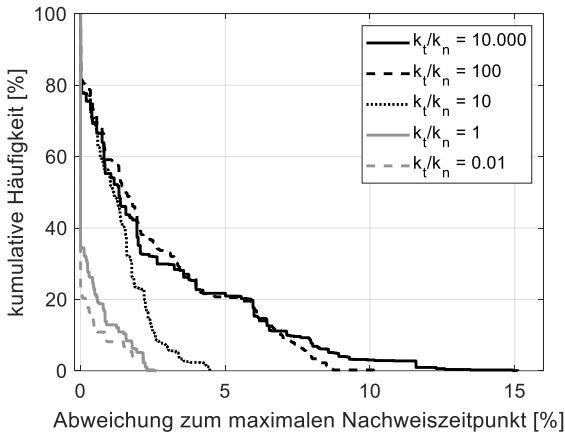


Abbildung 4.40: Kumulative Häufigkeit der Abweichung des bEoL zum optimalen Nachweiszeitpunkt des b3EoL bei jeweils vollständiger Ausnutzung des Budgets für verschiedene Kostenverhältnisse

Die dargestellte Auswertung zeigt, welche Abweichungen sich zum Optimum ergeben, falls nur zwei beschleunigte Lastniveaus (bEoL) berücksichtigt werden. Dies entspricht der kumulativen Häufigkeit der Abweichung des Nachweiszeitpunkts der Testkonfigurationen ohne Prüflinge auf dem mittleren beschleunigten Lastniveau zum Optimum bei festen Budgets für verschiedene ausgewertete Kostenverhältnisse.

Alle fünf dargestellten Verläufe zeigen eine geringe Abweichung des bEoL zum maximal möglichen Nachweiszeitpunkt des b3EoL. So wurde in der Parameterstudie für ein Kostenverhältnis von $k_t/k_n = 1$ für den bEoL nur eine maximal mögliche Abweichung von 2,5 % vom maximalen Nachweiszeitpunkt ermittelt, wobei der b3EoL das tatsächliche Optimum bei ca. 35 % der simulierten Testkonfigurationen darstellt. Für größere Kostenverhältnisse steigt die maximal mögliche Abweichung zum Optimum auf bis zu 15 %, wobei auch hier die kumulative Häufigkeit nur in wenigen Fällen (20 %) größere Abweichungen (>5 %) indiziert. Anschaulich kann für große Kostenverhältnisse, also hohen Testzeitkosten und niedrigen Prüflingskosten, bestehendes Restbudget insbesondere durch viele Prüflinge mit jeweils kurzer Erprobungsdauer ausgenutzt werden. Für kleine Kostenverhältnisse, also hohe Prüflingskosten, kann bestehendes Restbudget nur bei ausreichender Höhe ausgenutzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die gegebenen Randbedingungen und das hier berücksichtigte Kostenmodell ein drittes Lastniveau (b3EoL) bei der effizienten Planung von Zuverlässigkeitstests nicht berücksichtigt werden muss, da in den meisten Fällen nur geringe Abweichungen vom maximalen Nachweiszeitpunkt bestehen. Das gleiche Verhalten wurde für weitere Kostenmodelle und Teststrategien beobachtet, kann durch Simulation auf Grund der Parametervielfalt jedoch nicht allgemein für alle möglichen Testkonfigurationen aus Parameterstudien nachgewiesen werden. Im Falle von Restbudget (Kosten oder Zeit) können zum Teil noch zusätzliche Prüflinge ggfs. auf anderen Lastniveaus getestet werden. Dies ist in der Anwendung individuell und daher simulativ nicht zu verallgemeinern. Für große Kostenverhältnisse ist dieser Effekt häufiger zu beobachten. Die Tendenz der Ergebnisse weist jedoch eindeutig auf einen nahezu optimalen Nachweiszeitpunkt des beschleunigten End-of-Life-Tests (bEoL) hin, weshalb eine ausschließliche Berücksichtigung des bEoL zum Finden eines effizienten Tests als ausreichend betrachtet wird. Die Ergebnisse lassen sich folglich über die Betrachtungen zum mittleren beschleunigten Lastniveau auch auf die Einführung weiterer zusätzlicher Lastniveaus übertragen (bXEoL).

Variation des Zensierungsanteils

In der Praxis liegen bei der Lebensdaueranalyse einer Komponente oft zensierte Ausfalldaten vor. Diese enthalten trotz fehlendem Ausfall wertvolle Informationen über die Mindestlebensdauer der jeweiligen Komponente. Inwiefern Zensierung in der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests berücksichtigt werden muss, wird im Folgenden untersucht. Die Parameterstudie und die Ergebnisdarstellung orientieren sich dabei am vorherigen Abschnitt über das mittlere beschleunigte Lastniveau.

Grundsätzlich kann der Nachweiszeitpunkt einer bEoL-Testkonfiguration durch Hinzufügen von zensierten Prüflingen auf dem niedrigen Lastniveau gesteigert werden. Entsprechend der Berücksichtigung zusätzlicher beschleunigter Lastniveaus kann durch zensierte Ausfallzeiten die Erprobungsdauer verringert werden, was dazu führt, dass bei gleichem Kostenbudget die Stichprobengröße erhöht werden kann. Ob bei gleichbleibendem Budget der Nachweiszeitpunkt einer Komponente durch Erprobung von Prüflingen mit Zensierung erhöht werden kann, zeigt die Auswertung, welche in Abbildung 4.41 grafisch dargestellt ist. Dabei ist das Lastniveau der zensierten Prüflinge immer gleich dem niedrigen beschleunigten Lastniveau. Diese Annahme basiert darauf, dass die Grundmotivation der Zensierung in der Verkürzung der Erprobungsdauer eines Tests liegt. Da die Erprobungsdauer insbesondere bei niedrigen Belastungen hoch ist, ist der potentielle Nutzen einer Zensierung besonders auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau sehr groß.

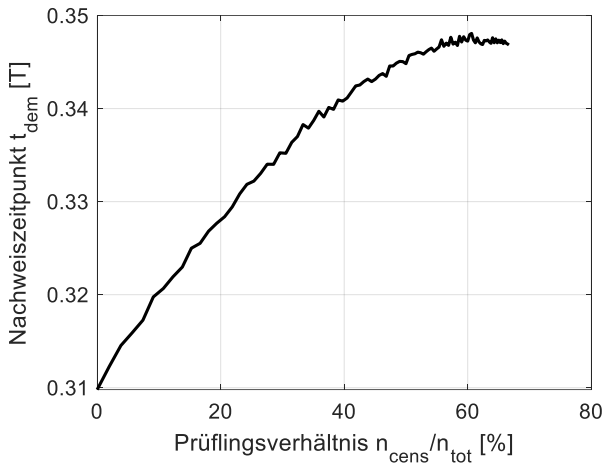


Abbildung 4.41: Ausgewählte Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss zensierter Ausfallzeiten bei vollständiger Ausnutzung des Budgets

Entsprechend der vorangehenden Untersuchung zum b3EoL wurden auch hier zahlreiche Kombinationen an Prüflingszahlen auf den beschleunigten Lastniveaus simuliert, um den Einfluss zensierter Prüflinge auf die Höhe des Nachweiszeitpunkts zu untersuchen. Ausgehend von einer bEoL-Referenzkonfiguration wird in Abbildung 4.41 der Anteil der zensierten Prüflinge und der jeweils resultierende Nachweiszeitpunkt dargestellt. Der Verlauf ist wie zu erwarten stetig ansteigend und nähert sich einem Maximum bei ca. 60 % Anteil zensierter Prüflinge an, da durch im Test erzeugte Ausfälle der Vertrauensbereich verengt wird, was zu einer Rechtsverschiebung

der oberen Vertrauensgrenze und damit zu einem höheren Nachweiszeitpunkt führt. Diese Verengung wird umso kleiner, je höher die Prüflingszahl bereits ist.

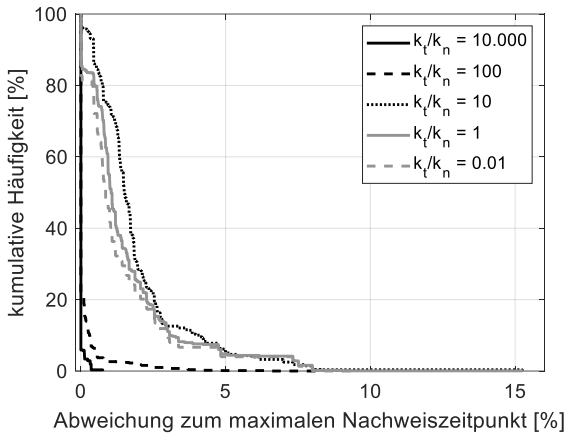


Abbildung 4.42: Kumulative Häufigkeit der Abweichung des bEoL zum optimalen Nachweiszeitpunkt des bzEoL bei jeweils vollständiger Ausnutzung des Budgets für verschiedene Kostenverhältnisse

Grundsätzlich kann der Nachweiszeitpunkt einer bEoL-Testkonfiguration demnach durch Hinzufügen von zensierten Prüflingen auf dem niedrigen Lastniveau erhöht werden. Es muss jedoch wieder neben einem hohen Nachweiszeitpunkt auch das vorhandene Budget für die Erprobungsdauer und die Erprobungskosten berücksichtigt werden. Da die Untersuchungen, ähnlich wie beim b3EoL, keine eindeutige und verallgemeinerbare Tendenz erkennen ließen, wurde jeweils der optimale bEoL mit dem optimalen bzEoL verglichen. Abbildung 4.42 basiert hierfür auf einer umfangreichen Parameterstudie mit zensierten Prüflingen. Die dargestellte Auswertung zeigt, welche Abweichungen sich zum Optimum ergeben, falls in der Planung keine Zensierung berücksichtigt wird (bEoL). Dargestellt ist die kumulative Häufigkeit der Abweichung des Nachweiszeitpunkts der Testkonfigurationen ohne Zensierung zum Optimum bei festem Budgets für verschiedene ausgewertete Kostenverhältnisse. Alle dargestellten Verläufe zeigen eine geringe oder keine Abweichung des bEoL zum maximal möglichen Nachweiszeitpunkt. So wurde in der Parameterstudie für ein Kostenverhältnis von $k_t/k_n = 1$ für den bEoL nur eine maximal mögliche Abweichung von 8 % vom maximalen Nachweiszeitpunkt ermittelt und auch für andere Kostenverhältnisse keine größeren Abweichungen. Insgesamt liegt der bEoL für alle Kostenverhältnisse immer sehr nahe am tatsächlichen Optimum aller simulierten Testkonfigurationen. Die kumulative Häufigkeit zeigt nur in wenigen Fällen (5 %) größere Abweichungen (>5 %), für große Kostenverhältnisse ($k_t/k_n > 100$) ist der bEoL ohne zensierte Prüflinge fast

immer optimal. Das in Abbildung 4.42 dargestellte Verhalten in Abhängigkeit zum Kostenverhältnis ist gegensätzlich zu dem des b3EoL in Abbildung 4.40, da ein größeres Kostenverhältnis zu einer geringeren Abweichung vom bzEoL-Optimum führt. Zusätzliche Prüflinge werden im bzEoL bei verfügbarem Restbudget nur auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau hinzugefügt und führen damit insbesondere bei einem hohen Kostenverhältnis zu einer hohen Erprobungsdauer. Damit kann Restbudget für diese Fälle nur bei ausreichender Höhe ausgenutzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die gegebenen Randbedingungen und das hier berücksichtigte Kostenmodell zensierte Testkonfigurationen (bzEoL) bei der effizienten Planung von Zuverlässigkeitstests nicht berücksichtigt werden müssen, da in den meisten Fällen nur geringe Abweichungen vom maximalen Nachweiszeitpunkt bestehen. Für weitere Kostenmodelle und Teststrategien wurde das gleiche Verhalten beobachtet. Auf Grund der Parametervielfalt können die Ergebnisse jedoch nicht allgemein für alle möglichen Testkonfigurationen nachgewiesen werden. Beim bEoL nicht verbrauchtes Restbudget (Kosten oder Zeit) kann zum Teil durch zusätzliche zensierte Prüflinge ausgeschöpft werden. Dies ist in der Anwendung individuell und daher simulativ nicht zu verallgemeinern. Für kleine Kostenverhältnisse ist dieser Effekt häufiger zu beobachten. Die Tendenz der Ergebnisse weist jedoch eindeutig auf einen nahezu optimalen Nachweiszeitpunkt des beschleunigten End-of-Life-Tests (bEoL) hin, weshalb eine ausschließliche Berücksichtigung des bEoL zum Finden eines effizienten Tests als ausreichend betrachtet wird.

4.5 Ansätze zur Reduktion der Simulationsdauer

Die Eignung des vorgestellten Konzepts wurde für Parameterstudien vorgestellt. Diese erfordern eine hohe Ergebnisgüte und damit rechenzeitintensive Simulationen, insbesondere bei hohen Wahrscheinlichkeitsquantilen des erweiterten Zuverlässigkeitsziels. In der praktischen Anwendung steht dagegen die schnelle Ermittlung von optimalen Testkonfigurationen im Vordergrund. Im folgenden Teilkapitel wird hierfür zum einen ein Konvergenzkriterium eingeführt, welches die Simulationsdauer durch Begrenzung der Monte-Carlo-Iterationen verkürzt. Zum anderen wird ein neuronales Netz ausgelegt, welches die aufwendigen Simulationen durch Verwendung eines Metamodells vollständig ersetzen kann.

4.5.1 Reduktion der Simulationsdauer durch ein Konvergenzkriterium

Voruntersuchungen und die Durchführung der Parameterstudie aus Teilkapitel 4.4 haben gezeigt, dass die Simulationszeit insbesondere bei hohem geforderten erweiterten Zuverlässigkeitsziel ($R, P_A, P_{ts} > 90\%$) sehr groß wird. Dies liegt an der für die Konvergenz des Nachweiszeitpunkts erforderlichen Anzahl an Monte-Carlo-Simulationsschritten. In jedem Simulationsschritt werden mit Hilfe des Maximum-Likelihood-Schätzers virtuelle Ausfallzeiten analysiert und die aus den Ausfalldaten ableitbare Lebensdauer auf Feldniveau bestimmt. Dies ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Alle diese Lebensdauern werden je nach gefordertem P_{ts} -Quantil ausgewertet, um den eindeutigen Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration zu bestimmen. Insbesondere die vielfache Maximum-Likelihood-Schätzung führt in diesem Vorgehen zu einer hohen Simulationsdauer, da die Log-Likelihood-Funktion jeweils global maximiert werden muss. Müssen, so wie im Falle einer Parameterstudie oder beim Finden der effizientesten Testkonfiguration, sehr viele Konfigurationen simuliert werden, sind auf Grund der Vielzahl an Simulationsparametern zur Erzeugung verlässlicher und reproduzierbarer Ergebnisse z. T. mehrere tausend Simulationen erforderlich. Hieraus ergibt sich der Bedarf eines Konvergenzkriteriums, welches bei ausreichender Konvergenz des Nachweiszeitpunkts die Monte-Carlo-Simulation abbricht. Für eine ausreichend hohe Ergebnisqualität wird ein einfaches Kriterium vorgeschlagen, welches

- eine prozentuale Abweichung Δ_{MCS} über eine Mindestanzahl an Iterationen l_{MCS} nicht überschreitet,
- abhängig von den Wahrscheinlichkeitsquantilen (R, P_A, P_{ts}) des erweiterten Zuverlässigkeitsziels ist und
- eine Mindestanzahl an Iterationen $i_{MCS,min}$ berücksichtigt.

Daraus ergibt sich folgendes Konvergenzkriterium:

- $\Delta_{MCS} = 1\%$
- $l_{MCS} = 100$
- $i_{MCS,min} = \begin{cases} 200, & \max(R, P_A, P_{ts}) \leq 90\% \\ 500, & \max(R, P_A, P_{ts}) > 90\% \end{cases}$

Beispielhaft werden der Verlauf des Nachweiszeitpunkts (breite Volllinie) mit steigender Anzahl an Iterationen und das implementierte Konvergenzkriterium in Abbildung 4.43 dargestellt. Dieses berücksichtigt die prozentuale untere und obere Abweichung Δ_{MCS} (schmale Volllinie) und die dauerhafte Einhaltung dieser prozentualen Abweichung über eine Mindestanzahl an Iterationen l_{MCS} (Strichlinie).

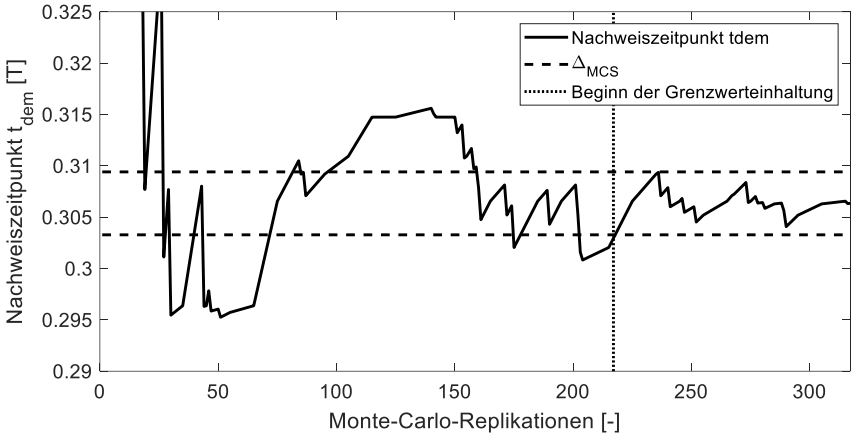


Abbildung 4.43: Exemplarisches Konvergenzverhalten und Konvergenzkriterium einer Testkonfiguration

4.5.2 Reduktion der Simulationsdauer durch Implementierung eines neuronalen Netzes

Eine Möglichkeit zur Reduktion der auch mit Konvergenzkriterium hohen Simulationszeit ist die Verkürzung des aufwendigsten Simulationsschritts, der Maximum-Likelihood-Schätzung. Dies wurde iterativ umgesetzt.

In [65] wurde auf Basis des simulierten Parameterraums ein Regressionspolynom zur Beschreibung der *Probability of Test Success* parametrisiert. Dieses ermöglicht eine Abschätzung der P_{ts} einer Testkonfiguration (unbeschleunigter End-of-Life-Test) für ausgewählte Sicherheitsabstände. Die Berücksichtigung der P_{ts} als planbare Konstante und die Eliminierung des Sicherheitsabstands aus dem Konzept der P_{ts} ermöglicht zum einen das Zusammenfassen aller Parameter in einem gemeinsamen Modell und zum anderen das Aufstellen des Modells zur direkten Abschätzung des Nachweiszeitpunkts auch für beschleunigte Lebensdauertests. Als Alternative zu einem Polynom zweiten Grades wird in der vorliegenden Arbeit das neuronale Netz vorgestellt.

Das Ziel der Anwendung neuronaler Netze ist die Bildung eines echtzeitfähigen mathematischen Ersatz- bzw. Meta-Modells für ein Simulationsmodell. Dieses soll für gleiche Eingangsparameter dieselben Ausgangsgrößen liefern. Die Berechnung soll dabei schneller ablaufen als per Simulation. Hierfür müssen laut [67] Stützstellen des Simulationsmodells berechnet werden. Diese wurden in der vorliegenden Arbeit über das Latin Hypercube Sampling (LHS) bestimmt, es eignen sich jedoch auch Methoden der statistischen Versuchsplanung wie beispielsweise das Factorial Design und das

Central Composite Design. Diese Stützstellen werden über das erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* unter Berücksichtigung des eingeführten Konvergenzkriteriums simuliert. Anhand dieser Simulationsergebnisse wird anschließend ein neuronales Netz trainiert und validiert, welches nachfolgend als Meta-Modell verwendet werden kann, um die Ergebnisgrößen auch für nicht-simulierte Eingangskombinationen schnell zu berechnen. Die Güte des Meta-Modells ist abhängig von seiner Abweichung zum Originalmodell [67].

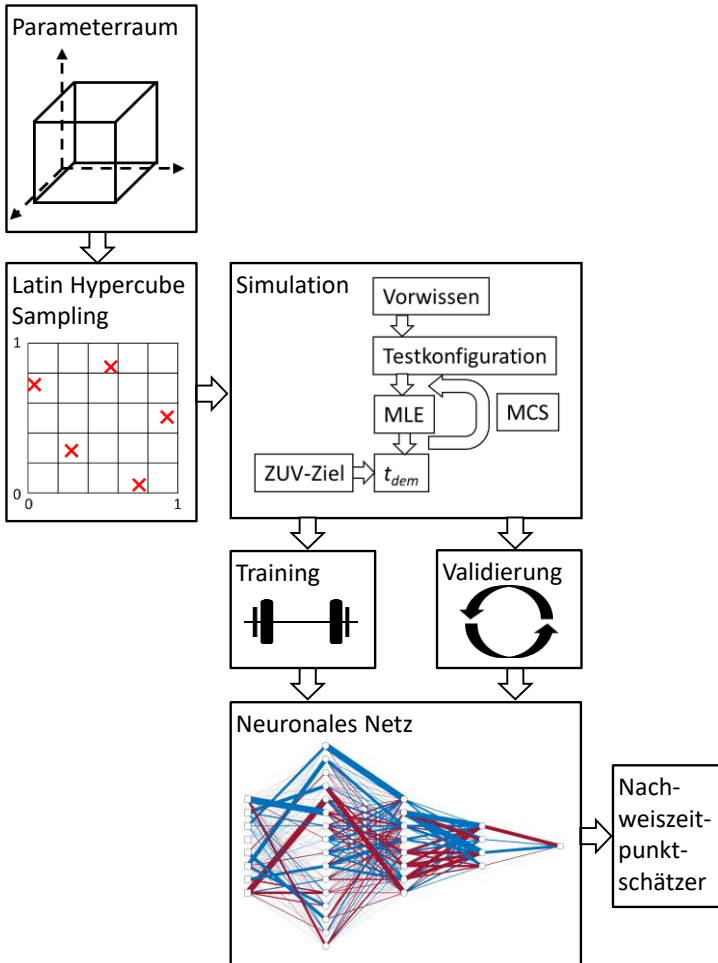


Abbildung 4.44: Vorgehensweise zur Erstellung eines Nachweiszeitpunktschätzers zur Reduktion der Simulationsdauer

Das implementierte Vorgehen ist in Abbildung 4.44 dargestellt. Dabei wird das Meta-Modell in einen Nachweiszeitpunktschätzer implementiert. Damit ist es möglich, den Nachweiszeitpunkt einer Testkonfiguration des Parameterraums mit ausreichender Genauigkeit in kurzer Berechnungszeit abzuschätzen.

Abdeckung des Parameterraums durch Latin Hypercube Sampling

Zur effizienten Abdeckung des gesamten Parameterraums wurden die zur Parametrisierung des neuronalen Netzes simulierten Testkonfigurationen über das Latin Hypercube Sampling (LHS) gewählt, welches auch von [65] zur effizienten Abdeckung des Parameterraums in die Simulationen verwendet wurde. Den Parameterraum spannen die acht in Tabelle 4.4 aufgelisteten Parameter und die jeweiligen oberen und unteren Grenzen auf. Diese umfassen die in der Zuverlässigkeitstestplanung üblichen Wertebereiche.

Tabelle 4.4: Parameterraum zur Erstellung des Metamodells

Parameter	min	max
R	50 %	99 %
P_A	50 %	99 %
P_{ts}	50 %	99 %
n_L	3	50
n_H	3	50
$load_L$	0,21	0,99
b	1,1	8
k	1,1	8

Dieser Parameterraum wurde anschließend über das LHS gleichmäßig abgedeckt. Die Idee ist es, die Anzahl an zu simulierenden Parameterkombinationen (Versuche zur vollständigen Abdeckung des Versuchsplans) zu reduzieren. Trotz Reduktion der Simulationsanzahl lässt sich über das LHS durch die gleichmäßige Abdeckung des Parameterraums ein qualitativ besseres neuronales Netz erstellen, als beispielsweise bei Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans. Zu wählen ist die Anzahl an Stufen für das LHS, wobei hier drei Stufen gewählt wurden, um die Gesamtanzahl an Simulationen zu begrenzen. Diese Simulationen erzeugen den Datensatz, mit welchem ein neuronales Netz trainiert und validiert wurde. Damit werden im weiteren Vorgehen die aufwendigen Simulationen reduziert, welche zum Finden der effizientesten Testkonfiguration erforderlich sind.

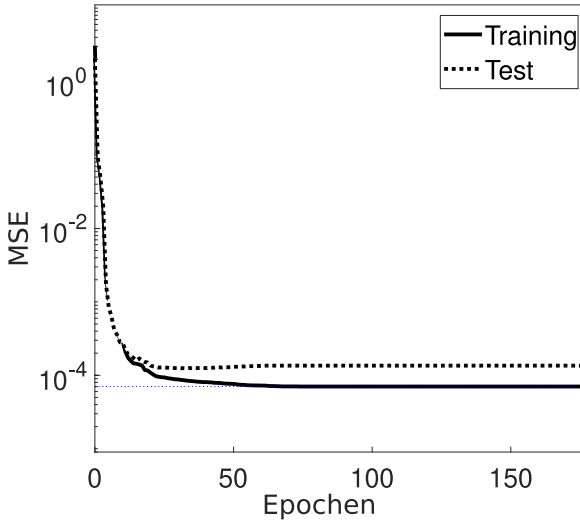
Auslegung eines neuronalen Netzes zur Abschätzung des Nachweiszeitpunkts

Abbildung 4.45: Entwicklung der Trainings- und Testperformance

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein neuronales Netz mit Bayesian Regularization (BR) als Lernfunktion und der klassischen ReLU-Aktivierungsfunktion mit zwei Schichten (40, 16 Neuronen) sehr gute Trainingsergebnisse liefert. Dabei erfordert die BR eine Aufteilung der Trainings- und Validierungsdaten ohne Testdatensatz. Das neuronale Netz wurde dabei mehrfach trainiert, um sicherzustellen, dass die Auswahl des Trainingsdatensatzes keine entscheidende Auswirkung auf die Güte des Netzes besitzt (Reproduzierbarkeit). Die trotz Konvergenzkriterium noch vorhandene Streuung der simulierten Nachweiszeitpunkte kann dabei als Rauschen angesehen werden, sofern, wie in diesem Fall, der Mittelwert keine systematische Abweichung aufweist. Dies führt dazu, dass *Overfitting*, also die Überanpassung des neuronalen Netzes, vermieden werden kann. Grund ist, dass die vorhandene Streuung eine Zufallsgröße darstellt. Ausgewählte Ergebnisse des Trainingsprozesses der gewählten Netzkonfiguration sind in Abbildung 4.45 bis Abbildung 4.47 dargestellt.

Abbildung 4.45 zeigt den Verlauf des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers *MSE* des Trainings- und Testdatensatzes als Performanceindikator über dem Trainingsfortschritt, welcher über den Epochen (vollständige Durchläufe durch die Trainingsdaten) dargestellt ist. Dieser zeigt bis zum Abbruch des Trainingsvorgangs ein annähernd monoton abnehmendes und glattes Verhalten und nimmt einen sehr geringen Wert ($MSE = 0,8 \cdot 10^{-4}$) an. Das leicht ansteigende Verhalten des Testdatensatzes

im Vergleich zum Trainingsdatensatz zwischen 40 und 60 Epochen unterstützt die Annahme, dass kein *Overfitting* vorliegt und das Neuronale Netz somit die Eingangsgrößen nicht direkt auf den Ausgang abbildet. Nach ca. 180 Epochen wurde das Training beendet, da hier der BR-Algorithmus erkannte, dass weiteres Training keine Verbesserung bringt. Ein Vergleich zu den Regressionsgleichungen von [65] ($RSME = 5,2\% - 7,5\%$) lässt sich aufgrund des unterschiedlichen Ansatzes zur Quantifizierung des Fehlers der Schätzung nicht direkt ziehen, bestätigt aber qualitativ den Vorteil des neuronalen Netzes, obwohl die Komplexität des Modells weit höher ist als in [65].

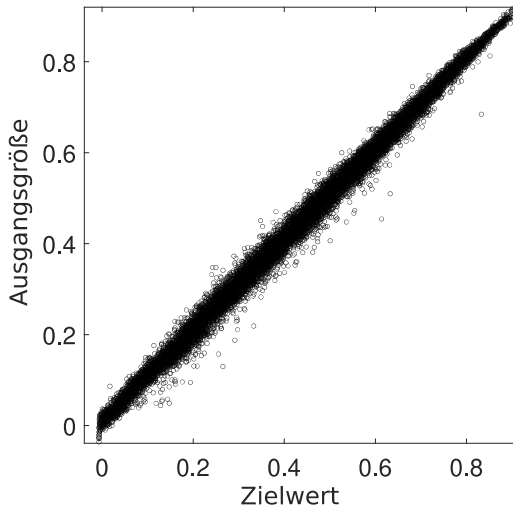


Abbildung 4.46: Korrelation von Netzoutput und Zielwerten

Abbildung 4.46 zeigt die Korrelation der Ausgabe- und Zielwerte. Dabei wird dargestellt, wie gut die Ausgangsgröße des neuronalen Netzes die Zielwerte abbildet. Für absolute Übereinstimmung liegen alle Daten dabei auf der ersten Winkelhalbierenden im Schaubild. $R^2 = 1$ beschreibt also die vollkommene Proportionalität. $R^2 = 0,99886^2 = 0,99772$ liegt damit nahe bei 1, was im Vergleich zu den Regressionsgleichungen von [65] ($R^2 = 0,87 - 0,96$) eine deutlich verbesserte Modellgüte bei höherer Komplexität des Modells und größerer Anzahl berücksichtigter Eingangsparameter darstellt.

Abbildung 4.47 stellt die auftretende Häufigkeit bestimmter Abweichungsklassen des relativen Fehlers von Ausgabe- und Zielwerten dar. Ein gut geeignetes Modell zeigt dabei eine geringe und normalverteilte Abweichung. Dies ist hier der Fall, eine systematische Abweichung liegt nicht vor.

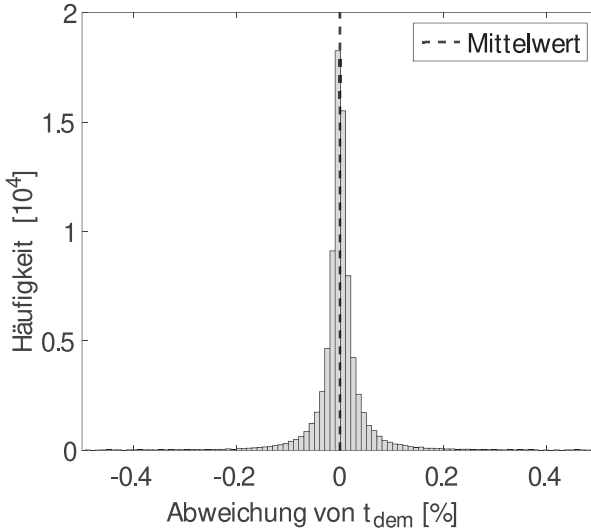


Abbildung 4.47: Abweichung von Netzoutput und Zielwerten (ohne Ausreißer)

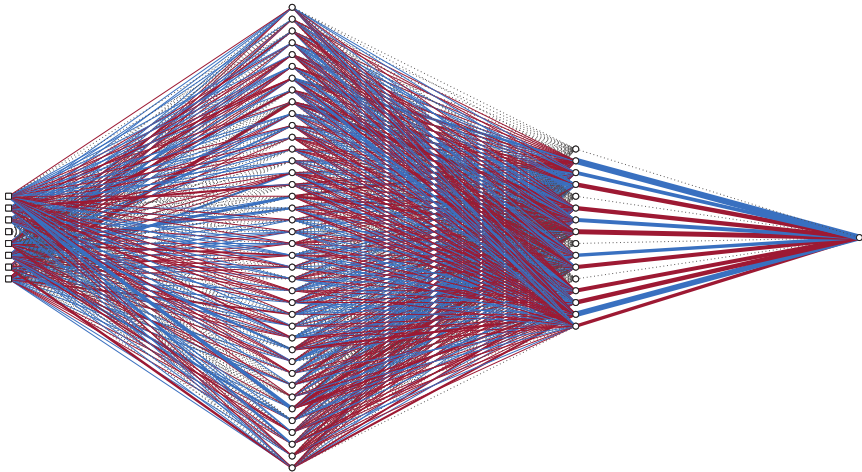


Abbildung 4.48: Visualisierung der Kantengewichte (blau: positiv, rot: negativ)

Das gesamte neuronale Netz inklusive der Kantengewichte ist in Abbildung 4.48 visualisiert. Dabei wird die relative Höhe der Gewichte über die Dicke der Verbindungen dargestellt, wobei blaue Verbindungen einem positiven Kantengewicht, rote einem

negativen entsprechen. Der Bias ist nicht dargestellt. Zu erkennen ist, dass das fünfte Eingangneuron eine verschwindend kleine Dicke der Verbindung zum ersten Layer besitzt, was einem Kantengewicht $\rightarrow 0$ entspricht. Dies passt zu Abbildung 4.26, welche zeigt, dass die Wahl des Wählerexponenten keinen Einfluss auf den Nachweiszeitpunkt besitzt und ist daher plausibel. In der zweiten Neuronenschicht lassen sich vier Neuronen identifizieren, welche nur geringe Kantengewichte aufweisen. Das Weglassen dieser Neuronen führte in weiteren Untersuchungen jedoch nicht zu einer Verbesserung der Güte des neuronalen Netzes.

Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit wurde das vorgestellte Netz mit einem randomisierten Datensatz mehrfach trainiert. Es zeigt für alle Trainingsdurchläufe konsistent sehr gute Ergebnisse.

Erstellung und Plausibilisierung des Nachweiszeitpunktschätzers

Das neuronale Netz kann anschließend als Meta-Modell in eine Matlab-Funktion integriert werden, um den Nachweiszeitpunkt auch für nicht-simulierte Testkonfigurationen aus dem Parameterbereich zu berechnen. Dies ist für jede Teststrategie möglich.

Eine Plausibilisierung des Nachweiszeitpunktschätzers kann über die Performanceindikatoren und über die dargestellten Abbildungen des neuronalen Netzes durchgeführt werden. Die Güte dieses Meta-Modells wird für die Variation der Eingangsgrößen in Abbildung 4.49 dargestellt. Dies ist dabei der Vollständigkeit halber für alle Eingangsparameter visualisiert. Ausgehend von der Referenzkonfiguration wird jeweils ein Parameter variiert und die durch Simulation ermittelten Werte den Ergebnissen des im Nachweiszeitpunktschätzer implementierten neuronalen Netz gegenübergestellt. Für alle Eingangsparameter zeigt der Nachweiszeitpunktschätzer dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den simulierten Werten. Wechselwirkungen können mit Hilfe dieser Abbildungen nicht dargestellt und validiert werden. Da sowohl Trainingsdatensatz, als auch Testdatensatz gleichmäßig aus dem Parameterraum gezogen wurden und die Performanceindikatoren sehr gute Ergebnisse anzeigen, kann der erstellte Nachweiszeitpunktschätzer als plausibel betrachtet werden.

Die Modellgüte des neuronalen Netzes kann auch anhand der Vergleichswerte aus Dazer [65] als sehr gut bewertet werden. Beide betrachteten Performanceindizes weisen eine weit höhere Abbildungsgenauigkeit des neuronalen Netzes gegenüber dem Regressionsmodell nach Dazer auf. Dabei wird im Vergleich zusätzlich durch Berücksichtigung der Prüflingszahlen und Lastniveauhöhen die Parametervielfalt weiter vergrößert und im Vergleich zu Dazer auch nur ein Gesamtmodell für alle Parameter gebildet. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene neuronale Netz eignet sich also für den Anwendungsfall besser als die bestehende Alternative und schätzt den Nachweiszeitpunkt für alle Eingangsparameter mit deutlich höherer Genauigkeit.

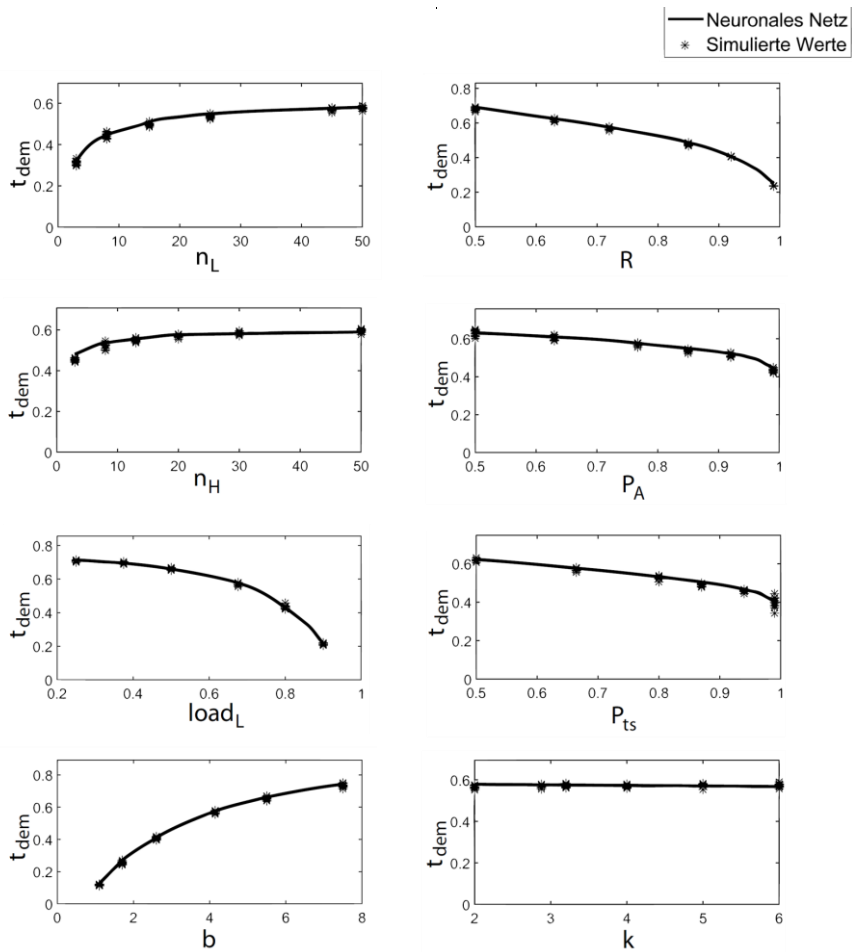


Abbildung 4.49: Vergleich simulierter Werte mit den Ergebnissen des Nachweiszeitpunkt-schätzers

4.6 Handlungsempfehlungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Richtlinien für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests ableiten. Diese gelten für die Zuverlässigkeitstestplanung mit dem Ziel, den Nachweiszeitpunkt der Tests zu erhöhen.

- Vorwissen: Der Nachweiszeitpunkt reagiert sehr sensibel auf die Wahl des Weibull-Formparameters des Vorwissens. Bei Unsicherheit muss dieser konservativ und damit klein gewählt werden.
- Erweitertes Zuverlässigkeitsziel: Der Nachweiszeitpunkt ist sehr stark von der Wahl der drei Wahrscheinlichkeiten des erweiterten Zuverlässigkeitsziels abhängig. Diese sollten daher zu Beginn gewählt werden, bei Nichterfüllung des Nachweises aber nicht angepasst werden.
- Stichprobengröße: Allgemein erhöht eine größere Stichprobe den Nachweiszeitpunkt. Falls zusätzliche Prüflinge zur Verfügung stehen, sollten diese bevorzugt auf dem niedrigen beschleunigten Lastniveau getestet werden.
- Optimale Prüflingsverteilung: Der in Nelson [3] gezeigte Ansatz zur Bestimmung der optimalen Prüflingsverteilung konnte bestätigt werden. Allerdings stellen die so bestimmten Prüflingsverteilungen n_L/n_{tot} ein Best-Case-Szenario dar, welches zum Teil sehr große Abweichungen (kleineres n_L/n_{tot}) zulässt. Dies ist dabei ohne große Verringerung des Nachweiszeitpunkts möglich. Unter Berücksichtigung des Erprobungsbudgets kann durch kleineres n_L/n_{tot} die Effizienz von Testkonfigurationen bei annähernd gleichbleibendem Nachweiszeitpunkt also stark erhöht werden.
- Lastniveauhöhe: Die Lage des niedrigen beschleunigten Lastniveaus beeinflusst die Höhe des Nachweiszeitpunkts sehr stark. Sofern das Zeit- und Kostenbudget dies ermöglicht, sollte es so nahe wie möglich an das Feldlastniveau gelegt werden.
- Anzahl Lastniveaus: Ein drittes beschleunigtes Lastniveau (b3EoL) muss bei der effizienten Planung von Zuverlässigkeitstests nicht berücksichtigt werden, da in den meisten Fällen nur geringe Abweichungen vom maximalen Nachweiszeitpunkt bestehen. Dies gilt insbesondere für kleine Kostenverhältnisse. Die Ergebnisse lassen sich auch auf weitere zusätzliche beschleunigte Lastniveaus verallgemeinern.
- Berücksichtigung von Zensierung: Ähnlich wie bei einem zusätzlichen beschleunigten Lastniveau, müssen auch zensierte Prüflinge in der effizienten Planung von Zuverlässigkeitstests nicht berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für hohe Kostenverhältnisse. Liegen zensierte Ausfalldaten vor, sollten diese selbstverständlich in der Analyse mitberücksichtigt werden.

- Bias der Maximum-Likelihood-Schätzung: Der MLE-Bias muss allgemein für genaue Betrachtungen mitberücksichtigt werden, sofern die Prüflingszahl auf einem der beschleunigten Lastniveaus klein ist. Für die in der Anwendung relevanten effizienten Testkonfigurationen und Testkonfigurationen mit geringer Gesamtprüflingszahl spielt der Bias allerdings keine entscheidende Rolle. Da die Weibullanalyse mit Hilfe des MLE als Stand der Technik in der Industrie akzeptiert wird, sind Methoden zur Reduktion des MLE-Bias für die Anwendung nur zielführend, wenn diese sich auch in der Anwendung durchgesetzt haben.
- Maximierung des Nachweiszeitpunkts als Optimalitätskriterium: Nach Bestimmung des Nachweiszeitpunkts jeder Testkonfiguration sind diese direkt miteinander vergleichbar und die Leistungsfähigkeit zweier Testkonfigurationen über die Differenz der nachgewiesenen Lebensdauern quantifizierbar. Der Nachweiszeitpunkt kann somit sehr einfach dazu verwendet werden, verschiedene Designs (mit unterschiedlichem Ausfallverhalten) und ihr Potenzial im Feld direkt zu vergleichen. Damit eignet sich die Maximierung des Nachweiszeitpunkts als Optimalitätskriterium.
- Klassische Optimalitätskriterien: Von den untersuchten klassischen Optimalitätskriterien, welche in vielen Veröffentlichungen als Ziel Planung optimaler Zuverlässigkeitstests verwendet werden, zeigt neben dem in der Arbeit vorgestellten erweiterten Konzept der *Probability of Test Success* nur die I-Optimalität eine gute Fähigkeit, das Optimum des Nachweiszeitpunkts einer Testkonfiguration zu finden. A-/ D- und E-Optimalität zeigen diesbezüglich Schwächen, welche mit dem Aufbau dieser Kriterien erklärt werden können.
- Generierung des erforderlichen Vorwissens: Die hier vorgestellte Planung effizienter Zuverlässigkeitstests ist für die Planung von Tests zum Aufbau des erforderlichen Vorwissens nicht zielführend. Gutes und exaktes Vorwissen erfordert viele Ausfälle und kann damit nur durch Erhöhen der Prüflingszahl generiert werden. Diese können allerdings auch stark beschleunigt erzeugt werden, ohne dass Einbußen in der Genauigkeit in Kauf genommen werden müssen.
- Konvergenzkriterium: Eine Anzahl von 300 Monte-Carlo-Iterationen zur Bestimmung des Nachweiszeitpunkts ist geeignet, eine ausreichend hohe Ergebnisgüte zu erreichen. Für hohe Quantile im erweiterten Zuverlässigkeitsziel ($\max(R, P_A, P_{ts}) > 90 \%$) sollten mindestens 500 Iterationen durchgeführt werden.
- Beschleunigter Success-Run-Test: Der beschleunigte Success-Run-Test kann nicht empfohlen werden, da dieser ausschließlich auf dem Vorwissen basiert, welches im Test nicht validiert werden kann, da keine Ausfälle auftreten. Der

Nachweiszeitpunkt und die Einhaltung des erweiterten Zuverlässigkeitsziels sind dadurch nur von den zu Beginn der Zuverlässigkeitstestplanung verwendeten Informationen abhängig.

Für andere Testziele gelten folgende zusätzliche Handlungsempfehlungen:

- Parametrisierung des Lebensdauermodells: Eine gleichmäßige Verteilung der Prüflinge auf die beiden beschleunigten Lastniveaus ermöglicht eine genauere Schätzung des Wöhlerexponenten. Für Gesamtprüflingszahlen ab $n_{tot} \geq 30$ führen größere Abweichungen von der gleichmäßigen Aufteilung jedoch nur zu kleinen Abweichungen in der Parameterschätzung des Wöhlerexponenten. Das niedrige beschleunigte Lastniveau sollte für eine gute Parameterschätzung so nahe wie möglich am Feldlastniveau liegen. Für eine allgemeine Handlungsempfehlung unter Berücksichtigung der Effizienz einer Testkonfiguration sind weitere Untersuchungen notwendig.
- Bestimmung des Ausfallverhaltens: Exaktes Vorwissen kann nur durch viele Ausfälle und damit durch Erhöhen der Prüflingszahl generiert werden. Allerdings können diese ohne Einbußen in der Genauigkeit bei bekanntem Lebensdauermodell auch stark beschleunigt erzeugt werden.
- Minimierung der Gesamterprobungsdauer: Eine reine Optimierung einer Testkonfiguration bezüglich der Gesamterprobungsdauer ist in der Anwendung nicht zielführend, da in diesem Fall der Nachweiszeitpunkt vollständig vernachlässigt wird. Im Rahmen der Effizienzbetrachtungen ist eine Berücksichtigung als sekundäres Optimierungsziel allerdings empfehlenswert, falls ein Produkt beispielsweise kurz vor der Markteinführung steht, aber der Lebensdauernachweis noch aussteht.
- Minimierung der Gesamterprobungskosten: Die Optimierung einer Testkonfiguration hinsichtlich der Gesamterprobungskosten ist möglich, führt jedoch meist zur Wahl ineffizienter Konfigurationen und verschwendeter Materialressourcen. Als sekundäres Optimierungsziel unter Einhaltung aller Randbedingungen ist die Minimierung der Gesamterprobungskosten allerdings empfehlenswert, um eine kostengünstige Testkonfiguration zu finden, welche die nachzuweisende Lebensdauer erfüllt.

5 Anforderungsgerechte Produktauslegung mit Probability of Test Success

Der Zielkonflikt der steigenden Zuverlässigkeitsanforderungen erfordert neben einer Planung effizienter Zuverlässigkeitstests für einen belastbaren Zuverlässigkeitsnachweis auch einen Lösungsweg, der zur Reduktion der Entwicklungskosten eines Bauteils führt. Die Produktauslegung ist hierbei ein zentraler Stellhebel für belastungsgerecht dimensionierte Produkte, indem sie das Ausfallverhalten eines Bauteils direkt beeinflusst. Dieses muss in der Testplanung berücksichtigt werden, um den Zuverlässigkeitsnachweis effizient erbringen zu können. Damit dient das Vorwissen als Schnittstelle zwischen Produktauslegung und Zuverlässigkeitstestplanung. Das in Kapitel 4 vorgestellte erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* wird im vorliegenden Kapitel verwendet, um der vorgestellten Problematik der Planung effizienter Zuverlässigkeitstests produktauslegungsbegleitend zu begegnen. Darauf aufbauend werden notwendige Randbedingungen für die Anwendung der Vorgehensweise vorgestellt und das Potenzial der Vorgehensweise in zwei Beispielanwendungen gezeigt.

5.1 Anforderungsgerechte Produktauslegung

Im Falle von fehlender Erfüllbarkeit der Lebensduranforderungen eines Bauteils oder gesteigerter Anforderungen an das Produkt ermöglicht die Betrachtung der *Probability of Test Success* die Auswahl einer Testkonfiguration, welche beispielsweise eine höhere Lebensdauer nachweist. Der Aufwand hierfür lässt sich über die Gesamttest- und über die Prüflingskosten (zusammen: Erprobungskosten) quantifizieren. Kann eine Testkonfiguration die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsziele eines Bauteils nicht nachweisen, kann zum einen die Zuverlässigkeitstestplanung angepasst werden. Alternativ ist die Beeinflussung des Vorwissens möglich, welches für beschleunigte End-of-Life-Tests aus dem Ausfallverhalten des Bauteils, sowie aus den Parametern des Lebensdauermodells besteht. Eine Änderung am Produkt, also beispielsweise an der Dimensionierung eines Bauteils durch Änderung des Auslegungsparameters „Durchmesser“, beeinflusst einen oder mehrere Ausfallmechanismen und

kann mit Hilfe der Lebensdauermodell- und Ausfallparameter beschrieben werden. Diese sind Eingangsinformationen zur Zuverlässigkeitstestplanung.

Das Vorwissen wurde in Kapitel 4 als bekannt vorausgesetzt und als Basis für die Zuverlässigkeitstestplanung verwendet. Die genaue Kenntnis des Vorwissens wird in der praktischen Anwendung dabei meist aus Vorversuchen oder Vorgängerprodukten abgeleitet, wobei die Zuverlässigkeitstestplanung als Teil der Bestätigung der Erfüllung der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen eines Produkts dient. Neben der Kenntnis des Vorwissens wird im vorliegenden Kapitel die Art und der Umfang des Vorwissens selbst betrachtet. Dafür wird in der anforderungsgerechten Produktauslegung untersucht, wie das in der Zuverlässigkeitstestplanung erforderliche Vorwissen beeinflusst wird. Dies ist durch genaue Betrachtung eines Bauteils durch Ausfallanalyse, Bestimmung der relevanten Ausfallmechanismen, Analyse der Auslegungsparameter und weiterer Informationen über Ausfälle und das Ausfallverhalten eines Bauteils möglich.

Das aus der anforderungsgerechten Produktauslegung resultierende Vorwissen fungiert dabei als Verbindungsgröße zwischen der Produktauslegung und der Zuverlässigkeitstestplanung. Dies ist in Abbildung 5.1 dargestellt und visualisiert die Gesamtstruktur des vorgeschlagenen Konzepts. Dabei wird die im vorherigen Kapitel vorgestellte Planung effizienter Zuverlässigkeitstests mit seinem Ausgang „Erprobungskosten“ um eine begleitende Produktauslegung mit den Ausgängen „Auslegungskosten“ und „Vorwissen“ ergänzt. Das „Vorwissen“ dient gleichzeitig als Eingangsinformation für die Zuverlässigkeitstestplanung. Die Gesamtkosten ergeben sich aus den „Auslegungskosten“ und den „Erprobungskosten“, wobei diese wieder in die Produktauslegung und die Zuverlässigkeitstestplanung rückgeführt werden. Sowohl die Produktauslegung als auch die Zuverlässigkeitstestplanung besitzen somit Optimierungsmöglichkeiten, um gesamtheitlich ein Kostenoptimum zu finden.

Durch Designoptimierungen (Wahl der Höhe eines Auslegungsparameters unter Berücksichtigung des Einflusses auf den betrachteten Ausfallmechanismus) ist es möglich, einzelne Ausfallmechanismen und damit das in der Zuverlässigkeitstestplanung verwendete Vorwissen anzupassen. Der hierbei entstehende Aufwand zur Anpassung der Produktauslegung, welcher sich durch die Änderung des Auslegungsparameters ergibt, kann ebenfalls über die Kosten quantifiziert werden (hier als Auslegungskosten bezeichnet).

Die Betrachtung der Lebensdauerzykluskosten, in dieser Arbeit bestehend aus Erprobungskosten und Auslegungskosten, führt je nach Anwendungsfall und Wahl der Parameter zu einem charakteristischen Verlauf, welcher durch ein Minimum an Lebensdauerzykluskosten gekennzeichnet ist. Die Lage dieses Minimums ist direkt abhängig von der Wahl der Höhe des Auslegungsparameters, durch welchen der betrachtete Ausfallmechanismus beeinflusst wurde.

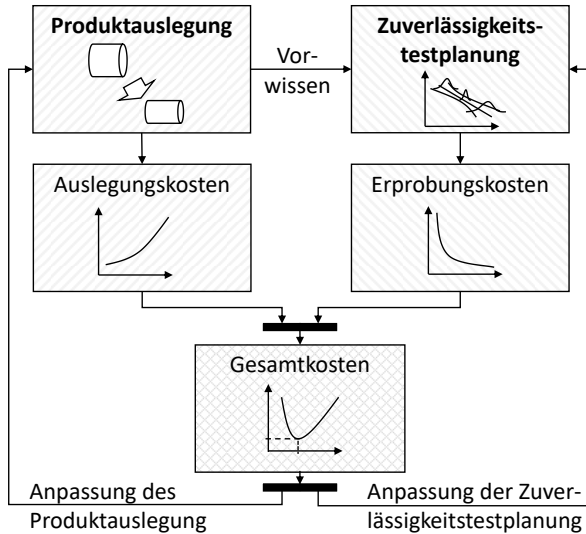


Abbildung 5.1: Gesamtstruktur „Anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests“

Die Idee dieses Konzepts ist es demnach, über die Bestimmung des Vorwissens mit Hilfe der resultierenden Gesamtkosten ein anwendungsnahes Optimierungskriterium für die anforderungsgerechte Produktauslegung durch Planung effizienter beschleunigter Zuverlässigkeitstests zu erhalten, welches über Parameter der Produktauslegung oder über Parameter der Zuverlässigkeitstestplanung beeinflusst werden kann.

5.2 Randbedingungen der Anwendung der Vorgehensweise

Für den produktauslegungsbegleitenden Schwerpunkt des Konzepts müssen Randbedingungen festgelegt werden, welche in der Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich gelten die gleichen Randbedingungen wie für die Zuverlässigkeitstestplanung (siehe Abschnitt 4.2.2). Diese werden ergänzt durch:

- **Belastungsfrequenz:** Die Belastungsfrequenz beeinflusst das Ausfallverhalten von Wöhlerproben. Für plausible Untersuchungen muss diese konstant gehalten werden.
- **Feldbelastung:** Die Feldbelastung auf die Komponente muss für die spätere Extrapolation auf Feldlastniveau bekannt sein.

- Betrachteter Anteil des Lebensdauerzyklus: Gemäß [134] sollte die Betrachtung der Zuverlässigkeit über den gesamten Lebensdauerzyklus eines Produkts, von der Entwicklung, über die Herstellung, den Betrieb und schlussendlich die Entsorgung, durchgeführt werden. Diese Phasen können bei Bedarf auch um die Schritte Planung, Ausführung und Prüfung von Zuverlässigkeitsaufgaben erweitert werden. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellte Untersuchung betrachtet die Entwicklung eines Produktes oder Systems und analysiert die Potenziale zur Ressourcenschonung zu Beginn des Lebenszyklus eines Produkts.
- Kostenmodell: Die Lebensdauerzykluskosten lassen sich nach [135] in Forschungs- und Entwicklungskosten, Herstellungskosten, Betriebs- und Unterhaltskosten sowie Entsorgungskosten aufteilen. In der vorliegenden Arbeit wird diese Unterteilung nicht streng vorgenommen. Um die Anwendbarkeit des Konzepts zu zeigen, werden nur ausgewählte Teilkosten betrachtet, für welche ein einfaches Kostenmodell angenommen werden kann. Berücksichtigte Teilkosten sind dabei Gesamterprobungskosten, welche sich zu den Forschungs- und Entwicklungskosten zuordnen lassen sowie die Materialkosten, durch welche beispielsweise der Kosteneinfluss variierender Durchmesser einer Wöhlerprobe quantifiziert werden kann. Diese lassen sich zu den Herstellungskosten zuordnen. Alle betrachteten Auslegungsparameter müssen für die Anwendung des vorliegenden Konzepts in diesem Kostenmodell berücksichtigt und abgebildet werden können.
- Lineare Schadensakkumulation: Eine reihenfolgenabhängige Schädigung wird nicht betrachtet.
- Belastungskollektiv: In den betrachteten Tests werden nur einstufige Belastungskollektive geprüft.
- Ausfallzeitpunkt: Der Zeitpunkt des Auftretens des gewählten Ausfalls ist eindeutig bestimmbar und dokumentiert.

5.3 Anwendungen der anforderungsgerechten Produktauslegung

Im folgenden Abschnitt wird die Anwendung des Konzepts gezeigt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Bauteile und Auslegungsparameter wird das Konzept zunächst anhand eines einfachen Beispiels vorgestellt. Dabei wird der Durchmesser einer Wöhlerprobe betrachtet. Anschließend wird in einem Anwendungsbeispiel die Zahnradbreite als Auslegungsparameter eines Zahnrads verwendet, um eine beispielhafte Anwendung der anforderungsgerechten Produktauslegung zu zeigen.

5.3.1 Einfaches Beispiel „Wöhlerprobe“

Im Rahmen des einfachen Beispiels soll die anforderungsgerechte Produktauslegung vorgestellt werden. Für eine auszulegende Wöhlerprobe soll eine optimale Testkonfiguration gefunden werden. Ziel ist es, die Gesamtkosten, bestehend aus Erprobungskosten und Materialkosten, zu minimieren. Dafür soll unter gegebenen Randbedingungen das Optimum zwischen dem Nachweiszeitpunkt der Testkonfiguration und dem Auslegungsparameter Durchmesser der Wöhlerprobe gefunden werden. Dafür werden zunächst Randbedingungen definiert, welche je nach Anwendung angepasst werden können.

Systembeschreibung

Für die Wöhlerprobe soll ein typisches Zuverlässigkeitsziel ($R = 90\%$, $P_A = 90\%$) nachgewiesen werden. Gleichzeitig wird für den Test $P_{ts} = 90\%$ gefordert. Nachzuweisende Lebensdauer für die Wöhlerprobe sind $N_{dem,min} = 1,8 \cdot 10^6$ Schwingspiele, wobei im Versuch bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz eine Feldbelastung von $F_{nom} = 8,5 \cdot 10^4$ N abgebildet werden soll. Die Testzeitkosten sind $k_t = 2.000$ €/T und die Prüflingskosten $k_n = 25$ €/Prüfling. Materialkosten von $k_m = 5 \cdot 10^{-5}$ €/mm³ werden für die Herstellung der später verkauften Bauteile veranschlagt, wobei mit $n_v = 10.000$ verkauften Einheiten kalkuliert wird. Die Herstellungskosten k_h des Serienbauteils entsprechen den Prüflingskosten. Alle Parameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Parameter der Randbedingungen des Anwendungsbeispiels Wöhlerprobe

Name des Parameters	Variable	Parameterhöhe bei Referenz-Testkonfiguration
Zuverlässigkeit	R	90 %
Aussagewahrscheinlichkeit	P_A	90 %
Probability of Test Success	P_{ts}	90 %
Lebensdauieranforderung	$N_{dem,min}$	$1,8 \cdot 10^6$ Schwingspiele
Frequenz	f	10 Schwingspiele / s
Feldbelastung (Kraftamplitude)	F_{nom}	$8,5 \cdot 10^4$ N
Testzeitkosten	k_t	2.000 €/T
Prüflingskosten	k_n	25 € / Prüfling
Materialkosten	k_m	$5 \cdot 10^{-5}$ € / mm ³
Herstellungskosten	k_h	25 € / Stück
Anzahl verkaufter Prüflinge	n_v	10.000

Datenbasis

Ausgangspunkt ist die Verfügbarkeit einer ausreichend großen Datenbasis aus Versuchsdaten für einzelne Ausfallmechanismen und Auslegungsparameter auf das Ausfallverhalten. Grundlage dieser Datenbasis können beispielsweise Lebensdauerests sein, welche im Rahmen eines Lebensdauer-Design-of-Experiment (L-DoE) Versuchsplans zum Einfluss einzelner Parameter auf die Lebensdauer durchgeführt wurden, um ein Lebensdauermodell einer Komponente zu parametrisieren. Dabei können sowohl mehrere Ausfallmechanismen als auch mehrere Auslegungsparameter enthalten sein.

Liegt keine ausreichende Anzahl an Informationen zum Einfluss von Auslegungsparametern auf das Ausfallverhalten einer Komponente vor, müssen Lebensdauerests durchgeführt werden, um das für die Zuverlässigkeitstestplanung erforderliche Vorwissen zu generieren. Die dafür durchgeführten Tests können allerdings auch bereits für den Zuverlässigkeitsnachweis verwendet werden und reduzieren damit den Erprobungsaufwand zum Teil erheblich.

Datenbanken, welche aufgrund ihrer Datenbasis für das vorliegende Konzept eignen, müssen bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese sind:

- hohe Testqualität
- hohe Datenqualität
- nachvollziehbare Ergebnisse und Versuchsaufbau (Plausibilität)
- Variation aller zu berücksichtigender Auslegungsparameter
- gleichmäßige Abdeckung des betrachteten Parameterraums

Für das Anwendungsbeispiel Wöhlerprobe als klassisches Prüfbauteil für Belastungsuntersuchungen gibt es zahlreiche Testergebnisse unterschiedlicher Art, welche in Datenbanken gesammelt wurden. Datenbasis für das Fallbeispiel ist der Abschlussbericht des FKM-Vorhabens Nr. 288 „Datenbank und Auswertesystem Betriebsfestigkeit“ [136]. Diese dem Fallbeispiel zugrundeliegende Datenbank enthält Wöhlerversuche für eine Vielzahl unterschiedlicher Geometrien, Oberflächen und Materialien von Wöhlerproben, aber auch für unterschiedliche Belastungskollektive. Neben diesen Auslegungsparametern sind Versuchsergebnisse enthalten, welche das Ausfallverhalten beschreiben. Für die betrachteten Wöhlerversuche sind dies Schwingungsspielzahlen, zu denen der betrachtete Ausfallmechanismus Bruch aufgetreten ist, sowie dazu zugehörige Spannungsamplituden, welche die Belastung charakterisiert, welcher die Stichprobe ausgesetzt war. Zur Ableitung des Ausfallverhaltens ist dabei eine große Stichprobe im Test von Vorteil, um kleinere Vertrauensbereiche in der Datenauswertung, das heißt mehr Informationen zum Ausfallverhalten der Gesamtpopulation, zu erhalten. Die Anforderungen an die Qualität dieser Datenbank sind erfüllt, da

- Einzelversuchsergebnisse vorliegen, um eine einheitliche Auswertung zu gewährleisten,
- die Proben mit Informationen zu Werkstoff und Fertigung, exakt beschrieben und dokumentiert sind und
- die Lastfolge in den Versuchen eindeutig beschrieben ist [137].

Auswahl eines Ausfallmechanismus und eines Auslegungsparameters

Aus der möglichen Vielzahl an in der Datenbank berücksichtigten Ausfallmechanismen und Auslegungsparametern werden die zu betrachtenden ausgewählt. Dafür muss eine ausreichende Datenbasis vorliegen. Diese besteht laut [136] aus vollständigen, gut belegten und plausiblen Datensätzen, um im späteren Vorgehen die Modellparameter ausreichend genau interpolieren zu können.

Die Wahl des zu betrachtenden Ausfallmechanismus, als „physikalischer, chemischer oder anderer Vorgang, der zu einem Ausfall führt oder geführt hat“ [138], schränkt die nutzbare Datenbasis der Datenbank ein. Es werden im Weiteren nur Datensätze berücksichtigt, bei welchen das Lebensdauermerkmal durch die gewählte Schadensart begrenzt wurde. Der anschließend gewählte Auslegungsparameter beeinflusst sinnvollerweise die Belastbarkeit und damit ebenfalls das Lebensdauermerkmal (meist: Ausfallzeit) der Komponente. Für einen bekannten linearen Einfluss eines Parameters sind entsprechend der klassischen statistischen Versuchsplanung zwei Stufen bzw. Versuchsreihen notwendig, um den Zusammenhang aus Auslegungsparameter und Lebensdauermerkmal ausreichend genau zu quantifizieren.

Als Auslegungsparameter für strukturmechanisches Versagen (Bruch) können beispielsweise gewählt werden:

- geometrische Merkmale (z. B. Durchmesser der Probe)
- Oberflächenqualität bzw. Rauheit
- Werkstoffe und Werkstoffkenngrößen
- Kerben

Für das Anwendungsbeispiel „Wöhlerprobe“ wurde als Ausfallmechanismus strukturmechanisches Versagen durch Bruch gewählt, wobei das Lebensdauermerkmal Ausfallzeit durch den Auslegungsparameter Durchmesser beeinflusst wird. Dies entspricht dem klassischen Wöhlerversuch, bei dem Standardwöhlerproben nach [55] schwingend zum Ausfall gebracht werden. Der Durchmesser der Komponente Wöhlerprobe beeinflusst dabei entscheidend die Ausfallzeiten der Proben und gleichzeitig den Materialbedarf zur Herstellung der Bauteile. Damit eignet er sich gut für eine auslegungsabhängige Testplanung.

Randbedingungen und Wahl geeigneter Versuchsreihen

Zur Ableitung des in der Zuverlässigkeitstestplanung benötigten Vorwissens müssen je nach Schädigungsmechanismus und Auslegungsparameter geeignete Versuchsreihen ausgewählt werden. Es sind Versuchsreihen mit größeren Stichproben zu bevorzugen, um eine genaue Schätzung des Lebensdauer- und Ausfallverhaltens zu ermöglichen. Um die im weiteren Verlauf zu ermittelnde Parameter durch Interpolation ermitteln zu können, müssen die ausgewählten Versuchsreihen den zu betrachtenden Parameterraum vollständig abdecken, d. h. sie begrenzen den Parameterraum nach oben und unten. Außerhalb des Parameterraums liegende Größen der Parameter müssen durch Extrapolation ermittelt werden, wobei hierfür erweiterte Methoden und Vorwissen erforderlich sind.

Für den in dieser Arbeit betrachteten Auslegungsparameter Probendurchmesser wurden zwei Versuchsreihen gewählt, welche eine Variation des Durchmessers in einem größeren Umfang abdeckt, siehe Tabelle 5.2. Dies repräsentiert den betrachteten Parameterraum für das betrachtete Anwendungsbeispiel. Beide gewählten Versuchsreihen besitzen eine ausreichende Anzahl an Ausfalldaten und eignen sich damit für die anstehende Betrachtung. Ausgangspunkt für die Anwendung der Vorgehensweise ist daher die Festlegung der Referenzdatensätze auf zwei Versuchsreihen 1107 und 1108. Bei beiden Datensätzen wurden Rundproben aus dem mikrolegierten Stahl 27MnVS6 mit axialer Biegung belastet. Somit wurden die Proben orthogonal zur Symmetrieachse schwingend beansprucht. Durch die Festlegung der Einstufenbelastung ist die Mittelspannung und die Spannungsamplitude während des gesamten Experiments konstant, wobei die Experimente ohne Mittelspannung durchgeführt wurden. Die Schwingbeanspruchung des Tests ist kraftgesteuert, das heißt die Probe wurde mit einer konstanten Kraftamplitude belastet und nicht soweit belastet, dass eine bestimmte Auslenkung erreicht wird. Der relevante Probendurchmesser für die Versuchsreihe 1107 beträgt 9 mm und für die Versuchsreihe 1108 25 mm.

Tabelle 5.2: Versuchsrandbedingungen der ausgewählten Versuchsreihen 1107 bzw. 1108

Probentyp	Rundprobe
Material	27MnVS6
Belastungsrichtung	axiale Biegung
Formzahl	2,05
Lastfolge	Einstufenbelastung
Schwingbeanspruchung	kraftgesteuert
relevanter Probendurchmesser	9 mm (1107), 25 mm (1108)

Beide Datensätze enthalten eine große Anzahl an Messwerten bei unterschiedlicher Belastung. Nur ein Teil davon liegt im relevanten Zeitfestigkeitsbereich, welcher sich aus der Schnittmenge der Zeitfestigkeitsbereiche der beiden Wöhlerlinien ergibt. Die Versuchsdaten, dazugehörigen Wöhlerlinien und die Zeitfestigkeitsbereiche sind in Abbildung 5.2 grafisch dargestellt.

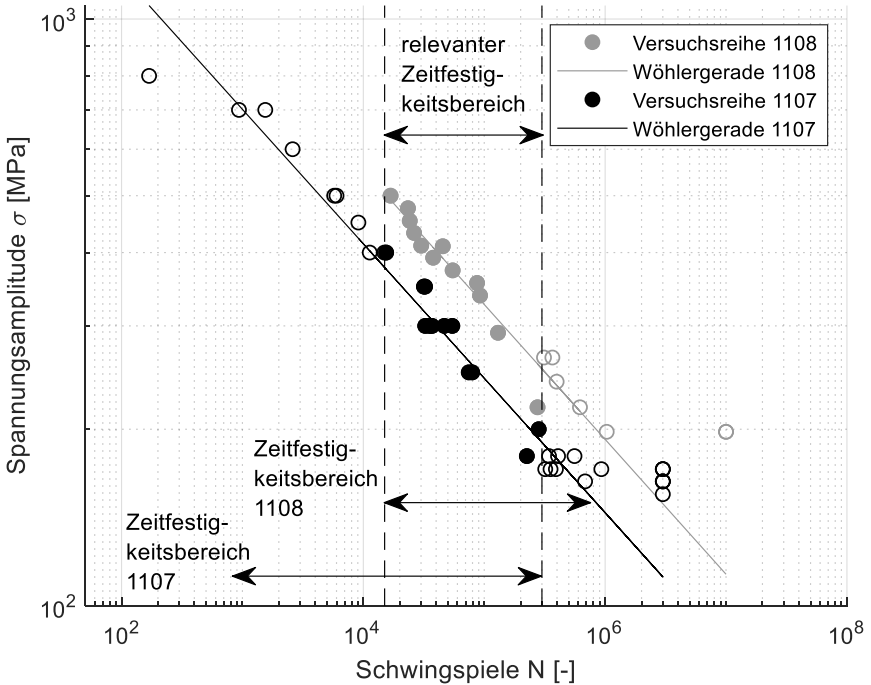


Abbildung 5.2: Wöhlerdiagramme der Versuchsreihen 1107 und 1108

Festlegung eines Lebensdauermodells

Um das Lebensdauerverhalten in Abhängigkeit des gewählten Auslegungsparameters bestimmen zu können, muss die Grundgleichung des geeigneten Lebensdauermodells aufgestellt werden. Diese wird nachfolgend parametrisiert. Grundgleichungen zu Lebensdauermodellen finden sich hierbei in der einschlägigen Literatur, wie beispielsweise in [116]. Beispiele für Lebensdauermodelle sind:

- Wöhler-Lebensdauermodell
- Arrhenius-Modell
- Coffin-Manson-Modell

Für die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Umsetzung der Vorgehensweise wird das Wöhler-Lebensdauermodell gewählt. Dieses eignet sich zur Beschreibung des Zusammenhangs aus ertragbarer Spannungsamplitude und durchgeführter Anzahl an Schwingspielen. Dieser Zusammenhang kann logarithmiert als Gerade dargestellt werden (Wöhlergerade), wobei die Ecklastspielzahl den Lageparameter repräsentiert und der Wöhlerexponent als Formparameter zur Beschreibung der Steigung der Geraden dient.

Parametrisierung des Lebensdauermodells

Für die Parametrisierung des Lebensdauermodells eignen sich Verfahren wie beispielsweise die Maximum-Likelihood-Schätzung und die Least-Squares-Methode, welche anhand vorliegender Ausfalldaten auf beschleunigten Testlastniveaus die Parameterschätzwerte finden, die die Residuen und damit die Abweichung des Lebensdauermodells von den Ausfalldaten der Versuchsreihen minimieren. Dieses Vorgehen wurde in Kapitel 4.2.1 beschrieben und kann auch in der Auswertung von Lebensdauerstestdaten verwendet werden.

Die Parametrisierung des Lebensdauermodells wird für alle gewählten Versuchsreihen separat durchgeführt, wodurch für jede Versuchsreihe die Lebensdauermodellparameter bestimmt werden können, welche das Lebensdauerverhalten am besten abbilden. Somit ist es möglich, das Lebensdauerverhalten in Abhängigkeit der Einflussparameter quantitativ zu beschreiben. Diese Information dient als Teil des Vorwissens für das in der Arbeit vorgestellte erweiterte Konzept der *Probability of Test Success*. Für die in Abbildung 5.2 vorgestellten Versuchsreihen ergeben sich so die Lebensdauermodellparameter, welche in Tabelle 5.3 zusammengefasst sind.

Tabelle 5.3: Lebensdauermodellparameter der Versuchsreihen 1107 bzw. 1108

Parameter	Versuchsreihe 1107	Versuchsreihe 1108
Ecklastschwingspielzahl N_D	$1,00 \cdot 10^7$	$3,00 \cdot 10^6$
Wöhlerexponent k	4,17	3,90

Berücksichtigung der Randbedingungen

Anwendungsspezifische Randbedingungen sind individuell zu berücksichtigen und können beispielsweise notwendige Informationen zu den Festigkeitsbereichen der Bauteile umfassen. Zum einen sind dies Informationen zur elastischen und plastischen Verformung, aber auch zur Dauerfestigkeit eines Bauteils. Des Weiteren können diese Randbedingungen auch Vereinfachungen zur Modellierung der Bauteile enthalten.

Für das vorliegende Anwendungsbeispiel leiten sich diese anwendungsspezifischen Randbedingungen unter anderem aus der Theorie der klassischen Wöhlerversuche ab, bei denen der Dauerfestigkeitsbereich die Schwingspielamplitude kennzeichnet, welche von der Wöhlerprobe dauerhaft und ohne Schädigung ertragen werden kann (Miner-Original) [59]. Sie entspricht der Ecklastschwingspielzahl und begrenzt die minimale Amplitude, welche zum Bruchausfall führen kann. Diese Amplitude variiert je nach Durchmesser, kann also aus den gewählten Versuchsreihen jeweils bestimmt werden.

Weitere Randbedingungen sind die maximale Schwingamplitude, welche im Wöhlerschaubild als Kurzzeitfestigkeit bezeichnet wird. Auch diese muss für alle betrachteten Versuchsreihen berücksichtigt werden und sorgt dafür, dass der zugelassene Parameterbereich für die Schwingungsamplituden nach oben begrenzt wird.

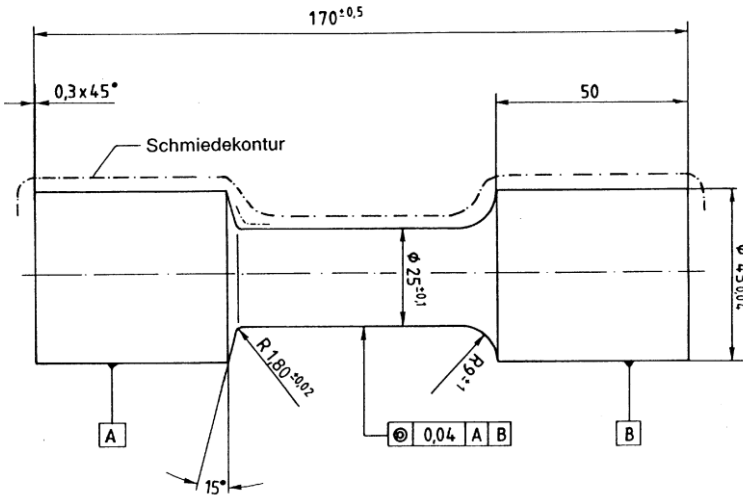


Abbildung 5.3: Wöhlerprobengeometrie der Versuchsreihe 1108 [137]

Vereinfacht kann eine Wöhlerprobe als Zylinder mit konstantem Querschnitt modelliert werden. Dafür wird der kleinste Durchmesser der Wöhlerprobe gewählt, da hier die Sollbruchstelle des Bauteils liegt. Die Wöhlerprobe ist in Abbildung 5.3 erkennbar, wobei der kleinste Durchmesser $d = 25 \text{ mm}$ für die vereinfachte Modellierung verwendet wird. Die Belastung muss dabei jeweils auf die Querschnittsfläche dieses Zylinders bezogen werden. Für die Betrachtung des Durchmessers als Auslegungsparameter muss daher die Belastung aller betrachteten Versuchsreihen gleich sein. Diese resultiert aus der auf den Zylinder wirkenden Kraftamplituden, welche durch die unterschiedlichen Durchmesser in unterschiedlichen Spannungsamplituden resultieren.

Größeneffekte, wie beispielsweise die höhere Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im Material bei größeren Volumen und damit sinkender Spannungsbelastbarkeit einer größeren Wöhlerprobe, müssen dadurch nicht gesondert betrachtet werden, da sie in den Versuchsdaten bereits enthalten sind. Eine Kerbwirkung durch Verengung des Querschnitts der Wöhlerprobe kann bei der vereinfachten Modellierung jedoch nicht berücksichtigt werden. Das später betrachtete Feldlastniveau muss zudem in allen Zeitfestigkeitsbereichen der analysierten Versuchsreihen enthalten sein.

Bestimmung des Ausfallverhaltens

Unter Berücksichtigung aller Randbedingungen kann das Ausfallverhalten bestimmt werden. Standardmethoden hierfür sind die Maximum-Likelihood-Schätzung und die Least-Squares-Methode. Die Weibullverteilung eignet sich als häufigste Verteilungsart in der Zuverlässigkeitstechnik dabei insbesondere für alle Arten mechanischer und mechatronischer Systeme [60].

Für die Analyse von Wöhlerversuchen haben sich das Horizontenverfahren und das Perlenschnurverfahren (PSV) nach [55] etabliert. Beim hier gewählten Perlenschnurverfahren werden alle Ausfallzeiten einer Versuchsreihe im Wöhlerschaubild parallel zur ermittelten Wöhlergeraden auf das gewählte Feldlastniveau verschoben und anschließend in einer klassischen Weibullanalyse die Weibullparameter bestimmt. Die Vorgehensweise des PSV wurde bereits in Abbildung 2.8 dargestellt. Die durch das PSV ermittelten Weibullparameter des Ausfallverhaltens des Bauteils sind in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Tabelle 5.4: Weibullparameter der Versuchsreihen 1107 bzw. 1108

Parameter	Versuchsreihe 1107	Versuchsreihe 1108
Charakteristische Lebensdauer T	$3,36 \cdot 10^4$	$2,41 \cdot 10^7$
Weibull-Formparameter b	6,14	5,99

Interpolationsmodell der Lebensdauermodellparameter

Aus den Lebensdauermodellparametern der gewählten Versuchsreihen lassen sich auch für nicht getestete Auslegungsparemeterrhöhen die Lebensdauermodellparameter interpolieren. Dies setzt voraus, dass ausreichend viele Versuchsreihen ausgewählt wurden. Für ein lineares Verhalten oder sehr geringe Unterschiede der Parameter sind, für eine ausreichend genaue Beschreibung der Einflüsse, zwei Versuchsreihen erforderlich. Dies entspricht dem klassischen Vorgehen in der statis-

tischen Versuchsplanung. Bei quadratischem Verhalten sind dagegen drei Versuchsreihen erforderlich, um die Abbildungsgüte des Lebensdauermodells zu erhöhen. Beide, lineares und quadratisches Verhalten, sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

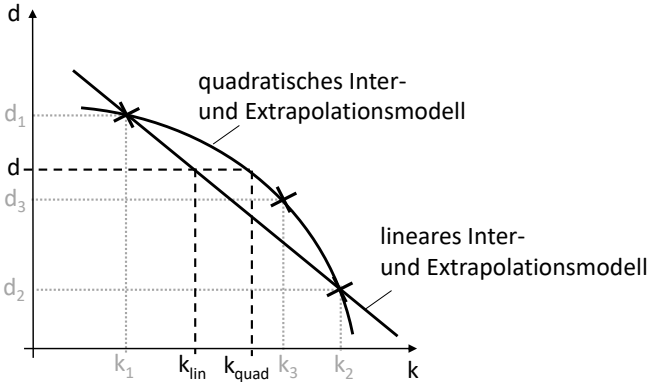


Abbildung 5.4: Lineares und quadratisches Inter- und Extrapolationsmodell für die Lebensdauermodellparameter

Im Anwendungsbeispiel Wöhlerprobe werden Wöhlerexponent und Ecklastspielzahl für alle Durchmessergrößen, welche zwischen den gewählten Versuchsreihen liegen, linear interpoliert. Der statistische Größeneinfluss führt dabei dazu, dass der Wöhlerexponent für größere Durchmesser kleiner wird. Hierbei kann im Allgemeinen nicht von einem linearen Einfluss ausgegangen werden. Der geringe Unterschied führt jedoch zu einem annähernd linearen Verhalten und gleichzeitig zu einer vernachlässigbaren Abweichung von den tatsächlichen Werten. Für die Ecklastspielzahl wird ebenfalls von linearem Verhalten ausgegangen.

Dieses lineare Verhalten wird ebenfalls angenommen, um die Lebensdauermodellparameter außerhalb der Parameter der Versuchsreihen zu ermitteln. Mögliches zusätzlich vorhandenes Vorwissen über das tatsächliche Verhalten sollte in jedem Fall in dieser Betrachtung berücksichtigt werden. Für die Abschätzung des Potenzials der vorgeschlagenen Vorgehensweise ist das lineare Verhalten jedoch ebenfalls ausreichend.

Interpolationsmodell der Parameter des Ausfallverhaltens

Wie zur Bestimmung der Lebensdauerparameter nicht getesteter Versuchsreihen (siehe Abbildung 5.4) eignet sich die lineare Interpolation auch zur Bestimmung des jeweiligen Ausfallverhaltens dieser Versuchsreihen, falls die geschätzten Parameter

der ausgewerteten Versuchsreihen entweder nahe zusammenliegen oder in Abhängigkeit des betrachteten Auslegungsparameters ein lineares Verhalten zeigen.

Zwischen diesen verhält sich der Weibull-Formparameter, welcher wichtigster Bestandteil des zu ermittelnden Vorwissens ist, nahezu konstant. Über das Verhalten des Formparameters außerhalb dieses Parameterbereichs des Probendurchmessers kann hier keine triviale Aussage getroffen werden, da dabei zusätzliche physikalische Einflüsse hinzukommen können, über welche zusätzliches Vorwissen erforderlich ist.

Wie bereits beschrieben, ist eine lineare Interpolation ausreichend exakt für die in den beiden Extremen, den Versuchsreihen 1107 und 1108, auftretenden Parameter für den Weibull-Formparameter b . Zwischen den charakteristischen Lebensdauern T wird ebenfalls linear interpoliert, eine realitätsnähere Modellierung allerdings empfohlen. Um über die Parameterbereiche der Versuchsreihen 1107 und 1108 hinausgehende Parameterbereiche zu berücksichtigen, wird eine lineare Extrapolation, entsprechend dem Lebensdauermodell, verwendet.

Festlegen der Höhe des Auslegungsparameters

Die Wahl der Höhe des Auslegungsparameters ist zentral in der Integration entwicklungsbegleitender Entscheidungen in die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests, da sie Stellgröße für die Produktauslegung und damit für die Dimensionierung des betrachteten Ausfallmechanismus der Komponente im Konzept ist. Mit Variation der Höhe des Auslegungsparameters können also Ausfallmechanismus sowie Ausfallverhalten der gewählten Komponente beeinflusst werden. Aus der Wahl der Höhe des Auslegungsparameters begründet sich die Anforderung nach einem Kostenmodell, welches insbesondere die durch Variation des Auslegungsparameters entstehenden Kosten berücksichtigt.

Im Fallbeispiel soll die Höhe des Auslegungsparameters als Optimierungsgröße verwendet werden, um gesamtheitlich minimale Kosten zu generieren. Im Interpolationsbereich der beiden Versuchsreihen 1107 und 1108 stehen deshalb alle Durchmesser zur Verfügung. Zusätzlich werden auch extrapolierte Durchmesser bis 30 mm erlaubt, um den Parameterraum für die Simulation zu vergrößern. Zur Abschätzung des Potenzials der Vorgehensweise ist diese Extrapolation ausreichend genau.

Bestimmung des Vorwissens

Mit Hilfe der beiden Interpolationsmodelle kann für die Wahl der Höhe des Auslegungsparameters im Folgenden das in der Zuverlässigkeitstestplanung erforderliche Vorwissen bestimmt werden. Dieses besteht zum einen aus dem parametrisierten Lebensdauermodell der Komponente mit festgelegter Höhe des Auslegungsparameters N_D und k und zum anderen aus den Weibullparametern des Ausfallverhaltens b und T .

Das Vorwissen ergibt sich im Fallbeispiel aus dem aus der Wahl der Höhe des Durchmessers resultierenden Ausfallverhalten durch lineare Interpolation. Tabelle 5.5 beschreibt das ermittelte Vorwissen für verschiedene gewählte Durchmesser der untersuchten Wöhlerproben. Dieses dient als Eingang in die Zuverlässigkeitstestplanung.

Tabelle 5.5: Interpoliertes Vorwissen für ausgewählte Durchmesser

Durchmesser	9 mm	15 mm	20 mm	25 mm
Ecklastschwingspielzahl N_D	$1,00 \cdot 10^7$	$7,38 \cdot 10^6$	$5,19 \cdot 10^6$	$3,00 \cdot 10^6$
Wöhlerexponent k	4,17	4,07	3,99	3,90
Charakteristische Lebensdauer T	$3,36 \cdot 10^4$	$1,48 \cdot 10^6$	$8,89 \cdot 10^6$	$2,41 \cdot 10^7$
Weibull-Formparameter b	6,14	6,08	6,04	5,99

Kostenmodell

Ein Kostenmodell ist erforderlich, um die Variation der in der Produktentwicklung festgelegten Kosten zu quantifizieren. Da sich laut Randbedingungen der Vorgehensweise die betrachteten Komponenten bis auf die Änderung der Höhe des Auslegungsparameters nicht unterscheiden, muss für diesen Auslegungsparameter ein Kostenmodell festgelegt werden.

Für Auslegungsparameter, welche das Materialvolumen beeinflussen, müssen materialvolumenabhängige Kosten (hier: Materialkosten) bestimmt werden, für Auslegungsparameter, welche sich auf einzelne Fertigungsschritte beziehen, muss ein Kostenmodell für diese Fertigungsschritte bestimmt werden. Zur Betrachtung des Auslegungsparameters „Oberflächenrauheit“ können beispielsweise die erforderliche Bearbeitungszeit zur Herstellung der Oberfläche, sowie die Auswahl eines geeigneten Werkzeugs und dessen Verschleiß berücksichtigt werden.

Allgemein enthält das hier verwendete Kostenmodell aus Gl. (4.1) zum einen zeitabhängige Kosten, welche beispielsweise durch höhere Fertigungszeit oder einen zusätzlichen Fertigungsschritt entstehen und volumenabhängige Kosten, welche aus einem veränderlichen Materialeinsatz resultieren.

Für das in dieser Arbeit betrachtete Anwendungsbeispiel „Durchmesser“ konzentrieren sich die variablen Kosten auf die volumenabhängigen Kosten, da sich ein größerer Durchmesser über die Querschnittsfläche und Länge des Bauteils direkt in ein vergrößertes Volumen und damit über den Materialpreis in vergrößerte Materialkosten umrechnen lässt. Es entstehen im Beispiel keine weiteren Kosten.

Bestimmung des optimalen Auslegungspunkts

Für die Simulation des in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Anwendungsbeispiels wurde der Auslegungsparameter des Bauteils (Durchmesser) im Bereich von 15 mm bis 26 mm in feiner Abstufung (0,1 – 0,25 mm) variiert. Die Verläufe in Abbildung 5.5 zeigen für jeden simulierten Durchmesser die jeweils günstigste (Gesamtkosten) Testkonfiguration für den beschleunigten End-of-Life-Test mit zwei Lastniveaus und die jeweiligen Prüflingskosten, Testzeitkosten und Materialkosten. Dabei erfüllen die dargestellten Testkonfigurationen alle Randbedingungen, welche in der Systembeschreibung des Anwendungsbeispiels gegeben sind (erweitertes Zuverlässigkeitsziel, Lebensduranforderung etc.).

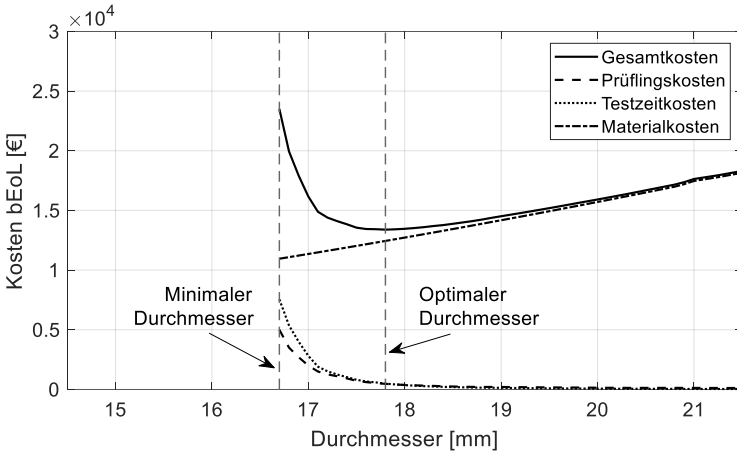


Abbildung 5.5: Verlauf der Teil- und Gesamtkosten in Abhängigkeit des gewählten Durchmessers für $R, P_A, P_{ts} = 90\%$

In Abbildung 5.5 markiert ist zum einen der erforderliche minimale Durchmesser des Bauteils, um das erweiterte Zuverlässigkeitsziel mit den untersuchten bEoL-Testkonfigurationen nachweisen zu können ($d_{min,bEoL,90\%} = 16,7\text{ mm}$). Für kleinere Durchmesser kann der Zuverlässigkeitsnachweis mit einem bEoL nicht mehr erbracht werden, selbst durch sehr aufwendige Tests und hohe Prüflingszahlen. Speziell für Durchmesser nahe dieses Mindestdurchmessers der Teststrategie bEoL ist zum Nachweis eine hohe Anzahl an Prüflingen erforderlich. Dies wird durch die Auslegung nahe der Nachweisgrenze verursacht, welche einen engen Vertrauensbereich erfordert. Mit höherer Prüflingszahl verengt sich der Vertrauensbereich, wodurch sich die obere Vertrauensgrenze und damit auch der Nachweiszeitpunkt erhöhen. Hohe Relevanz besitzt dieser Parameterbereich bei Leichtbauanwendungen, bei welchen eine geringe Dimensionierung wichtig ist. Bei diesen kann mit dem vorgestellten Vorgehen eine minimale

Dimensionierung für eine Teststrategie bestimmt werden, welcher die Einhaltung des erweiterten Zuverlässigkeitsziels und aller anderen Randbedingungen sicherstellt. Für die Absicherung im Leichtbau sind allgemein hohe Prüflingszahlen erforderlich, um mit großer Wahrscheinlichkeit (P_{ts}) einen erfolgreichen Zuverlässigkeitsnachweis zu erbringen. Selbst mit höherer Prüflingszahl kann der mit dem Vorgehen ermittelte minimale Durchmesser nicht verringert werden. Für Leichtbauanwendungen, welche nur in geringer Stückzahl hergestellt werden und auch im Test nur geringe Prüflingszahlen zulassen, kann diese minimale Dimensionierung mit dem bEoL nicht realisiert werden, da der Zuverlässigkeitsnachweis nicht erbracht kann.

Für größere Durchmesser sinkt die erforderliche Prüflingszahl zum Nachweis aller Anforderungen und Ziele und damit auch die Prüflings- und Testzeitkosten. Für große Durchmesser, also eine hohe Überdimensionierung, reichen je drei Prüflinge auf den beschleunigten Lastniveaus zum Zuverlässigkeitsnachweis aus.

Die Materialkosten weisen ein stetig ansteigendes Verhalten auf. Sie steigen mit größerem Durchmesser, da sie direkt abhängig vom Volumen und damit auch vom Durchmesser des Bauteils sind. Zusätzlich werden sie stark durch die Anzahl verkaufter Bauteile beeinflusst.

Die Summe aller hier betrachteten Kosten (Gesamtkosten) weist ein zunächst stark abfallendes Verhalten auf, welches insbesondere durch die hohe Prüflingszahl für Durchmesser nahe der Nachweismarge beeinflusst wird. Nach Ausbildung eines Gesamtkostenminimums (optimaler Durchmesser, $d_{opt,bEoL,90\%} = 17,8 \text{ mm}$) steigen sie mit größerem Durchmesser, dominiert von den steigenden Materialkosten, welche in Summe gegenüber den durch die Erprobung verursachten Kosten überwiegen. Der optimale Durchmesser entspricht für das vorliegende Fallbeispiel dem Gesamtkostenoptimum aus beschleunigter Zuverlässigkeitstestplanung (bEoL) und Dimensionierung des untersuchten Bauteils. Dieser Durchmesser ist damit auch der optimale Auslegungspunkt für ein Bauteil mit minimalen Gesamtkosten unter Berücksichtigung der Maximierung des Nachweiszeitpunkts und der Anzahl verkaufter bzw. ausgelieferter Bauteile.

Die Auswertungen, welche in Abbildung 5.5 dargestellt sind, werden in Abbildung 5.6 für eine gesteigerte Zuverlässigkeitsanforderung ($R, P_A, P_{ts} = 95 \%$) dargestellt. Diese sorgt für eine Verschiebung des minimalen Durchmessers auf $d_{min,bEoL,95\%} = 17,2 \text{ mm}$ sowie des optimalen Durchmessers auf $d_{opt,bEoL,95\%} = 18,4 \text{ mm}$. Diese Verschiebung hin zu größerer Dimensionierung des Bauteils und damit einhergehender Erhöhung der minimalen Gesamtkosten korreliert mit den Parameterstudien aus Teilkapitel 4.4.

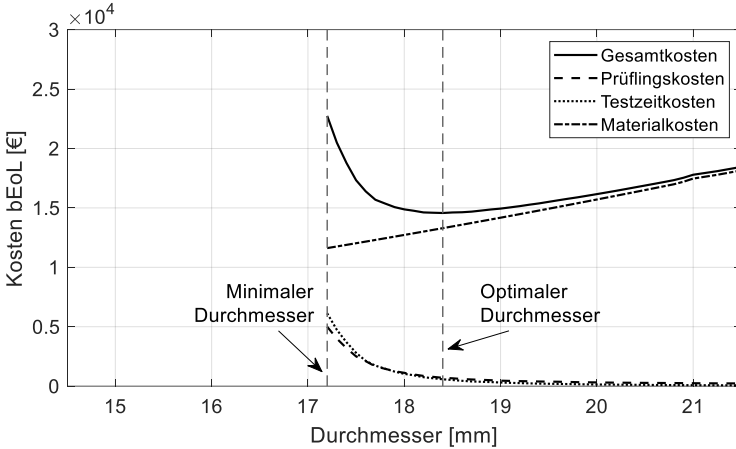


Abbildung 5.6: Verlauf der Teil- und Gesamtkosten in Abhängigkeit des gewählten Durchmessers für $R, P_A, P_{IS} = 95\%$

Die Gesamtkosten des bEoL werden im Vergleich zu den anderen in der Arbeit betrachteten Teststrategien EoL und SRT in Abbildung 5.7 dargestellt. Dabei werden nur die Gesamtkosten der für jeden simulierten Durchmesser jeweils kostengünstigsten Testkonfiguration der Teststrategien betrachtet. Die Randbedingungen der Simulation sind entsprechend Abbildung 5.5.

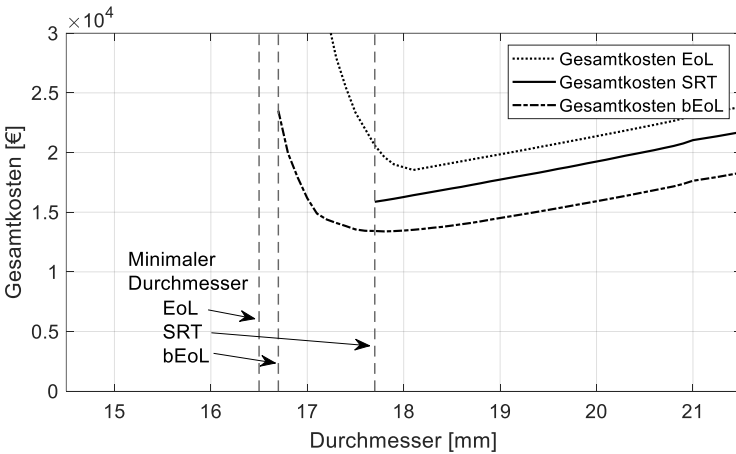


Abbildung 5.7: Verlauf der Gesamtkosten für die berücksichtigten Teststrategien in Abhängigkeit des gewählten Durchmessers

Markiert sind die minimalen Durchmesser aller drei verglichenen Teststrategien, wobei der dargestellte Ausschnitt den EoL (minimaler Durchmesser $d_{min,EoL,90\%} = 16,4 \text{ mm}$ bei Gesamtkosten von $k_{tot} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ €}$) nicht vollständig darstellen kann. Auffällig ist, dass sehr kleine Durchmesser ($< 16,8 \text{ mm}$) nur mit dem End-of-Life-Test zuverlässigkeitstechnisch abgesichert werden können. Dies liegt an der Testbelastung des EoL, welche der Feldbelastung entspricht. Dadurch ist im Vergleich zum bEoL bei gleicher Prüflingszahl ein höherer Nachweis möglich. Der Minstdurchmesser für den SRT beträgt $d_{min,SRT,90\%} = 17,7 \text{ mm}$. Gleichzeitig sind die Gesamtkosten für den bEoL minimal (für $d_{opt,bEoL,90\%} = 17,8 \text{ mm}$), während sie für den EoL und den SRT auf höherem Niveau liegen.

Der Verlauf des EoL ist ähnlich wie der des bEoL. Für kleine Durchmesser können die Anforderungen nur mit sehr vielen Prüflingen und Erprobungsdauern nachgewiesen werden, was zu hohen Erprobungskosten führt. Für große Durchmesser dominiert der Einfluss des Durchmessers auf die Materialkosten, während die Erprobungskosten sehr klein werden.

Die Gesamtkosten des SRT zeigen ein ansteigendes Verhalten über dem Durchmesser. Dieses ist geprägt von den ansteigenden Materialkosten für größere Durchmesser. Die Erprobungskosten fallen hier kaum ins Gewicht, da für alle Durchmesser die minimale Prüflingszahl am kostengünstigsten ist. Auch mit deutlich höherer Prüflingszahl kann beim SRT kein kleinerer Durchmesser das erweiterte Zuverlässigkeitsziel nachweisen. Der SRT, als Test ohne geplante Ausfälle, generiert keine Ausfalldaten, weshalb nur ein Nachweis der Mindestzuverlässigkeit möglich ist. Dies führt zu einer konservativen Abschätzung, weshalb im Vergleich zum EoL eine höhere Dimensionierung erforderlich ist. Die in [65] beschriebene notwendige Überdimensionierung des Success-Run-Tests kann somit bestätigt werden.

Fazit

Für das einfache Beispiel Wöhlerprobe und den gewählten Auslegungsparameter Durchmesser wurde die Anwendbarkeit der anforderungsgerechten Produktauslegung nachgewiesen. Mit Vergrößerung des Durchmessers kann die Lebensdauer der Komponente erhöht werden. Dies führt zu höheren Kosten zur Herstellung der für den Nachweis erforderlichen Prüflinge (Prüflingskosten) und zu höheren Kosten in der Serienfertigung des Produkts (Anzahl verkaufter Bauteile). Beide Kosten sind jeweils direkt abhängig vom Durchmesser der Komponente und damit vom Volumen und vom Materialpreis des Produkts. Neben diesen höheren Kosten in der Produktauslegung sinken die Kosten, welche aus der Zuverlässigkeitstestplanung resultieren, da bei gleichem erweitertem Zuverlässigkeitsziel weniger Prüflinge zum Zuverlässigkeitsnachweis benötigt werden und die Erprobungsdauer dieser Prüfling geringer ist.

Für Leichtbauanwendungen, welche sich insbesondere durch geringeren Materialeinsatz auszeichnen, kann der Durchmesser klein gewählt werden, wodurch sich die Materialkosten reduzieren. Zum Nachweis der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen sind gleichzeitig hohe Erprobungskosten erforderlich, die sich vor allem durch die gesteigerte Prüflingszahl und durch die dadurch höheren Erprobungszeiten begründen lässt. Leichtbauanwendungen erfordern also hohe Prüflingszahlen zum Zuverlässigkeitsnachweis, welche sich in der Anwendung nicht immer realisieren lassen. Die Konsequenz ist daher, dass bei kleinen Stichprobengrößen Leichtbauanwendungen nicht zuverlässigkeitstechnisch abgesichert werden können.

Der EoL eignet sich insbesondere zum Nachweis der Zuverlässigkeit von Leichtbauanwendungen, da der minimale Durchmesser am geringsten ist. Dieser minimale Durchmesser des EoL $d_{min,EoL}$ entspricht zudem dem minimalen möglichen Durchmesser, welcher überhaupt nachgewiesen werden kann. Für diesen Durchmesser gilt, dass die Überdimensionierung null ist.

Die mit größerem Durchmesser steigenden Kosten für die Produktauslegung und die gleichzeitig sinkenden Kosten für den Zuverlässigkeitsnachweis in der Erprobung bilden die Basis für das in dieser Arbeit integrierte Konzept der anforderungsgerechten Produktauslegung durch Planung effizienter Zuverlässigkeitstests. Der gewählte Auslegungsparameter, hier der Durchmesser, soll so gewählt werden, dass die betrachteten Gesamtkosten unter Berücksichtigung aller Randbedingungen, bei gleichzeitiger Erfüllung aller Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen, minimal sind. Das Gesamtkostenmodell aus Gl. (4.1) kann dabei an dieser Stelle beliebig erweitert werden und beeinflusst das Optimum. Das Gesamtkostenoptimum kann durch eine Vielzahl an Parametern und Parameterkombinationen beeinflusst werden. In der Anwendung ist daher die genaue Berücksichtigung aller Kosten, verkaufter Produkte, aber auch des Vorwissens in der anforderungsgerechten Produktauslegung erforderlich, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig abgedeckt werden kann.

5.3.2 Anwendungsbeispiel „Zahnradbreite“

Im Rahmen eines Anwendungsbeispiels soll für eine auszulegende Zahnradbreite die optimale Testkonfiguration gefunden werden. Ziel ist es, die Gesamtkosten, bestehend aus Erprobungskosten und Materialkosten, zu minimieren. Dafür soll unter gegebenen Randbedingungen das Optimum zwischen Nachweiszeitpunkt der Testkonfiguration und Zahnbreite des Zahnrad gefunden werden.

Systembeschreibung

Grundlage des Anwendungsbeispiels ist ein Stirnradpaar, welches in ähnlicher Form auch in der Serienproduktion in der Automobilbranche zum Einsatz kommt. Betrachtet wird dabei eine Geradverzahnung eines Losrads mit Ritzel, wobei die Zahnradbreite als Auslegungsparameter und Grübchenbildung als Ausfallmechanismus betrachtet werden.

Für das Zahnradpaar soll ein Zuverlässigkeitsziel ($R = 99\%$, $P_A = 50\%$) nachgewiesen werden. Dieses ist typisch in der Zahnradauslegung nach DIN 3990-2, welche in der Automobilbranche Standard ist. Es entspricht einer hohen geforderten Zuverlässigkeit in Kombination mit einer geringen Aussagewahrscheinlichkeit. Geforderte *Probability of Test Success* ist $P_{ts} = 90\%$, die geforderte Lebensdauer $N_{dem,min} = 1,8 \cdot 10^7$ Schwingspiele, wobei im Versuch bei einer Frequenz von $f = 21,7$ Hz ein Antriebsmoment (Feldbelastung) von $T_{nom} = 150$ Nm abgebildet werden soll. Die geforderte Lebensdauer liegt dabei im oberen Teil des Zeitfestigkeitsbereichs.

Die Testzeitkosten sind $k_t = 50.000$ €/T und die Prüflingskosten betragen $k_n = 65$ €/Prüflingspaar. Materialkosten von $k_m = 0,5$ €/mm Zahnradbreite werden für die Herstellung der später verkauften Bauteile veranschlagt, wobei mit $n_v = 1.000.000$ verkauften Einheiten kalkuliert wird, was der Serienproduktion zuzuordnen ist. Die Herstellungskosten k_h des Serienbauteils entsprechen den Prüflingskosten. Diese Parameter sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.6: Parameter der Randbedingungen des Anwendungsbeispiels Zahnradbreite

Name des Parameters	Variable	Parameterhöhe bei Referenz-Testkonfiguration
Zuverlässigkeit	R	99 %
Aussagewahrscheinlichkeit	P_A	50 %
<i>Probability of Test Success</i>	P_{ts}	90 %
Lebensduranforderung	$N_{dem,min}$	$1,8 \cdot 10^7$ Schwingspiele
Frequenz	f	$21,7$ Schwingspiele / s
Feldbelastung	T_{nom}	150 Nm
Testzeitkosten	k_t	50.000 €/T
Prüflingskosten	k_n	65 € / Prüflingspaar
Materialkosten	k_m	0,5 € / mm
Herstellungskosten	k_h	65 € / Zahnradpaar
Anzahl verkaufter Prüflinge	n_v	1.000.000

Tragfähigkeitsberechnung anhand DIN 3990-2 (Methode B)

Die Produktauslegung der Zahnradbreite b_{gem} erfolgt anhand der Tragfähigkeitsberechnung, Methode B aus der DIN 3990-2 [139]. Das verwendete Material ist

einsatzgehärteter Stahl 20MnCr5. Der für die Normberechnung maximale Spannung beträgt $load_H = 2.400 \text{ MPa}$ und die Dauerfestigkeitsgrenze $load_D = 1.500 \text{ MPa}$. Alle Parameter, welche für die Normberechnung erforderlich sind, wurden in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Parameter für die Normberechnung nach DIN 3990-2

Kategorie	Name des Parameters	Variable	Parameterhöhe bei Referenz-Testkonfiguration
Getriebe	Achsabstand	a	71 mm
	Übersetzungsverhältnis	i	1,952381
	Drehzahl Abtrieb	n_2	1.300 min ⁻¹
Festigkeitskennwerte	Dauerfestigkeitswert für Flankenpressung (DIN 3990-5 Abschnitt 4)	$load_D$	1.500 MPa
	maximale Spannung	$load_H$	2.400 MPa
Sicherheiten	Mindestsicherheit für Flankenpressung	$S_{H,min}$	1,0
Losrad	Zähnezahl Rad	z_2	41
	Kopfkreisdurchmesser Rad	d_{a2}	98,9 mm
	Grundkreisdurchmesser Rad	d_{b2}	86,7724 mm
Material (20MnCr5)	Zähnezahl Ritzel	z_1	21
	Normalmodul	m_n	2 mm
	Stirnmodul	m_t	2,245 mm
	Nennw. Profilverschiebungsfaktor	x_{prof}	0,5
	Zahnhöhe (Zahnfuß- zu Zahnkopfkreis)	h	5,399 mm
	Profilüberdeckung	ε_α	1,7831
	Sprungüberdeckung	ε_β	1
	Gesamtüberdeckung	ε_γ	2,8669
	Wälzkreisdurchmesser	d_w	48,0968 mm
	Teilkreisdurchmesser	d_1	47,1450 mm
	Kopfkreisdurchmesser Ritzel	d_{a1}	53,952 mm
	Grundkreisdurchmesser Ritzel	d_{b1}	44,4444 mm

Die Grundgleichung zur Berechnung der auftretenden Flankenpressung σ_H lautet:

$$\sigma_H = Z_D \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \quad (5.1)$$

Damit wird die Flächenpressung im Wälzpunkt auf die für die Grübchenbildung relevante Pressung im Eingriffspunkt umgerechnet. Über die Faktoren K_i können unter anderem die ungleichförmige Kraftverteilung über die Zahnbreite und dynamische Einflüsse berücksichtigt werden. Die nominelle Flankenpressung σ_{H0} repräsentiert eine fehlerfreie Verzahnung unter Nenndrehmoment T_{nom} .

Bestimmung des Vorwissens

Sowohl die Variation des Antriebsmoments als auch die Variation der Zahnradbreite führen in der Normberechnung zu einer Änderung der Lastwechselzahl, für welche das Zahnrad laut DIN 3990-2 ausgelegt ist. Diese Lastwechselzahl kann damit als Teil des Vorwissens in der Zuverlässigkeitstestplanung verwendet werden und eignet sich damit auch in der Anwendung der anforderungsgerechten Produktauslegung. Der von Stahl et al. [140] ermittelte Weibull-Formparameter $b = 3,2$ für den Ausfallmechanismus Grübchen wird als Teil des Vorwissens verwendet, um das Ausfallverhalten zu charakterisieren. Als Wöhlerkoeffizient wurde entsprechend der DIN 3990 $k = 12,6255$ gewählt, welches mit Hilfe der ermittelten statischen Festigkeit und der Dauerfestigkeit für den Ausfallmechanismus Grübchen ermittelt wurde.

Bestimmung des optimalen Auslegungspunkts

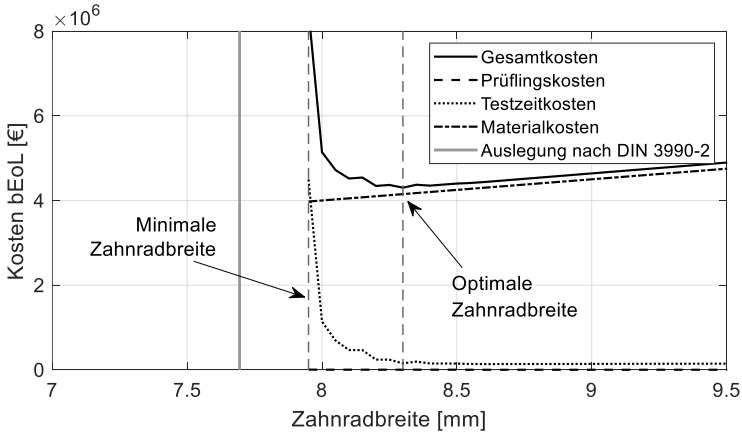


Abbildung 5.8: Verlauf der Teil- und Gesamtkosten des bEoL in Abhängigkeit der gewählten Zahnradbreite

Für die Simulation des vorgestellten Anwendungsbeispiels wurde der Auslegungspaarparameter des Bauteils (gemeinsame Zahnradbreite b_{gem}) im Bereich von 3 mm bis 30 mm in feiner Abstufung variiert, um für die Anwendung übliche Zahnradbreiten

mitberücksichtigen zu können. Die Verläufe in Abbildung 5.8 zeigen für jede simulierte Zahnradbreite die jeweils günstigste (Gesamtkosten) Testkonfiguration für den bEoL und die dazugehörigen Prüflingskosten, Testzeitkosten und Materialkosten. Dabei erfüllen die dargestellten Testkonfigurationen alle Randbedingungen, welche in der Systembeschreibung des Anwendungsbeispiels gegeben sind.

Ähnlich wie im Anwendungsbeispiel Wöhlerprobe ist auch in Abbildung 5.8 für den bEoL eine minimale Zahnradbreite zu erkennen ($b_{gem} = 7,95 \text{ mm}$). Diese ist mindestens erforderlich, um mit einem bEoL die geforderten Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen nachzuweisen, ohne dass die Belastung im Kurzzeitfestigkeitsbereich liegt. Das Minimum der Gesamtkosten liegt bei $b_{opt,bEoL} = 8,3 \text{ mm}$. Dies entspricht dem Optimum aus Material- und Erprobungskosten. Diese verhalten sich ähnlich dem Anwendungsbeispiel Wöhlerprobe. Die zur Einhaltung der Lebensdaueranforderung $1,8 \cdot 10^7$ Schwingspiele aus der Normberechnung nach DIN 3990-2 ermittelte Zahnradbreite beträgt $b_{DIN3990} = 7,69 \text{ mm}$. Für die gegebenen Randbedingungen kann die aus der Norm berechnete Zahnradbreite nicht mit den simulierten bEoL-Testkonfigurationen nachgewiesen werden. Für das Anwendungsbeispiel bedeutet dies, dass für eine Zahnradbreite, welche durch Anwendung der Norm bestimmt wurde der Nachweis der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen mit Hilfe eines bEoL auch mit einer hohen Prüflingszahl nicht möglich ist.

Fazit

Für das Anwendungsbeispiel Zahnradbreite und den gewählten Auslegungsparameter gemeinsame Zahnradbreite kann mit Vergrößerung der Zahnradbreite die Lebensdauer des Zahnrads für den Ausfallmechanismus Grübchen erhöht werden. Dies führt zu höheren Kosten zur Herstellung der für den Nachweis erforderlichen Prüflinge (Prüflingskosten) und zu höheren Kosten in der Serienfertigung des Produkts (Anzahl verkaufter Bauteile). Beide Kosten sind jeweils direkt abhängig von der Breite der Zahnräder und damit vom Volumen und vom Materialpreis des Produkts. Neben diesen höheren Kosten in der Produktauslegung sinken die Kosten, welche aus der Zuverlässigkeitstestplanung resultieren, da bei gleichem erweiterten Zuverlässigkeitsziel weniger Prüflinge zum Zuverlässigkeitsnachweis benötigt werden und die Erprobungsdauer dieser Prüfling geringer ist.

Das Gesamtkostenoptimum kann ähnlich wie im Anwendungsbeispiel Wöhlerprobe durch eine Vielzahl an Parametern und Parameterkombinationen beeinflusst werden. In der Anwendung ist daher die genaue Berücksichtigung aller Kosten, verkaufter Produkte, aber auch des Vorwissens in der anforderungsgerechten Produktauslegung erforderlich, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig abgedeckt werden kann.

5.4 Zusammenfassung und Fazit

Beide Beispiele zeigen, dass die Zuverlässigkeitstestplanung bereits in der Produktauslegung berücksichtigt werden muss, um die Gesamtkosten zu reduzieren und die Nachweisbarkeit der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen von Bauteilen zu gewährleisten. Produktauslegung und Testplanung beeinflussen sich gegenseitig, weshalb zur Reduktion der Gesamtkosten sowohl eine Anpassung von Auslegungsparametern als auch der Testkonfigurationsparameter möglich ist.

Die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests trägt damit einen wichtigen Teil zur Auflösung des Zielkonflikts der steigenden Zuverlässigkeitsanforderungen bei gleichzeitiger Reduktion der Entwicklungskosten bei. Die Abhängigkeit der Zuverlässigkeitstestplanung von der Überdimensionierung eines Bauteils ermöglicht die Verbindung zur anforderungsgerechten Produktauslegung. Dabei dient die Produktdimensionierung als zentraler Stellhebel für belastungsgerecht dimensionierte Produkte, welche gleichzeitig mit geringem Erprobungsaufwand ausreichend abgesichert werden können. Damit beeinflussen sich die Produktauslegung und die Zuverlässigkeitstestplanung gegenseitig. Dies führt zu einer Reduktion der Entwicklungskosten eines Bauteils.

Im Falle von fehlender Erfüllbarkeit der Lebensdauieranforderungen eines Bauteils oder gesteigerter Anforderungen an das Produkt ermöglicht die Verknüpfung von Zuverlässigkeitstestplanung und Produktauslegung durch Integration der *Probability of Test Success* die Auswahl einer Testkonfiguration, welche beispielsweise eine höhere Lebensdauer nachweist. Der Aufwand hierfür lässt sich über die Testzeit- und über die Prüflingskosten (zusammen: Erprobungskosten) quantifizieren. Kann eine Testkonfiguration die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsziele eines Bauteils nicht nachweisen, kann zum einen die Zuverlässigkeitstestplanung angepasst werden. Alternativ ist die Beeinflussung des Vorwissens durch Anpassung eines Auslegungsparameters möglich. Das aus der Produktauslegung abgeleitete Vorwissen dient als Basis für die Zuverlässigkeitstestplanung. Das Vorwissen kann, abhängig von der Wahl der Höhe des Auslegungsparameters, beispielsweise aus Datenbanken abgeleitet werden oder in der Normberechnung bestimmt werden.

Die *Probability of Test Success* ermöglicht in der anforderungsgerechten Produktauslegung damit die Bestimmung der minimal möglichen Dimensionierung eines Bauteils, sodass ein Zuverlässigkeitsnachweis noch möglich ist. Darüber hinaus zeigen die Anwendungsbeispiele, dass es möglich ist, die Gesamtkosten zu minimieren, indem gleichermaßen die Auslegungskosten und die Erprobungskosten betrachtet werden.

6 Zusammenfassung & Ausblick

Beschleunigte Lebensdauertests sind für die Erprobung und den Zuverlässigkeitsnachweis unverzichtbar. Neben dem *Success-Run-Test* sind sie die gängigsten in der Industrie verwendeten Erprobungsstrategien. Die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Testnachweises ist dabei stark abhängig von der Vielzahl an Parametern, welche in der Planung dieser Tests berücksichtigt werden muss.

Im Falle eines fehlgeschlagenen Zuverlässigkeitsnachweises muss entweder das Bauteil neu ausgelegt oder der Nachweistest neu geplant werden. In der Industrie wird dabei meist das Bauteil angepasst, d. h. überdimensioniert, um in der nachfolgenden Erprobung die Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen sicher nachweisen zu können. Dieses Vorgehen führt zu Entwicklungsschleifen, welche die Entwicklungszeit, den Entwicklungsaufwand und die Entwicklungs- sowie Materialkosten erhöhen und zu Überdimensionierung führen.

Die vorliegende Arbeit betrachtet die *Probability of Test Success* als entscheidenden Parameter des erweiterten Zuverlässigkeitsziels, bei dem die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Zuverlässigkeitsnachweises durch Planung effizienter Zuverlässigkeitstests maximiert werden kann, um bereits in der Auslegung eines Produkts die Zuverlässigkeitstestplanung zu berücksichtigen. Damit ist es möglich, die Grenzen des Zuverlässigkeitsnachweises und damit auch die Grenzen der Auslegung unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu finden und Leichtbauanwendungen kostenoptimal auszulegen und zuverlässigkeitstechnisch abzusichern.

In dieser Arbeit wurde das bestehende Konzept der *Probability of Test Success* erweitert, um die praxisrelevanten beschleunigten *End-of-Life-Tests* mit zu berücksichtigen. Das erweiterte Konzept orientiert sich dabei am Basiskonzept, ergänzt dieses jedoch unter anderem um ein Lebensdauermodell. Zusätzlich wurde der Nachweiszeitpunkt als Zielkriterium des erweiterten Konzepts eingeführt und umfangreiche Parameterstudien im gesamten Parameterbereich durchgeführt, um Handlungsempfehlungen für die Planung effizienter Zuverlässigkeitstests abzuleiten. Diese umfassen Empfehlungen zur Berücksichtigung von beschleunigten *Success-Run-Tests* sowie zu Zensierungsstrategien und zusätzlichen beschleunigten Lastniveaus. Konvergenzkriterien verbessern die Effizienz der rechenzeitintensiven Simulationen. Die Simulationszeit wurde weiterhin durch die Einführung eines Nachweiszeitpunktschätzers

verbessert, welcher auf Basis eines neuronalen Netzes die aufwendige Simulation durch die hohe Genauigkeit des Schätzers zum Teil vollständig vermeidet. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Ergebnisgüte des neuronalen Netzes stark von der einer Regressionsgleichung abhebt und sich dieses daher besser eignet.

Bestehende Optimalitätskriterien haben das Ziel, einzelne Eigenschaften einer Erprobungsstrategie zu verbessern. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die gängigen Optimalitätskriterien dabei für den Zuverlässigkeitsnachweis nicht sinnvoll sind. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die meistens verwendeten Optimalitätskriterien nicht zum eigentlichen Ziel der Zuverlässigkeitstestplanung zum Zuverlässigkeitsnachweis passen. Dagegen kann der Nachweiszeitpunkt, ermittelt durch die Anwendung des erweiterten Konzepts der *Probability of Test Success*, als Optimierungsziel verwendet werden und ist daher für den Zuverlässigkeitsnachweis zielführend. Die Notwendigkeit einer Unterscheidung des Optimierungsziels wurde somit erstmals anwendungsnah gezeigt.

Eine Einordnung des erweiterten Konzepts in die Produktauslegung wurde anschließend vorgenommen. Dabei wurde, basierend auf einer umfangreichen Datenbank an Wählerversuchen, für ein einfaches Wählermodell eine Gesamtkostenoptimierung vorgenommen, welche das Potenzial der Vorgehensweise zeigt. Diese Optimierung umfasst zum einen die Zuverlässigkeitstestplanung, welche durch die Gesamterprobungskosten, bestehend aus Gesamterprobungsdauer und Gesamtprüflingszahl, repräsentiert wird. Abhängig vom gewählten Durchmesser des zu testenden Bauteils variieren die Gesamterprobungskosten, da große Überdimensionierung einen geringeren Erprobungsaufwand (Kosten, Zeit, Anzahl Prüflinge) zum Nachweis des gegebenen erweiterten Zuverlässigkeitsziels bedingt. Zum anderen beinhaltet sie die Produktauslegung, repräsentiert durch die Materialkosten, welche mit größerem Durchmesser ebenfalls steigen.

In einem Anwendungsbeispiel wurde die Zahnradbreite als Auslegungsparameter im Gesamtkonzept verwendet, um ein Zahnrad gegen Grübchen abzusichern. Das Vorwissen wurde anhand der Normberechnung nach DIN 3990-2 bestimmt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Auslegung nach Norm mit einem beschleunigten End-of-Life-Test auch bei hoher Prüflingszahl nicht zuverlässigkeitstechnisch abgesichert werden kann. Die Zuverlässigkeitstestplanung für einen unbeschleunigten End-of-Life-Test zeigt, dass die aus der Norm bestimmte Zahnradbreite deutlich verringert werden kann, ohne die Zuverlässigkeits- und Lebensdauernanforderungen zu unterschreiten. Auslegung nach Norm führt demnach zu einer hohen Überdimensionierung der Zahnradbreite. Auch sind die Gesamtkosten, welche sich aus der Normauslegung ergeben, nicht optimal und können reduziert werden.

Für die untersuchten Anwendungen konnte gezeigt werden, dass das erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* und die Vorgehensweise zur anforderungsge-rechten Produktauslegung das Potenzial besitzt, die Zuverlässigkeitstestplanung bereits in der Produktauslegung zu berücksichtigen und die Gesamtkosten zu reduzieren. Dieses Potenzial der Berücksichtigung der Zuverlässigkeitstestplanung bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung besteht insbesondere für Leichtbauanwendungen, bei welchen minimale Dimensionierung zentral ist, die Erfüllung der Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen jedoch gewährleistet sein muss. Die Nachweisbarkeit eines Zuverlässigkeitsziels kann mit dem erweiterten Konzept nun erstmals auch für die praxisrelevanten beschleunigten *End-of-Life*-Erprobungsstrategien berücksichtigt und quantifiziert werden. Der Nachweiszeitpunkt, bestimmt über die *Probability of Test Success*, eignet sich außerdem als geeignetes Optimalitätskriterium in der Zuverlässigkeitstestplanung, da für den Zuverlässigkeitsnachweis eine Maximierung des Nachweiszeitpunkts zentral ist. Bestehende Richtlinien zur Planung effizienter Zuverlässigkeitstests vernachlässigen dagegen die Effizienz einer Erprobungsstrategie. Die Anwendung des neuronalen Netzes ermöglicht eine hochgenaue Schätzung und damit das Finden optimaler und effizienter Erprobungsstrategien mit sehr geringem Rechenaufwand. Zusätzlich besteht das Potenzial, Überdimensionierung auf Grund mangelnden Erprobungsaufwands zu reduzieren. Dabei kann sowohl die minimale Dimensionierung eines Bauteils gefunden werden, für welche gerade noch das erweiterte Zuverlässigkeitsziel nachgewiesen werden kann, aber auch das Optimum, bestehend aus Gesamterprobungskosten und Materialkosten (abhängig vom Auslegungsparameter Durchmesser) gefunden werden.

Die *Probability of Test Success* begründet ein weites Feld möglicher Forschungsthemen in der Zuverlässigkeitstestplanung. Diese umfassen die Nutzung und die Erweiterung des Konzepts. Dazu zählen beispielsweise die Berücksichtigung der dreiparametrischen Weibullverteilung als Vorwissen, die Integration unscharfen Vorwissens und die Anwendung von Strategien zur Verringerung der erforderlichen Prüflingszahl durch Bayes'sche Ansätze. Auch der *Bias* der Maximum-Likelihood-Schätzung für kleine Stichprobengrößen erfordert detaillierte Untersuchungen, um die Abweichung der Parameterschätzungen zu reduzieren und verlässlichere Ausfallverhaltens- und Lebensdauermodellparameter im erweiterten Konzept der *Probability of Test Success* zu erhalten.

Der Nachweiszeitpunktschätzer und damit die sehr schnelle Möglichkeit, mit Hilfe des neuronalen Netzes optimale und effiziente Testkonfigurationen zu finden, ermöglicht die *Real-Time-Anpassung* eines Tests, da zu jedem Zeitpunkt und nach jedem Ausfall das Vorwissen neu bestimmt und damit auch der Test entsprechend angepasst

werden kann. Die Entwicklung eines Regelalgorithmus zur automatischen, zustandsabhängigen Anpassung der optimalen Teststrategie ist damit möglich. Während der Durchführung der Lebensdauertests kann schnell auf die aktuellen Randbedingungen für die Tests reagiert werden. Dies ist beispielsweise durch Änderung der ausstehenden Prüflingszahlen oder Variation der Höhe der beschleunigten Lastniveaus möglich.

Die Planung von Zuverlässigkeitstests kann zukünftig genutzt werden, um neben Zuverlässigkeits- auch Verfügbarkeitsanforderungen eines Systems nachzuweisen. Damit kann auch die Wahrscheinlichkeit des Nachweises von Zielen, welche neben der Zuverlässigkeit auch die Instandhaltbarkeit zum Ziel haben, erhöht werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde nur ein Bauteil mit einem Ausfallmechanismus betrachtet. Eine Erweiterung des erweiterten Konzepts auf Systeme sollte Ziel der Forschung sein. Damit kann ein effizienter Zuverlässigkeitsnachweis von multiplen und konkurrierenden Ausfallmechanismen, aber auch von Systemen bestehend aus mehreren Komponenten, durchgeführt werden. Im Umkehrschluss kann dann auch der Absicherungsgrad eines Systems in Abhängigkeit der bereits durchgeführten Tests quantifiziert werden. Weiterer Forschungsbedarf betrifft die nichtlineare Schadensakkumulation, die Berücksichtigung einer ausfallfreien Zeit in der Weibullanalyse, der lastabhängige Weibull-Formparameter und Belastungsart im Test, beispielsweise Step-Stress-Testing.

Erweiterungsmöglichkeiten besitzt das vorgeschlagene erweiterte Konzept der *Probability of Test Success* in der Reduzierung des MLE-Bias bei kleinen Stichprobengrößen, um die Parameterschätzung zu verbessern. Die *Probability of Test Success* selbst kann in die Konzepte der *Coverage Probability* und Hypothesentests zur Bestimmung des Fehler 2. Ordnung eingeordnet werden, um zukünftig analytische Lösungen zur Bestimmung der *Probability of Test Success* zu finden.

Für die entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitsauslegung besitzt insbesondere die Einordnung in den Produktentwicklungsprozess enormes Potenzial, sodass zukünftig zum einen die Nachweisbarkeit von Zuverlässigkeitszielen in der Produktentwicklung berücksichtigt wird, zum anderen Überdimensionierung reduziert werden kann. Auch die Erweiterung des verwendeten Kostenmodells um Garantie- und Kulanzkosten, die Übertragung der Vorgehensweise auf andere Auslegungsparameter und Lebensdauermodelle und die gesamtheitliche Betrachtung der Lebensdauerzykluskosten versprechen großes Potenzial für die entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitsauslegung.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Bertsche and G. Lechner, *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Springer-Verlag, 2004.
- [2] R. B. Abernethy, *The New Weibull handbook: reliability and statistical analysis for predicting life, safety, supportability, risk, cost and warranty claims*. Dr. Robert B. Abernethy, 2006.
- [3] W. Nelson, *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*, vol. 1706, no. October. Wiley, 2009.
- [4] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE, "Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Band 3.2: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten," *Berlin VDA.QMC*. 2004.
- [5] L. Srivani, B. K. Kumar, S. A. V. S. Murty, and P. Swaminathan, "Accelerated life testing of field programmable gate arrays," in *2010 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard-Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods (ICRESH)*, 2010, pp. 329–334.
- [6] P. Vassiliou and A. Mettas, "Understanding accelerated life-testing analysis," in *Annual Reliability and Maintainability symposium, Tutorial Notes*, 2001, pp. 1–21.
- [7] S. N. Luko, "Attribute Reliability and the Success Run: A Review," *SAE Trans.*, pp. 251–261, Sep. 1997.
- [8] B. Bertsche and G. Lechner, *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Springer-Verlag, 2004.
- [9] A. Meyna and B. Pauli, *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik*, vol. 2. Hanser, Muenchen, 2010.
- [10] G. Yang, *Life cycle reliability engineering*. John Wiley & Sons, 2007.
- [11] G. Härtler, *Statistik für Ausfalldaten*. Springer, 2016.
- [12] A. Krolo, *Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen*. Inst. für Maschinenelemente, 2004.
- [13] W. Q. Meeker and L. A. Escobar, "Statistical methods for reliability data," *A. Wiley Intersci. Publ.*, p. 680, 1998.
- [14] W. Q. Meeker and L. A. Escobar, "Pitfalls of accelerated testing," *IEEE Trans. Reliab.*, 1998.
- [15] L. A. Escobar and W. Q. Meeker, "A review of accelerated test models," *Stat. Sci.*, pp. 552–577, 2006.
- [16] W. Q. Meeker, G. Sarakakis, and A. Gerokostopoulos, "More pitfalls of accelerated tests," *J. Qual. Technol.*, 2013.
- [17] M. Modarres, M. Amiri, and C. Jackson, *Probabilistic Physics of Failure*

- Approach to Reliability*. 2017.
- [18] A. Gerokostopoulos, H. Guo, and E. Pohl, "Determining the right sample size for your test: Theory and application," in *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium Tutorial Notes*, 2015.
- [19] S. A. Van der Wiel and W. Q. Meeker, "Accuracy of approx confidence bounds using censored Weibull regression data from accelerated life tests," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 39, no. 3, pp. 346–351, Aug. 1990.
- [20] H. Ma and W. Q. Meeker, "Strategy for planning accelerated life tests with small sample sizes," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 59, no. 4, pp. 610–619, Dec. 2010.
- [21] K. Denkmayr, H. Hick, and U. Sauerwein, "Die Load-Matrix. Der Schluessel zum "intelligenten Dauerlauf," *Mot. Zeitschrift*, vol. 64, 2003.
- [22] W. Nelson and W. Q. Meeker, "Theory for Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions," *Technometrics*, vol. 20, no. 2, pp. 171–177, May 1978.
- [23] W. Q. Meeker, "A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Distributions and Type I Censoring," *Technometrics*, vol. 26, no. 2, pp. 157–171, May 1984.
- [24] G. Yang, "Optimum constant-stress accelerated life-test plans," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 43, no. 4, pp. 575–581, 1994.
- [25] S.-R. Huang and S.-J. Wu, "Reliability sampling plans under progressive type-I interval censoring using cost functions," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 57, no. 3, pp. 445–451, 2008.
- [26] B. X. Wang, K. Yu, and Z. Sheng, "New inference for constant-stress accelerated life tests with weibull distribution and progressively type-ii censoring," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 63, no. 3, pp. 807–815, 2014.
- [27] L. Gao, Z.-S. Ye, W. Chen, P. Qian, and J. Pan, "Accelerated Life Test Planning for Minimizing Misclassification Risks," *IEEE Trans. Reliab.*, 2020.
- [28] I. Arizono, Y. Kawamura, and Y. Takemoto, "Reliability tests for Weibull distribution with variational shape parameter based on sudden death lifetime data," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 189, no. 2, pp. 570–574, 2008.
- [29] H. Ahmed and A. Chateaneuf, "Optimal number of tests to achieve and validate product reliability," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 131, pp. 242–250, 2014.
- [30] T.-R. Tsai, Y.-T. Lu, and S.-J. Wu, "Reliability sampling plans for Weibull distribution with limited capacity of test facility," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 55, no. 3, pp. 721–728, 2008.
- [31] B. L. Vlcek, R. C. Hendricks, and E. V. Zaretsky, "Monte Carlo simulation of sudden death bearing testing," *Tribol. Trans.*, vol. 47, no. 2, pp. 188–199, 2004.
- [32] H. K. Hsieh, "Average type-II censoring times for the 2-parameter Weibull distribution," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 43, no. 1, pp. 91–96, 1994.
- [33] J. I. McCool, "Design of sudden death tests for estimation of a Weibull percentile," *J. Test. Eval.*, vol. 37, no. 4, pp. 311–315, 2009.
- [34] H. Schneider, "Failure-censored variables-sampling plans for lognormal and Weibull distributions," *Technometrics*, vol. 31, no. 2, pp. 199–206, 1989.
- [35] K. W. Fertig and N. R. Mann, "Life-test sampling plans for two-parameter

- Weibull populations," *Technometrics*, vol. 22, no. 2, pp. 165–177, 1980.
- [36] W. B. Nelson, "A bibliography of Accelerated Test Plans," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 54, no. 2, pp. 194–197, Jun. 2005.
- [37] W. Q. Meeker, L. A. Escobar, and Y. Hong, "Using accelerated life tests results to predict product field reliability," *Technometrics*, vol. 51, no. 2, pp. 146–161, 2009.
- [38] W. B. Nelson, *Applied life data analysis*, vol. 521. John Wiley & Sons, 2003.
- [39] E. A. Elsayed and H. Zhang, "Design of optimum simple step-stress accelerated life testing plans," in *Recent Advances in Stochastic Operations Research*, World Scientific, 2007, pp. 23–38.
- [40] R. Miller and W. Nelson, "Optimum Simple Step-Stress Plans for Accelerated Life Testing," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. Vol. R-32, no. 1, pp. 59–6, 1983.
- [41] J.-W. W. Park and B.-J. J. Yum, "Optimal design of accelerated life tests with two stresses," *Nav. Res. Logist.*, vol. 43, no. 6, pp. 863–884, 1996.
- [42] H. Guo, R. Pane, and R. Pan, "D-optimal reliability test design for two-stress accelerated life tests," in *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007, pp. 1236–1240.
- [43] W. Q. Meeker and G. J. Hahn, *How to plan an accelerated life test: some practical guidelines*. American Society for Quality Control, Statistics Division, 1985.
- [44] V. Fedorov, "Optimal experimental design," *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 2, no. 5, pp. 581–589, Sep. 2010.
- [45] W. Q. Meeker and L. A. Escobar, "A Review of Recent Research and Current Issues in Accelerated Testing," *Int. Stat. Rev. / Rev. Int. Stat.*, vol. 61, no. 1, pp. 147–168, 1993.
- [46] Loon-Ching Tang and Guiyu Yang, "Planning multiple levels constant stress accelerated life tests," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2002 Proceedings (Cat. No.02CH37318)*, 2002, pp. 338–342.
- [47] L.-C. Tang, A.-P. Tan, and S.-H. Ong, "Planning accelerated life tests with three constant stress levels," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 42, no. 2–4, pp. 439–446, Apr. 2002.
- [48] S.-J. Wu and S.-R. Huang, "Planning two or more level constant-stress accelerated life tests with competing risks," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 158, pp. 1–8, Feb. 2017.
- [49] L.-C. Tang and K. Xu, "A multiple objective framework for planning accelerated life tests," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 54, no. 1, pp. 58–63, 2005.
- [50] G. Yang, "Accelerated life test plans for predicting warranty cost," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 59, no. 4, pp. 628–634, 2010.
- [51] H. K. T. Ng, N. Balakrishnan, and P. S. Chan, "Optimal sample size allocation for tests with multiple levels of stress with extreme value regression," *Nav. Res. Logist.*, vol. 54, no. 3, pp. 237–249, 2007.
- [52] P. S. Chan, N. Balakrishnan, H. Y. So, and H. K. T. Ng, "Optimal sample size allocation for multi-level stress testing with exponential regression under type-I censoring," *Commun. Stat. Methods*, vol. 45, no. 6, pp. 1831–1852, 2016.
- [53] C. Y. Ka, P. S. Chan, H. K. T. Ng, and N. Balakrishnan, "Optimal sample size

- allocation for multi-level stress testing with Weibull regression under Type-II censoring," *Statistics (Ber)*, vol. 45, no. 3, pp. 257–279, 2011.
- [54] D. S. Bai, M. S. Kim, and S. H. Lee, "Optimum Simple Step-Stress Accelerated Life Tests with Censoring," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 38, no. 5, pp. 528–532, 1989.
- [55] "DIN 50100: Schwingfestigkeitsversuch--Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile." Beuth-Verlag Berlin, Germany, 2016.
- [56] O. Buxbaum, *Betriebsfestigkeit. Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile*. 1986.
- [57] IEC, "IEC 62506:2013 - IEC-Normen - VDE VERLAG." [Online]. Available: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/219949/iec-62506-2013.html>. [Accessed: 03-Aug-2020].
- [58] D. Radaj and M. Vormwald, "Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure." Springer, 2007.
- [59] E. Haibach, *Betriebsfestigkeit*. Springer-Verlag, 2006.
- [60] B. Bertsche, P. Göhner, U. Jensen, W. Schinköthe, and H.-J. Wunderlich, *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Springer-Verlag, 2009.
- [61] E. Castillo and A. Fernandez-Canteli, *A unified statistical methodology for modeling fatigue damage*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [62] H.-J. Bargel and G. Schulze, *Werkstoffkunde*. 2008.
- [63] M. Dazer, M. Stohrer, S. Kemmler, and B. Bertsche, "Planning of reliability life tests within the accuracy, time and cost triangle," in *2016 IEEE Accelerated Stress Testing and Reliability Conference, ASTR 2016*, 2016.
- [64] A. Grundler, M. Dazer, T. Herzig, and B. Bertsche, "Considering Multiple Failure Mechanisms in Optimal Test Design," in *7th International Conference Integrity-Reliability-Failure*, 2020, pp. 673–682.
- [65] M. Dazer, "Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen," Institut für Maschinenelemente, Stuttgart, 2019.
- [66] M. Dazer, D. Brautigam, T. Leopold, and B. Bertsche, "Optimal Planning of Reliability Life Tests Considering Prior Knowledge," in *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2018, vol. 2018-January.
- [67] A. Kamusella, "Probabilistische Simulation dynamischer Systeme am Beispiel eines Induktionsmotors," 2014.
- [68] T. Martini, "Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Darstellung der Modellgenauigkeit des flugmechanischen Modells eines unbemannten Forschungshubschraubers," Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2018.
- [69] J. E. Gentle, W. K. Härdle, and Y. Mori, *Handbook of computational statistics: Concepts and methods*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [70] C. Theis and W. Kernbichler, "Grundlagen der Monte Carlo Methoden," *TU Graz*, 2002.
- [71] S. Raychaudhuri, "Introduction to Monte Carlo Simulation," in *Proceedings of*

- the 40th Conference on Winter Simulation*, 2008, pp. 91–100.
- [72] B. Lapeyre, "Introduction to Monte-Carlo Methods," *Lect. Halmstad, Sweden*, pp. 2–4, 2007.
- [73] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, "Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code," *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, 1979.
- [74] M. Stein, "Large sample properties of simulations using latin hypercube sampling," *Technometrics*, vol. 29, no. 2, pp. 143–151, 1987.
- [75] A. B. Owen, "A Central Limit Theorem for Latin Hypercube Sampling," *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 54, no. 2, pp. 541–551, Jan. 1992.
- [76] N. Packham and W. M. Schmidt, "Latin Hypercube Sampling with Dependence and Applications in Finance," *SSRN Electron. J.*, Dec. 2011.
- [77] J. C. Helton and F. J. Davis, "Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 81, no. 1, pp. 23–69, Jul. 2003.
- [78] B. Minasny and A. B. McBratney, "A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information," *Comput. Geosci.*, vol. 32, no. 9, pp. 1378–1388, Nov. 2006.
- [79] P. Glassermann, *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. 2013.
- [80] H. Janssen, "Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 109, pp. 123–132, 2013.
- [81] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*. 2009.
- [82] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke, and R. Weiber, *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung*, vol. 14. 2016.
- [83] L. V Fausett, *Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms and applications*. Pearson Education India, 2006.
- [84] C. C. Aggarwal and others, "Neural networks and deep learning," *Springer*, vol. 10, pp. 973–978, 2018.
- [85] M. Henß and B. Bertsche, "AutoEncoder basierte automatisierte Zustandsdiagnose von Wälzlagern," in *Tagung Technische Zuverlässigkeit, TTZ2019*, 2019.
- [86] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, vol. 60, no. 1. 2012.
- [87] N. Tishby and N. Zaslavsky, "Deep learning and the information bottleneck principle," in *2015 IEEE Information Theory Workshop, ITW 2015*, 2015.
- [88] B. D. Ripley, *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge university press, 2007.
- [89] K. Levenberg, "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares," 1944.
- [90] D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963.
- [91] M. T. Hagan and M. B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 5, no. 6, pp. 989–993, 1994.
- [92] C. Stöber, G. Gruber, H. Krehmer, J. Stuppy, and C. Westphal, "Herausforderung

- Design for X (DfX)," in *DFX 2009: Proceedings of the 20th Symposium on Design for X*, 2009, pp. 101–111.
- [93] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit - Klaus Ehrlenspiel, Harald Meerkamm - Google Books*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [94] M. Silverman and A. Kleyner, *What is design for reliability and what is not?* 2012.
- [95] Z. Huang and Y. Jin, "Reliability prediction methods: a survey and selection for mechanical design-for-reliability," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2009, vol. 49002, pp. 759–771.
- [96] D. Raheja, D. Crowe, and L. J. Gullo, *Design for Reliability*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [97] A. Taylor, "Design for Reliability Concepts, Causes and Identification," *Des. 1St*, pp. 1–8, Jul. 2012.
- [98] A. Mettas, "Design for reliability: Overview of the process and applicable techniques," *Int. J. Performability Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 577–586, 2010.
- [99] W. G. Ireson, C. F. Coombs Jr, and R. Y. Moss, *Handbook of reliability engineering and management 2/E*. McGraw Hill Professional, 1996.
- [100] E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel, and S. Singhal, *Engineering design reliability handbook*. CRC Press, 2004.
- [101] B. S. El-Haik and N. P. Suh, "Axiomatic quality," *Hoboken, New Jersey, United States John Wiley Sons Inc*, 2005.
- [102] Z. Huang, "Design-for-reliability Starting from Conceptual Design," University of Southern California, 2010.
- [103] L. Paganin and M. Borsato, "A critical review of design for reliability-a bibliometric analysis and identification of research opportunities," *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 1421–1428, 2017.
- [104] A.-M. Lee, "Stress-strength interference models in reliability," 1989.
- [105] G. Augusti, A. Baratta, and F. Casciati, *Probabilistic methods in structural engineering*. CRC Press, 1984.
- [106] G. Taguchi, "Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes," 1986.
- [107] K. Grantham Lough, R. B. Stone, and I. Tumer, "The risk in early design (RED) method: likelihood and consequence formulations," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2006, vol. 4255, pp. 1119–1129.
- [108] A. Farhang Mehr and I. Y. Tumer, "Risk-based decision-making for managing resources during the design of complex space exploration systems," *J. Mech. Des.* 128(4)1014, 2006.
- [109] S. Askari and M. Nourani, "A design for reliability methodology based on selective overdesign," in *2010 5th International Design and Test Workshop*, 2010, pp. 73–77.
- [110] T. C. Kuo, S. H. Huang, and H.-C. C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': Concepts, applications, and perspectives," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 41,

- no. 3, pp. 241–260, Dec. 2001.
- [111] K. M. M. Tant, A. J. Mulholland, A. Curtis, and W. L. Ijomah, “Design-for-testing for improved remanufacturability,” *J. Remanufacturing*, vol. 9, no. 1, pp. 61–72, Apr. 2019.
- [112] A. Coppola, “A Design Guide for Built-in-Test (BIT),” 1979.
- [113] M. E. Lovelace, “Design-for-test techniques,” in *1997 IEEE Autotestcon Proceedings AUTOTESTCON'97. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Systems Readiness Supporting Global Needs and Awareness in the 21st Century*, 1997, pp. 390–393.
- [114] M. A. Valdebenito and G. I. Schuëller, *A survey on approaches for reliability-based optimization*, vol. 42, no. 5. Springer-Verlag, 2010, pp. 645–663.
- [115] C. D. Eamon and M. Rais-Rohani, “Integrated reliability and sizing optimization of a large composite structure,” *Mar. Struct.*, vol. 22, no. 2, pp. 315–334, Apr. 2009.
- [116] F. Jakob, “Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung,” 2017.
- [117] Y. L. Lee, S. Makam, S. McKelvey, and M. W. Lu, *Durability Reliability Demonstration Test Methods*, vol. 133. Elsevier Ltd, 2015, pp. 31–59.
- [118] G. Cowan, *Statistical data analysis*. Oxford university press, 1998.
- [119] V. V. Fedorov, *Theory of optimal experiments*. Elsevier, 2013.
- [120] H. Cramér, “A contribution to the theory of statistical estimation,” *Scand. Actuar. J.*, vol. 1946, no. 1, pp. 85–94, 1946.
- [121] K. Nordström, “The Concentration Ellipsoid of a Random Vector Revisited,” *Econom. Theory*, vol. 7, no. 3, pp. 397–403, 1991.
- [122] V. Fedorov, *Theory of optimal designs*. 1972.
- [123] A. Ly, M. Marsman, J. Verhagen, R. P. P. P. Grasman, and E. J. Wagenmakers, “A Tutorial on Fisher information,” *J. Math. Psychol.*, vol. 80, pp. 40–55, 2017.
- [124] C. Kwong-yu and L. Ming-chit, *Five Decades as a Mathematician and Educator: On the 80th Birthday of Professor Yung-Chow Wong*. World Scientific, 1995.
- [125] E. A. Rady, M. M. E. Abd El-Monsef, and M. M. Seyam, “Relationships among Several Optimality Criteria,” 2009.
- [126] H. Chernoff, “Locally Optimal Designs for Estimating Parameters,” *Ann. Math. Stat.*, vol. 24, no. 4, pp. 586–602, Dec. 1953.
- [127] A. Wald, “On the Efficient Design of Statistical Investigations,” *Ann. Math. Stat.*, vol. 14, no. 2, pp. 134–140, Jun. 1943.
- [128] J. Kiefer and J. Wolfowitz, “The Equivalence of Two Extremum Problems,” *Can. J. Math.*, vol. 12, pp. 363–366, Nov. 1960.
- [129] D. Papadopoulos, *Identification of continuous granular flow models*, vol. 490, no. 1. Institute of Physics Publishing, 2014.
- [130] F. E. Udwardia, “Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems,” *J. Eng. Mech.*, vol. 120, no. 2, pp. 368–390, 1994.
- [131] S. Van Aert, A. J. Den Dekker, A. Van Den Bos, and A. D. Van Dyck, “Statistical Experimental Design for Quantitative Atomic Resolution Transmission Electron Microscopy,” 2004.

- [132] S. B. Crary, L. Hoo, and M. Tennenhouse, "I-Optimality Algorithm and Implementation," in *Computational Statistics*, Physica-Verlag HD, 1992, pp. 209–214.
- [133] B. Bogacka and F. Wright, "Comparison of two design optimality criteria applied to a nonlinear model," *J. Biopharm. Stat.*, vol. 14, no. 4, pp. 909–930, 2004.
- [134] VDI, "VDI 4003 - Zuverlässigkeitsmanagement." 2007.
- [135] Y. Asiedu and P. Gu, "Product life cycle cost analysis: State of the art review," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 4, pp. 883–908, 1998.
- [136] F. Ellmer and K. Hinkelmann, *Datenbank und Auswertesystem Betriebsfestigkeit: Erhöhung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit schwingend beanspruchter Bauteile durch einen verbesserten Festigkeitsnachweis: FKM-Vorhaben Nr. 288; Abschlussbericht*. FKM, 2011.
- [137] K. L. Kotte and K.-G. Eulitz, *Datensammlung Betriebsfestigkeit – Zuverlässigkeit von Lebensdauerabschätzungen*, vol. 34, no. 9. John Wiley & Sons, Ltd, 2003, pp. 836–842.
- [138] "DIN EN 13306: Begriffe der Instandhaltung," *Berlin: Beuth*. 2001.
- [139] "DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Teil 1-5." Berlin: Beuth, 1987.
- [140] K. Stahl, K. Michaelis, B.-R. Höhn, and H. Winter, "Forschungsvorhaben Nr. 304 'Lebensdauerstatistik,'" 1999.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Thomas Herzig

Geburtstag /-ort: 13.06.1989 in Aalen

Ausbildung & Beruflicher Werdegang

09/99 – 06/07: Theodor-Heuss-Gymnasium Aalen

10/08 – 11/11: Bachelor-Studium Maschinenbau, Universität Stuttgart

10/11 – 03/15: Master-Studium Maschinenbau, Universität Stuttgart

07/15 – 06/21: Akademischer Mitarbeiter: Institut für Maschinenelemente,
Universität Stuttgart

Seit 08/21: Zuverlässigkeitsingenieur: Robert Bosch GmbH in Reutlingen

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

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

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

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

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen
184	St. Kemmler	Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten
185	T. Rieker	Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme mit stochastischen Netzverfahren
186	M. Bartholdt	Kunden- und kostenorientierte Zuverlässigkeitszielermittlung
187	V. Warth	Systematische Synthese und Bewertung von Stufenlosgetrieben
188	N. Nowizki	Funktionale Sicherheit und Zuverlässigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung
189	F. Schiefer	Additive Fertigung von Radial-Wellendichtungen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenläufflächen und Radial-Wellendichtungen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtungen aus PTFE-Compound
193	N. Dakov	Elastohydrodynamische Simulation von Wellendichtungen am Beispiel der PTFE-Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen
194	Z. Beslic	Modellierung der Schadensdegradation Zahnradgrübchen bei Fahrzeuggetrieben
195	St. Jetter	Zuverlässigkeitsprognose mechanischer Komponenten auf Basis simulierter Betriebsfestigkeit
196	O. R. Orozco	Availability of Particle Accelerators: requirements, prediction methods and optimization
197	V. Schramm	Dependable System Development Methodology and Case Study for the LHC Beam Loss Monitoring System at CERN
198	J. Gröber	Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme
199	K. Lucan	Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse
200	F. Müller	Realitätsnahe Modellierung, Simulation und Analyse der operativen Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskennwerte technischer Systeme mit Vertrauensbereich
201	A. Ostertag	Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke
202	A. Kremer	Statistische Versuchsplanung in der Lebensdauererprobung mit Vertrauensintervallen