

# **Entwicklung Effizienter Multivariater Lebensdauertests**

Developing Efficient Multivariate Lifetime Tests

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

von  
**Marco Arndt, M.Sc.**  
aus Ravensburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Dazer  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mit Berichter

Tag der mündlichen Prüfung:

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2026



# **Vorwort**

Thanks for your service.



# Kurzfassung/Abstract

TODO:

- 
- Bilder prüfen
- "mark changes after your Oral presentation for review"
- "textcolor blue in definitions ändern
- "Print" Funktion aktivieren
- "nocite" Funktion deaktivieren in main Z.269



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung/Abstract</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Nomenklatur</b> . . . . .	<b>ix</b>
Abkürzungen . . . . .	ix
Indizes . . . . .	ix
Formelzeichen . . . . .	ix
<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Forschungsperspektive und Problembeschreibung . . . . .	2
1.2 Beitrag dieser Arbeit . . . . .	3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	5
2.1.1 Begriffe und Definitionen . . . . .	6
2.1.2 Deskriptive Statistik für Lebensdauerdaten . . . . .	7
2.1.3 Parameterschätzverfahren . . . . .	7
2.2 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung . . . . .	7
2.2.1 Grundbegriffe der statistischen Versuchsplanung . . . . .	7
2.2.2 Statistische Lebensdauer-Versuchspläne . . . . .	7
2.2.3 Statistische Modellbildung . . . . .	7

<b>3</b>	<b>Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Planung von ausfallbasierten Lebensdauertests mit mehreren Faktoren . . . . .</b>	<b>9</b>
3.1	Bewertung des Standes der Forschung und Technik . . . . .	9
3.2	Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Parameter-Screening für multifaktorielle Lebensdauertests . . . . .</b>	<b>11</b>
4.1	Identifikation potenzieller Einflussgrößen . . . . .	11
4.2	Kreativmethoden zum Auswahlprozesse im Parameter-Screening . . . . .	11
4.3	Randbedingungen in der Parameterauswahl für die Zuverlässigkeitsmodellierung . . . . .	11
4.4	Vorgehen zum heuristische Screening für die Zuverlässigkeitsmodellierung . . . . .	11
4.5	Zusammenfassung . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Effiziente multivariate Versuchspläne für Lebensdaueruntersuchungen . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Fallstudie . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>17</b>
7.1	Key Findings . . . . .	17
7.2	Diskussion . . . . .	17
7.3	Ausblick . . . . .	17
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>19</b>
	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>21</b>
A	Ein Anhang . . . . .	21
A.1	Unteranhang 1 . . . . .	21



# Nomenklatur

## Abkürzungen

ALT	Accelerated Lifetime Testing
DoE	Design of Experiments
ECU	Electronic Control Unit

## Indizes

$q$	Quantilwert
-----	-------------

## Formelzeichen

$F(\cdot)$	Ausfallwahrscheinlichkeit, Verteilungsfunktion
$f(\cdot)$	Dichtefunktion
Pr	Wahrscheinlichkeit
$R$	Kovarianz des Messrauschens des Kalmanfilters
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$t$	Zeit, Lebensdauermerkmal
$\tau$	kontinuierliche Zufallsvariable



# **Abbildungsverzeichnis**



# **Tabellenverzeichnis**



# 1 Einleitung

Die Absicherung technischer Produkte und Systeme hinsichtlich ihrer Funktionalität bildet einen zentralen Bestandteil der ingenieurwissenschaftlichen Verantwortlichkeiten im Produktentwicklungsprozess. Motiviert durch Produktversprechen gegenüber der potenziellen Käuferschaft sowie bestehender Kunden, zur Wahrung des Selbstverständnisses einer Marke oder rein aufgrund regulatorischer Vorgaben soll hier im Kontext des vorgesehenen Einsatzzweckes Zuverlässigkeitsmanagement betrieben werden. So wird auch insbesondere Kundensicht aus dabei erwartet, dass ein (technisches) Produkt - ein Fahrzeug, ein Smartphone, eine Photovoltaikanlage - seine Funktionalität mindestens zum Gewährleistungs- oder Garantiezeitraum uneingeschränkt erfüllt.

Über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg unterstützen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik dabei, diese Anforderungen systematisch zu erfüllen. Verfahren aus dem Bereich „Safety“, explorative Datenanalysen zur Untersuchung der Produktperformance im Betrieb oder Test, effiziente Versuchsplanung zum Nachweis der Lebensdauer am Design, Methoden der beschleunigten Versuchsplanung, engl. [Accelerated Lifetime Testing \(ALT\)](#), der Aufbau probabilistischer Lebensdauermodelle sowie das Risikomanagement im Allgemeinen eignen sich für diese Herausforderung. Das zentrale Ergebnis liegt in der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit als Komplement zur Zuverlässigkeit - also der Wahrscheinlichkeit, dass ein entwickeltes Produkt unter den definierten Randbedingungen eine vorgegebene Zeitdauer ohne funktionskritischen Ausfall übersteht [1]. Üblicherweise soll so nachgewiesen werden, dass das Erzeugnis dem Einfluss einer bestimmten Belastung - beispielsweise einer physikalischen oder elektrischen Kraft, einem Wärmeeintrag oder der Exposition gegenüber einer chemischen Beanspruchung - standhält. Gelingt in der Praxis keine hinreichend genaue Quantifizierung dieser probabilistischen Metrik, so liegen die Ursachen jedoch nicht zwangsläufig allein in ökonomischen Einschränkungen wie dem Zeit- und Kostenbudget für ein erforderliches Testing oder einem

fehlenden methodischen Know-how - vielmehr könnten *mehrere* Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit einwirken und sogar Wechselwirkungen ausprägen, ohne dass dies adäquat wahrgenommen oder antizipiert wird. Moderne Produkte können schlichtweg durch multivariat bedingte Fehlermechanismen ausfallen.

### 1.1 Forschungsperspektive und Problembeschreibung

Da trotz genannter Umstände die Kundenanforderungen und Garantiebedingungen üblicherweise als unveränderlich, teils sogar als zunehmend anspruchsvoll zu verstehen sind, werden Unsicherheiten in der Lebensdauerabsicherung dann meist nur durch präventive Wartungsstrategien, durch Tolerierung von Restrisiken oder durch die Inkaufnahme nachträglicher Schadensbegrenzung behandelt. Der zugrunde liegende Gedanke: ehe ein Produkt, dessen Lebensdauerverhalten nicht quantifizierbar verstanden ist, einen kritischen Verschleißzustand erreicht, wird es im Rahmen eines festgelegten Wartungsintervalls vorsorglich ersetzt. Dabei könnte zugrunde liegen, dass schlichtweg kein physikalisches Modell oder eine ausreichend ausgeprägte empirische Datengrundlage vorhanden ist. Führt auch diese Vorsorge zu erheblichen Regress- oder Kulanzkosten, müssen ausfallschutzorientierte Maßnahmen - bis hin zu Rückrufaktionen - frühzeitig eingeplant und umgesetzt werden, um Image- und Kostenrisiken (wenn auch selten nachhaltig) zu minimieren. Um jenes zu vermeiden, muss also bereits im Vorfeld den verschiedensten Randbedingungen mithilfe der Zuverlässigkeitstechnik begegnet werden. Besonders komplexe Randbedingungen lassen sich beispielsweise durch eine hochgradige Integration von Elektrifizierung und Digitalisierung, verkürzte Entwicklungszyklen, verschärfter Kostendruck, sich per se verändernde Prioritäten, wandelnde Materialauswahl und -komposition, leistungsoptimierte Belastungsszenarien, intensivierete Einsatzbedingungen und nicht zuletzt eine effiziente Ressourcennutzung innerhalb eines Produkts beschreiben - um nur einige zu nennen. Ein einfaches Beispiel verdeutlicht dies: Der komfortable sowie ausfallfreie Betrieb eines Fahrzeugs soll einerseits gegenüber verschiedensten Schadensursachen gewährleistet werden; andererseits hängt er inzwischen maßgeblich vom Funktionserhalt einer bis zu dreistelligen Anzahl an [Electronic Control Units \(ECUs\)](#) ab - während in der jüngeren Vergangenheit noch



eine geringe bis mittlere zweistellige Anzahl mit nur begrenztem Funktionsumfang üblich war [2]. Oder aber der störungsfreie Betrieb digitale Services setzt bei Zentralisierung von ECU-Funktionen die performante Funktionsfähigkeit einer Traktionsbatterie voraus, durch deren chemische Alterung sich jedoch zeitgleich wiederum weitere Unsicherheiten eingliedern können. Ein damit betrachtetes System bildet somit ein vielfältig komplexeres Netzwerk aus teils wechselwirkenden oder direkten Eigenschaften, die zu einem Versagen führen könnten. Damit kann festgehalten werden: Produktdesigns werden angesichts steigender Kundenanforderungen zunehmend raffinierter und im Sinne des Effizienzgedankens optimiert (z.B. durch mehr Sensorik, Rechenleistung und fortschrittliche Assistenzsysteme), gleichzeitig wird jedoch die Art und Weise eines möglichen Funktionsverlustes zunehmend komplexer. Somit rückt die Fähigkeit, Prognosen über die Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von mehreren Einflussgrößen treffen zu können, zunehmend in den unternehmerischen Fokus für strategische Entscheidungen. Über die klassische Testplanung im Rahmen der Zuverlässigkeitstechnik hinaus erfordert dies also Methoden der statistischen Versuchsplanung bei gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren auf die Lebensdauer. Methoden wie ALT und die Lebensdauermodellbildung behalten dabei weiterhin ihre Relevanz und bilden einen unverzichtbaren Bestandteil einer fundierten Teststrategie.

## 1.2 Beitrag dieser Arbeit

Ausgehend von der beschriebenen Problemstellung lässt sich der übergeordnete Beitrag dieser Arbeit wie folgt formulieren: Liegt ein komplexes technisches System vor und soll dieses hinsichtlich seiner Lebensdauer empirisch untersucht werden, um fundierte Prognosen über die Funktionalität im Betrieb treffen zu können, so müssen mehrdimensionale Lebensdaueruntersuchungen nach dem Prinzip des *Design of Experiments (DoE)* geplant werden. Neben der bloßen Implementierung von mehrdimensionalen Tests für die Lebensdauererprobung berücksichtigt dieser Ansatz damit:

- eine effiziente Methodik zur gezielten Vorauswahl relevanter Faktoren aus der Gesamtheit potenzieller Systemparameter - mit dem Ziel, deren signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer zu untersuchen;

- die Auswahl geeigneter Strategien und passender Testpläne zur statistisch abgesicherten Quantifizierung von Einflüssen auf die Lebensdauer, in Kombination mit konventionellen Zuverlässigkeitsmethoden wie beispielsweise ALT;
- eine präzise Parameterschätzung zur mathematischen Beschreibung der Effekte auf Basis der als signifikant identifizierten Einflussgrößen;
- die Bilanzierung geeigneter Testpläne im Vergleich zu etablierten, in der Literatur bereits umfangreich diskutierten Versuchsplänen, insbesondere hinsichtlich potenzieller Abweichungen bei nicht-normalverteilten Daten.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Der allgemeine inhaltliche Aufbau der vorliegenden Arbeit kann **Abb. 1** entnommen werden. So folgt auf die in diesem Abschnitt beschriebene Problemstellung sowie Ausführung über den generellen Beitrag der Arbeit weiter in Kapitel 2 der relevante Stand aus aktueller Forschung und Literatur. Kapitel 3 fasst schließlich den Forschungsbedarf zusammen und stellt das Ziel der Arbeit, aus der sich die relevanten Forschungsfragen ergeben, konkret heraus. Kapitel 4 beinhaltet die Vorstellung zu effizienten, qualitativen Screeningmethoden. Hier werden die herausgearbeiteten Vorschläge zu einer Auswahl an heuristischen Methoden für die Selektion der perspektivisch wenig relevanten Faktoren für die Umsetzung in der experimentellen statistischen Datenerhebung beschrieben. Weiter werden in Kapitel 5 darauf die Rahmenbedingungen für die zur statistischen Versuchsplanung neu herausgearbeiteten Versuchsplankonfigurationen für effiziente Lebensdauertests abgeglichen und schließlich bewertet. Als Ergebnis sind neben neuen, effizienten Versuchsplänen auch die relevanten Merkmale beschrieben, die es bedarf, um Versuchspläne im Kontext von Lebensdauertests zu bewerten. **Kapitel 6**. Abschließend stellt Kapitel 7 eine Zusammenfassung über die methodische Herangehensweise und die erreichten Ergebnisse der Arbeit zusammen und ordnet diese für künftige Forschungsbestrebungen im Bereich der multivariaten Lebensdauer-Versuchsplanung ein.

## 2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel stellt die für diese Arbeit erforderlichen technischen und methodischen Grundlagen bereit. Zunächst werde in Abschnitt 2.1 zentrale Begriffe und Konzepte der Zuverlässigkeitstechnik sowie das grundlegende statistische Verfahren zur Lebensdauer-Datenanalyse in Kombination mit Versuchsplänen erläutert. Darauf aufbauend folgen in Abschnitt 2.2 die Einführung und die Einordnung von DoE sowie der multivariaten Lebensdauermodellierung aus dem Stand der Technik und der Wissenschaft, die beide für die Entwicklung effizienter Lebensdauer-versuchspläne maßgeblich sind. Im Kontext der Lebensdauererprobung umfasst dies insbesondere typische, statistische Versuchspläne sowie Metriken und Indikatoren zur allgemeinen Bewertung der Versuchspläne.

### 2.1 Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie

Die Zuverlässigkeitstechnik befasst sich mit der probabilistischen Beschreibung der Lebensdauer technischer Produkte und Systeme. Ziel ist die statistische Modellierung des Ausfallverhaltens unter Berücksichtigung der Funktionalität des Produkts unter relevanten Randbedingungen. Eine zentrale Aufgabe besteht somit in der statistischen Charakterisierung des Ausfallbegriffs mithilfe deskriptiver Statistik sowie in der Parametrisierung geeigneter Verteilungen zur Abbildung des Lebensdauer-verhaltens. Die Modellierung kann - abhängig von den Randbedingungen - auf Basis *einer einzelnen* Belastungsgröße oder *mehrerer* Beanspruchungsparameter erfolgen, die gemeinsam den Produktausfall determinieren. Ein grundlegendes Verständnis des Umgangs mit zufallsverteilten Lebensdauerereignissen ist daher eine elementare Voraussetzung für die statistische Versuchsplanung im Rahmen der Zuverlässigkeitstechnik. Weiterführende Konzepte und vertiefte methodische Ansätze zur Zuverlässigkeitstechnik sowie zur statistischen Testplanung sind allen voran in der

Standardliteratur von Bertsche und Dazer [1] dargelegt, an deren Vorgehensweise sich die nachfolgenden Ausführungen orientieren.

### 2.1.1 Begriffe und Definitionen

Der **Ausfall** eines technischen Produkts bezeichnet den Zeitpunkt innerhalb seiner Lebensdauer, zu dem die geforderte Funktionalität unter definierten Umgebungs- und Randbedingungen nicht mehr erfüllt ist. Die **Ausfallzeit**, welche diese Zustandsänderung zeitlich definiert, wird im Allgemeinen als kontinuierliche Zufallsvariable  $\tau > 0$  aufgefasst. So ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt im Zeitraum bis  $t$  einen Funktionsverlust erleidet, zu

$$F(t) = \Pr(\tau \leq t). \quad (2.1)$$

Diese Funktion beschreibt die **Ausfallwahrscheinlichkeit**  $F(t)$ , während die **Zuverlässigkeit**

$$R(t) = \Pr(\tau > t) = 1 - F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt, \quad t \geq 0. \quad (2.2)$$

komplementär diejenige Wahrscheinlichkeit  $R(t) : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow [0, 1] \subset \mathbb{R}$  quantifiziert, zu der das nicht reparierbare Produkt die realisierte Zeit  $t$  überlebt: also frei von Funktionsverlust bleibt und funktionsfähig ist [1, 3, 4, 5]. Damit ist die Zuverlässigkeit mathematisch als reellwertige, monoton fallende und stetige Funktion definiert. Die **Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion**  $f(t)$  der Ausfallzeit beschreibt, wie sich die Wahrscheinlichkeiten der Ausfälle über der Zeit verteilen. Sie folgt der Ableitung der Verteilungsfunktion  $F(t)$  und kann als Maß für die Ausfallintensität pro Zeiteinheit interpretiert werden:

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \frac{d}{dt}\Pr(\tau \leq t), \quad t \geq 0. \quad (2.3)$$

Damit beschreibt  $f(t)$  die lokale Änderungsrate der Zuverlässigkeit - also, wie schnell die Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung respektive der Lebensdauer ab- bzw. zunimmt. Das **Quantil**  $t_q$  einer Lebensdauer definiert den Zeitpunkt, zu dem die

kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$  mindestens den Anteil  $q$  (bzw. das **Perzentil** in Prozentpunkten) erreicht:

$$F(t_q) = q, \quad q \in [0, 1]. \quad (2.4)$$

Damit gibt das  $q$  - Quantil denjenigen Lebensdauerwert an, unterhalb dessen der Anteil  $q$  aller betrachteten Produkte ausgefallen ist.

Ein spezieller und häufig verwendeter Fall ist der **Median**, also das Quantil zur Lebensdauer  $t_{0.5}$ , bei dem die Eintrittswahrscheinlichkeit zu einem Ereignis bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeit 50 % beträgt:

$$F(t_{0.5}) = 0.5. \quad (2.5)$$

Der Median beschreibt somit den Zeitpunkt, zu dem die Hälfte aller Produkte ausgefallen ist. Er stellt eine robuste, lagebezogene Kenngröße der zentralen Tendenz dar, da er - im Gegensatz zum **arithmetischen Mittelwert** - gegenüber Ausreißern und schiefen Verteilungen unempfindlich ist und auf der Verteilungsfunktion und nicht auf der Dichte basiert. Während der Mittelwert hingegen sensitiv gegenüber Ausreißern ist, erfassen **Varianz** und **Standardabweichung** lediglich die Streuung der Zufallsvariablen um den Erwartungswert.

### 2.1.2 Deskriptive Statistik für Lebensdauerdaten

### 2.1.3 Parameterschätzverfahren

## 2.2 Statistische Versuchsplanung und Modellbildung

### 2.2.1 Grundbegriffe der statistischen Versuchsplanung

### 2.2.2 Statistische Lebensdauer-Versuchspläne

### 2.2.3 Statistische Modellbildung



### **3 Ansätze zur Effizienzsteigerung in der Planung von ausfallbasierten Lebensdauertests mit mehreren Faktoren**

#### **3.1 Bewertung des Standes der Forschung und Technik**

#### **3.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit**





## **4 Parameter-Screening für multifaktorielle Lebensdauertests**

### **4.1 Identifikation potenzieller Einflussgrößen**

### **4.2 Kreativmethoden zum Auswahlprozesse im Parameter-Screening**

### **4.3 Randbedingungen in der Parameterauswahl für die Zuverlässigkeitsmodellierung**

### **4.4 Vorgehen zum heuristische Screening für die Zuverlässigkeitsmodellierung**

### **4.5 Zusammenfassung**



## **5 Effiziente multivariate Versuchspläne für Lebensdaueruntersuchungen**



## **6 Fallstudie**



## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

### **7.1 Key Findings**

### **7.2 Diskussion**

### **7.3 Ausblick**





# Literatur

- [1] B. Bertsche und M. Dazer. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 4. Auflage. Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. ISBN: 978-3-662-65023-3. URL: <http://www.springer.com/>.
- [2] *DAT Report 2025: Kurzbericht*. Ostfildern, Deutschland, Februar 2025. URL: [https://www.dat.de/fileadmin/protected/DAT\\_Report/2025/DAT-Report-2025-Kurzbericht.pdf](https://www.dat.de/fileadmin/protected/DAT_Report/2025/DAT-Report-2025-Kurzbericht.pdf).
- [3] A. Birolini. *Reliability Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN: 978-3-662-54208-8. DOI: [10.1007/978-3-662-54209-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54209-5).
- [4] W. Q. Meeker, L. A. Escobar und F. G. Pascual. *Statistical methods for reliability data*. Second edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, NJ: Wiley, 2022. ISBN: 978-1-118-11545-9.
- [5] G. Yang. *Life cycle reliability engineering*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2007. ISBN: 9780471715290. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0740/2006019150-b.html>.



## **Anhang A   Ein Anhang**

### **Anhang A.1   Unteranhang 1**