

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

Das ist die Kurzfassung für die Diss.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

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

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Die Absicherung technischer Produkte und Systeme hinsichtlich ihrer Funktionalität bildet einen zentralen Bestandteil der ingenieurwissenschaftlichen Verantwortlichkeiten im Produktentwicklungsprozess. Sie erfolgt zur Erfüllung von Produktversprechen gegenüber der potenziellen Käuferschaft sowie bestehender Kunden, zur Wahrung des internen Selbstverständnisses der Marke und aufgrund regulatorischer Vorgaben. Es wird erwartet - insbesondere aus Kundensicht -, dass ein technisches Produkt - ein Fahrzeug, ein Smartphone, ein elektrischer Antriebsstrang - mindestens die Garantiezeit problemlos übersteht.

Über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg unterstützen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik dabei, diese Anforderungen systematisch zu erfüllen. Dazu zählen 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, der Aufbau probabilistischer Lebensdauermodelle sowie das Risikomanagement im Allgemeinen. Das zentrale Ergebnis liegt in der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit als Komplement zur Zuverlässigkeit - also der Wahrscheinlichkeit, dass ein entwickeltes Produkt unter definierten Randbedingungen eine vorgegebene Zeitdauer ohne funktionskritischen Ausfall übersteht [dazer22]. Üblicherweise soll damit nachgewiesen werden, dass das Produkt dem Einfluss einer bestimmten Belastung - beispielsweise einer physikalischen oder elektrischen Kraft, einem Wärmeeintrag oder der Exposition gegenüber einem chemischen Milieu - 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 das Testing oder einem fehlenden methodischen Know-how - vielmehr könnten *mehrere* Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit multidimensional und/oder komplex wechselwirkend einwirken, ohne dass dies bislang bekannt ist. Moderne Produkte können schlichtweg durch multivariat ausgelöste Mechanismen ausfallen.

1.1 Forschungsperspektive und Problembeschreibung

Da trotz genannter Randbedingungen die Kundenanforderungen und Garantiebedingungen üblicherweise als unveränderlich, teils sogar als zunehmend anspruchsvoll wahrgenommen werden, werden Unsicherheiten in der Lebensdauer 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. Führt jedoch auch dies 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 dies zu vermeiden, muss also bereits im Vorfeld auch den verschiedensten Randbedingungen mithilfe der Zuverlässigkeitstechnik begegnet werden. Komplexe Randbedingungen lassen sich durch eine hochgradige Integration von Elektrifizierung und Digitalisierung, verkürzte Entwicklungszyklen, verschärften Kostendruck, sich verändernde Prioritäten, wandelnde Materialauswahl und -komposition, leistungsoptimierte

Belastungsszenarien, intensivierten Einsatzbedingungen und nicht zuletzt eine effiziente Ressourcennutzung innerhalb eines Produkts beschreiben - um nur einige zu nennen. Auch ein einfaches Beispiel verdeutlicht dies: Der komfortable wie ausfallfreie Betrieb eines Fahrzeugs soll einerseits gegenüber verschiedensten Schadensursachen gewährleistet werden; andererseits hängt er inzwischen maßgeblich vom Funktionserhalt einer bis zu dreistelligen Anzahl an ECUs ab - während in der jüngeren Vergangenheit noch eine geringe bis mittlere zweistellige Anzahl mit begrenztem Funktionsumfang üblich war. Ein damit betrachtetes System bildet somit ein vielfältig komplexeres Netzwerk aus teils wechselwirkenden oder direkten Eigenschaften, die zu einem Versagen führen könnten. Damit ist gemeint: Produktdesigns werden angesichts steigender Kundenanforderungen zunehmend raffinierter und im Sinne des Effizienzgedankens optimiert (z.B. durch mehr Sensorik 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 strategischer Entscheidungen. Über die klassische Testplanung im Rahmen der Zuverlässigkeitstechnik hinaus erfordert dies zunehmend Methoden der statistischen Versuchsplanung bei gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren auf die Lebensdauer.

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 Lebensdauer-

untersuchungen nach dem Prinzip der Design-of-Experiments ([Design of Experiments \(DoE\)](#)) geplant werden. Neben der bloßen Implementierung von Tests für Lebensdauerversuche berücksichtigt dieser Ansatz zudem:

- eine effiziente Methodik zur gezielten Vorauswahl relevanter Faktoren aus der Gesamtheit potenzieller Systemparameter mit dem Ziel, deren 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 der beschleunigten Testplanung (engl. Accelerated Lifetime Testing, ALT);
- eine präzise Parameterschätzung zur mathematischen Beschreibung der Effekte auf Basis der als signifikant identifizierten Einflussgrößen;
- die Bilanzierung geeigneter Testpläne im Vergleich zu etablierten Standardplänen, insbesondere hinsichtlich potenzieller Abweichungen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Orientierung soll eine makroskopische Beschreibung zum Aufbau der Arbeit dienen, welcher [Abb. 1](#) zu entnehmen ist.

Im ?? wird [Accelerated Lifetime Testing \(ALT\)](#) an [Electronic Control Unit \(ECU\)](#)s durchgeführt.

2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel stellt die für diese Arbeit erforderlichen technischen und methodischen Grundlagen bereit. Zunächst werden zentrale Begriffe und Konzepte der Zuverlässigkeitstechnik (Abschnitt ??) sowie grundlegende statistische Verfahren erläutert. Darauf aufbauend folgen Einführung und Einordnung des DoE sowie der multivariaten Modellbildung, die beide für die Entwicklung effizienter Lebensdauertests maßgeblich sind.

2.1 Zuverlässigkeitstechnik und Wahrscheinlichkeitstheorie

2.1.1 Begriffe und Definitionen

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 Effizientes 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

4.6 Key Findings

4.7 Diskussion

4.8 Ausblick

Anhang A Ein Anhang

Anhang A.1 Unteranhang 1