

Jan Gröber

Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme

D 93
ISBN 978-3-936100-99-X

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

Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme

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

Vorgelegt von
Jan Gröber, M.Sc.
aus Tübingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler

Tag der mündlichen Prüfung: 29.4.2021

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart
2021

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter im Fachbereich Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart sowie als Doktorand bei der Festo SE & Co. KG.

Mein besonderer Dank gilt dem Direktor des Instituts für Maschinenelemente Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche für die Ermöglichung dieser Arbeit, die fortwährende fachliche Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler danke ich für die Übernahme des Mitberichts und der kritischen Durchsicht der Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Zeiler möchte ich mich für die hervorragende fachliche Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Herrn Frank Müller danke ich für die Unterstützung und das Interesse an dem Projekt. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Beteiligten des Kooperationsprojektes des Institutes für Maschinenelemente und der Festo SE & Co. KG. Besonderen Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Gauchel für die kritische und konstruktive Unterstützung. Bei Herrn Thomas Rittler möchte ich mich für die fachliche Betreuung bedanken. Herrn Manuel Häderle danke ich für seinen Einsatz bei der Realisierung von Dauerlaufprüfaufbauten. Herrn Uwe Hönlinger und Marco De Lucia möchte ich für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung danken. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Post für die Unterstützung der Arbeit bedanken.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern für die fortwährende Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Indizes und Abkürzungen	IV
Abstract.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
2.1 Begriffe und Definitionen der Zuverlässigkeitstechnik	4
2.2 Grundlagen quantitativer Zuverlässigkeitsanalysen.....	6
2.3 Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse	9
2.4 Zuverlässigkeitsabsicherung pneumatischer Ventile	11
2.4.1 Herkömmliche pneumatische Ventile.....	12
2.4.2 Festo Motion Terminal (VTEM).....	13
2.5 Grundlagen der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme ...	16
2.5.1 Zuverlässigkeit von Mechanik.....	16
2.5.2 Zuverlässigkeit von Elektronik	17
2.5.3 Zuverlässigkeit von Software	19
2.5.4 Erfassung von Wechselwirkungen.....	21
2.5.5 Zuverlässigkeitsmodellierung von Systemen.....	23
2.6 Methoden zur Klassifizierung der Betriebsbelastung.....	26
2.7 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung.....	27
3 Analyse und Auswahl geeigneter Methoden.....	36
3.1 Anforderungen an die Vorgehensweise	36
3.2 Analyse bestehender Vorgehensweisen	38
3.3 Methoden der Versuchsdurchführung.....	41
3.4 Methoden der Versuchsverkürzung	45

3.5	Eignung bestehender Methoden.....	48
4	Gesamtheitliches Vorgehen	52
4.1	Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen	55
4.2	Qualitative Analyse.....	55
4.3	Voruntersuchung und quantitative Analyse	56
4.4	Statistische Versuchsplanung	59
4.5	Versuchsdurchführung und Auswertung	63
4.6	Ableitung eines Lebensdauermodells	64
4.7	Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit der Algorithmen der Firmware	66
4.8	Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware.....	70
4.9	Quantitative Modellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit.....	73
4.10	Zuverlässigkeits-Monitoring	75
4.11	Evaluierung des vorgeschlagenen gesamtheitlichen Vorgehens	76
5	Exemplarische Anwendung des vorgeschlagenen Vorgehens... 79	
5.1	Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen	80
5.2	Qualitative Analyse.....	81
5.3	Versuchstechnische Voruntersuchungen	86
5.3.1	Erkenntnisse aus vorausgehenden Versuchen	86
5.3.2	Analyse von Belastungsverläufen	89
5.3.3	Auswahl der Testmethodik und Möglichkeiten der Testzeitverkürzung	90
5.3.4	Messaufbauten und Analysemöglichkeiten.....	93
5.3.5	Durchführung von Voruntersuchungen.....	98
5.3.6	Bewertung der Zuverlässigkeit der Elektronik	107
5.3.7	Erste Abschätzung der Systemzuverlässigkeit	110
5.4	Statistische Planung der Versuche.....	111
5.4.1	Zieldefinition	111
5.4.2	Erfassung der Einflussgrößen	112
5.4.3	Aufstellung und Auswahl möglicher Versuchspläne	113

5.5	Versuchsdurchführung und Auswertung	123
5.5.1	Dauerlaufprüfstände	124
5.5.2	Automatisierte Messungen und Messdatenaufbereitung.....	127
5.5.3	Analyse unterschiedlicher Schadensmechanismen..	134
5.5.4	Eigenschaftsänderungen der Pilotpatrone.....	138
5.5.5	Eigenschaftsänderungen der Boosterpatrone	141
5.6	Ableitung eines Lebensdauermodells	144
5.6.1	Ermitteln von Ausfallzeiten.....	145
5.6.2	Ableitung eines ersten Lebensdauermodells	147
5.6.3	Abgleich des Lebensdauermodells.....	153
5.7	Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit der Algorithmen der Firmware.....	162
5.8	Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware	166
5.9	Quantitative Modellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit.....	168
5.10	Zuverlässigkeits-Monitoring	173
5.11	Zusammenfassung und Bewertung der exemplarischen Anwendung.....	174
6	Zusammenfassung und Ausblick	178
7	Literatur.....	180
A.	Anhang	191
A.1	Mögliche vollfaktorielle Versuchspläne.....	191
A.2	Versuchspunkte der statistischen Versuchsplanung	197
A.3	Ausfallzeiten durch Leckage am unteren Lippendichtring	198
A.4	Kennwertverläufe Vorsteuerung	209

Indizes und Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
2FWW	2-fach Wechselwirkungen
3FWW	3-fach Wechselwirkungen
4FWW	4-fach Wechselwirkungen
B2P	Belüftungsbooster Anschluss 2
B2R	Entlüftungsbooster Anschluss 2
B4P	Belüftungsbooster Anschluss 4
B4R	Entlüftungsbooster Anschluss 4
CPN	Coloured Petri Nets
DoE	Design of Experiments, Statistische Versuchsplanung
DSG	Direct System Grid
DSM	Design Structure Matrix
E2Pp	Belüftungspiezo für Belüftungsbooster Anschluss 2
E2Pr	Entlüftungspiezo für Belüftungsbooster Anschluss 2
E2Rp	Belüftungspiezo für Entlüftungsbooster Anschluss 2
E2Rr	Entlüftungspiezo für Entlüftungsbooster Anschluss 2
E4Pp	Belüftungspiezo für Belüftungsbooster Anschluss 4
E4Pr	Entlüftungspiezo für Belüftungsbooster Anschluss 4
E4Rp	Belüftungspiezo für Entlüftungsbooster Anschluss 4
E4Rr	Entlüftungspiezo für Entlüftungsbooster Anschluss 4
ECSPN	Extended Coloured Stochastic Petri Nets
ESPN	Extended Stochastic Petri Nets
FBD	Funktionsblockdiagramm
FDV	Funktionsdauerversuche
FFT	Fast Fourier Transform
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss- Analyse

Abkürzung	Bezeichnung
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTA	Fault Tree Analysis, Fehlerbaumanalyse
HALT	Highly Accelerated Life Test
HiL	Hardware-in-the-Loop
LDV	Lebensdauerversuche
MDS	Multifunktionales Datenerfassungs System
MiL	Model-in-the-Loop
OFAT	One-factor-at-a-time
PiL	Processor-in-the-Loop
RF	Raffungsfaktor
SiL	Software-in-the-Loop
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
XiL	X-in-the-Loop
ZBD	Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Abstract

Reliability Analysis of Novel Mechatronic Systems

Mechatronic systems combine the domains of mechanics, electronics and software. Thereby possibilities for new products emerge. This also applies to the exemplary use case of pneumatic valves. If the pneumatic valve is designed as a mechatronic system instead of mechanical components, it is possible to implement different functionalities using software.

New challenges arise for the reliability assurance of mechatronic systems. In addition to the reliability of the mechanics, the reliability of the electronics and software and their interactions must be considered. For the first product generation of a mechatronic system, it is not or only occasionally possible to fall back on previous knowledge. To keep development times as short as possible, it is desirable to apply reliability methods already during development.

Within this thesis, a holistic approach for the reliability analysis of novel mechatronic systems to predict the reliability for different operating conditions is proposed. Methods for the domains of mechanics, electronics and software are considered. The proposed approach is exemplarily applied to a novel pneumatic valve terminal.

A focus of this thesis is the determination of reliability parameters for different operating conditions during the development phase. It is demonstrated how the necessary experiments can be planned, performed and evaluated by using a reliability DoE. In conventional test designs, only uncensored failures have been considered so far. In this thesis, an iterative

procedure for estimating the influence of right- and interval-censored failures is proposed. The experiments planned in this way were implemented in extensive test series. Statistically significant effects could be determined with the collected right- and interval-censored failure data. A simplified lifetime model was derived. In additional tests, predictions of the lifetime model were compared with empirically determined lifetime characteristics.

To ensure the reliability of the control algorithms of the firmware of the mechatronic system, a model-in-the-loop simulation environment was described and implemented. Using design of experiments, the correct functioning of the application can be examined efficiently in a predetermined parameter space.

To make statements about the reliability of the firmware, an approximation of the course of the detected failures of the firmware was considered using mathematical models. This approximation can be used to derive statements about the reliability of the firmware. It can be estimated how much time is still necessary in the project to realize a minimum quality of the firmware. Even if these forecasts relate to uncertainties, a plausibility check of the project duration can be performed.

To evaluate the system reliability based on the determined reliability parameters of the individual components, a simplified reliability model using Petri nets (ECSPN) was presented and the system reliability was simulated exemplarily. By modelling using Petri nets, it is possible to map interactions between individual components.

1 Einleitung

Durch mechatronische Systeme werden die Domänen der Mechanik, Elektronik und Software vereint [1, 2]. Hierdurch ergeben sich Möglichkeiten für neue Produkte. Mit einem vergrößerten Funktionsumfang von mechatronischen Systemen steigt jedoch auch deren Komplexität. Gekoppelt mit immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten steigt die Gefahr von Rückrufen. Zur Reduzierung der Rückrufgefahr sind an die geänderten Anforderungen angepasste Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse notwendig.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Herkömmliche pneumatische Ventile sind stark von mechanischen Komponenten geprägt. Die Pneumatikventile besitzen üblicherweise eine durch die Mechanik vorgegebene, unveränderliche Funktionalität. Bei einem Aufbau des Pneumatikventils als mechatronisches System ist es möglich, per Software unterschiedliche Funktionalitäten mit einem entsprechend angepassten mechanischen Ventilaufbau zu realisieren (vgl. [3]).

Für die Absicherung der Mechanik herkömmlicher Pneumatikventile existieren bereits etablierte Vorgehensweisen (vgl. [4–6]). Für die Absicherung eines mechatronischen Systems ergeben sich neue Herausforderungen. Die Mechanik muss für die unterschiedlichen Anwendungsfälle geeignet sein. Zusätzlich zur Zuverlässigkeit der Mechanik, muss die Zuverlässigkeit der Elektronik und Software sowie deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Für die erste Produktgeneration als mechatronisches System kann nicht oder nur vereinzelt auf Vorwissen zurückgegriffen werden. Für möglichst kurze Entwicklungszeiten besteht der Wunsch, Zuverlässigkeitsmethoden bereits während der Entwicklung anzuwenden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine ganzheitliche Vorgehensweise zur entwicklungsbegleitenden Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme für die Vorhersage der Zuverlässigkeit bei unterschiedlichen Betriebspunkte aufzuzeigen. Hierbei sollen Methoden für die Domänen der Mechanik, Elektronik und Software berücksichtigt werden. Da die Vorgehensweise für neuartige Systeme anwendbar sein soll, muss diese auch ohne Vorwissen von Lebensdauerkenntnissen aus vorausgehenden Produkten geeignet sein. Die zu erarbeitende Vorgehensweise soll an einem neuartigen mechatronischen System exemplarisch angewendet werden. Die Vorgehensweise soll jedoch allgemein auf neuartige mechatronische Systeme übertragbar sein.

1.2 Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 2** wird der Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellt. Neben allgemeinen Begriffen und Definitionen der Zuverlässigkeitstechnik werden die Grundlagen von quantitativer und qualitativer Zuverlässigkeitsanalysen vorgestellt. Es wird auf die üblichen Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsabsicherung von pneumatischen Ventilen sowie das hier beispielhaft betrachtete mechatronische System eingegangen. Weiterhin werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse für mechatronische Systeme vorgestellt. Den Abschluss des Kapitels 2 bilden die Methoden zur Klassifizierung von Betriebsbelastungen sowie die Grundlagen zur statistischen Versuchsplanung.

Zur Analyse und Auswahl geeigneter Methoden werden in **Kapitel 3** Anforderungen an die zu erarbeitende Vorgehensweise ermittelt. Bestehende Methoden werden anschließend analysiert, bewertet und überprüft, inwieweit die hier gestellten Anforderungen bereits erfüllt werden. Geeignete Methoden werden ausgewählt.

Das in dieser Arbeit vorgeschlagene gesamtheitliche Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme wird in **Kapitel 4** vorgestellt. Nach der Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen wird eine qualitative Analyse durchgeführt. In Voruntersuchungen und quantitati-

ven Analysen werden notwendige Informationen für eine statistische Versuchsplanung ermittelt. Nach der Durchführung der mittels Zuverlässigkeits-DoE geplanten Versuche kann ein Lebensdauermodell abgeleitet werden. Zur Absicherung der Firmware werden entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit von Regelalgorithmen sowie Methoden zur Bewertung der Softwarezuverlässigkeit beschrieben. Den Abschluss des gesamtheitlichen Vorgehens bilden eine quantitative Modellierung, die Berechnung der Systemzuverlässigkeit sowie ein Zuverlässigkeits-Monitoring.

Die exemplarische Anwendung des vorgeschlagenen Vorgehens wird in **Kapitel 5** vorgestellt. Die Kapitelstruktur von Kapitel 5 ist gleich wie bei Kapitel 4.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick in **Kapitel 6** ab. Eine Übersicht der Kapitel dieser Arbeit ist in Bild 1.1 dargestellt.

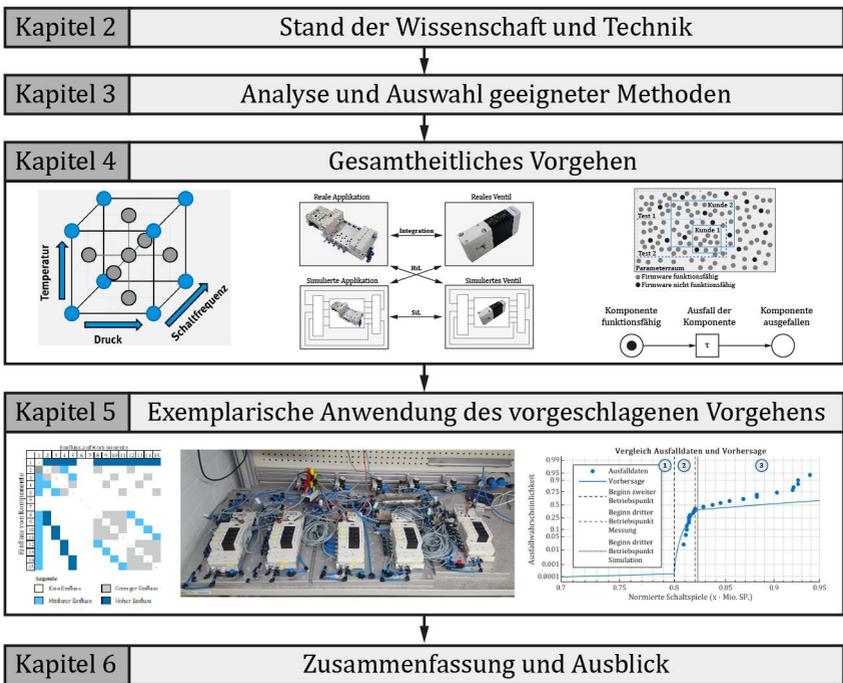


Bild 1.1: Übersicht der einzelnen Kapitel dieser Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In den folgenden Unterkapiteln werden Grundlagen erläutert, welche für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind. Basierend auf der Definition von wichtigen Begriffen werden quantitative und qualitative Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse vorgestellt (Abschnitt 2.2 und 2.3). Es wird auf die Grundlagen der Zuverlässigkeitsabsicherung pneumatischer Ventile (Abschnitt 2.4) und mechatronischer Systeme (Abschnitt 2.5), auf Methoden zur Klassifizierung von Betriebsbelastungen (Abschnitt 2.6), sowie auf die statistische Versuchsplanung eingegangen (Abschnitt 2.7).

2.1 Begriffe und Definitionen der Zuverlässigkeitstechnik

Nach [7, S. 20] ist die **Zuverlässigkeit** $R(t)$ definiert als „die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ Die Verwendung von Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung sind notwendig, da die Ausfallzeiten der einzelnen Produkte stark streuen [7, S. 7]. Im Folgenden werden grundlegende Begriffe der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse vorgestellt (vgl. [7–11]).

Die **Ausfallwahrscheinlichkeit** $F(t)$ ist das Komplement der Zuverlässigkeit und gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher ein Produkt ausfällt:

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{2.1}$$

Durch die Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird die **Dichtefunktion** $f(t)$ ermittelt. Diese beschreibt die Anzahl der Ausfälle zu einem bestimmten Zeitpunkt:

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

Mit der **Ausfallrate** $\lambda(t)$ wird das Verhältnis von Dichtefunktion und Zuverlässigkeit beschrieben:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.3)$$

Die Ausfallrate gibt somit an, welcher Anteil der noch funktionsfähigen Prüflinge in einem definierten Zeitabschnitt ausfallen werden. Je nach zeitlichem Verlauf der Ausfallrate können die Ausfälle in drei verschiedene Bereiche klassifiziert werden (vgl. Bild 2.1). Der Bereich der Frühausfälle ist durch eine abnehmende Ausfallrate gekennzeichnet. Eine konstante Ausfallrate lässt auf Zufallsausfälle schließen. Der Bereich der Verschleiß- und Ermüdungsausfälle ist durch eine ansteigende Ausfallrate charakterisiert.

Zur Angabe der Lebensdauer von Produkten kann die **B_x -Lebensdauer** verwendet werden. Diese Lebensdauer stellt den Zeitpunkt dar, bei dem x-Prozent der Prüflinge ausgefallen sind [7, S. 33]. Ein häufig genutzter Kennwert

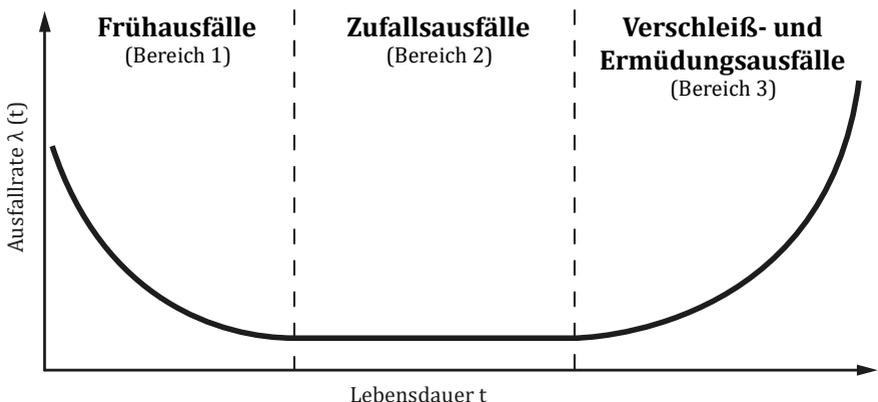


Bild 2.1: Badewannenkurve nach [7, S. 24]

ist hierbei die B_{10} -Lebensdauer. Die beispielhafte Angabe

$$B_{10} = 10.000 \text{ h}$$

gibt somit an, dass 10 % aller Prüflinge bei einer Lebensdauer von 10.000 h ausgefallen sind.

2.2 Grundlagen quantitativer Zuverlässigkeitsanalysen

Basierend auf Lebensdauerversuchen können quantitative Zuverlässigkeitskennwerte abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Kennwerte kann überprüft werden, ob das Produkt eine vorher spezifizierte Lebensdauer erreicht hat und somit ausreichend zuverlässig ist.

Um Zuverlässigkeitskennwerte aus den Versuchen abzuleiten, werden die in den Lebensdauerversuchen ermittelten Ausfalldaten mit entsprechenden Ausfallverteilungen ausgewertet. Die Grundlagen zur Auswertung der Lebensdauerversuche werden im Folgenden vorgestellt.

Bei der Durchführung eines Lebensdauerversuches werden baugleiche Prüflinge unter identischen Bedingungen so lange belastet, bis diese ausfallen (vgl. [4, 6, 7]). Aus Zeit- oder Kostengründen können die Lebensdauerversuche jedoch nicht immer bis zum Ausfall aller Prüflinge durchgeführt werden. Ein Beispiel eines Lebensdauerversuches ist in Bild 2.2 dargestellt. Ausfälle sind hierbei mit einem „x“ gekennzeichnet. Von den sieben getesteten Prüflingen sind die Prüflinge fünf und sieben bei Versuchsende noch funktionsfähig. Da die „rechte Seite“ der Daten fehlt, spricht man hier auch von **rechtszensierten Daten** [12, S. 34–35].

Nicht immer kann der genaue Ausfall eines Prüflings beobachtet werden. Muss der Prüfling beispielsweise zyklisch aus dem Dauerlauf entnommen werden um die Funktionsfähigkeit zu überprüfen, kann nur ein Zeitintervall des Ausfalls angegeben werden. Bei dieser Art der Zensierung spricht man von **intervallzensierten Daten** [12, S. 34–35].

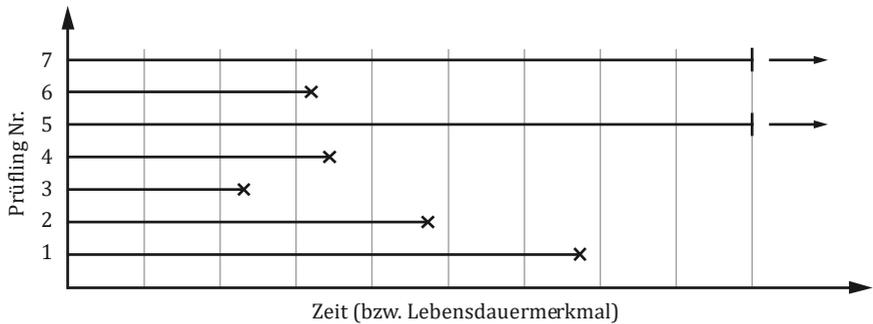


Bild 2.2: Ausfallzeitpunkte eines beispielhaften Lebensdauerversuches nach [13]

Zur Auswertung von Lebensdauerdaten werden die in den Lebensdauerversuchen ermittelten Ausfallzeiten ausgewertet und mittels entsprechender Ausfallverteilungen angenähert. Im Folgenden wird eine Auswahl an relevanter Ausfallverteilungen vorgestellt.

Die **Normalverteilung** ist wohl die bekannteste und am besten untersuchte Wahrscheinlichkeitsverteilung (vgl. [7, S. 58] und [11, S. 29]). Die Dichtefunktion stellt hierbei die bekannte Glockenkurve dar. Soll die Normalverteilung zur Beschreibung von Ausfalldaten verwendet werden, müssten die Auftretenshäufigkeit der Ausfälle dieser Glockenkurve entsprechen. Dies ist in der Praxis selten der Fall. Als Lebensdauerverteilung spielt die Normalverteilung somit nur eine untergeordnete Rolle [11, S. 29].

Eine **logarithmische Normalverteilung**, auch als Lognormalverteilung bezeichnet, verwendet anstelle der statistischen Variable t die logarithmierte Form $\lg t$ [7, S. 56]. Mit dem Lageparameter μ und dem "Formparameter" σ resultieren die folgende Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg \tau - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau \quad (2.5)$$

Wie in Bild 2.3 links dargestellt, können durch unterschiedliche Formparameter σ andere Formen der Dichtefunktion dargestellt werden. Hierdurch lassen sich flexibler Ausfälle annähern. Mit der Lognormalverteilung lassen sich gut Ausfälle abbilden, wenn anfangs viele Prüflinge ausfallen, aber auch entsprechend viele Prüflinge sehr lange überleben. Ausfälle bedingt durch Ermüdung oder Verschleiß, welche sich durch eine monoton ansteigende Ausfallrate auszeichnen, können durch die Lognormalverteilung jedoch nur bedingt beschrieben werden [7, S. 58].

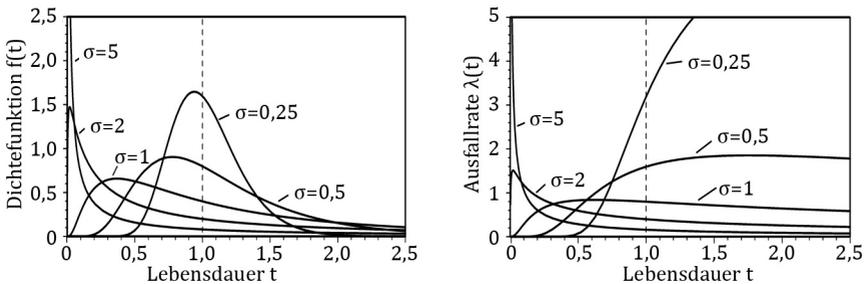


Bild 2.3: Dichtefunktion und Ausfallrate einer Lognormalverteilung [7, S. 57]

Die im Maschinenbau am häufigsten verwendete Lebensdauererzeugung ist die **Weibullverteilung** [7, S. 37]. Diese wurde von W. Weibull auf rein empirischer Grundlage entwickelt und 1951 vorgestellt [14]. Die Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit für die zweiparametrische Weibullverteilung ergibt sich mit der charakteristischen Lebensdauer T und dem Formparameter b zu

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}. \quad (2.6)$$

Für die Dichtefunktion ergibt sich

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

Bei Erreichen der charakteristischen Lebensdauer T ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit zu

$$F(T) = 1 - e^{-1} = 0,632. \quad (2.8)$$

Die Lebensdauer, bei welcher 63,2 % Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht wird, entspricht somit – unabhängig vom Formparameter b – der charakteristischen Lebensdauer T .

Wie in Bild 2.4 ersichtlich ist, können durch den Formparameter b unterschiedliche Formen der Dichtefunktion und Ausfallrate realisiert werden. Mit $b < 1$ können Frühausfälle, mit $b = 1$ Zufallsausfälle und mit $b > 1$ Ermüdungsausfälle beschrieben werden [7, S. 46].

Neben der zweiparametrischen Weibullverteilung existiert eine dreiparametrische Form. Diese beinhaltet zusätzlich zu den Parametern b und T eine ausfallfreie Zeit t_0 .

Zwei- und dreiparametrische Formen der Weibullverteilung werden vielfältig in der Fachliteratur behandelt, für weiterführende Informationen sei auf diese verwiesen [1, 7–17].

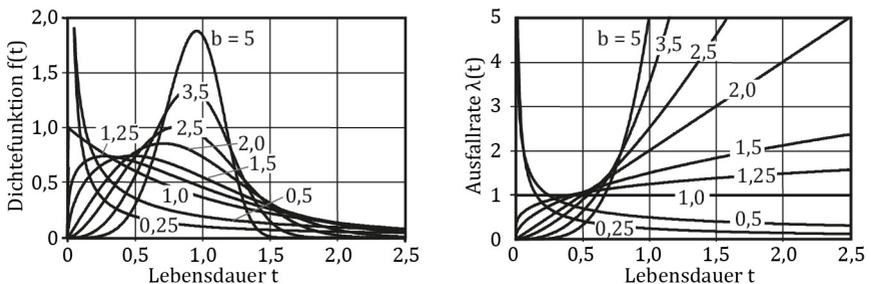


Bild 2.4: Dichtefunktion und Ausfallrate einer Weibullverteilung [7, S. 54–55]

2.3 Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse

Wie in Bild 2.5 nach [7] dargestellt ist, können Zuverlässigkeitsanalysen in quantitative und qualitative Untersuchungen unterteilt werden. Das Ziel der quantitativen Methoden (vgl. Abschnitt 2.2) ist es, Zuverlässigkeitskennwerte berechnen zu können. Mit Hilfe der qualitativen Methoden werden Systeme und Komponenten systematisch untersucht und die Auswirkung der Fehler analysiert. Ziel ist es, mögliche Fehler frühzeitig zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zur Zuverlässigkeitssteigerung zu treffen. Für diese Arbeit relevante Methoden werden im Folgenden kurz vorgestellt.

kann als Basis für eine quantitative Bewertung mittels der booleschen Algebra (vgl. Abschnitt 2.5.5) verwendet werden.

Für eine Veranschaulichung der Funktionen der unterschiedlichen Komponenten und deren Wechselwirkungen sowie als Basis für darauf aufbauende Analysen kann ein **Funktionsblockdiagramm** (FBD) verwendet werden [25, 7]. In diesem werden funktionale Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten abstrahiert als Zusammenschluss einzelner Funktionsblöcke dargestellt. Beispiele für ein FBD sind in [7, S. 95] und [25, S. 653] dargestellt.

Das FBD kann als Basis zur Aufstellung eines Zuverlässigkeitsblockdiagramms (ZBD) verwendet werden. Das ZBD visualisiert die Funktionsfähigkeit des Systems mittels logischer Verknüpfungen der jeweiligen Komponenten [26].

Vorausgehend wurden die Grundlagen der quantitativen und qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse vorgestellt. Im Folgenden wird näher auf die üblichen Methoden zur Absicherung der in dieser Arbeit exemplarisch betrachteten pneumatischen Ventile eingegangen.

2.4 Zuverlässigkeitsabsicherung pneumatischer Ventile

Für die Zuverlässigkeitsabsicherung herkömmlicher pneumatischer Komponenten existiert bereits eine bewährte Vorgehensweise, welche im folgenden Abschnitt 2.4.1 vorgestellt wird. Das in dieser Arbeit beispielhaft betrachtete mechatronische System lässt sich nicht in bisher bestehende Kategorien der Pneumatik einordnen. Eine Übersicht des hier betrachteten Systems sowie der sich hierbei ergebenden Herausforderungen bei der Zuverlässigkeitsabsicherung werden im Abschnitt 2.4.2 vorgestellt.

2.4.1 Herkömmliche pneumatische Ventile

Pneumatische Ventile sind Steuerelemente, die durch die Änderung des Strömungsquerschnittes den Druck oder Volumenstrom auf Basis pneumatischer, elektrischer oder mechanischer Eingangsgrößen beeinflussen [27, S. 150]. Eingesetzt werden können pneumatische Ventile u.a. zur Ansteuerung von pneumatischen Aktuatoren wie beispielsweise Pneumatik-Zylindern. Ein herkömmliches pneumatisches Ventil ist in Bild 2.6 dargestellt. Je nach Ausführung der Dichtstellen kann ein Ventil der Gruppe der Sitz- oder Schieberventilen zugeordnet werden [27, S. 151–155]. Die Sitzbauweise ist exemplarisch in Bild 2.7 links dargestellt. Hierbei wird das Dichtelement zur Abdichtung auf einen Dichtsitz gedrückt. Bei der Schieberbauweise (Bild 2.7 rechts) werden die Dichtungs Kanäle durch ein Schieberelement geschaltet. Für weiterführende Informationen sei auf [27] und [28] verwiesen.



Bild 2.6: Herkömmliches pneumatisches Ventil [29]

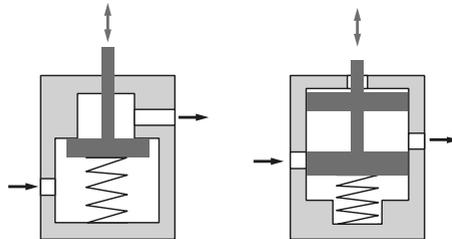


Bild 2.7: Vereinfachte schematische Darstellung der Sitzbauweise (links) und Kolbenschieberausführung (rechts) (vgl. [27])

Bei der Zuverlässigkeitsabsicherung pneumatischer Ventile wird üblicherweise zwischen Funktionsdauer- und Lebensdauerversuchen unterschieden [6].

Die **Funktionsdauerversuche** (FDV) dienen im Rahmen der Produktfreigabe zur Sicherstellung einer Mindestzuverlässigkeit. Hierbei werden jeweils drei baugleiche Prüflinge bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen getestet. Die Versuche dürfen gestoppt werden, wenn eine vorab spezifizierte Schaltspielzahl erreicht ist [6].

Im Rahmen von **Lebensdauerversuchen** (LDV) werden gemäß ISO 19973 [4, 5] Lebensdauerkennwerte für die Ventile ermittelt. Bei LDVs werden mindestens sieben baugleiche Prüflinge getestet. Üblicherweise werden die Versuche nur unter Nennbedingungen durchgeführt.

Sowohl bei FDV, als auch bei LDV werden die Ventile an ein Volumen angeschlossen. Durch ein zyklisches Schalten der Ventile wird das Volumen abwechselnd be- und entlüftet. Die Testfrequenz darf hierbei soweit erhöht werden, dass der Druck in den Volumen in jedem Zyklus noch unterhalb von 10 % sinkt und oberhalb 90 % des Versorgungsdruckes steigt [5, S. 4]. Es wird angenommen, dass die bis zu dieser Grenze erhöhte Frequenz keinen Einfluss auf die Lebensdauer hat. Wird im Versuch ein Lebensdauerkennwert unter erhöhten Frequenzen ermittelt, wird erwartet, dass dieser dem im Feld beobachteten Lebensdauerkennwert bei geringeren Frequenzen entspricht.

Zur Feststellung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Ventile werden diese regelmäßig aus dem Versuch entnommen und spezifische Messungen durchgeführt. Die Ventile gelten als ausgefallen, wenn diese eine zu hohe Leckage aufweisen oder nicht mehr korrekt schalten (vgl. ISO 19973 [4, 5]).

2.4.2 Festo Motion Terminal (VTEM)

Im Gegensatz zu herkömmlichen pneumatischen Ventilen kann bei den Ventilen des Festo Motion Terminals durch Software die Funktionalität des Ventils geändert werden. So lassen sich neben einfachen Schaltaufgaben auch komplexe Bewegungsaufgaben realisieren (vgl. [3]).

Eine Übersicht des Motion Terminals ist in Bild 2.8 dargestellt. Es besteht aus bis zu acht Ventilscheiben, die von einem Controllermodul angesteuert werden. Das Controllermodul ist an einer speicherprogrammierbaren Steuerung angeschlossen.

Eine Ventilscheibe besteht jeweils aus acht Piezobiegern, welche zur Vorsteuerung von insgesamt vier Membransitzventilen („Boosterpatronen“) verwendet werden. Die Boosterpatronen sind notwendig, da die Piezobieger allein nicht

für den vorgesehenen Durchfluss ausreichen. Sowohl die Boosterpatronen, als auch die Vorsteuerventile sind jeweils als pneumatische Vollbrücke verschaltet. Dies hat den Vorteil, dass die Arbeitsanschlüsse des Motion Terminals völlig unabhängig voneinander angesteuert werden können (vgl. Bild 2.9).

Der Öffnungsquerschnitt der Boosterpatrone kann über einen integrierten Hubsensor abgeleitet werden. Durch eine Rückmeldung der Sensorwerte an ein

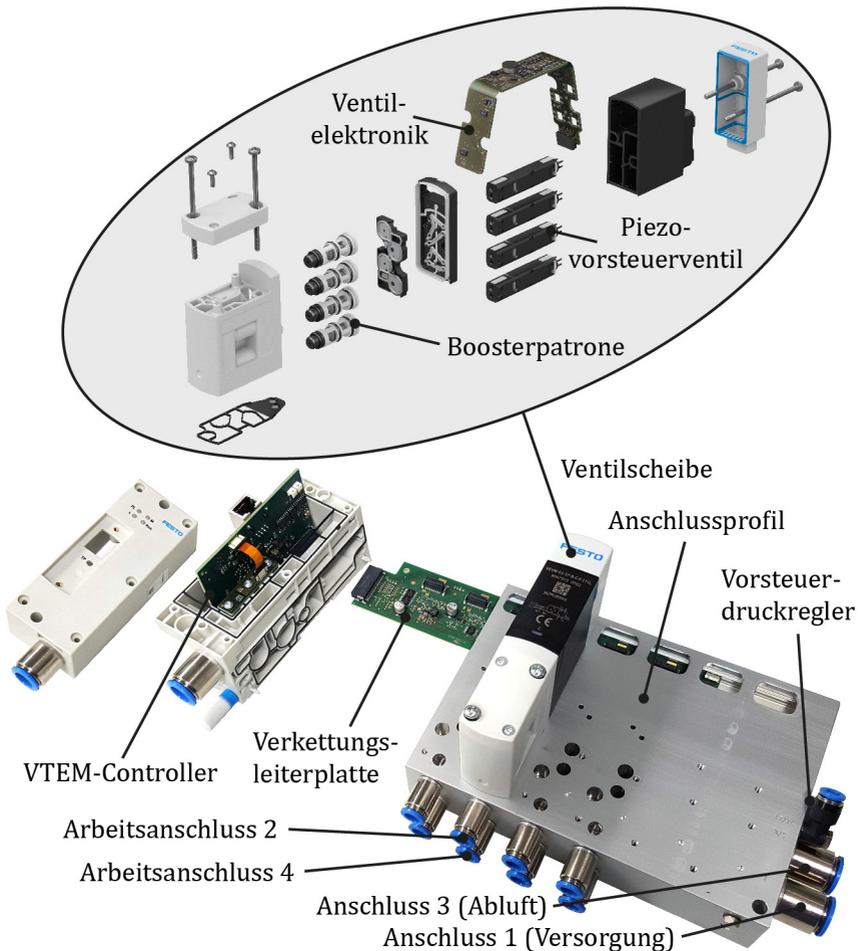


Bild 2.8: Übersicht des Festo Motion Terminals (VTEM) basierend auf [30]

Field Programmable Gate Array (FPGA) kann eine Hubregelung realisiert werden. Im Festo Motion Terminal sind Drucksensoren an jedem Arbeitsanschluss sowie an der Zuluft und Abluft vorhanden. Die Drucksensorwerte werden im Controller verarbeitet und können in übergeordneten Applikationen („Motion Apps“) verwendet werden.

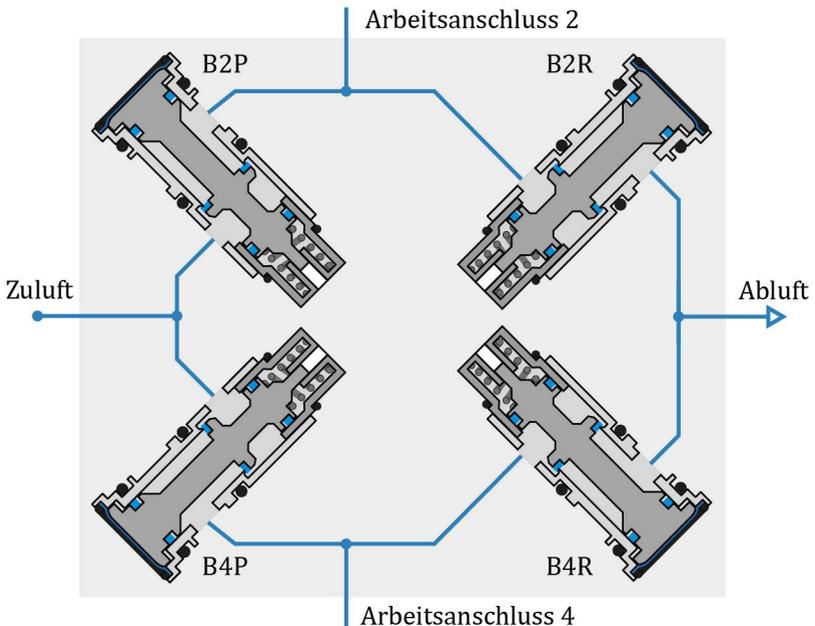


Bild 2.9: Verschaltung der Booster als pneumatische Vollbrücke im Ventil

Bei herkömmlichen Ventilen existieren etablierte Vorgehensweisen zur Zuverlässigkeitsabsicherung. Bei dem hier beispielhaft betrachteten mechatronischen System stellt sich die Frage, wie die Zuverlässigkeit der praktisch unbegrenzten Anwendungsfälle sichergestellt werden kann. In den folgenden Abschnitten wird daher der Stand der Technik zur Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme näher betrachtet.

2.5 Grundlagen der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme vereinen die Domänen der Mechanik, Elektronik und Software [1, 2], wodurch sich die Möglichkeit neuer Produkte ergeben. Da mit mechatronischen Systemen ein vergrößerter Funktionsumfang als bisher realisiert werden kann, steigt die Komplexität des Systems. Im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse muss die Zuverlässigkeit in den drei Domänen, als auch mögliche Interaktionen zwischen den einzelnen Domänen berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse der Mechanik (Abschnitt 2.5.1), Elektronik (Abschnitt 2.5.2) und Software (Abschnitt 2.5.3) vorgestellt. Darauf aufbauend folgen im Abschnitt 2.5.4 die Grundlagen zur Ermittlung und Modellierung von Wechselwirkungen. In Abschnitt 2.5.5 wird dargestellt, wie die Zuverlässigkeit eines Gesamtsystems aus den Ausfallwahrscheinlichkeiten von Unterkomponenten ermittelt werden kann.

2.5.1 Zuverlässigkeit von Mechanik

Bei Ausfällen mechanischer Komponenten kann zwischen einem Ausfall durch Überbeanspruchung sowie einem Driftausfall unterschieden werden [1, S. 24]. Ausfälle durch Überbeanspruchung können mittels einer entsprechenden Auslegung unterbunden werden. Driftausfälle, beispielsweise hervorgerufen durch Ermüdung und Verschleiß, treten bei mechanischen Komponenten häufig auf. Für die Zuverlässigkeitsuntersuchung mechanischer Komponenten können je nach Phase im Produktlebenszyklus unterschiedliche Methoden angewendet werden (vgl. Bild 2.10). So können qualitative Methoden wie die FMEA und FTA (vgl. Abschnitt 2.3) frühzeitig eingesetzt werden.

Wird die Komponente durch eine schwingende Belastung geschädigt, kann bei bekannter Wöhlerlinie durch eine Schadensakkumulation eine Lebensdauer berechnet werden [31, 32, 7]. Alternativ können durch Lebensdauerversuche und eine anschließende statistische Auswertung von Ausfalldaten (vgl. Abschnitt 2.2) Lebensdauerkenneiwerte abgeleitet werden.

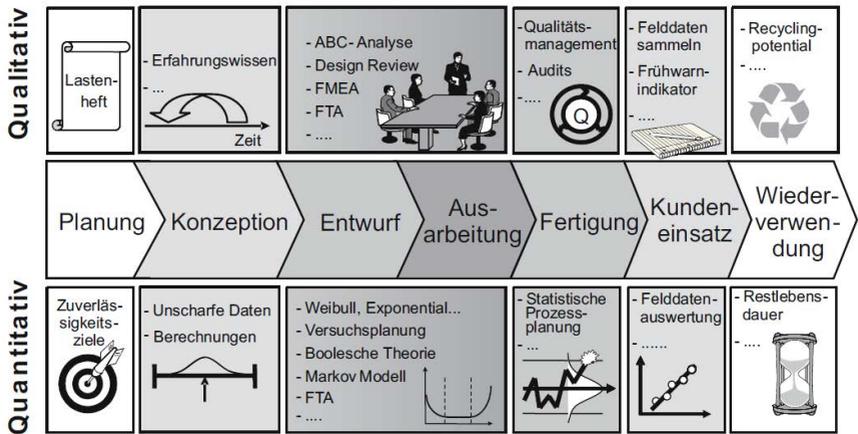


Bild 2.10: Zuverlässigkeitsmethoden im Produktlebenszyklus [7, S. 3]

2.5.2 Zuverlässigkeit von Elektronik

Elektronische Baugruppen können aus diskreten, bereits bestehenden elektronischen Komponenten aufgebaut werden. Für viele dieser Komponenten konnten bereits Lebensdauerwerte im Feld ermittelt und in sogenannten Ausfallratenkatalogen festgehalten werden. Gängige Ausfallratenkataloge sind beispielsweise das Military-Handbook 217F [33], die Siemens Norm 29500 [34] und die IEC TR 62380 [35]. Eine Übersicht verschiedener Ausfallratenkatalogen kann [36] entnommen werden.

Zumeist werden in den **Ausfallratenkatalogen** Berechnungsmodelle mit entsprechenden Parametern angegeben, welche eine Berechnung der Ausfallrate für die vorgesehenen Einsatzbedingungen ermöglichen. Alternativ können typische bzw. minimale Ausfallraten unter vorgegebenen Bedingungen entnommen werden. Bei der Berechnung wird eine konstante Ausfallrate angenommen. Ermüdungserscheinungen können somit nicht abgebildet werden. Zwischen den unterschiedlichen Ausfallratenkatalogen bestehen, u. a. bedingt durch unzureichend berücksichtigte Betriebs- und Versuchsbedingungen, teil-

weise Unterschiede im Bereich mehrerer Zehnerpotenzen [37, S. 63]. Die Vorhersage der sich in Realität ergebenden Lebensdauer ist somit nur mit entsprechenden Ungenauigkeiten möglich. Dennoch können die Literaturangaben für Konzeptvergleiche und Schwachstellenanalysen genutzt werden. Hierbei müssen die Lebensdauerkennwerte aus einem einzelnen Katalog verwendet werden [37, S. 63].

Für elektronische Komponenten existieren verschiedene **Raffungsmodelle** (vgl. [38–42]). Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, Lebensdauern für unterschiedliche Belastungen zu berechnen. So können beispielsweise bei erhöhten Belastungen Versuche durchgeführt und die resultierenden Lebensdauern auf die Lebensdauern im Feld umgerechnet werden. Durch die Wahl einer erhöhten Belastung kann die Versuchszeit deutlich reduziert werden.

Da die Lebensdauer elektronischer Komponenten durch die Temperatur beeinflusst werden kann, kann die Temperatur folglich zur Testbeschleunigung verwendet werden. Zur Ermittlung der Testbeschleunigung kann häufig das Arrhenius-Modell angewendet werden. Das Arrhenius-Gesetz beschreibt die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion in Abhängigkeit der Temperatur [44]. Mit Hilfe der Aktivierungsenergie E_a , der Boltzmannschen Konstante k und den absoluten Temperaturniveaus T_1 und T_2 ergibt sich folgender Raffungsfaktor :

$$RF = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2.9)$$

In Abhängigkeit des Schadensmechanismus kann ein anderes Raffungsmodell notwendig sein. Für eine korrekte Anwendung der Modelle darf sich der Schadensmechanismus in dem betrachteten Temperaturbereich nicht ändern. Auch sollte das gewählte Modell und dessen Parameter für den jeweiligen Anwendungsfall verifiziert werden. Für weitere gängige Modelle, deren Anwendungsfälle und entsprechende Testmethoden sei auf [38–42] verwiesen.

2.5.3 Zuverlässigkeit von Software

Im Gegensatz zu mechanischen und elektronischen Komponenten fällt Software nicht durch Verschleiß aus. Fehler in der Software sind bereits vor der Nutzung vorhanden und können im Betrieb unter gewissen Umständen zum Ausfall des Systems führen („inhärente Fehler“, vgl. [45]). Softwarefehler lassen sich in Spezifikationsfehler, Entwurfsfehler, Programmierfehler sowie durch Wartung und den Compiler hervorgerufene Fehler untergliedern [46]. Den größten Fehleranteil können hierbei der Spezifikation (Spezifikationsfehler) und deren Interpretation (Entwurfsfehler) zugeordnet werden [47, 48].

Zum Test der Software eines mechatronischen Systems werden in der Regel die Hardware des Systems und ggf. dessen Umgebungskomponenten benötigt. Um beispielsweise die Software des Controllers des Festo Motion Terminals testen zu können, muss eine Ventilinsel mit Controllern und Ventilen zur Verfügung stehen.

Die Hardware steht üblicherweise erst zum Schluss des Entwicklungsprojektes in ausreichender Zahl für die notwendigen Versuche zur Verfügung. Um dennoch frühzeitig testen zu können, wird bei der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206 [49]) der Einsatz von Hardware-in-the-Loop (HiL) und Software-in-the-Loop Simulationen vorgesehen. Hierbei werden Teile oder sogar das gesamte mechatronischen Systems durch Simulationsmodelle ersetzt.

Neben HiL und SiL Simulationen gibt es weitere Simulationsmöglichkeiten wie Model-in-the-Loop (MiL) oder Processor-in-the-Loop (PiL). Die verschiedenen Simulationen sind unter dem Überbegriff X-in-the-Loop (XiL) Simulationen zusammengefasst. Hierbei steht das „X“ für die zu testende Komponente (vgl. [50]). Bei MiL werden im Gegensatz zu SiL nur die Algorithmen und nicht die komplette Software / Firmware getestet.

Wie auch bei der Mechanik, können bei der Softwareentwicklung qualitative Methoden, wie die FMEA oder die Fehlerbaumanalyse, angewendet werden (vgl. Abschnitt 2.3). Mit Hilfe der qualitativen Methoden kann die Anzahl verbleibender Softwarefehler reduziert werden.

Mit Hilfe quantitativer Modelle kann die Anzahl der Softwarefehler abgeschätzt und eine entsprechende Zuverlässigkeit abgeleitet werden. Hierzu werden die in der Software entdeckten Fehler kumuliert über die Zeit aufgetragen und mittels geeigneter Modelle approximiert (vgl. Bild 2.11). Ist eine Zielzuverlässigkeit definiert, kann die verbleibende Entwicklungszeit vorhergesagt werden. Liegt die vorhergesagte Entwicklungszeit oberhalb bzw. die Zuverlässigkeit unterhalb der Planung, können entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Eingesetzt werden können unterschiedliche Modelle wie z. B. das Jelinski-Moranda Modell oder das Goel-Okumoto Modell. Eine Übersicht und Beschreibung gängiger Modelle kann [51–54] entnommen werden.

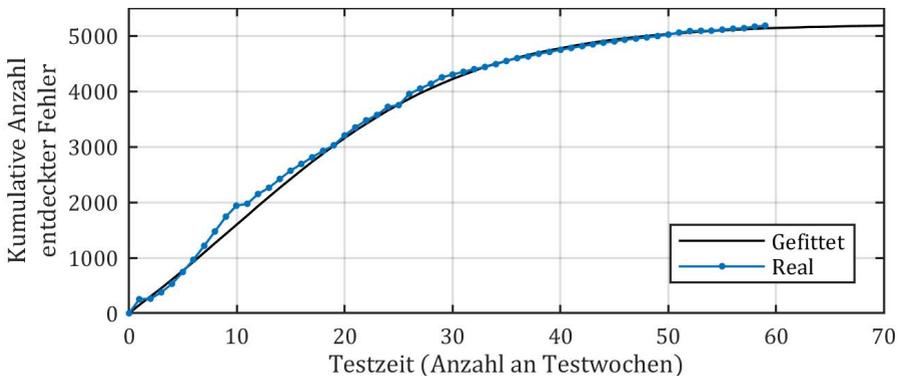


Bild 2.11: Vergleich realer und gefitteter Daten [54, S. 61]

Vorausgehend wurden die Grundlagen der Zuverlässigkeit für die jeweiligen Domänen eines mechatronischen Systems gesondert betrachtet. Im folgenden Abschnitt werden die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Domänen, als auch zwischen einzelnen Komponenten domänenübergreifend betrachtet.

2.5.4 Erfassung von Wechselwirkungen

Wechselwirkungen sind in verschiedenen Fachgebieten gegenwärtig. Im Bereich der Medizin sind Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arzneimitteln alltäglich. In der Physik beschreiben gravitative Wechselwirkungen die gegenseitige Beeinflussung von Teilchen durch ihre Masse [55, S. 79]. Im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung wird von einer Wechselwirkung gesprochen, wenn der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors beeinflusst wird ([56–58], vgl. Abschnitt 2.7).

Für Wechselwirkungen innerhalb des mechatronischen Systems wird im Rahmen dieser Arbeit die folgende Definition verwendet [59, S. 6]:

„Unter einer Wechselwirkung wird eine gegenseitige Beeinflussung von zwei oder mehreren Komponenten verstanden. Diese Beeinflussung kann entweder positiv, neutral oder negativ sein.“

Hierbei werden zwischen direkten und indirekten Wechselwirkungen, sowie zwischen Beeinflussungen durch die Umgebungen unterschieden [59, S. 29]. Wechselwirkungen können mittels unterschiedlicher Methoden erfasst und dargestellt werden. Hervorzuheben sind hierbei die komponentenbasierte Design Structure Matrix (DSM) sowie das Direct System Grid (DSG).

In einer DSM werden die relevanten Komponenten eines Systems paarweise verglichen und die Wechselwirkungen in einer Matrix eingetragen [60, 61]. Hierbei wird zwischen einer binären und numerischen DSM unterschieden. Während in einer binären DSM nur das Vorhandensein einer Wechselwirkung erfasst wird, wird bei einer numerischen DSM zusätzlich die Stärke der Wechselwirkung bewertet. Durch eine Neuordnung der Zeilen und Spalten können Cluster gebildet werden. Ziel ist es, die Wechselwirkungen innerhalb von Clustern zu erhöhen und die Wechselwirkungen zwischen Clustern so gering wie möglich zu realisieren. Hierdurch können entsprechend der einzelnen Clustern Baugruppen aufgezeigt werden, welche weitestgehend unabhängig voneinander gestaltet werden können.

Nach einer quantitativen Bewertung der Wechselwirkungen in der Matrixdarstellung können die Werte in den Zeilen und Spalten aufsummiert werden. Hierdurch ergeben sich die sogenannten Aktiv- und Passivsummen [59, 62, 63]. Die Aktivsumme gibt hierbei an, wie stark die jeweilige Komponente andere Komponenten beeinflusst. Durch die Passivsumme wird ausgedrückt, wie stark die jeweilige Komponente von anderen Komponenten beeinflusst wird. Zur Visualisierung und weiteren Analyse kann die Aktivsumme über der Passivsumme in einem sogenannten Direct System Grid (DSG) aufgetragen werden [59, 63]. Wie in Bild 2.13 dargestellt, kann das DSG durch die Berechnung der jeweiligen Medianwerte in die vier Teilbereiche aktiv, ambivalent, passiv und puffernd unterteilt werden. Sollen Wechselwirkungen im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse betrachtet werden, können Komponenten mit hohen Aktiv- bzw. Passivsummen priorisiert betrachtet werden. Komponenten im puffernden Bereich können ggf. vernachlässigt werden. Für weiterführende Informationen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen sei auf [59] verwiesen.

Wie die als relevant bewerteten Wechselwirkungen in einer Modellierung berücksichtigt werden können wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

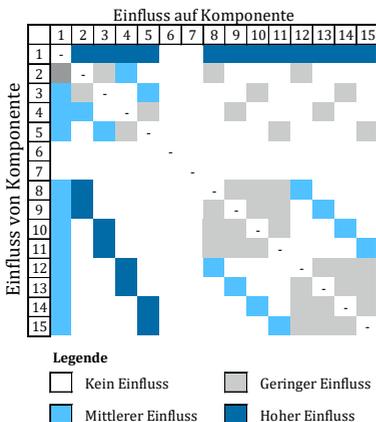


Bild 2.12: Beispielhafte komponentenbasierte Design-Structure Matrix, vgl. [60, 61]

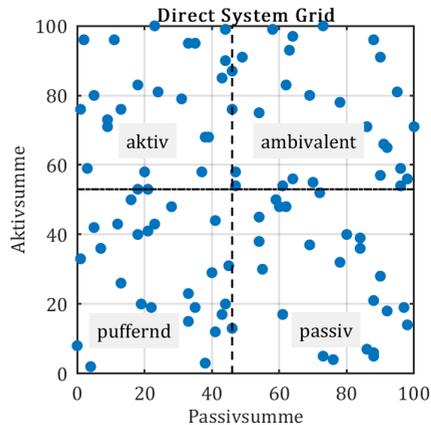


Bild 2.13: Beispielhaftes Direct System Grid, vgl. [63, 59]

2.5.5 Zuverlässigkeitsmodellierung von Systemen

Wie in den vorausgehenden Abschnitten vorgestellt, können Zuverlässigkeitskennwerte für die unterschiedlichen Komponenten eines mechatronischen Systems ermittelt werden. Für die Berechnung von Zuverlässigkeitskennwerten des kompletten Systems können unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden die Boolesche Systemtheorie, die Markov-Methode sowie die Petrinetze vorgestellt.

Mit Hilfe der **Booleschen Systemtheorie** kann das Ausfallverhalten von nicht reparierbaren Systemen berechnet werden. Systemelemente werden hierbei als unabhängig voneinander betrachtet und können nur die Zustände „funktionsfähig“ oder „ausgefallen“ annehmen [15, 7]. Wechselwirkungen zwischen Komponenten können somit nicht berücksichtigt werden. Liegt die Struktur des Systems als reine Serienstruktur vor, kann die Systemzuverlässigkeit durch die Multiplikation der einzelnen Bauteilzuverlässigkeiten berechnet werden ([7, S. 81], Gleichung (2.10)). Eine Parallelstruktur kann gemäß Gleichung (2.11) berechnet werden ([7, S. 83]. Mit Hilfe der Booleschen Systemtheorie kann somit vergleichsweise einfach eine Systemzuverlässigkeit unter den genannten Einschränkungen berechnet werden.

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_{Bi}(t) \quad (2.10)$$

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2.11)$$

Mit Hilfe der **Markov-Methode** können auch reparierbare Systeme beschrieben werden [7, 64]. Wie in Bild 2.14 dargestellt, kann ein Systemelement entweder den Zustand Z_0 (funktionsfähig) oder Z_1 (ausgefallen, Reparaturzustand) annehmen. Zwischen den Zuständen kann mit der Ausfallrate λ und der Reparaturrate μ gewechselt werden. Bei der Markov-Methode können jedoch nur konstante Ausfall- und Reparaturraten berücksichtigt werden. Mit Hilfe dieser Methode kann die Systemverfügbarkeit ermittelt werden.

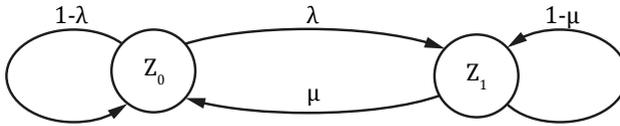


Bild 2.14: Markov-Graph für ein Einzelement [7, S. 367]

Eine vielfältig einsetzbare Methode zur Modellierung sind die sogenannten **Petrinetze** (vgl. Bild 2.15). Diese wurden von Carl Adam Petri entwickelt und 1962 vorgestellt [65].

Ein Petrinetz basiert auf vier grundlegenden Objekten [66–69]:

- Stellen: Eine Stelle repräsentiert einen möglichen Zustand des Systems und wird durch einen Kreis visualisiert. Stellen können Marken enthalten.
- Marken: Durch Marken wird der aktuelle Zustand des Systems markiert. Dargestellt werden Marken durch ausgefüllte Kreise.
- Transitionen: Mögliche Zustandsübergänge werden Transitionen genannt und sind durch ein Rechteck dargestellt. Wird eine Transition geschaltet, werden Marken gelöscht oder erzeugt.
- Kanten: Kanten stellen die Verbindungen zwischen Stellen und Transitionen dar. Eine Normalkante wird durch einen Pfeil dargestellt.

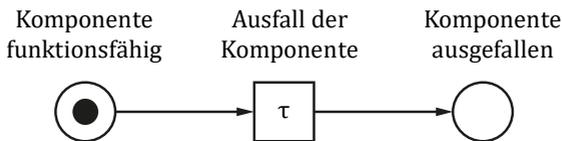


Bild 2.15: Petrinetz einer einzelnen Komponente

Das in Bild 2.15 dargestellte Petrinetz besteht aus einer Komponente mit zwei möglichen Zuständen. Der Ausgangszustand „Funktionsfähig“ wird durch die Marke in der entsprechenden Stelle angegeben. Nach Aktivierung der Transition wird die bestehende Marke gelöscht und im Zustand „Ausgefallen“ neu erzeugt. Je nach Klasse des verwendeten Petrinetzes können für die Transitionen

deterministische oder stochastische Schaltzeiten vorgegeben werden. Im Beispiel der Zuverlässigkeitsmodellierung einer Komponente könnte die in Versuchen ermittelte Ausfallverteilung als Schaltzeitverzögerung eingetragen werden. Die mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelte mittlere Verweildauer im Zustand „Funktionsfähig“ entspricht der Zuverlässigkeit der Komponente [67, 68].

Basierend auf den von Carl Adam Petri vorgestellten Petrinetzen wurden im Laufe der Zeit verschiedene, aufeinander aufbauende Erweiterungen vorgestellt. Hervorzuheben sind hierbei die erweiterten stochastische Petrinetze (Extended Stochastic Petri Nets, **ESPN**), die farbigen Petrinetze (Coloured Petri Nets, **CPN**) oder die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (Extended Coloured Stochastic Petri Nets, **ECSPN**) [67, 68, 70]. Die Petrinetze unterscheiden sich primär durch die möglichen Modellierungsaspekte (wie z. B. die Art der Markeninterpretation und -eigenschaften sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten der Zeitverzögerungen von Transitionen).

Mit Hilfe des ECSPN ist eine detaillierte zuverlässigkeitstechnische Modellierung möglich. Neben Ausfallabhängigkeiten und Alterung können auch Kriterien der Instandhaltung, wie z. B. Warteschlangenverhalten, direkt modelliert werden [67, S. 39]. Das ECSPN kann somit für eine Modellierung der Zuverlässigkeit eines mechatronischen Systems unter der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Komponenten verwendet werden.

In den Unterabschnitten von Abschnitt 2.5 wurden die grundlegenden Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung der Domänen eines mechatronischen Systems vorgestellt. Durch eine Erfassung der Wechselwirkungen und Modellierung des Gesamtsystems kann die Systemzuverlässigkeit ermittelt werden. Die Lebensdauer des Systems ist abhängig von den im Betrieb herrschenden Belastungen. Im folgenden Abschnitt wird vorgestellt, mit welchen Methoden die Betriebsbelastungen erfasst und klassifiziert werden können.

2.6 Methoden zur Klassifizierung der Betriebsbelastung

Zur Erfassung und Aufbereitung der im Betrieb auftretenden Belastungen existieren unterschiedliche Methoden. Mit Hilfe dieser Methoden ist es möglich, einen zeitlichen Belastungsverlauf in die relevanten Belastungsanteile zu zerlegen. Ein Beispiel mit Hilfe der Von-Bis-Zählung ist in Bild 2.16 dargestellt. Analog zum Namen des Verfahrens werden hierbei die steigenden und fallenden Abschnitte des Belastungsverlaufes in einer Matrix abgelegt. Gängige Namen für diese Von-Bis-Matrix sind auch Übergangsmatrix, Korrelationsmatrix oder Markov-Matrix [7, S. 313]. In dieser Matrix sind die relevanten Informationen wie die Extremwerte aus dem zeitabhängigen Belastungsverlauf enthalten.

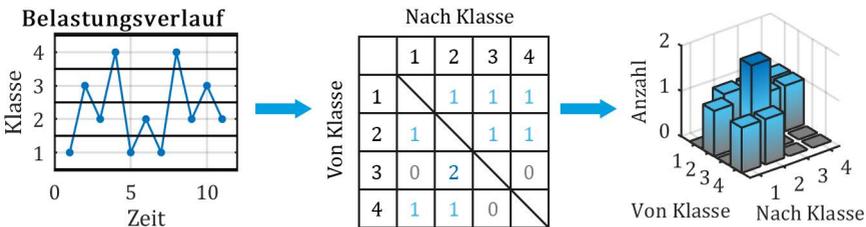


Bild 2.16: Veranschaulichung der Von-Bis-Zählung (vgl. [7, S. 314])

Insbesondere bei hohen Abtastraten und langen Messdauern kann der zeitliche Belastungsverlauf einen großen Speicherplatz benötigen. Wie Bild 2.16 zeigt, besitzt die Übergangsmatrix eine nur von der Anzahl an Klassen abhängige Dimension. Die Größe der Matrix bleibt über die Messdauer stets konstant. Nur die Werte innerhalb der Matrix ändern sich. Durch die Klassifizierung des Belastungsverlaufs können folglich die zu speichernden Daten bei Erhalt der relevanten Informationen deutlich reduziert werden.

Neben der Von-Bis-Zählung existieren weitere Methoden zur Erfassung der Betriebsbelastung. Bei der Verweildauerzählung wird die kumulierte Zeit in den jeweiligen Klassen ermittelt [7, S. 311–313]. Mit Hilfe der Momentanwertzählung wird in konstanten Zeitintervallen die aktuelle Klasse ermittelt und hoch-

gezählt. Beim Klassengrenzenüberschreitungsverfahren werden Überschreitungen von den jeweiligen Klassengrenzen aufsummiert [7, S. 308–310]. Bei der Rainflow-Zählung werden geschlossene Hystereseschleifen des Belastungsverlaufes gezählt [7, S. 315–316]. Unvollständige Hystereseschleifen werden als Residuum abgespeichert. Mit Hilfe der Rainflow-Zählung können Amplituden und Mittelwerte der Schwingspiele des Belastungsverlaufes identifiziert werden. Für weiterführende Informationen zu den einzelnen Methoden sei auf [7, 31, 71] verwiesen.

Wie der Einfluss der jeweiligen Betriebsbelastungen auf die Lebensdauer ermittelt werden kann, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

2.7 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Zur passenden Beschreibung des Verhaltens eines Systems sind oft experimentelle Untersuchungen notwendig. Hierbei gilt es, trotz Messungenauigkeiten mit möglichst geringem Aufwand das Maximum an Erkenntnissen zu erzielen. Auch müssen Einflüsse unterschiedlicher Faktoren berücksichtigt werden. Hierzu kann die Methode der statistischen Versuchsplanung („Design of Experiments“, DoE) verwendet werden, welche 1935 von R. A. Fischer vorgestellt wurde [56]. Diese Methode ist mit entsprechenden Weiterentwicklungen der aktuelle Stand der Technik zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchen. Die Grundlagen hierzu werden im Folgenden vorgestellt.

Die folgenden Begriffe sind in der statistischen Versuchsplanung gebräuchlich und für das Verständnis dieser Arbeit notwendig [56–58]:

- Zielgröße: Die im Versuch zu ermittelnde Größe.
- Einflussgrößen: Größen, welche die Zielgröße ggf. beeinflussen können.
- Faktor: Im Versuch untersuchte Einflussgrößen. Faktoren können qualitativ (kategorisch, z. B.: ja / nein) oder quantitativ (numerisch, z. B.: 10 °C / 50 °C) sein.

- Stufe / Einstellung: Einstellungen der jeweiligen Faktoren im Versuch.
- Effekt: Gemittelte Änderung der Zielgröße als Folge einer veränderten Stufe eines Faktors.
- Wechselwirkung: Der Effekt eines Faktors ist von der Einstellung eines anderen Faktors abhängig. Bei Mehrfachwechselwirkungen ist der Effekt abhängig von den Einstellungen mehrerer Faktoren.

Zur Bestimmung des Einflusses mehrerer Faktoren auf eine Zielgröße werden oftmals basierend auf einem Ausgangspunkt die Einstellungen der jeweiligen Faktoren einzeln nacheinander variiert. So soll gewährleistet werden, dass die Änderung der Zielgröße einem einzelnen Faktor zugeordnet werden kann. Dieses Vorgehen wird auch „one-factor-at-a-time“ (OFAT) genannt und ist in Bild 2.17 links dargestellt (vgl. [58]). Um trotz Streuung die Zielgröße ausreichend genau ermitteln zu können, sind in der Regel mehrere Wiederholungen der einzelnen Versuche notwendig. In dem hier gezeigten Beispiel werden acht Versuche pro Versuchspunkt durchgeführt.

Im Gegensatz zu OFAT werden bei der statistischen Versuchsplanung auch Einstellungen mehrerer Faktoren gleichzeitig geändert (vgl. Bild 2.17 rechts). Hieraus ergeben sich verschiedene Vorteile. Durch das Testen aller möglichen Kombinationen können Wechselwirkungen identifiziert werden. Durch den ausgewogenen Versuchsplan können die Versuchsergebnisse aller Versuche der jeweiligen Stufe eines Faktors für die Berechnung des jeweiligen Effektes berücksichtigt werden. Wie in Bild 2.17 rechts dargestellt, sind bereits bei der geringen Anzahl an Faktoren des Beispiels insgesamt weniger Versuche als bei dem herkömmlichen Vorgehen notwendig. Da pro Faktor jeweils acht Versuche zur Berechnung des Effektes zur Verfügung stehen, können die Haupteffekte bei der statistischen Versuchsplanung mit der gleichen Güte wie bei OFAT ermittelt werden [58].

Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung ist es somit möglich, effizient den Einfluss inklusive Wechselwirkungen verschiedener Faktoren auf eine Zielgröße bestimmen zu können.

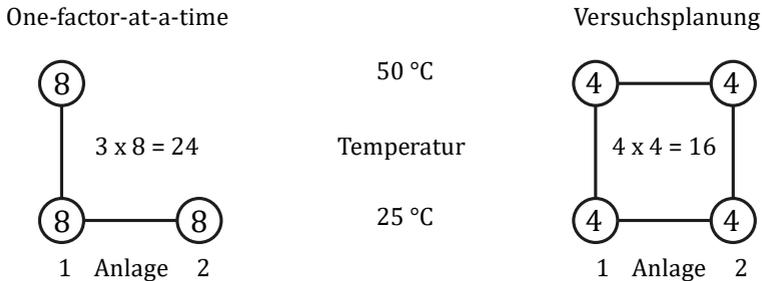


Bild 2.17: Vergleich von OFAT (links) und DoE (rechts). [58, S. 4]

Zur Bewertung, ob ein Faktor einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße besitzt, kann ein Hypothesentest angewendet werden [11]. Hierbei besteht jedoch nur die Möglichkeit, eine Hypothese zu widerlegen, nicht diese zu beweisen [57, S. 97]. Somit wird üblicherweise von der so genannten Nullhypothese ausgegangen. Diese nimmt an, dass die Faktoren keinen Einfluss auf die Zielgröße haben. Kann die Nullhypothese durch entsprechende Beobachtungen widerlegt werden, wird hierdurch die Alternativhypothese (Faktoren haben einen Einfluss) wahrscheinlich.

Ein Hypothesentest kann nicht mit absoluter Sicherheit eine Hypothese akzeptieren oder verwerfen. Eine Entscheidung kann dabei nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit als wahr oder falsch identifiziert werden. Hierbei sind prinzipiell zwei Fehlentscheidungen möglich [10, 426-429]:

- α -Fehler (Fehler 1. Art): Die Nullhypothese wird zu Unrecht verworfen. „Falscher Alarm“.
- β -Fehler (Fehler 2. Art): Die Nullhypothese wird zu Unrecht akzeptiert. „Versäumter Alarm“.

Die Wahrscheinlichkeit $1 - \beta$, mit welcher die Nullhypothese korrekterweise abgelehnt wird (also ein real vorhandener Effekt als solcher erkannt wird), wird auch als „Power“ bezeichnet (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Fehlentscheidungen im Hypothesentest [10, S. 427]

	Nullhypothese wahr	Nullhypothese falsch
Nullhypothese abgelehnt	Fehler 1. Art (α -Fehler)	Richtige Entscheidung (Power $1 - \beta$)
Nullhypothese akzeptiert	Richtige Entscheidung ($1 - \alpha$)	Fehler 2. Art (β -Fehler)

Mit Hilfe eines Hypothesentests kann überprüft werden, ob die Nullhypothese bei einem vorgegebenen Wert für α (z. B. $\alpha = 0,05$) abgelehnt oder akzeptiert werden kann. Hierbei wird jedoch keine Information darüber gegeben, ob der vorgegebene Schwellwert knapp oder sehr weit überschritten wird. Daher wird üblicherweise der sogenannte p-Wert verwendet [72, S. 40]. Der p-Wert ist der kleinste Wert von α , bei welchem die Nullhypothese abgelehnt werden kann. Mit Hilfe des p-Wertes kann festgestellt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit Effekte vorliegen. Bei $p < 0,05$ wird üblicherweise von statistisch signifikanten Daten gesprochen [10, S. 431].

Für weiterführende Informationen zu Hypothesentests sowie Planung und Auswertungen von statistischen Versuchsplänen sei auf [10, 56, 58, 72, 57] verwiesen.

Im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung können unterschiedliche Versuchspläne zum Einsatz kommen. Ein vollständig faktorieller (vollfaktorieller) Versuchsplan beinhaltet alle möglichen Faktorstufenkombinationen. Wie in Bild 2.18 veranschaulicht, beinhaltet ein vollfaktorieller Versuchsplan bei zwei Stufen und drei Faktoren $2^3=8$ Versuchspunkte. Mit zunehmender Anzahl an Faktoren steigt der Versuchsaufwand stark an. Bei acht Faktoren ergeben sich bereits 256 Versuchspunkte. Ein Großteil dieser Versuche wird jedoch für die Bestimmung von Wechselwirkungen benötigt, insbesondere für Wechselwirkungen zwischen drei und mehr Faktoren [58, S. 122]. Wechselwirkungen zwischen drei Faktoren (3-fach Wechselwirkungen, 3FWW) haben in der Praxis nur selten eine Bedeutung [58, S. 138]. Bei größerer Anzahl an Faktoren werden vollfaktorielle Versuchspläne folglich ineffizient.

Anstelle der höheren Wechselwirkungen können auch weitere Faktoren untersucht werden. Solche Versuchspläne werden fraktionelle faktorielle (teilkonto-

rielle) Versuchspläne genannt. Die Vermengung von Effekten und Wechselwirkungen wird hierbei durch die Auflösung beschrieben. Bei einem Versuchsplan mit Auflösung III sind hierbei Hauptfaktoren mit 2FWW vermengt. Bei einem Versuchsplan mit Auflösung IV sind Hauptfaktoren mit 3FWW sowie 2FWW untereinander vermengt. Versuchspläne ab Auflösung V (Vermengung von Haupteffekten und 4FWW sowie 2FWW und 3FWW) eignen sich für die Parametrierung eines linearen Beschreibungsmodells [57, S. 29, 58, S. 137–138].

Ein teilfaktorieller Versuchsplan für drei Faktoren ist beispielhaft in Bild 2.19 dargestellt. Die Versuchspunkte sind hierbei gleichmäßig angeordnet. Besitzt ein Faktor keinen bzw. einen vernachlässigbaren Einfluss, ergibt sich für die verbleibenden zwei Faktoren ein vollfaktorieller Versuchsplan. Sollte eine Bestimmung aller Haupteffekte und Wechselwirkungen notwendig sein, kann der teilfaktorielle Versuchsplan durch Testen der fehlenden Versuchspunkte zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan ausgebaut werden.

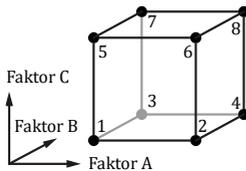


Bild 2.18: Vollständig faktorieller Versuchsplan [58, S. 108]

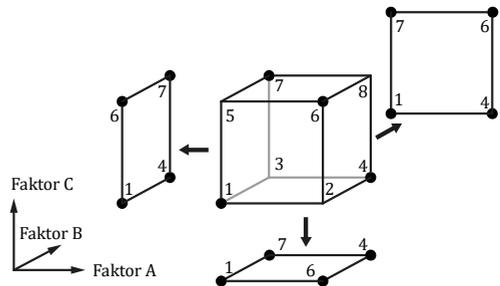


Bild 2.19: Teilfaktorieller Versuchsplan (vgl. [58, S. 133])

Neben vollfaktoriellen und teilfaktoriellen Versuchsplänen existieren weitere Versuchspläne. Gängig sind zentral zusammengesetzte Versuchspläne, Plackett-Burman, Box-Behnken oder die sogenannten optimalen Versuchspläne [58, 57, 72].

Ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan setzt sich aus einem voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplan und einem „Stern“ mit „Zentrum“ zusammen (vgl.

Bild 2.20). Da jeder Faktor in fünf Stufen untersucht wird, können mit Hilfe dieses Versuchsplanes auch nichtlineare Zusammenhänge ermittelt werden. Wie in Bild 2.21 dargestellt, werden bei einem Box-Behnken Versuchsplan die Versuchspunkte auf die Mittelpunkte der Würfelkanten sowie den Zentralpunkt gelegt. Der Versuchsplan kann ebenfalls zur Parametrierung eines quadratischen Modellansatzes verwendet werden. Das ermittelte Beschreibungsmodell gilt jedoch nicht in den Ecken.

Bei Plackett-Burman Versuchsplänen der Auflösung III sind Zweifachwechselwirkungen mit mehreren Haupteffekten überlagert. Dies ist vorteilhaft, wenn die Zweifachwechselwirkungen klein sind. Dann können die Hauptfaktoren relativ genau ermittelt werden. Sind die Zweifachwechselwirkungen jedoch zu groß, werden fast alle Faktoren beeinflusst. Das Versuchsergebnis wird dadurch unbrauchbar verfälscht [58, S. 149–153]. Die Vermengungen von Haupteffekten und Zweifachwechselwirkungen kann durch eine Wiederholung der gesamten Versuche mit invertierten Einstellungen aufgelöst werden [57, S. 31–33].

Bei den sogenannten optimalen Versuchsplänen, wie z. B. den D-optimalen Versuchsplänen, kann ein beliebiger Modellansatz vorgegeben werden. Basierend darauf erfolgt die Ermittlung der hierfür notwendigen Versuchspunkte. Die Optimalität gilt jedoch nur für den vorgegebenen Modellansatz, welcher üblicherweise nicht zu Versuchsbeginn bekannt ist [58, S. 217].

Bei einer statistischen Versuchsplanung wird üblicherweise ein zweistufiges Vorgehen gewählt [57, S. 264]: In einem ersten Schritt werden mittels eines Screening-Versuchsplanes Faktoren mit signifikantem Einfluss auf die Zielgröße identifiziert. Auf Basis dieser Informationen wird eine zweite Versuchsreihe durchgeführt, um den Einfluss dieser ausgewählten Faktoren und ggf. Wechselwirkungen genauer zu untersuchen. Falls notwendig kommen Versuchspläne zum Einsatz, mit welchen auch nichtlineare Einflüsse erfasst werden können.

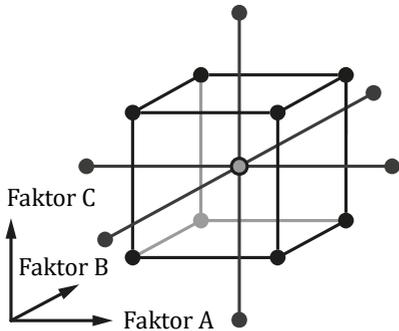


Bild 2.20: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan [58, S. 199]

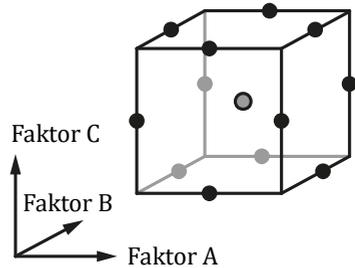


Bild 2.21: Box-Behnken Versuchsplan [57, S. 41]

Voraussetzung für die Auswertung einer DoE ist, dass die Messwerte der Zielgröße in den jeweiligen Faktoreinstellungen normalverteilt sind [58, 72, 57]. Ist diese Voraussetzung erfüllt, kann der quantitative Einfluss der als statistisch signifikant bewerteten Faktoren ermittelt werden. Wie beispielhaft in Gleichung (2.12) für ein lineares Modell ohne Wechselwirkungen dargestellt, ist hierzu ein entsprechender Polynomansatz möglich. Mittels linearer Regressionsanalyse können anschließend die Koeffizienten β_k für die einzelnen Faktoren x_k geschätzt werden. Das Residuum ϵ soll hierbei möglichst klein werden. Wurden die Koeffizienten geschätzt, kann die vorhergesagte Zielgröße y durch Einsetzen der gewünschten Faktoreinstellungen im untersuchten Parameterraum berechnet werden (vgl. [73]).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.12)$$

Wie in Abschnitt 2.2 vorgestellt, sind Lebensdauerdaten üblicherweise nicht normalverteilt. Die direkte Auswertung von Lebensdauerdaten in einer DoE ist somit nicht möglich.

Können die Lebensdauerdaten mittels einer Lognormalverteilung gefittet werden, besteht die Möglichkeit durch Logarithmieren der Ausfalldaten normalverteilte Daten zu erhalten. Für die so transformierten Daten kann eine übliche

Auswertung der DoE durchgeführt werden. Liegen jedoch zensierte Ausfalldaten vor (z. B. intervallzensiert und / oder rechtszensiert, vgl. Abschnitt 2.2), kann dieses Vorgehen nicht angewendet werden [74, S. 605].

Zur Berücksichtigung zensierter Ausfalldaten oder mittels Weibull-Verteilung angenäherte Datensätze muss die Auswertung der DoE angepasst werden. Für Weibull-verteilte Daten mit zwei Faktoren wird beispielsweise der Ansatz in Gleichung (2.13) gewählt [73]. Hierbei beschreibt das Polynom den Lageparameter der 2P-Weibullverteilung. Da der Lageparameter keine negativen Werte annehmen kann, ist dieser logarithmisch transformiert. Hierbei wird angenommen, dass der Formparameter für alle Faktorstufen gleichbleibt. Durch die unterschiedlichen Belastungen darf sich der Schadensmechanismus folglich nicht ändern.

$$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.13)$$

Für die Parameterschätzung und die Berechnung des p-Wertes wird die sogenannte Maximum-Likelihood-Estimation (MLE) zugrunde gelegt. Mit Hilfe dieser Methode werden diejenigen Parameter einer vorgegebenen Verteilung geschätzt, welche die Daten am wahrscheinlichsten abbildet. Die MLE ist bei der Auswertung von Lebensdauerdaten weit verbreitet [16, 7, 9, 10, 75].

Zur Feststellung, ob die getesteten Faktoren bei einer Auswertung mit Lebensdauerdaten einen statistisch signifikanten Einfluss haben, wird der Likelihood-Quotienten-Test (englisch Likelihood Ratio, LR) gemäß Gleichung (2.14) verwendet (vgl. [76]). Hierbei wird der Likelihoodwert L sowohl für den vollständigen Modellansatz als auch für den zu testenden Faktor entfernten Modellansatz berechnet. Wenn der Effekt des getesteten Faktors klein ist, ändert sich der Likelihoodwert L nur gering. Der Likelihood-Quotient ist in diesem Fall nahe 0. Umgekehrt können signifikante Effekte eines Faktors durch einen großen Likelihood-Quotienten identifiziert werden [76].

$$LR_{\text{Faktor X}} = -2 \ln \frac{L_{\text{Faktor X entfernt}}}{L_{\text{Vollständiger Modellansatz}}} \quad (2.14)$$

Der Likelihoodwert L berechnet sich in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung (Weibull, Lognormal, ...) sowie der Art der Zensierung der Lebensdauerdaten (keine Zensierung, rechtszensiert, intervallzensiert, intervall- und rechtszensiert). Die Likelihood Funktion für eine Weibullverteilung mit unzensierten Lebensdauerdaten ist beispielhaft in Gleichung (2.15) dargestellt (vgl. [73]). Hierbei ist F_e die Gesamtanzahl der ermittelten Ausfallzeiten, T_i die charakteristische Lebensdauer und t_i der Zeitpunkt des i -ten Ausfalls.

$$L_{\text{Weibull unzensiert}} = \prod_{i=1}^{F_e} \left[\frac{b}{T_i} \left(\frac{t_i}{T_i} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t_i}{T_i} \right)^b \right] \right] \quad (2.15)$$

Für beispielhafte Auswertungen und weitere Details zur Auswertung von Lebensdauerdaten im Rahmen einer DoE für unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen und zensierte Lebensdauerdaten sei auf [12, 74, 73, 76] verwiesen.

Mit Hilfe der Zuverlässigkeits-DoE ist es möglich, effizient den Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Lebensdauer zu ermitteln. Wie vorausgehend vorgestellt, muss hierbei jedoch eine auf Lebensdauerdaten angepasste Auswertung verwendet werden.

In diesem Kapitel wurden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert. Neben quantitativen und qualitativen Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse wurde auf die Grundlagen der Absicherung pneumatischer Ventile, der einzelnen Domänen eines mechatronischen Systems, Methoden zur Klassifizierung der Betriebsbelastungen sowie der statistischen Versuchsplanung eingegangen.

Im Folgenden werden übergeordnete Vorgehensweisen betrachtet und untersucht, inwieweit bestehende Vorgehensweisen den Anforderungen genügen.

3 Analyse und Auswahl geeigneter Methoden

Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, inwieweit bereits bestehende Vorgehensweisen der Zuverlässigkeitsabsicherung mechatronischer Systeme die Anforderungen zur Absicherung des beispielhaft betrachteten Systems erfüllen. Hierfür werden die Anforderungen an die zu erarbeitende Vorgehensweise in Abschnitt 3.1 aufgestellt. In Abschnitt 3.2 wird untersucht, inwieweit sich bestehende Vorgehensweisen eignen. Mit Hilfe welcher Methoden Defizite der bereits bestehenden Vorgehensweisen potenziell behoben werden können, wird in den Abschnitten 3.3 und 3.4 analysiert. Eine Zusammenfassung der Defizite und der verbleibenden Forschungslücke wird in Abschnitt 3.5 vorgestellt.

Die Vorgehensweisen bauen auf den im vorausgehenden Kapitel 2 beschriebenen Methoden auf. Erfüllen Methoden die gestellten Anforderungen, werden diese in dem gesamtheitlichen Vorgehen des nachfolgenden Kapitels 4 entsprechend berücksichtigt.

3.1 Anforderungen an die Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Absicherung der Zuverlässigkeit des beispielhaft betrachteten mechatronischen Systems muss unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Zum einen müssen die unterschiedlichen Domänen der Mechanik, Elektronik und Software berücksichtigt werden (Anforderung (A.) 1). Es wird gefordert, dass quantitative Zuverlässigkeitskennwerte für das gesamte System abgeleitet werden können (A. 2). Das mechatronische System, für welches die Methode zum Einsatz kommen soll, ist neuartig. Es sind somit keinerlei Vorkenntnisse, insbesondere keine Zuverlässigkeitskennwerte für verbaute mechanische Komponenten vorhanden. Die Vorgehensweise muss die fehlenden

Vorkenntnisse berücksichtigen (A. 3). Das betrachtete System kann bei sehr unterschiedlichen Kundenanwendungen eingesetzt werden. Mit Hilfe der Vorgehensweise sollen für unterschiedliche Kundenanwendungen Zuverlässigkeitskennwerte abgeleitet werden können (A. 4).

In dem mechatronischen System werden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten erwartet. Die Wechselwirkungen sollen erfasst und in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden (A. 5). Die Vorgehensweise soll sich bereits bei der Entwicklung des Systems und nicht erst nach Abschluss der Entwicklung einsetzen lassen (A. 6).

Zusammengefasst ergeben sich die folgenden zentralen Anforderungen an die zu entwickelnde Vorgehensweise:

1. Gesamtheitliches Vorgehen unter der Berücksichtigung der Domänen Mechanik, Elektronik und Software.
2. Ableiten quantitativer Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene (z.B. $B_{10,50}$ Wert).
3. Anwendung bei neuartigen mechatronischen Systemen: Keine Vorkenntnisse von Zuverlässigkeitskennwerten.
4. Zuverlässigkeitskennwerte sollen für unterschiedliche Kundenanwendungen abgeleitet werden können.
5. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten sollen erfasst und in einer Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden.
6. Das Vorgehen soll entwicklungsbegleitend durchgeführt werden können.

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, inwieweit bereits bestehenden Vorgehensweisen die gestellten Anforderungen erfüllen.

3.2 Analyse bestehender Vorgehensweisen

Zur Analyse der Zuverlässigkeit von Systemen existieren verschiedene Methoden und Vorgehensweisen (vgl. [1, 7, 77, 78]). In Bild 3.1 ist eine von [7] vorgestellte Vorgehensweise gezeigt. Nach einer Systemdefinition wird das System analysiert. Anschließend werden qualitative und quantitative Analysen durchgeführt. Für die Prognose des quantitativen Systemausfallverhaltens werden die ermittelten Ausfallkurven der einzelnen Komponenten beispielsweise mittels der Booleschen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.5.5) zusammengerechnet. Dieses Vorgehen eignet sich vorwiegend für mechanische Komponenten.

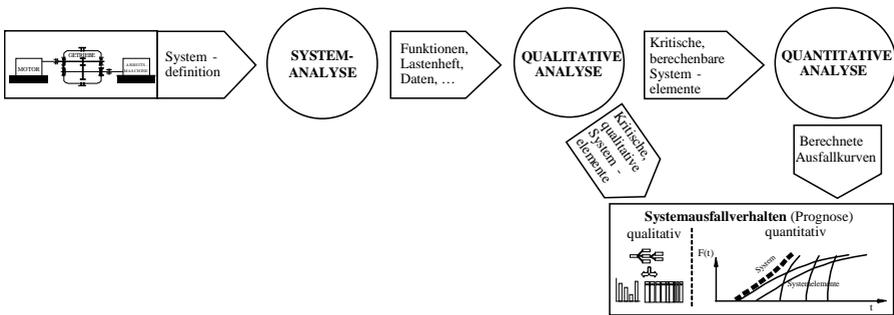


Bild 3.1: Vorgehensweise zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit [7, S. 104]

Eine für die Anforderungen weitestgehend geeignete Vorgehensweise zur Zuverlässigkeitsvorhersage für mechatronische Systeme wird in [78] vorgestellt. Die Methodik ist in zehn Schritte unterteilt [78, S. 241]:

1. Externe funktionale Analyse: Ermittlung von Hauptfunktionen, Einschränkungen und Wechselwirkungen zwischen System und Umgebung.
2. Interne funktionale Analyse: Ermittlung der funktionellen Architektur, Beschreibung des internen Systems und dem Verhältnis interner Funktionen.
3. Organische Analyse: Systemzerlegung in Subsysteme und Komponenten. Erfassung von Schnittstellen sowie Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten.
4. Physikalische Implementierung: Erarbeiten eines gesamtheitlichen Planes des Systems. Identifikation von Wechselwirkungen.

5. Fehleranalyse: Identifikation von potenziellen Schäden, deren Ursachen und Auswirkungen auf das System.
6. Wechselwirkungsanalyse: Ermittlung von Wechselwirkungen.
7. Qualitative Modellierung: Erstellung eines Modells von Funktionen und Fehlfunktionen für relevante Komponenten, Untersysteme und Systeme.
8. Datenerfassung und Verarbeitung auf Komponentenbasis: Ermitteln von Zuverlässigkeitskennwerten von Komponenten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Betriebsbedingungen.
9. Modellierung und Simulation: Erstellung eines Zuverlässigkeitsmodells, Ermittlung von Zuverlässigkeitskennwerten für Komponenten und für das System.
10. Ergebnisanalyse: Ergebnisaufbereitung der Zuverlässigkeitsanalyse. Vergleich mit Vorgaben.

In den einzelnen Schritten kommen jeweils unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Hervorzuheben sei das Funktions- / Zuverlässigkeitsblockdiagramm, die FMEA, die Wechselwirkungsmatrix und Simulationen (Petrietze / Monte-Carlo). Mit Hilfe dieser Vorgehensweise ist es möglich, die Systemzuverlässigkeit eines mechatronischen Systems nicht nur versuchstechnisch zu ermitteln, sondern die Zuverlässigkeit für ein vorgegebenes Betriebsprofil vorherzusagen. Die Vorhersage wird durch eine Simulation mittels Petrietzen erstellt. Basis hierfür sind Zuverlässigkeitskennwerte für die unterschiedlichen Phasen eines Betriebsprofils. In dem vorgestellten Vorgehen werden diese Zuverlässigkeitskennwerte durch Expertenbefragung ermittelt. Bei einem neuartigen System sind diese Informationen in der Regel nicht vorhanden. Der Mangel an Zuverlässigkeitskennwerten wird von den Autoren selbst als größte Limitierung der Vorgehensweise angesehen [78, S. 253].

Die Vorgehensweise nach [78] erfüllt bereits einige der gestellten Anforderungen. Es können Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene mittels Petrietzen / Monte-Carlo Simulationen ermittelt werden. Wechselwirkungen zwischen Komponenten können mittels Petrietzen modelliert werden. Es können bei bekannten Zuverlässigkeitskennwerten Aussagen für unterschiedliche Anwendungsfälle getroffen werden. Für neuartige Systeme, bei welchen die Zuverlässigkeitskennwerte nicht bekannt sind, kann das Vorgehen jedoch nicht ohne Anpassung angewendet werden. Gängige qualitative Methoden wie die

FMEA, welche entwicklungsbegleitend eingesetzt werden können, sind berücksichtigt. Bei dem gesamtheitlichen Vorgehen werden Zuverlässigkeitskennwerte für die Software berücksichtigt. Im Rahmen der Vorgehensweise wird jedoch nicht gezeigt, wie diese Zuverlässigkeitskennwerte ermittelt und die Software entwicklungsbegleitend abgesichert werden kann.

Wie in Abschnitt 2.5.3 vorgestellt, gibt es gesonderte Methoden zur entwicklungsbegleitenden Absicherung der Software und zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten. Insbesondere die Nutzung von HiL- und SiL Simulationen gemäß VDI 2206 [49] ist ein wichtiges Instrument in der Entwicklung und Absicherung eines mechatronischen Systems. Auf Basis des zeitlichen Verlaufs von identifizierten Softwarefehlern können durch Nutzung gängiger Modelle Zuverlässigkeitskennwerte abgeleitet werden (vgl. [51–54], Abschnitt 2.5.3). Zur Erfüllung der gestellten Anforderung an die gewünschte Vorgehensweise müssen die Nutzung von HiL- / SiL Simulationen sowie die Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten berücksichtigt werden.

Die Zuverlässigkeit der Elektronik wird in der Vorgehensweise nach [78] hauptsächlich durch die Nutzung von Ausfallratenkatalogen berücksichtigt. Sind neuartige Elektronikkomponenten abzusichern, müssen Versuche zur Ermittlung von Lebensdauer kennwerten durchgeführt werden. Die üblicherweise zur Versuchsverkürzung genutzten Raffungsmodelle sind in Abschnitt 2.5.2 vorgestellt. Mit der Hilfe der Raffungsmodelle kann die Lebensdauer der Elektronik für unterschiedliche Betriebsbedingungen berechnet werden.

Bis auf die Bestimmung von Lebensdauer kennwerten für die Mechanik für unterschiedliche Betriebsbedingungen erfüllt die mit den beschriebenen Methoden ergänzte Vorgehensweise die gestellten Anforderungen. Im Folgenden werden zur vollständigen Erfüllung der Anforderungen unterschiedliche Versuchsmethoden und Möglichkeiten der Versuchsverkürzung analysiert und bewertet.

3.3 Methoden der Versuchsdurchführung

Zur Gewinnung quantitativer Zuverlässigkeitskennwerte müssen ohne Vorwissen oder Berechnungsmöglichkeiten Lebensdauerversuche durchgeführt werden. Das Ziel dieses Abschnittes ist es, unterschiedliche Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitskennwerten aufzuzeigen und für eine Verwendung in einem ganzheitlichen Vorgehen zu bewerten.

Basierend auf den Anforderungen aus Abschnitt 3.1 können für die Versuchsmethoden die folgenden Bewertungskriterien abgeleitet werden:

1. Zuverlässigkeitskennwerten können abgeleitet werden.
2. Zuverlässigkeitskennwerte sind für unterschiedliche Anwendungsfälle ableitbar.
3. Die Methode ist ohne Vorwissen anwendbar.
4. Der dominierende Schadensmechanismus kann ermittelt werden.
5. Der Arbeitsaufwand ist gering.
6. Der Zeitaufwand ist gering.

In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht der hier betrachteten Versuchsmethoden und deren Bewertungen dargestellt. Im Folgenden werden diese näher vorgestellt.

In einem **Lebensdauerversuch** werden gleiche Prüflinge unter gleichen Bedingungen so lange getestet, bis diese ausfallen. Durch die Auswertung der Ausfallzeiten der jeweiligen Prüflinge können Zuverlässigkeitskennwerte für die auftretenden Schadensmechanismen ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2.2). Die Zuverlässigkeitskennwerte gelten für das getestete Lastniveau, eine Übertragung auf andere Bedingungen ist nicht möglich. Der Versuch kann ohne Vorwissen durchgeführt werden. Als Ausgangslage für eine Bewertung der folgenden Methoden wird der Arbeits- und Zeitaufwand neutral bewertet.

Tabelle 3.1: Vergleich und Bewertung der unterschiedlichen Versuchsmethoden

Anforderungen / Bewertungskriterien Bewertung: + voll erfüllt 0 teilweise erfüllt - nicht erfüllt	Versuchsmethoden					
	Lebensdauerversuch	Success-Run	HALT	Step-Stress	Sudden-Death	Zuverlässigkeits-DoE
Ableiten von Zuverlässigkeitskennwerten	+	0	-	0	+	+
Ableiten von Zuverlässigkeitskennwerten für unterschiedliche Anwendungsfälle	-	-	-	-	-	+
Kein Vorwissen notwendig	+	+	0	-	0	-
Ermittlung dominierender Schadensmechanismus	+	-	+	+	+	+
Geringer Versuchsaufwand	0	+	-	0	-	-
Geringer Zeitaufwand	0	+	+	+	+	-

Soll lediglich eine definierte Mindestzuverlässigkeit abgesichert werden, bietet sich der sogenannte **Success-Run** an. Dieser Versuch ist ähnlich wie der Lebensdauerversuch aufgebaut. Im Vergleich zum Lebensdauerversuch wird der Versuch jedoch dann gestoppt, wenn die geforderte Mindestzuverlässigkeit erreicht ist. Üblicherweise ist der Versuch so ausgelegt, dass während der Versuchszeit kein Ausfall auftritt [7]. Ohne Ausfälle können allerdings keine Schadensmechanismen bestimmt werden. Für das getestete Lastniveau kann nur eine Mindestzuverlässigkeit angegeben werden. Durch den frühzeitigen Stopp der Versuche ergibt sich ein verringerter Versuchs- und Zeitaufwand.

Der sogenannten **Highly Accelerated Life Test (HALT)** ist dafür vorgesehen, mögliche Fehlermechanismen frühzeitig zu erkennen [79, S. 326–327]. Hierzu werden die Belastungen auch über die Einsatzgrenzen hinaus, schrittweise bis zu einem Ausfall erhöht. Anschließend werden die Fehler analysiert und im Entwicklungsprozess berücksichtigt. Während Schwachstellen im Produkt effizient erkannt und die Zuverlässigkeit qualitativ verbessert werden kann, können durch HALT jedoch keine quantitativen Zuverlässigkeitskennwerte für eine Feldbelastung ermittelt werden [7, S. 284–285].

Bei der **Step-Stress-Methode** werden nach einem Ausfall eines Prüflings die Belastung der restlichen Prüflinge der Dauerlaufgruppe erhöht [7, S. 283–284]. Hierdurch kann, ähnlich wie bei HALT, die Testzeit bis zum Ausfall stark verkürzt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten auf das spätere Betriebsniveau der jeweilige Raffungsfaktor bereits bekannt sein muss. Dies ist üblicherweise nicht der Fall. Für eine Ermittlung von Zuverlässigkeitskennwerten rät [42, S. 19] von variablen Belastungen ab und empfiehlt ein Test bei konstanten Belastungen.

Der sogenannten **Sudden-Death-Test** bietet die Möglichkeit einer starken Testzeitverkürzung [7, S. 193]. Hierfür ist jedoch eine vergleichsweise hohe Prüflingsanzahl notwendig. Zur Testdurchführung werden die Prüflinge in gleichgroße Prüflöse unterteilt [7, S. 219–222]. Jedes Prüflöse wird nur so lange getestet, bis jeweils ein Prüfling ausgefallen ist. Durch eine Auswertung der jeweils ersten Ausfälle kann anschließend auf die Ausfallverteilung der gesamten Stichprobe geschlossen werden (vgl. Bild 3.2).

Wie in Abschnitt 2.7 bereits vorgestellt, können mittels einer **Zuverlässigkeits-DoE** Lebensdauer kennwerte für unterschiedliche Anwendungsfälle abgeleitet werden. Hierbei werden Lebensdauerexperimente bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Somit ist der Arbeits- und Zeitaufwand im Vergleich zu einem Lebensdauerexperiment bei nur einem Anwendungsfall deutlich höher. Für eine zielführende Planung des DoE ist Vorwissen wie dominierende Schadensmechanismen oder die Streuung der Versuche (Parameter einer Lebensdauerverteilung) notwendig.

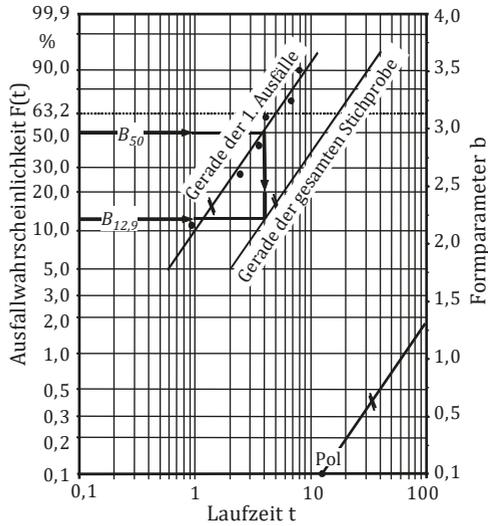
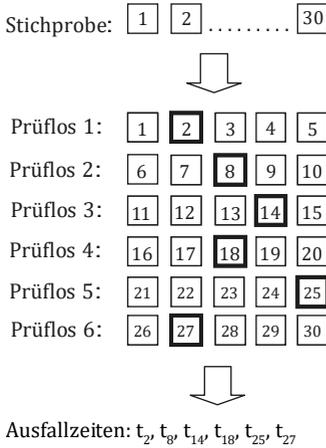


Bild 3.2: Sudden-Death Verfahren [7]

Die Methode der Zuverlässigkeits-DoE ist die einzige Methode, mit welcher Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Anwendungsfälle abgeleitet werden können. Keine andere der dargestellten Methoden erfüllt diese Anforderung. Um eine Zuverlässigkeits-DoE planen und durchführen zu können, ist Vorwissen über die dominierenden Schadensmechanismen und Lebensdauerverteilungen notwendig. Mittels HALT können Schadensmechanismen frühzeitig ermittelt werden. Für die Ermittlung einer Lebensdauerverteilung für eine vorgegebene Testbedingung kann ein Lebensdauer-versuch verwendet werden. Die Methoden Success-Run, HALT und der Step-Stress-Methoden sind hierfür nicht bzw. wenig geeignet. Der Sudden-Death-Test ist prinzipiell geeignet, hat für diese Art der Voruntersuchung jedoch einen vergleichsweise hohen Versuchsaufwand.

3.4 Methoden der Versuchsverkürzung

Lebensdauerversuche sind in der Regel kosten- und zeitintensiv. Daher wird für eine effiziente Durchführung der Versuche untersucht, wie der Versuchsaufwand und die Versuchszeit verringert werden können. In Tabelle 3.2 sind hierzu verschiedene Möglichkeiten zusammengefasst. Im Folgenden werden diese Möglichkeiten einzeln vorgestellt und bewertet.

Tabelle 3.2: Möglichkeiten zur Versuchsverkürzung [7, 79, 80]

Versuchsverkürzung durch	Voraussetzung
Überbeanspruchung	Beschleunigungsfaktor zur Übertragung der ermittelten Lebensdauer auf Nennbelastung muss bekannt sein. Der Schadensmechanismus darf sich nicht ändern.
Erhöhung der Nutzungsrate	
Anpassung von Konstruktionsparametern	
Anpassung der Ausfallgrenze	
Zensierte Auswertung der Versuche	Es müssen ausreichend viele Ausfälle vorhanden sein.
Extrapolation von Degradationsmerkmalen	Der Verlauf des Degradationsmerkmals muss bekannt sein.

Die **Überbeanspruchung** ist die gängigste Methode zur Beschleunigung von Dauerlaufversuchen [79, S. 241–243]. Hierbei werden die Prüflinge unter höheren Belastungen als im Nennfall bis zum Ausfall getestet. Durch die Lasterhöhung darf sich der Schadensmechanismus jedoch nicht ändern. Der Beschleunigungsfaktor, auch Raffungsfaktor genannt, ergibt sich aus dem Verhältnis von der Lebensdauer bei Nennbedingungen zu der Lebensdauer unter erhöhter Last [7, S. 281–283]:

$$RF = \frac{t}{t_{\text{raff}}} . \quad (3.1)$$

Üblicherweise ist RF bei einem neuartigen Produkt nicht vorab bekannt, sondern muss erst durch Versuche ermittelt werden.

Bei einer **Erhöhung der Nutzungsrate** wird eine Versuchsverkürzung durch das Auslassen von Pausenzeiten bzw. durch ein schnelleres Aufbringen der Belastungen erreicht [79, S. 243–244]. Diese Möglichkeiten sind in Bild 3.3

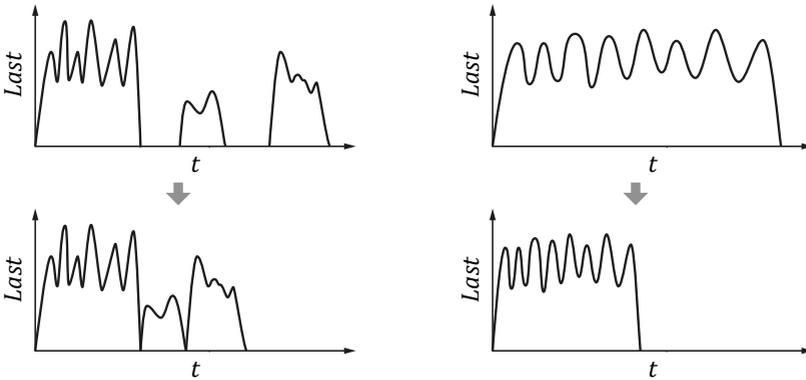


Bild 3.3: Versuchsverkürzung durch Auslassen von Pausenzeiten (links) und schnelleres Aufbringen der Belastungen (rechts)

veranschaulicht. Es muss beachtet werden, dass bei der Methode der Erhöhung der Nutzungsrate eine zusätzliche Schädigung auftreten kann. So könnte beispielsweise der Prüfling weniger Zeit zum Abkühlen bekommen und durch eine höhere Temperatur stärker geschädigt werden. Können gleiche Bedingungen, z.B. durch eine zusätzliche Kühlung, nicht gewährleistet werden, folgt eine tendenziell zu niedrige, ggfs. jedoch auch zu hohe Lebensdauerannahme. Sind diese Einflüsse bekannt oder wurden versuchstechnisch ermittelt, können diese bei einer Auswertung berücksichtigt werden [79, 81, 82].

Eine weitere Methode zur Versuchsverkürzung ist die **Anpassung von Konstruktionsparametern** wie z. B. die Verkleinerung eines tragenden Querschnittes [79, S. 244]. Diese Methode setzt voraus, dass der quantitative Einfluss der vorgenommenen Anpassung auf die Lebensdauer bekannt ist. Dieses Wissen steht üblicherweise zu Beginn der Untersuchung eines neuartigen Systems nicht zur Verfügung. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Größen in einer Produktreihe beschreibt [83, S. 170–173] ein Modell, welches eine Ausfallrate proportional zur Produktgröße berücksichtigt, [84] beschreibt einen allgemeineren Ansatz.

Einige Produkte versagen durch Toleranzausfälle, d. h. eine funktionsrelevante Eigenschaft liegt außerhalb des spezifizierten Wertebereichs. Liegt beispielsweise die Leckage eines Pneumatikventils oberhalb einer definierten Grenze,

gilt das Ventil als ausgefallen. Dauerlaufversuche können prinzipiell verkürzt werden, indem eine **Anpassung der Ausfallgrenze** vorgenommen wird. Pneumatikventile gelten beispielsweise früher als ausgefallen, wenn die maximale zulässige Leckage verringert wird. Diese Methode erfordert ein Modell, um auf die Ausfallzeiten bei nomineller Ausfallgrenze schließen zu können [79, S. 244]. In [79, 358-378] wird beschrieben, wie ein solches Modell versuchstechnisch ermittelt werden kann.

Wie in Abschnitt 2.2 bereits vorgestellt, kann durch eine **zensierte Auswertung** der Versuche bereits ein Zuverlässigkeitskennwert abgeleitet werden, auch wenn noch nicht alle Prüflinge ausgefallen sind. Für eine aussagekräftige Auswertung muss jedoch eine gewisse Mindestanzahl an Ausfällen vorhanden sein. Im Bereich pneumatischer Komponenten wird von der ISO 19973-1 [4, S. 6] ein Anteil von mindestens 70 % ausgefallener Prüflinge gefordert. Durch eine zensierte Auswertung kann – im Gegensatz zu den anderen hier vorgestellten Methoden – eine Versuchsverkürzung auch ohne bereits existierendes Vorwissen realisiert werden.

Versagt das Produkt durch einen Toleranzausfall und kann der relevante ausfallsspezifische Kennwert (Degradationsmerkmal) versuchsbegleitend gemessen werden, ist eine **Extrapolation des Degradationsmerkmals** zur Versuchsverkürzung denkbar. Bei einem pneumatischen Ventil könnte beispielsweise die Leckage ein solches Degradationsmerkmal sein. Ist der Verlauf der Leckage über die Zeit bekannt, kann ausgehend von einem Testzeitpunkt die Zeit bis zum Überschreiten der Ausfallgrenze berechnet werden (vgl. Bild 3.4).

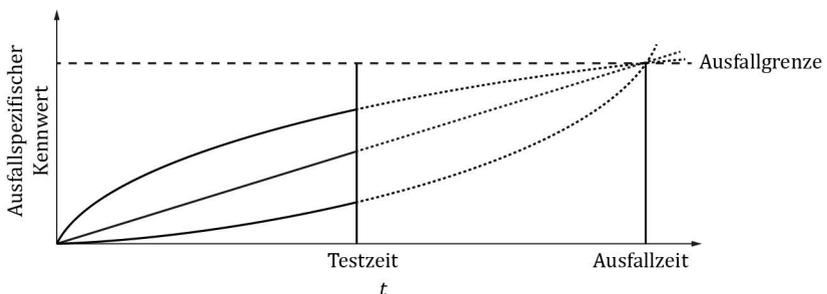


Bild 3.4: Beispielhafte Degradationsverläufe (vgl. [7, S. 286–287])

Dauerlaufversuche können mit unterschiedlichen Methoden erfolgreich verkürzt werden. Ein Großteil der vorgestellten Methoden benötigt jedoch Vorwissen, um die ermittelten Lebensdauer kennwerte auf Nennbedingungen umzurechnen. Ohne ein solches Vorwissen, lassen sich nur die Methoden der zensierten Auswertung und eine Erhöhung der Nutzungsrate (ohne zusätzliche Schädigung des Produktes) anwenden.

Ist für ein Produkt jedoch eine größere Anzahl an Versuchen geplant (z. B. im Rahmen einer DoE), erscheint eine Evaluierung der einzelnen Beschleunigungsmöglichkeiten sowie ggf. eine Erarbeitung des notwendigen Vorwissens sinnvoll.

Zusammenfassend wurden in den vorausgehenden Abschnitten Anforderungen an ein gesamtheitliches Vorgehen aufgestellt (Abschnitt 3.1). Es wurden bestehende Vorgehensweisen vorgestellt und analysiert (Abschnitt 3.2). Hierbei zeigte sich, dass insbesondere die Ermittlung von Lebensdauerdaten für unterschiedliche Betriebsbedingungen in den bisherigen Vorgehensweisen nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Bei einer näheren Analyse von Methoden zur Versuchsdurchführung, wurde die Zuverlässigkeits-DoE als hierfür zielführende Methodik identifiziert (Abschnitt 3.3). Lebensdauerversuche sind in der Regel kosten- als auch zeitintensiv. Für eine möglichst effiziente Versuchsdurchführung wurden Methoden der Versuchsdurchführung näher betrachtet (Abschnitt 3.4). Inwieweit die vorgestellten Anforderungen mit bestehenden Methoden erfüllt werden, wird im folgenden Abschnitt evaluiert.

3.5 Eignung bestehender Methoden

In Tabelle 3.3 ist eine Übersicht des Erfüllungsgrades der in Abschnitt 3.1 aufgestellten Anforderungen mit den vorausgehend vorgestellten bestehenden Methoden dargestellt. Der Erfüllungsgrad der einzelnen Anforderungen wird im Folgenden detaillierter beschrieben.

Tabelle 3.3: Übersicht des Erfüllungsgrades der Anforderungen mit bestehenden Methoden

Anforderungen Bewertung: + voll erfüllt 0 teilweise erfüllt - nicht erfüllt	Erfüllungsgrad	Anmerkung
A. 1: Gesamtheitliches Vorgehen (Mechanik, Elektronik und Software)	0	Durch Methoden wie in Abschnitt 3.2 beschrieben weitestgehend erfüllbar. Integration von Zuv-DoE bisher nicht gezeigt.
A. 2: Quantitative Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene	+	Beispielsweise mittels Boolescher Systemtheorie oder Petrinetzen möglich.
A. 3: Anwendbarkeit bei neuartigem mechatronischem System (kein Vorwissen)	0	Die Zuverlässigkeits-DoE (Zuv-DoE) erfordert Vorwissen. Das Erarbeiten des erforderlichen Wissens muss in einem zusätzlichen Schritt des gesamtheitlichen Vorgehens berücksichtigt werden.
A. 4: Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Kundenanwendungen ableitbar	-	Die Zuv-DoE ist die einzige Methode, mit welcher sinnvoll Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Bedingungen ermittelt werden können. Im aktuellen Stand der Technik wird jedoch nicht gezeigt, wie eine Zuv-DoE mit den hier aufgeführten Anforderungen geplant werden kann.
A. 5: Wechselwirkungen zwischen Komponenten berücksichtigen	+	Erfassung und Identifikation mittels Design Structure Matrix und Direct System Grid. Modellierung und Simulation mittels Petrinetzen.
A. 6: Entwicklungsbegleitend durchführbar	-	Die bestehenden Vorgehensweisen sind grundsätzlich entwicklungsbegleitend anwendbar. Um eine Zuv-DoE entwicklungsbegleitend durchführen zu können müssen jedoch zensierte Ausfälle berücksichtigt werden. Bisher wird nicht gezeigt, wie eine Zuv-DoE unter Berücksichtigung von zensierten Ausfällen geplant werden kann.

Mit **Anforderung 1** wird ein gesamtheitliches Vorgehen unter Berücksichtigung der Domänen der Mechanik, Elektronik und Software gefordert. Diese Anforderung wird, wie in Abschnitt 3.2 aufgeführt, bereits weitestgehend mit bestehenden Methoden erfüllt. Bisher wird jedoch noch nicht gezeigt, wie eine Zuv-DoE in ein gesamtheitliches Vorgehen integriert werden kann.

Durch **Anforderung 2** wird verlangt, dass quantitative Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene ermittelt werden können. Diese Anforderung kann für einfache Systeme mittels der Booleschen Systemtheorie sowie für komplexe Systeme mit Hilfe von Petrinetzen erfüllt werden (vgl. Abschnitt 2.5.5).

Anforderung 3 fordert, dass das Vorgehen für ein neuartiges mechatronisches System geeignet sein muss und somit ohne Vorwissen realisiert werden kann. Insbesondere für die Planung und Durchführung einer Zuverlässigkeits-DoE (Zuv-DoE) ist Vorwissen erforderlich. Zur Erfüllung der folgenden Anforderung 4 ist die Zuv-DoE zwingend erforderlich. Damit die Zuv-DoE durchgeführt werden kann, muss im gesamtheitlichen Vorgehen Schritte vorgesehen werden, um das für die Zuv-DoE notwendige Vorwissen zu erarbeiten. Das Vorwissen kann ggf. mit bestehenden Methoden wie Lebensdauerversuchen erarbeitet werden.

Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Kundenanwendungen abzuleiten wird mit **Anforderung 4** verlangt. Diese Forderung kann prinzipiell bereits mit bestehenden Vorgehensweisen erfüllt werden (vgl. Abschnitt 3.2). Bei der hierfür relevantesten Vorgehensweise nach [78] werden die Zuverlässigkeitskennwerte durch Expertenbefragungen ermittelt. Bei einem neuartigen mechatronischen System ist diese Informationsquelle nicht verfügbar (Anforderung 3). Die geeignetste Vorgehensweise nach [78] kann somit in diesem Aspekt nicht angewendet werden.

In einem neuartigen mechatronischen System müssen die Zuverlässigkeitskennwerte für die unterschiedlichen Kundenanwendungen zwangsläufig versuchstechnisch ermittelt werden. Wie in Abschnitt 3.3 aufgezeigt wurde, ist die Zuverlässigkeits-DoE die einzige Versuchsmethode, welche das Ableiten von Zuverlässigkeitskennwerten für unterschiedliche Anwendungsfälle ermöglicht. Im aktuellen Stand der Technik wird jedoch bisher nicht gezeigt, wie eine Zuverlässigkeits-DoE unter Berücksichtigung von Kriterien einer gewöhnlichen DoE geplant werden kann.

Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen in der Zuverlässigkeitsanalyse (**Anforderung 5**) kann mit gängigen Methoden realisiert werden. Wechselwirkungen können mittels der Design Structure Matrix erfasst und mittels Direct System Grid identifiziert werden. Die Modellierung und Simulation von Wechselwirkungen in Bezug auf die Lebensdauer kann mittels Petrinetzen realisiert werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass für die Modellierung des Systems quantitative Zuverlässigkeitskennwerte für die jeweiligen Wechselwirkungen vorliegen.

Mit **Anforderung 6** wird gefordert, dass die Vorgehensweise entwicklungsbegleitend durchführbar ist. Die vorausgehend vorgestellten Methoden sind grundsätzlich entwicklungsbegleitend anwendbar. Bei der Planung und Durchführung von Lebensdauerversuchen und der Zuv-DoE muss jedoch die limitierte Zeit während eines Entwicklungsprojektes berücksichtigt werden. Um die Versuche realisieren zu können, müssen Methoden der Versuchsverkürzung angewendet werden (vgl. Abschnitt 3.4). Wie aufgezeigt, lässt sich ohne Vorwissen (Anforderung 3) insbesondere die Methoden der zensierten Auswertung anwenden. Im aktuellen Stand der Technik wird bisher jedoch nicht beschrieben, wie eine Planung einer Zuv-DoE unter Berücksichtigung von intervall- und rechtszensierten Ausfällen durchgeführt werden kann.

Wie aufgezeigt, können mit den Methoden des Stands der Wissenschaft und Technik nicht alle Anforderungen an die hier geforderte Vorgehensweise erfüllt werden. Defizite zeigen sich bei der Integration einer Zuv-DoE in ein gesamtgesellschaftliches Vorgehen, insbesondere bei dem Erarbeiten des notwendigen Vorwissens sowie der Nutzung der erfassten Informationen in weiteren Schritten der Zuverlässigkeitsanalyse. Weiterhin wird bisher nicht beschrieben, wie eine Zuv-DoE unter Berücksichtigung gängiger Kriterien und zensierten Ausfällen geplant werden kann.

Ein gesamtgesellschaftliches Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme, welches die vorausgehend beschriebenen Anforderungen erfüllt und die identifizierten Defizite ausbessert, wird im folgenden Kapitel vorgeschlagen.

4 Gesamtheitliches Vorgehen

Das hier vorgeschlagene gesamtheitliche Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme ist in Bild 4.1 veranschaulicht und wird in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

Den ersten Schritt des Vorgehens stellen die Definition der Zuverlässigkeitsziele und der Systemgrenzen dar (**Abschnitt 4.1**). Dies ermöglicht eine zielgerichtete Zuverlässigkeitsanalyse.

In **Abschnitt 4.2** folgt die qualitative Analyse. Kernelemente sind die Systemanalyse und die Erstellung eines Funktionsblockdiagramms, die Ermittlung von Wechselwirkungen mittels einer Design Structure Matrix und dem Direct System Grid sowie die Durchführung gängiger qualitativer Analysen wie der FMEA oder Fehlerbaumanalyse.

Bei der in **Abschnitt 4.3** durchgeführten quantitativen Analyse werden grundlegende Untersuchungen zu den mechanischen Komponenten durchgeführt. Hierbei werden Belastungsverläufe analysiert und Möglichkeiten der Versuchsbeschleunigung evaluiert. Zur Durchführung der Versuche müssen Versuchsaufbauten und Analysemöglichkeiten realisiert und validiert werden. Für die elektronischen Komponenten können mittels Ausfallratenkatalogen erste Lebensdauer kennwerte abgeschätzt werden. Erste Aussagen zur Zuverlässigkeit der Mechanik und Elektronik können in ausgewählten Betriebspunkten bereits abgeleitet werden.

Mittels der statistischen Versuchsplanung in **Abschnitt 4.4** werden die Versuche zur Ermittlung der Lebensdauer kennwerte für unterschiedliche Anwendungsfälle geplant. Welche Gegebenheiten bei der Durchführung der geplanten Versuche zu berücksichtigen sind, wird in **Abschnitt 4.5** vorgestellt.

Die Vorgehensweise zum Ableiten eines Lebensdauermodells wird in **Abschnitt 4.6** behandelt. Üblicherweise untergliedert sich die DoE in die zwei Schritte des Screenings (Identifikation relevanter Faktoren) sowie die Modellerstellung. Zur Bewertung des erstellten Modells empfiehlt sich ein Abgleich von Vorhersagen des Modells mit realen Versuchen.

In einem mechatronischen System kommen üblicherweise Regelalgorithmen zum Einsatz. Mit welchen Methoden die Regelalgorithmen entwicklungsbegleitend untersucht werden können, wird in **Abschnitt 4.7** aufgezeigt. Eine wesentliche Rolle spielen XiL Simulationen, insbesondere Model-in-the-Loop (MiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL).

Neben den mechanischen und elektronischen Komponenten besteht ein mechatronisches System aus Software. Wie die Softwarekomponenten abgesichert und bewertet werden können, wird in **Abschnitt 4.8** beschrieben. Neben den bei mechanischen Komponenten gängigen Methoden, wie einer FMEA, kommen spezifische Prüftechniken, wie statisches oder dynamisches Testen auf unterschiedlichen Prüfebene, zum Einsatz. Quantitative Kennwerte zur Zuverlässigkeit der Software können durch spezifische Modelle abgeleitet werden.

Zur Ermittlung der Systemzuverlässigkeit müssen die Zuverlässigkeitskennwerte der einzelnen Komponenten des mechatronischen Systems zusammengeführt werden. Das Vorgehen zur hierfür notwendigen Modellierung und Simulation der Systemzuverlässigkeit ist in **Abschnitt 4.9** beschrieben.

In einem mechatronischen System sind oft Sensoren für eine Regelung vorhanden. Als optionalen letzten Schritt können die im Feld auftretenden Belastungen hiermit erfasst und die von Kunden gemeldeten Ausfälle für einen Abgleich mit dem erstellten Lebensdauermodell verwendet werden (**Abschnitt 4.10**).

Inwieweit das hier vorgeschlagene Vorgehen die hier gestellten Anforderungen erfüllt wird in **Abschnitt 4.11** abschließend evaluiert.

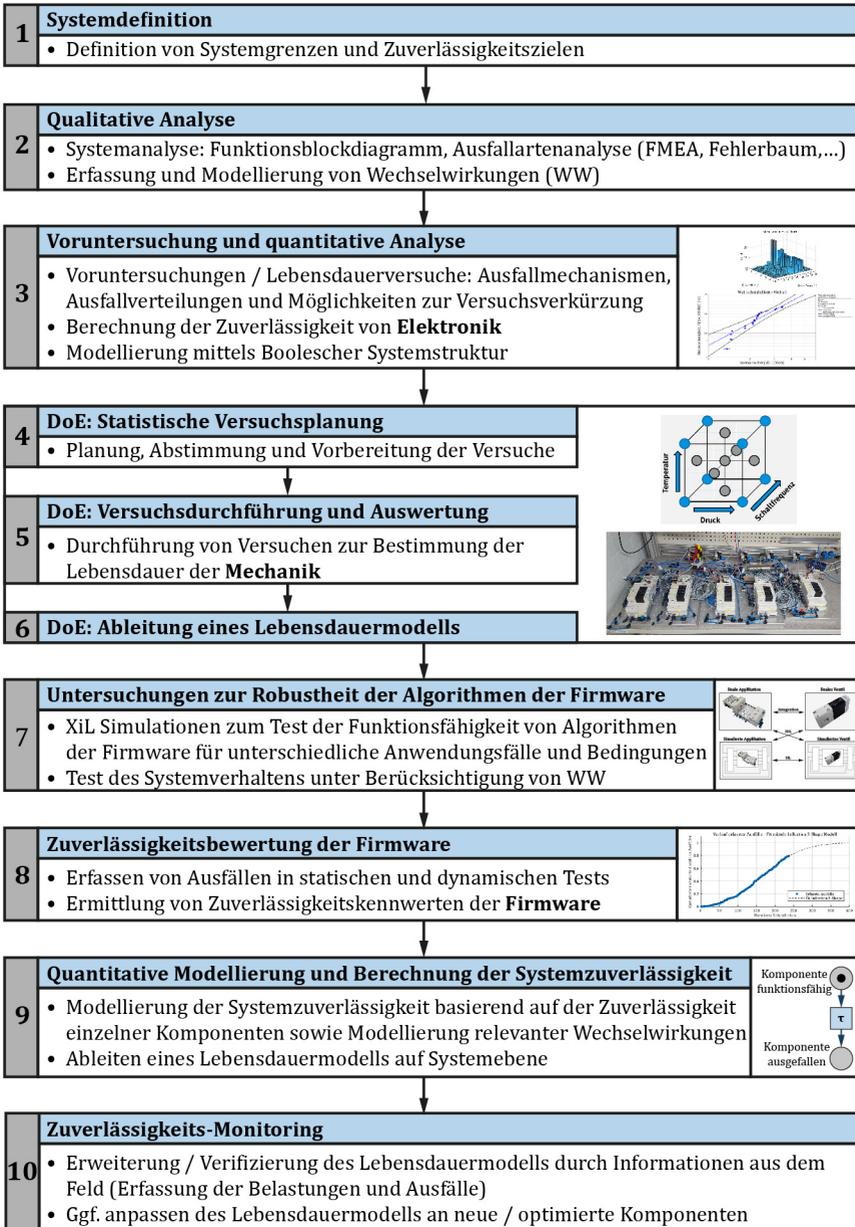


Bild 4.1: Vorgeschlagenes gesamtheitliches Vorgehen zur Absicherung neuartiger mechatronischer Systeme

4.1 Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen

Vor einer zeitaufwändigen und ggf. kostenintensiven Analyse müssen Ziele der Untersuchung definiert, sowie die Grenzen des zu untersuchenden Systems festgelegt werden. Nur so ist eine zielgerichtete Analyse möglich.

Für eine Eingrenzung der möglichen Einflussfaktoren auf das System sollte definiert werden, welche Größen untersucht bzw. nicht untersucht werden sollen.

Die Definition eines Zuverlässigkeitszieles kann mittels des B_{10} -Kennwertes erfolgen (Abschnitt 2.1). Durch die Definition eines quantitativen Zuverlässigkeitskennwertes kann überprüft werden, ob das zu untersuchende System den Zuverlässigkeitsanforderungen genügt.

Das Ergebnis dieses ersten Schrittes ist die Zieldefinition der Zuverlässigkeitsanalyse und Abgrenzung des zu untersuchten Systems. Mit Hilfe dieser Informationen kann die eigentliche Zuverlässigkeitsanalyse gemäß den folgenden Abschnitten gestartet werden.

4.2 Qualitative Analyse

Die qualitative Analyse des neuartigen mechatronischen Systems kann analog zu bestehenden Vorgehensweisen durchgeführt werden (vgl. Abschnitte 2.3 und 3.2). Mittels einer Systemanalyse können die relevanten Elemente des Systems ermittelt und in einem Funktionsblockdiagramm visualisiert werden (vgl. Bild 4.2 sowie Abschnitt 2.3). Dieses Funktionsblockdiagramm stellt die Basis für weitere qualitative Analysen, wie die FEMA oder Fehlerbaumanalyse (vgl. Abschnitt 2.3), dar. Weiterhin kann die aufgezeigte Systemstruktur als Basis für eine Zuverlässigkeitsmodellierung des Systems verwendet werden.

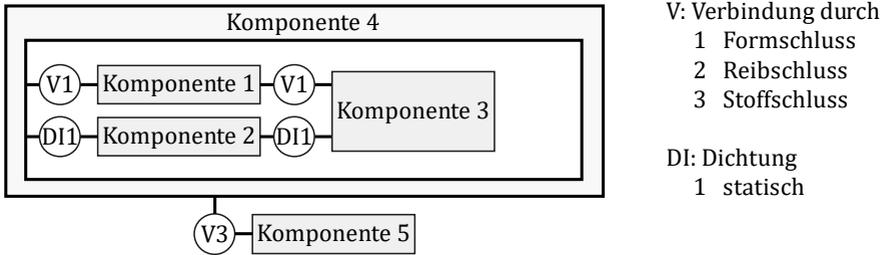


Bild 4.2: Exemplarisches Funktionsblockdiagramm (vgl. [7])

Für eine später folgende Zuverlässigkeitsmodellierung können Wechselwirkungen zwischen Komponenten relevant sein. Wie in Abschnitt 2.5.4 beschrieben, können Wechselwirkungen mittels der Design Structure Matrix erfasst und durch einen paarweisen Vergleich bewertet werden. Eine Identifikation relevanter Wechselwirkungen kann durch das Direct System Grid erfolgen.

Bei komplexeren Systemen nimmt der Aufwand für eine Bewertung mittels eines paarweisen Vergleiches jedoch stark zu. In diesem Falle kann das erweiterte Vorgehen nach [62] Anwendung finden. Hierbei wird das System schrittweise bewertet. In einem ersten Schritt wird eine Bewertung auf Systemebene durchgeführt. Nur die kritischen Systemelemente werden in einem zweiten Schritt näher betrachtet. In einem abschließenden optionalen Schritt können hohe Bewertungen überprüft werden. Weiterhin können Bewertungen in Bezug auf eine sich möglicherweise geänderte Systemstruktur angepasst werden.

Das Ergebnis der qualitativen Analyse ist die Identifikation von möglichen Fehlern, zuverlässigkeitskritischen Komponenten sowie möglicherweise relevanten Wechselwirkungen. Mit Hilfe dieser Informationen ist im Folgenden eine zielgerichtete quantitative Analyse möglich.

4.3 Voruntersuchung und quantitative Analyse

Das Ziel der hier vorgestellten Voruntersuchung ist es, ausreichend Informationen für die mechanischen Komponenten als Grundlage für die im folgenden

Abschnitt durchzuführende statistische Versuchsplanung zu ermitteln. Es gilt, die dominanten Schadensmechanismen samt ersten Ausfallverteilungen für zuverlässigkeitsrelevante Komponenten in ausgewählten Betriebspunkten zu ermitteln. Für die elektronischen Komponenten können mit Hilfe von Ausfallratenkatalogen auch ohne Versuche bereits quantitative Kennwerte angenähert werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Für eine Abschätzung der Systemzuverlässigkeit können die ermittelten quantitativen Kennwerte der Mechanik und Elektronik mittels der Booleschen Modellierung zusammengeführt werden.

Zur Durchführung der Voruntersuchung und quantitativen Analyse wird das folgende Vorgehen vorgeschlagen:

1. Erkenntnisse aus ggf. vorausgehenden und bereits gestarteten Versuchen zusammenführen und analysieren.
2. Untersuchen von Belastungsverläufen.
3. Auswahl der Testmethodik und Möglichkeiten der Testzeitverkürzung.
4. Planung und Realisierung von Messaufbauten, Evaluierung von Analysemöglichkeiten.
5. Durchführung und Auswertung von Voruntersuchung für die Mechanik.
6. Untersuchung der Zuverlässigkeit der elektronischen Komponenten.
7. Abschätzung der Systemzuverlässigkeit.

Im **ersten Schritt** sollen alle Erkenntnisse aus möglicherweise bereits abgeschlossenen oder noch andauernden Versuchen zusammengeführt und analysiert werden.

Mittels der im **zweiten Schritt** durchgeführten Belastungsanalyse von ausgewählten Anwendungen können relevante Lastverläufe näher untersucht werden. Dies ermöglicht eine Einschätzung der im Feld auftretenden Belastungen und unterstützt bei der Wahl der Faktoren und deren Einstellungen bei den Voruntersuchungen und der darauf aufbauenden statistischen Versuchsplanung. Zur Klassifizierung und Quantifizierung der Beanspruchungen können

unterschiedliche Zählmethoden wie die Momentanwertzählung, Klassengrenzenüberschreitungszählung, die Bereichspaarmittelwertzählung oder die Rainflowzählung zum Einsatz kommen [7, 31, 71].

Lebensdauerversuche sind in der Regel kosten-, als auch zeitintensiv. Im **dritten Schritt** soll daher aufbauend auf Abschnitt 3.4 untersucht werden, inwieweit die durchzuführenden Versuche beschleunigt werden können. Ansätze zur Versuchsbeschleunigung können beispielsweise eine Erhöhung der Nutzungsrate oder Belastung sein.

Der **vierte Schritt** stellt die Planung und Realisierung von Messaufbauten sowie die Evaluation notwendiger Analysemöglichkeiten dar. Messaufbauten sind üblicherweise zur Feststellung der Funktionsfähigkeit notwendig. Weiterhin sollten Prüflinge nach der Feststellung eines Ausfalls auf ihre Ausfallursache weiterführend analysiert werden, wie z. B. durch optische Begutachtung oder mikroskopische Aufnahmen.

Der **fünfte Schritt** stellt die Durchführung und Auswertung von Versuchen für die Mechanik dar. Hierbei sollen relevante Schadensmechanismen sowie deren Ausfallverteilungen ermittelt werden. Möglichkeiten der Versuchsbeschleunigung können genutzt und auf deren Eignung im vorliegenden Anwendungsfall untersucht werden. Das erarbeitete Wissen kann sowohl während der Entwicklung zur Verbesserung der Zuverlässigkeit als auch als Grundlage für die Planung einer später folgenden statistischen Versuchsplanung genutzt werden.

Im **sechsten Schritt** soll die Zuverlässigkeit der Elektronik untersucht werden. Wie in Abschnitt 2.5.2 dargestellt, können Zuverlässigkeitskennwerte für Elektronikbaugruppen mit Hilfe von Ausfallratenkatalogen abgeschätzt werden. Wird als Datenbasis ein einzelner Ausfallratenkatalog verwendet, sind Konzeptvergleiche und Schwachstellenanalysen möglich [37, S. 63]. Zur genaueren Ermittlung von Zuverlässigkeitskennwerten können Elektronikbaugruppen in einer anschließenden quantitativen Analyse zusätzlich untersucht werden. Rafungsmodele können für eine Verkürzung der Testdauer zum Einsatz kommen (Abschnitt 2.5.2).

Soll basierend auf den unterschiedlichen beobachteten Ausfallursachen eine Aussage für die Systemzuverlässigkeit abgeleitet werden, ist im **siebten Schritt** eine Zuverlässigkeitsmodellierung notwendig. Für eine Abschätzung der Systemzuverlässigkeit kann vereinfachend die Booleschen Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.5.5) zum Einsatz kommen. Für die Nutzung detaillierterer Modellierungsansätze sei auf Abschnitt 4.9 verwiesen.

Das Ergebnis der Voruntersuchung und quantitativen Analyse liefert ein deutlich verbessertes Grundverständnis zur Zuverlässigkeit des zu untersuchenden Systems. Es wurde untersucht, wie das System belastet wird. Methodiken zur Versuchszeitverkürzung wurden evaluiert. Prüfaufbauten zur Belastung und Messung der Prüflinge wurden erstellt und evaluiert. Dominante Schadensmechanismen der Mechanik wurden identifiziert und für einzelne Betriebspunkte Ausfallverteilungen ermittelt. Durch die Nutzung von Ausfallratenkatalogen kann die Zuverlässigkeit der Elektronik beurteilt werden. Durch eine erste Zuverlässigkeitsmodellierung kann die Systemzuverlässigkeit für einzelne Betriebspunkte abgeschätzt werden.

Mit Hilfe der hier vorgeschlagenen Voruntersuchung und quantitativen Analysen werden die Grundlagen für die im Anschluss folgende statistische Versuchsplanung gelegt.

4.4 Statistische Versuchsplanung

Ein Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Vorgehensweise ist es, Lebensdauer kennwerte für unterschiedliche Anwendungsfälle ableiten zu können. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, eignet sich hierzu die Methode der Zuverlässigkeits-DoE. Wie in den Grundlagen der statistischen Versuchsplanung in Abschnitt 2.7 vorgestellt, werden hierbei Versuche an ausgewählten Betriebspunkten durchgeführt. Durch diese Versuche können anschließend die relevanten Faktoren ermittelt und ein Modell der Lebensdauer für den getesteten Parameterraum abgeleitet werden.

Die Durchführung einer DoE kann nach [58, 72, 74, 76] durch die folgenden Schritte realisiert werden:

- Ziele der Untersuchung definieren.
- Zielgrößen bestimmen.
- Faktoren und deren Einstellungen festlegen.
- Versuchsplan ausarbeiten.
- Versuche vorbereiten und durchführen.
- Daten analysieren.
- Schlussfolgerungen ableiten und Empfehlungen aussprechen.

Diese übergeordneten Schritte können für eine herkömmliche DoE, als auch für eine Zuverlässigkeits-DoE angewendet werden. Der Umfang der Schritte „Versuchsplan ausarbeiten“ sowie „Daten analysieren“ unterscheidet sich jedoch jeweils zwischen einer herkömmlichen DoE und einer Zuverlässigkeits-DoE.

Wie in Abschnitt 2.7 erläutert, setzt die Planung und statistische Auswertung einer regulären DoE normalverteilte Daten voraus, welche bei Lebensdauerversuchen üblicherweise nicht der Fall sind. In der Planungsphase wird u. a. ermittelt, wie viele Prüflinge zur Erkennung eines definierten Effektes notwendig sind. In der statistischen Auswertung wird untersucht, inwiefern ein Faktor einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Zielgröße aufweist. Da die Voraussetzungen für das herkömmliche Vorgehen nicht gegeben sind, muss eine alternative Vorgehensweise verwendet werden.

Zur Planung einer Zuverlässigkeits-DoE wird in [85] die Verwendung der in [86] definierten Erfolgswahrscheinlichkeit vorgeschlagen. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Parameter einer vorgegebenen Ansatzfunktion in einem definierten Toleranzbereich geschätzt werden können. In [86] wird als Ansatzfunktion eine zweiparametrische Weibullverteilung verwendet, in [85] wird die Ansatzfunktion um ein Polynom eines Lebensdauermodells erweitert (vgl. Gleichung (2.13), Abschnitt 2.7).

Basierend auf einer Parameterstudie stellt [85] eine Planungstabelle vor, mit welcher eine Zuverlässigkeits-DoE geplant werden kann. Hierzu kann, basierend auf einer zu erkennenden Mindesteffekthöhe und des Formparameters b , je nach geforderter Erfolgswahrscheinlichkeit eine Mindestversuchszahl je

Faktorstufe ermittelt werden. Hierbei wird eine Toleranzbreite von $\pm 10\%$ für die Parameter des Lebensdauermodells in Bezug auf die normierte charakteristische Lebensdauer T verwendet [85, S. 275–276]. Dieses Bewertungskriterium ist jedoch willkürlich gewählt und ist nicht mit den üblichen Bewertungskriterien bei regulären statistischen Auswertungen vergleichbar. Neben der fehlenden Vergleichbarkeit kann mit der Planungstabelle nach [85] je nach Ziel der Untersuchung eine zu hohe Anzahl an Prüflingen vorgeschlagen werden. Insbesondere für ein Screening ist es nicht notwendig, die Parameter des Lebensdauermodells in dem genannten Toleranzbereich zu erfassen.

Bei der Planung des Versuchsumfanges von regulären DoEs wird üblicherweise ein tolerierbares Risiko festgelegt, nicht signifikante Effekte als signifikant einzustufen (α -Risiko), bzw. signifikante Effekte nicht als solche zu identifizieren (β -Risiko) (vgl. [57], Abschnitt 2.7). Basierend auf dem tolerierbaren Risiko für eine zu erkennende Effekthöhe kann anschließend eine Mindestversuchsanzahl festgelegt werden.

Zur Planung von Zuverlässigkeits-DoEs wird das in Bild 4.3 dargestellte Vorgehen empfohlen. Dieses Vorgehen ist in zwei Teile untergliedert. Im ersten Teil wird, falls möglich, eine Vorauslegung durchgeführt. Können die Ausfalldaten der zu untersuchenden Komponente mittels einer Lognormalverteilung angenähert werden und liegen alle Ausfalldaten unzensiert vor, können die Ausfalldaten durch eine logarithmische Skalierung auf normalverteilte Daten überführt werden. In diesem Fall können bereits bekannte Auswertetechniken von regulären DoEs genutzt werden (vgl. [76, 73]).

Nicht immer liegen unzensierte Ausfalldaten vor. Bei Versuchen zur Ermittlung von Lebensdauer kennwerten bei pneumatischen Komponenten sind sowohl intervall-, als auch rechtszensierte Ausfalldaten üblich (vgl. [4]). Zur Berücksichtigung von zensierten Ausfalldaten wird daher im zweiten Teil der in Bild 4.3 dargestellten Vorgehensweise eine iterative Planung und Bewertung vorgeschlagen. Hierzu wird als erster Schritt ein fiktives Lebensdauermodell festgelegt. Dieses fiktive Lebensdauermodell soll Effekte und Wechselwirkungen in unterschiedlichen Höhen beinhalten. Im Folgenden werden Zufallszahlen für die jeweiligen Belastungsstufen des zu bewertenden Versuchsplanes gemäß

dem Lebensdauermodell ermittelt. Durch eine statistische Auswertung der Ausfallzahlen kann überprüft werden, ob Effekte in der gewünschten Höhe (auch bei später ggf. vorliegender Intervall- und Rechtszensierung) als statistisch signifikant bewertet werden können. Durch eine iterative Vorgehensweise können verschiedene Versuchspläne untersucht, bewertet und anschließend ein geeigneter Versuchsplan ausgewählt werden.

Vorauslegung	
Kann die Ausfallverteilung der zu untersuchenden Komponente als Lognormalverteilung approximiert werden?	
Ja	Nein
Transformieren der Ausfalldaten durch Logarithmieren. Ermittlung der notwendigen Prüflingsanzahl für unzensierte Messwerte analog zu regulären DoEs.	Festlegung der notwendigen Prüflingsanzahl durch iteratives Vorgehen des nachfolgenden Schrittes.

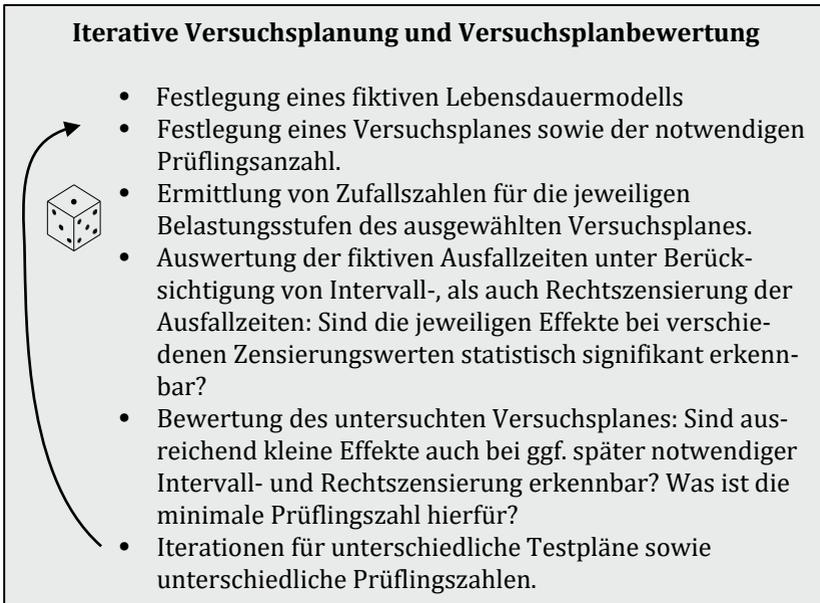


Bild 4.3: Vorgeschlagene Vorgehensweise zur Planung einer Zuverlässigkeits-DoE

Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein Versuchsplan, welcher sich je nach Iterationsschritt für die Ermittlung der relevanten Faktoren (Screening) oder zur Modellerstellung eignet. Mit Hilfe dieses Versuchsplanes kann im Folgenden die Versuchsdurchführung und Auswertung durchgeführt werden.

4.5 Versuchsdurchführung und Auswertung

Zur Durchführung des im vorausgehenden Abschnitt erarbeiteten Versuchsplanes sind Dauerlauf- sowie Messaufbauten notwendig. In den Dauerlaufaufbauten werden die Prüflinge mit den vorgesehenen Belastungen betrieben. Nicht immer kann in den Dauerlaufaufbauten die vollständige Funktionsfähigkeit der zu testenden Prüflinge bewertet werden. In diesem Falle ist eine zyklische Entnahme der Prüflinge aus dem Dauerlauf und die Überführung der Prüflinge in gesonderte Messaufbauten notwendig. Auf Basis der ermittelten Messdaten können verschiedene Auswertungen durchgeführt werden (vgl. Bild 4.4). Hierbei können aus den Messungen extrahierte Kennwerte die Basis für weiterführende Auswertungen sein. Beispielsweise kann untersucht werden, ob bestimmte Änderungen erfasster Kennwerte mit den Dauerlaufbelastungen zusammenhängen. Weiterhin können Toleranzausfälle, definiert als das Verlassen eines Kennwertes aus einem vorab definierten Bereich, ermittelt werden. Die so ermittelten Ausfallzeiten können als Basis für die Auswertung einer Zuverlässigkeits-DoE sein.

Das Ergebnis dieses in der Praxis zeit- und arbeitsintensiven Schrittes sind die Messdaten der getesteten Prüflinge. Mit Hilfe dieser Daten können im folgenden Abschnitt relevante Faktoren identifiziert und ein Lebensdauermodell abgeleitet werden.

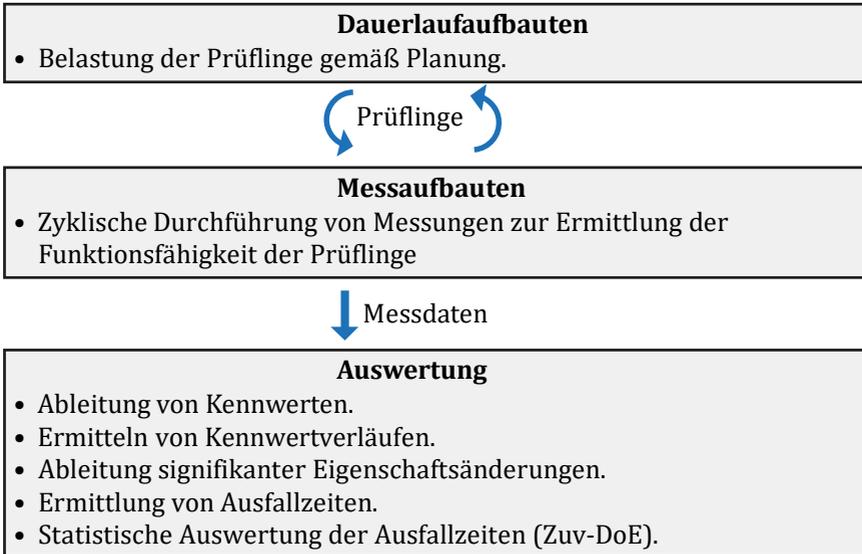


Bild 4.4: Übersicht des Vorgehens zur Versuchsdurchführung und -auswertung

4.6 Ableitung eines Lebensdauermodells

Wie in Abschnitt 2.7 aufgezeigt wurde, ist eine standardmäßige statistische Auswertung der DoE nur bei normalverteilten Daten möglich. Basierend auf Abschnitt 2.7 können die in der statistischen Versuchsplanung ermittelten Lebensdauerdaten auf verschiedene Arten ausgewertet werden. Können die Ausfalldaten mittels einer Lognormalverteilung approximiert werden und liegen die Ausfalldaten unzensiert vor, können diese durch ein Logarithmieren der Ausfallzeiten in eine Normalverteilung transformiert werden. Hiermit ist eine standardmäßige Auswertung möglich. Liegen Daten bei jedem Versuchspunkt vor, können als zweiter Auswertungsansatz an jedem Versuchspunkt die Lageparameter gesondert ausgewertet werden. Bei der wiederholten Durchführung und Auswertung von Lebensdauerversuchen kann der Lageparameter mittels einer Normalverteilung approximiert werden. Auf diese Weise kann auch mit dem zweiten Auswertungsansatz eine standardmäßige Auswertung genutzt werden.

Ein wesentlicher Nachteil dieser beiden Auswertungsansätze ist, dass unzensurierte Daten vorausgesetzt werden. Es müssen somit alle Prüflinge ausgefallen sein, bevor die Auswertung durchgeführt werden kann. Im Rahmen von entwicklungsbegleitenden Versuchen ist es jedoch wünschenswert, Informationen abzuleiten bevor alle Versuche abgeschlossen sind. Zur Kosten- und Zeitersparnis sind die hierbei gewonnen Informationen idealerweise genau genug, um die Lebensdauerversuche nicht bis zum Ausfall aller Prüflinge durchführen zu müssen.

Ein gängiger Ansatz zur Auswertung von Lebensdauerdaten in einer DoE ist eine angepasste Auswertung ([12, 74, 73], vgl. Abschnitt 2.7). Wie beschrieben, können Lebensdauerdaten, wie z. B. einer Weibullverteilung, direkt berücksichtigt werden. Intervall- und rechtszensierte Ausfalldaten können ebenfalls ausgewertet werden. Die Auswertung von Lebensdauerdaten mit dem letztgenannten Ansatz ist bereits in kommerzieller Auswertesoftware implementiert und gehört somit zum Stand der Technik. Für die Beschreibung der der Auswertung zugrunde liegende Statistik sei auf Abschnitt 2.7 sowie [12, 74, 73, 76] verwiesen.

Wie in Abschnitt 2.7 vorgestellt, ist bei der Durchführung einer DoE ein zweistufiges Vorgehen üblich. In einem ersten Schritt werden die relevanten Faktoren identifiziert (Screening). Im zweiten Schritt wird der Einfluss von den Faktoren genauer ermittelt (Modellerstellung). Je nach Iterationsschritt ist das Ergebnis dieses Abschnittes somit die Identifikation der relevanten Faktoren bzw. ein entsprechendes Lebensdauermodell. Zur Überprüfung des erstellten Lebensdauermodells empfiehlt sich ein Abgleich der Vorhersage des Lebensdauermodells mit realen Versuchen.

Mit Hilfe des Lebensdauermodells können Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Betriebsbedingungen abgeleitet werden. Diese Informationen können in der Modellierung der Systemzuverlässigkeit berücksichtigt werden (Abschnitt 4.9). Bei der Modellierung der Systemzuverlässigkeit gilt es, neben Zuverlässigkeitskennwerten zur Mechanik und Elektronik, auch die Zuverlässigkeitskennwerte der Software zu berücksichtigen.

4.7 Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit der Algorithmen der Firmware

Neben den Komponenten der Mechanik und Elektronik besteht ein mechatronisches System aus Firmware. In dem hier beispielhaft betrachteten mechatronischen System gibt es zwei Instanzen, bei denen Firmware integriert ist: die Ventilscheibe und der übergeordnete Controller.

Wie in Abschnitt 2.5.3 vorgestellt, ist die Nutzung von Simulationen während des Entwicklungsprozesses von mechatronischen Systemen Stand der Technik. Gängig sind hierbei Hardware-in-the-Loop (HiL) und Software-in-the-Loop (SiL) Simulationen (vgl. VDI 2206 [49]). Bei diesen Simulationen werden Teile des Systems durch Simulationsmodelle substituiert. In Bild 4.5 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten veranschaulicht.

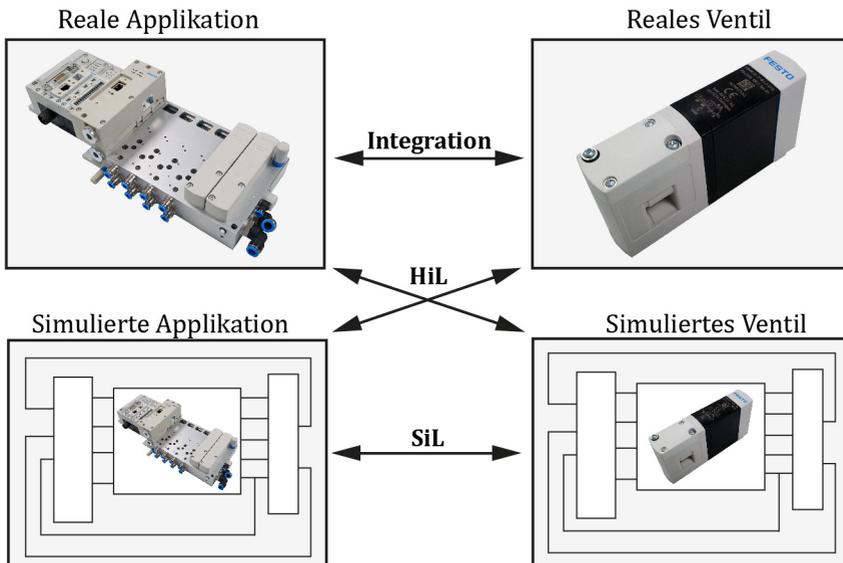


Bild 4.5: Veranschaulichung von HiL und SiL und realer Applikation (vgl. [87, 49])

Wesentlicher Vorteil der HiL bzw. SiL Simulationen ist der Test der Funktionsfähigkeit unter realen bzw. simulierten Bedingungen bei paralleler Einsparung von realen Versuchen (vgl. [49, S. 40]). Bei SiL Simulationen können die Algorithmen ohne Echtzeitanforderungen auf handelsüblichen Computern durchgeführt werden. Mit HiL-Simulationen können die realen Komponenten getestet werden. Hierfür ist jedoch ein komponentenspezifischer HiL-Simulator notwendig. Der HiL-Simulator muss in Echtzeit mit der zu testenden Komponente kommunizieren (vgl. [2]).

Zur effizienten und zielgerichteten Zuverlässigkeitsabsicherung wird das in Bild 4.6 dargestellte Vorgehen vorgeschlagen. Das Vorgehen ist abgeleitet von der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206 [49]).



Bild 4.6: In Anlehnung an VDI 2206 [49] vorgeschlagenes Vorgehen zur Absicherung der Firmware

Den **ersten Schritt** des Vorgehens stellen die Verifikation und Validierung dar. In der Verifikation wird überprüft, ob die Implementierung mit den Spezifikationen übereinstimmt. Bei der Validierung wird untersucht, ob die Implementierung zur Lösung der vorgegebenen Aufgabe geeignet ist (vgl. [49, S. 38–39]).

Im nachfolgenden **zweiten Schritt** der Model- bzw. Software in-the-Loop Simulationen können die in den vorausgegangenen Versuchen beobachteten Eigenschaftsänderungen berücksichtigt und die Funktionsfähigkeit der Regelstrecke bewertet werden. Die MiL-Simulationen können direkt in der Entwicklungsumgebung, z. B. MATLAB/Simulink, durchgeführt werden. Änderungen an dem zu entwickelnden Regler können somit vergleichsweise schnell und einfach getestet werden.

Im **dritten Schritt** des Vorgehens werden der Regler mit der kompletten Firmware mittels Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation auf der Zielhardware ge-

testet. Wie bereits aufgezeigt, läuft die Simulation im Gegensatz zu den MiL-Simulationen in Echtzeit auf einer gesonderten Hardware ab. Hierdurch ist es jedoch möglich, realitätsnäher zu testen.

Den abschließenden **vierten Schritt** der Untersuchungen bilden Versuche mit ausschließlich realer Hardware.

Zur Durchführung von MiL-Simulationen wird das in Bild 4.7 dargestellte Vorgehen vorgeschlagen. Den ersten Schritt stellt die Auswahl der zu untersuchenden Faktoren, wie z. B. Applikationsparameter, und deren jeweilige minimale und maximalen Einstellgrenze dar. Durch die Auswahl eines statistischen Versuchsplanes wird festgelegt, welche Versuchspunkte im vorgegebenen Parameterraum untersucht werden. Durch die Wahl von vollfaktoriellen (VF) oder teilfaktoriellen (TF) Versuchsplänen können definierte Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren betrachtet werden. Hierbei werden jedoch nur die Eckpunkte des vorgegebenen Parameterraums getestet (vgl. Abschnitt 2.7). Mit Hilfe des für Computersimulationen besonders geeigneten Latin-Hypercube Designs (LHD) (vgl. [72, 57]) können auch Zwischenpunkte innerhalb des Parameterraums effizient getestet werden. Neben der automatischen Testfallgenerierung können bei Bedarf ergänzend manuell Testfälle definiert werden.

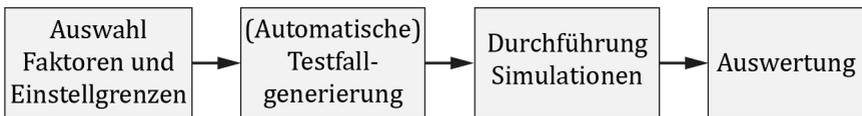


Bild 4.7: Vorgeschlagenes Vorgehen zur Durchführung von MiL-Simulationen

Je nach Bedarf der Entwicklung können zwischen wenigen Dutzend bis mehrere tausend Simulationen durchgeführt werden. Damit nicht jede Simulation einzeln ausgewertet werden muss, können Kennwerte zur Bewertung des Simulationsergebnisses definiert werden. Nach Abschluss der Simulationen können auffällige Simulationsdurchläufe anhand der Kennwerte identifiziert und

näher betrachtet werden. Die so durchgeführten MiL-Simulationen ermöglichen die systematische und effiziente Durchführung der entwicklungsbegleitenden Untersuchungen zur robusten Funktionsfähigkeit der Motion Apps. Neben der vorgestellten Vorgehensweise zur Testfallgenerierung mittels statistischer Versuchsplanung können Testfälle auch mittels Search-Based-Algorithmen ergänzend erstellt werden. Hierbei werden für die Regelaufgabe Qualitätskriterien definiert. Mittels eines Suchalgorithmus können iterativ die Faktoren so variiert werden, dass für die definierten Qualitätskriterien die Worst-Case Szenarien identifiziert werden können (vgl. [88]).

Der Fokus des vorgeschlagenen Vorgehens zur Durchführung von MiL-Simulationen liegt auf der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Randbedingungen und Applikationsparameter auf die Regelalgorithmen der zu testenden Applikation. Hierbei ist jedoch nicht zwangsläufig eine ausreichend hohe Testabdeckung des zugrundeliegenden Codes gewährleistet (in den durchgeführten Simulationen könnte insgesamt nur ein Bruchteil des vorhandenen Codes ausgeführt werden). Bei den durchzuführenden Simulationen ist somit die erreichte Testabdeckung zu erfassen und falls notwendig ergänzende Testfälle zu definieren. Für Systeme mit mittleren bis hohen Integritätsansprüchen ist das Erreichen von 100% Zweigüberdeckung empfehlenswert [89]. Auch für sicherheitskritische Software kann die Testabdeckung auf Modellebene anstelle auf Source-Codeebene ermittelt werden[90, S. 23].

Während der Entwicklung von Regelalgorithmen werden iterativ neue Versionsstände erstellt, die es jeweils zu evaluieren gilt. Insbesondere durch die Nutzung von MiL-Simulationen kann in kurzer Zeit bei geringem Arbeitsaufwand im Gegensatz zu manuellen Versuchen eine große Anzahl an Versuchen durchgeführt werden. Es kann einfach überprüft werden, ob durch eine Änderung des Algorithmus neue Fehler an bisher fehlerfreien Bereichen erzeugt werden („Regressionstest“, vgl. [91])

In realen Versuchen müssen zur Erfassung der relevanten Messgrößen in der Regel jeweils entsprechende Sensoren genutzt werden. Sind die Messgrößen Teil der Simulation, können diese in den MiL-Tests ohne zusätzlichen Aufwand betrachtet werden.

Die Nutzung von MiL- und HiL-Simulationen ist ein elementarer Bestandteil in der Zuverlässigkeitsabsicherung der Algorithmen. Werden nur Versuche auf der Zielhardware durchgeführt, könnten die notwendigen Robustheitsuntersuchungen nicht oder nur mit sehr großem Aufwand durchgeführt werden.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine Erhöhung der Robustheit und Absicherung der zum Einsatz kommenden Regelalgorithmen. Informationen, wann wie viele Fehler gefunden wurden, können im folgenden Abschnitt zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten berücksichtigt werden.

4.8 Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware

Im vorausgehenden Abschnitt wurde beschrieben, wie die Regelalgorithmen eines mechatronischen Systems entwicklungsbegleitend untersucht werden können. Die Firmware eines mechatronischen Systems besteht jedoch üblicherweise nicht nur aus Regelalgorithmen. Es gilt weitere funktionale Anforderungen abzusichern, wie beispielsweise das Lesen und Schreiben betriebsrelevanter Parameter oder die Konfiguration der Motion Apps über eine Webvisualisierung.

Die Zuverlässigkeit der Firmware ist abstrahiert in Bild 4.8 dargestellt. In grauen Kreisen sind hierbei die fehlerfreien Realisierungen von funktionalen Anforderungen dargestellt. Mit schwarzen Punkten sind Fehler in der Firmware dargestellt, die zum Ausfall des Gesamtsystems führen. Durch Tests können die Ausfälle identifiziert und die zugrundeliegenden Fehler behoben werden. Nutzt ein Kunde nur Funktionalitäten, welche zu 100 % abgetestet und von den in den Tests identifizierten Fehlern bereinigt wurden, funktioniert die Firmware dauerhaft („Kunde 1“). Nutzt ein Kunde Funktionalitäten, welche nicht in Tests überprüft wurden, kann hierbei ein Fehler vorhanden sein, welcher zum Ausfall des Systems führt („Kunde 2“). Die Funktionsfähigkeit der Software ist somit vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig.

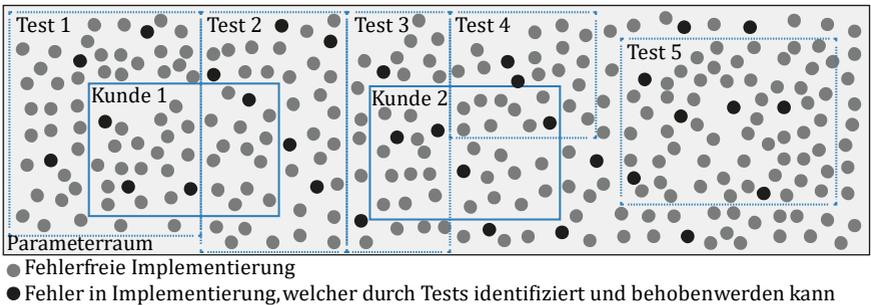


Bild 4.8: Veranschaulichung der Zuverlässigkeit der Firmware in Anlehnung an [91, S. 461–462]

Analog zu mechanischen Komponenten können für Software qualitative Methoden, wie die FMEA oder Fehlerbaumanalyse, angewendet werden (vgl. Abschnitt 2.5.3).

Wie in Bild 4.9 dargestellt, können Softwaretests auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt werden. In Unit-Tests (auch Modultests oder Komponententest genannt) werden die einzelne Programmeinheiten isoliert getestet. Im Integrationstests wird die Programmeinheit in eine größere Programmeinheit integriert. Sind alle Teilkomponenten der Software integriert, wird der Systemtest durchgeführt. Im Systemtest werden die Vorgaben des Pflichtenheftes bereits überprüft. Im Abnahmetest wird nach Vorgabe des Auftraggebers abschließend final gegen die Spezifikationen geprüft und die Ergebnisse dokumentiert (vgl. [92, S. 159–170]).

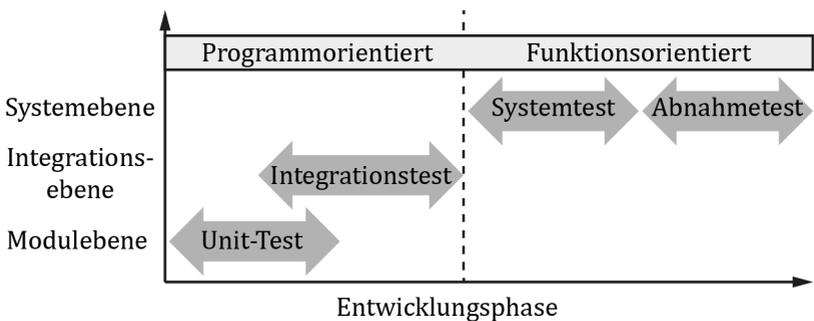


Bild 4.9: Die verschiedenen Prüfebene von Softwaretests [92, S. 159]

Für die Absicherung der Software kommen unterschiedliche Methoden in Betracht. Die Prüftechniken können hierbei in statische und dynamische Prüftechniken unterteilt werden [91, S. 37–44]. In dynamischen Tests wird die Software stets ausgeführt und mit verschiedenen Eingaben versehen. Da in der Regel nicht alle möglichen Eingaben getestet werden können, gelten die dynamischen Prüftechniken als Stichprobenverfahren [91, S. 39]. Bei den statischen Analysen wird im Gegensatz zu den dynamischen Analysen die Software nicht ausgeführt. Die Untersuchung wird basierend auf der Analyse des Quelltextes durchgeführt [92, S. 247]. Für die dynamischen und statischen Prüfverfahren existieren untergeordnet jeweils verschiedene Prüftechniken. Eine Übersicht der Prüftechniken kann [91, S. 38] entnommen werden.

Neben den verschiedenen Prüftechniken existieren Reifegradmodelle wie „Software Process Improvement and Capability dEtermination“ (SPICE). Mit Hilfe der Reifegradmodelle können die Prozesse zur Entwicklung der Software innerhalb des Unternehmens bewertet und optimiert werden [92, S. 514]. Für weitere Details zu den Prüftechniken und Reifegradmodellen sei auf [91–96] verwiesen.

Wie in Abschnitt 2.5.3 vorgestellt, können basierend auf dem zeitlichen Verlauf der in Tests identifizierten Softwarefehler unter Zuhilfenahme von spezifischen Modellen quantitative Kennwerte für die Softwarezuverlässigkeit abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser übergeordneten Vorgehensweise kann der jeweils aktuelle Entwicklungsstand der Software bewertet werden. Insbesondere kann abgeleitet und bewertet werden, ob die Softwarezuverlässigkeit für einen Marktstart ausreichend ist. Zuverlässigkeitskennwerte der Software können in der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Modellierung der Systemzuverlässigkeit berücksichtigt werden.

Bei der Durchführung der im Rahmen von Abschnitt 4.4 geplanten Versuche für das zu untersuchende mechatronische System wird neben der Hardware auch die Software getestet. Bei den Versuchen wird das System systematisch in unterschiedlichen Betriebsbedingungen getestet. Durch Eigenschaftsänderungen

der Mechanik können die Regelalgorithmen in einen nicht mehr funktionsfähigen Zustand versetzt werden. Analog zu den Ausfällen der Mechanik können die Ausfälle der Regelalgorithmen ebenfalls statistisch ausgewertet und daraus Lebensdauererkennwerte ermittelt werden. Auch diese Lebensdauererkennwerte können im folgenden Abschnitt berücksichtigt werden.

Das Ergebnis dieses Schrittes sind durchgeführte Versuche zur Funktionsfähigkeit der Software, mit Hilfe derer Fehler in der Software identifiziert und anschließend behoben werden können. Durch eine Auswertung der entdeckten Fehler über der Zeit können Aussagen zur Softwarezuverlässigkeit abgeleitet werden. Ausfallzeiten verursacht durch Eigenschaftsänderungen der Mechanik können in der folgenden Zuverlässigkeitsmodellierung ebenfalls berücksichtigt werden.

4.9 Quantitative Modellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Eine Anforderung an die zu erarbeitende Vorgehensweise ist das Ableiten quantitativer Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene (vgl. Abschnitt 3.1). In den vorausgehenden Abschnitten wurde aufgezeigt, welche Methoden zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten für die Mechanik, Elektronik und Software verwendet werden können. Zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit müssen die Zuverlässigkeitskennwerte der jeweiligen Komponenten des Systems unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen in einer Systemmodellierung implementiert werden.

Insbesondere Petrinetze wie die ECSPN eignen sich zur Zuverlässigkeitsmodellierung. Im Gegensatz zu anderen Modellierungsansätzen wie der Booleschen Systemtheorie oder Markov-Graphen können Wechselwirkungen und Alterung direkt berücksichtigt werden (Abschnitt 2.5.5).

Ein Beispiel, wie die mittels der vorausgehenden Methoden erarbeiteten Zuverlässigkeitskennwerte in eine Systemmodellierung überführt werden können, ist in den Bildern Bild 4.10 und Bild 4.11 dargestellt. Zwischen der Software und der Mechanik ist hierbei exemplarisch eine Wechselwirkung modelliert.

Durch einen fehlerhaften Zustand in der Software kann hierbei die Mechanik stärker belastet werden. Die Elektronik ist in diesem Beispiel ohne Wechselwirkungen modelliert. Geht die Mechanik, Software oder Elektronik in den Zustand „ausgefallen“ über, geht folglich das Gesamtsystem vom Zustand „funktionsfähig“ in den Zustand „ausgefallen“ über. Durch den in Simulationen zu ermittelnden Wahrscheinlichkeitsverlauf, der angibt, bei welcher Wahrscheinlichkeit das System in Abhängigkeit der Zeit in den Zustand „ausgefallen“ übergeht, kann die Systemzuverlässigkeit bewertet werden.

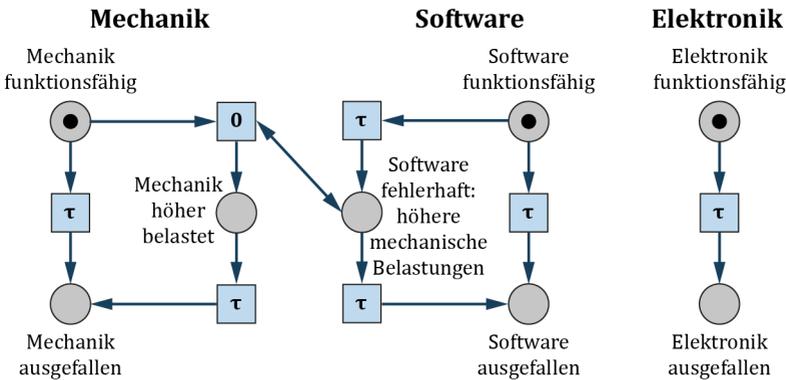


Bild 4.10: Beispiel für eine stark vereinfachte Modellierung der einzelnen Komponenten

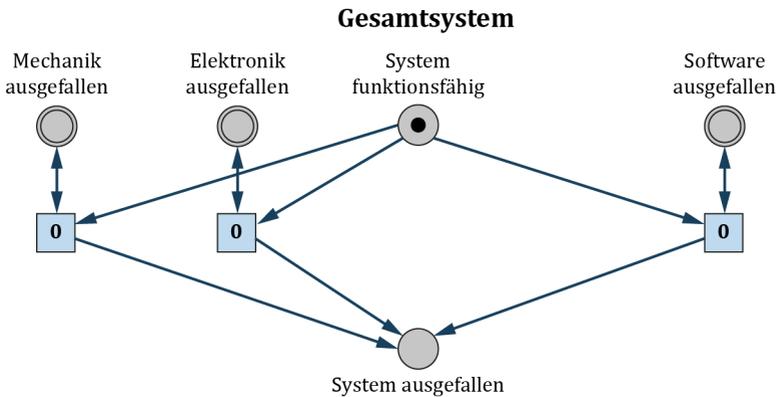


Bild 4.11: Beispiel für eine stark vereinfachte Modellierung der Systemzuverlässigkeit

Der Wahrscheinlichkeitsverlauf des Systems ist ein zentrales Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen. Hiermit kann überprüft werden, ob die Zuverlässigkeit des Systems den Anforderungen entspricht.

Das Ergebnis dieses Schrittes stellt eine Zuverlässigkeitsmodellierung des mechatronischen Systems dar. Mit Hilfe dieser Modellierung können Zuverlässigkeitskennwerte für das System durch Simulationen ermittelt werden. Dies stellt ein wesentliches Ergebnis des Vorgehens dar. Wie im folgenden Abschnitt beschrieben, können die Ergebnisse nach Möglichkeit mit Felddaten abgeglichen werden.

4.10 Zuverlässigkeits-Monitoring

In den vorausgehenden Abschnitten wurde aufgezeigt, wie basierend auf den wirkenden Belastungen die Lebensdauer des mechatronischen Systems abgeleitet werden kann. Die dem Lebensdauermodell zugrundeliegenden Versuche werden in der Regel unter definierten Laborbedingungen durchgeführt. Zum Abgleich und zur Verbesserung des erstellten Lebensdauermodells kann der Vergleich mit Ausfällen aus dem Feld zielführend sein. Anwendungen im Feld werden jedoch üblicherweise bei undefinierten und teilweise unbekanntem Bedingungen betrieben. Für ein Abgleich mit dem Lebensdauermodell müssen die anliegenden Belastungen jedoch bekannt sein. Ein Lösungsansatz für diese Herausforderung ist die Nutzung der Sensoren des mechatronischen Systems. Können die relevanten Betriebsbelastungen durch die im System integrierten Sensoren erfasst und gespeichert werden, ist hiermit ein Abgleich mit dem Lebensdauermodell möglich. Sollen die Belastungen direkt auf dem mechatronischen System gespeichert werden, ist eine Klassifizierung der Belastungsverläufe in der Regel notwendig. Die unverarbeitete Abspeicherung des Belastungsverlaufes kann in einer zu großen Datenmenge resultieren. Mit Hilfe der in Abschnitt 2.6 vorgestellten Klassifizierungsmethoden können die wesentlichen Belastungen bei einem deutlich geringeren Speicherbedarf erfasst werden.

Wurde ein ausreichend genaues Lebensdauermodell erarbeitet und ist die Erfassung der relevanten Belastungen realisierbar, ergibt sich die Möglichkeit eines Condition Monitorings. Hierbei können die im Betrieb auftretenden Belastungen verwendet werden, um mittels des Lebensdauermodells die übliche Lebensdauer unter den vorherrschenden Betriebsbedingungen zu ermitteln.

Der Abgleich der Lebensdauerdaten mit realen Felddaten stellt den optionalen letzten Schritt des Vorgehens dar. Inwieweit das vorgestellte Vorgehen die gestellten Anforderungen erfüllen wird im folgenden Abschnitt evaluiert.

4.11 Evaluierung des vorgeschlagenen gesamtheitlichen Vorgehens

In Abschnitt 3.1 wurden Anforderungen an das gesamtheitliche Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme aufgestellt und in Abschnitt 3.5 die Defizite bestehender Methoden aufgezeigt. Wie in der Übersicht in Tabelle 4.1 dargestellt und im Folgenden erläutert, können die Anforderungen mit der vorausgehend vorgeschlagenen Vorgehensweise erfüllt werden.

Hauptunterschied zu herkömmlichen Vorgehensweisen ist die Integration einer Zuverlässigkeits-DoE. Durch die vorgeschlagene Vorauslegung und iterative Versuchsplanung kann die Zuv-DoE analog zu Kriterien herkömmlicher DoEs geplant werden (vgl. Abschnitt 4.4). Die geplanten Versuche stellen die Basis dar, um Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Kundenanwendungen ableiten zu können (A. 4). Durch die vorgeschlagene iterative Versuchsplanung können intervall- und rechtszensierte Ausfälle berücksichtigt werden. Die hiermit verbundene Versuchszeitverkürzung ermöglicht die entwicklungsbegleitende Versuchsdurchführung (A. 6). Zum Erarbeiten des für die Planung der Zuv-DoE notwendigen Vorwissens wurde ein gesonderter Schritt im gesamtheitlichen Vorgehen berücksichtigt (Abschnitt 4.3, A.3). Während der Zuv-DoE können neben Lebensdauer kennwerten auch Eigenschaftsänderungen der mechanischen Komponenten, der Elektronik sowie die Funktionsfähigkeit der

Software in diesen unterschiedlichen Betriebspunkten erfasst werden. Diese Informationen können im späteren Verlauf der Zuverlässigkeitsanalyse zur Untersuchung der Robustheit der Regelalgorithmen verwendet werden (Abschnitt 4.7). Somit wurde aufgezeigt, wie die Zuv-DoE in ein gesamtheitliches Vorgehen integriert werden kann (A. 1).

Tabelle 4.1: Übersicht des Erfüllungsgrades der Anforderungen mit bestehenden Methoden und mit dem vorgeschlagenen Vorgehen

Anforderungen	Erfüllungs- grad Stand der Technik	Erfüllungs- grad vorge- schlagenes Vorgehen
Bewertung: + voll erfüllt 0 teilweise erfüllt - nicht erfüllt		
A. 1: Gesamtheitliches Vorgehen (Mechanik, Elektronik und Software)	0	+
A. 2: Quantitative Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene	+	+
A. 3: Anwendbarkeit bei neuartigem mechatronischem System (kein Vorwissen)	0	+
A. 4: Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Kundenanwendungen ableitbar	-	+
A. 5: Wechselwirkungen zwischen Komponenten berücksichtigen	+	+
A. 6: Entwicklungsbegleitend durchführbar	-	+

Während das vorgeschlagene Vorgehen die genannten Anforderungen erfüllt, gibt es dennoch weiteres Optimierungspotenzial. Die vorgeschlagene iterative Versuchsplanung und -bewertung ist bisher ein weitgehend manueller Vorgang mit vergleichsweise hohem Aufwand.

Kern der iterativen Versuchsplanung ist die Generierung von Zufallszahlen als Grundlage der fiktiven Ausfallzeiten. Damit die Streuung der Zufallszahlen in der Versuchsplanung berücksichtigt werden kann, muss ein Versuchsplan mehrfach mit unterschiedlichen Zufallszahlen ausgewertet werden. Die Anzahl der durchgeführten Simulationen ist jedoch durch den Aufwand bzw. die für die Versuchsplanung zur Verfügung stehende Zeit begrenzt. Durch eine Weiterentwicklung des Planungstools könnte der Aufwand reduziert werden. Hierzu könnte beispielsweise die in [85] beschriebene automatisierte statistische Zuv-

DoE Analyse auf die hier beschriebenen Anforderungen angepasst werden. Die Güte der Planung könnte durch eine Erhöhung der Anzahl durchgeführter Simulationen je Versuchsplan weiter erhöht werden.

Aus methodischer Sicht könnte die Versuchsplanung ebenfalls weiterentwickelt werden. Wie in Abschnitt 4.4 vorgestellt, stellt [85] eine Planungstabelle zur Planung einer Zuv-DoE vor. Während die vorgestellte Planungstabelle aus den in Abschnitt 4.4 genannten Gründen für die hier vorliegenden Anforderungen nicht geeignet ist, erscheint die generelle Idee einer Planungstabelle als Unterstützung der iterativen Planung hilfreich. Hierfür müsste die Planungstabelle mit den hier gestellten Anforderungen neu erstellt werden.

Die praktische Durchführbarkeit des vorgeschlagenen Vorgehens ist durch den hierfür notwendigen Aufwand limitiert. Wie vorausgehend dargestellt, ist der Aufwand einer Zuv-DoE erheblich höher als bei einfachen Lebensdauerversuchen. Zur Erfüllung der hier gestellten Anforderungen ist eine Zuv-DoE jedoch zwingend notwendig (vgl. Abschnitt 3.3). Zur Verringerung des Versuchsaufwandes und Verbesserung der praktischen Durchführbarkeit gilt zu prüfen, inwieweit eine verringerte zu erreichende Güte des Lebensdauermodells bereits zielführend ist.

Inwieweit sich das vorgeschlagene Vorgehen in der Praxis bewährt, soll im folgenden Kapitel in einer beispielhaften Anwendung evaluiert werden.

5 Exemplarische Anwendung des vorgeschlagenen Vorgehens

Zur Bewertung des in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehen wird dieses beispielhaft an dem in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten neuartigen mechatronischen System „Festo Motion Terminal“ angewendet. Der Aufbau dieses Kapitels setzt sich analog zum methodischen Vorgehen des vorausgehenden Kapitels zusammen. Den Beginn stellen die Definition der Zuverlässigkeitsziele und Grenzen des zu untersuchenden Systems dar (**Abschnitt 5.1**). In der qualitativen Analyse in **Abschnitt 5.2** werden ein Funktionsblockdiagramm und Wechselwirkungen mittels Design Structure Matrix und Direct System Grid erfasst und bewertet.

In der versuchstechnischen Voruntersuchung in **Abschnitt 5.3** werden diverse Untersuchungen vorgestellt. Belastungsverläufe werden analysiert und Möglichkeiten der Testzeitverkürzung evaluiert. Messaufbauten und Analysemöglichkeiten werden vorgestellt. Versuche zur Identifikation relevanter Schadensmechanismen und Ableiten erster Ausfallverteilungen für einzelne Betriebspunkte werden beschrieben und ausgewertet. Die Zuverlässigkeit der Elektronik wird mittels Ausfallratenkatalog und realen Versuchen bewertet. Basierend auf den ermittelten Daten kann die Systemzuverlässigkeit abgeschätzt werden.

In **Abschnitt 5.4** wird die Versuchsplanung mittels DoE durchgeführt und ein passender Versuchsplan abgeleitet. **Abschnitt 5.5** beschreibt das Vorgehen zur Umsetzung des erarbeiteten Versuchsplanes. Hierzu werden speziell entwickelte Dauerlauf- und Messaufbauten vorgestellt. Im Dauerlauf aufgetretene Ausfälle werden auszugsweise vorgestellt. Relevante Eigenschaftsänderungen werden am Beispiel der Pilotpatrone und Boosterpatrone jeweils beschrieben.

Die zuverlässigkeitsbeeinflussenden Faktoren sowie ein Lebensdauermodell werden in **Abschnitt 5.6** bestimmt. Vorhersagen des Lebensdauermodells werden mit realen Messungen verglichen.

Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit der Regelalgorithmen in der Firmware werden in **Abschnitt 5.7** vorgestellt. In **Abschnitt 5.8** wird auf die Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware eingegangen.

Die Zuverlässigkeitsmodellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit werden in **Abschnitt 5.9** vorgestellt. Es wird eine vereinfachte Modellierung mittels Petrinetzen vorgestellt und die Systemlebensdauer exemplarisch berechnet.

Die Möglichkeiten eines Zuverlässigkeits-Monitorings werden in **Abschnitt 5.10** beschrieben. Den Abschluss bildet **Abschnitt 5.11** mit einer Zusammenfassung und Bewertung der beispielhaften Anwendung.

5.1 Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen

Das im Rahmen dieser Untersuchung betrachtete System setzt sich wie folgt zusammen (vgl. Bild 5.1):

- Eine Ventilscheibe (VEVM).
- Ein übergeordneter Controller.
- Verbindungsleiterplatte zwischen VEVM und übergeordnetem Controller.

Der in der Ventilinsel verwendete mechanische Vorsteuerdruckregler wird als bekannte Technik bewertet und ist somit nicht Teil des betrachteten Systems. Wie bei pneumatischen Ventilen gemäß ISO 19973-1 [4] üblich, wird auch für dieses System ein zu erreichender B_{10} -Kennwert definiert. Der genaue Wert unterliegt der Geheimhaltung.

Betriebsbedingungen wie Temperatur und Arbeitsdruck stellen relevante Kenngrößen in Hinsicht auf die Lebensdauer dar und sollen folglich näher untersucht werden. Der Einfluss von Fehlern aus Montage, Fertigung, Transport und Lagerung sind hingegen nicht Inhalt dieser Untersuchung.

Auch wenn Controller und Ventile prinzipiell austauschbar sind, soll das System in dieser Untersuchung als nicht-reparierbar betrachtet werden.

Die Zuverlässigkeitsanalyse des dargestellten Systems beginnt im folgenden Abschnitt mit der qualitativen Analyse.

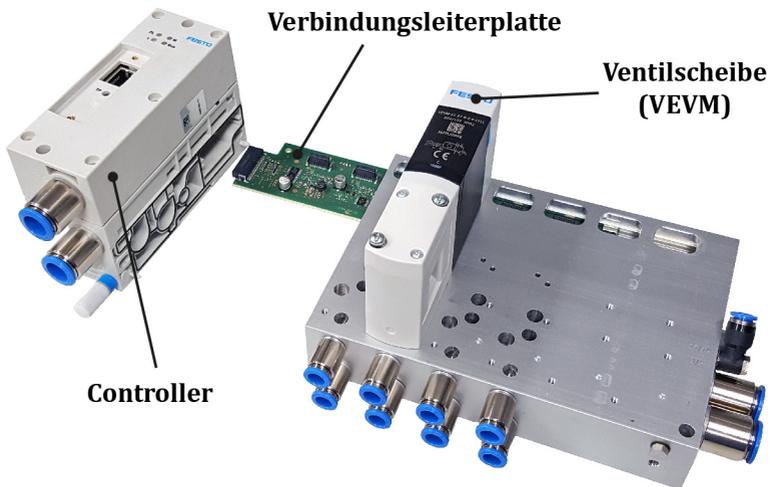


Bild 5.1: Systemgrenze des hier beispielhaft betrachteten Systems „Festo Motion Terminal“

5.2 Qualitative Analyse

Gemäß Abschnitt 4.2 kann für das hier betrachtete mechatronische System ein Funktionsblockdiagramm als Basis für die folgenden Analysen angefertigt werden. Bild 5.2 zeigt ein Funktionsblockdiagramm des in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Systems auf Komponentenebene. Hierdurch können relevante Funktionsbeziehungen übersichtlich aufgezeigt werden. Beispielsweise ist direkt ersichtlich, wie die einzelnen Membransitzventile als pneumatische Vollbrücke

zusammengeschaltet sind. Der Belüftungsbooster B2P regelt hierbei die Zuluft, der Entlüftungsbooster B2R die Abluft des Arbeitsanschlusses 2. Analog werden die Boosterpatronen B4P und B4R für das Belüften und Entlüften des Arbeitsanschlusses 4 verwendet.

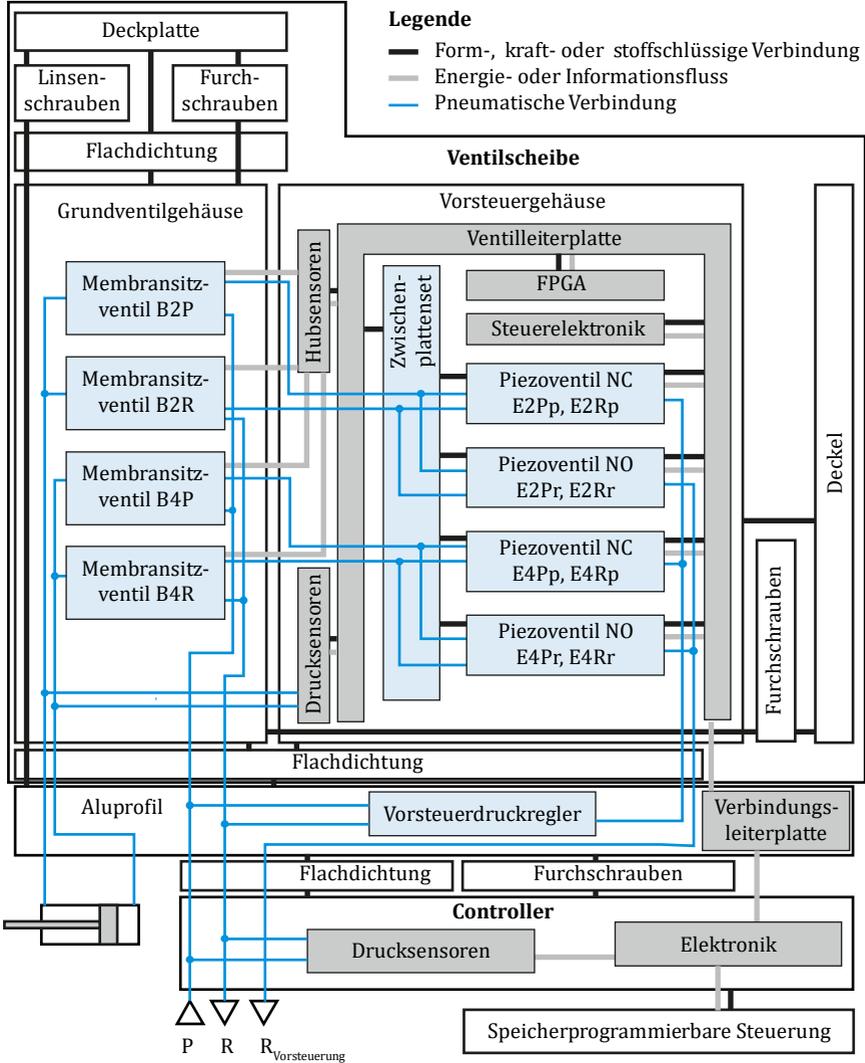


Bild 5.2: Funktionsblockdiagramm des „Festo Motion Terminals“ mit einer Ventilscheibe

Die Boosterpatronen werden jeweils von zwei zusammengeschalteten Piezobiegern geregelt. So ist der Piezobieger E2Pp für die Belüftung und der Piezobieger E2Pr für die Entlüftung der Vorsteuerkammer der Boosterpatrone B2P zuständig. Die Regelung der Vorsteuerkammer der restlichen Boosterpatronen erfolgt analog.

Detaillierte Funktionsblockdiagramme relevanter Komponenten wie der Membransitzventile oder der Piezovenile wurden erarbeitet, sind hier jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit und Geheimhaltung nicht dargestellt. Für das weitere Verständnis dieser Arbeit ist ein noch detaillierteres Funktionsblockdiagramm nicht notwendig.

Basierend auf den erarbeiteten Funktionsblockdiagrammen kann eine FMEA durchgeführt werden. Wie in Abschnitt 2.3 vorgestellt, ist die FMEA eine weit verbreitete Methode. Auch während der Entwicklung des hier beispielhaft betrachteten Systems kommt diese Methode standardmäßig zum Einsatz. Daher soll auf die Anwendung der FMEA an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die Ergebnisse der FMEA werden in den folgenden Schritten jedoch berücksichtigt.

Wie in den Abschnitten 4.2 und 2.5.4 dargestellt, können Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten mittels einer Design Structure Matrix ermittelt werden. Wie erläutert, werden hierzu die Baugruppen und anschließend die Bauteile der relevanten Baugruppen paarweise verglichen. Die Design Structure Matrix ist auf Komponentenebene für das beispielhaft betrachtete System VTEM in Bild 5.3 dargestellt. Die Stärke des Einflusses wurde in insgesamt vier Stufen bewertet. Neben einzelnen Komponenten wurden das System beeinflussende Größen wie z. B. die Umgebungstemperatur ebenfalls in der Matrix aufgenommen.

Wie Bild 5.3 veranschaulicht, existieren sowohl gerichtete Auswirkungen, als auch gegenseitig gleich starke Wirkungen. Gleich starke Wechselwirkungen zwischen Komponenten können durch eine Symmetrie an der Diagonalen identifiziert werden.

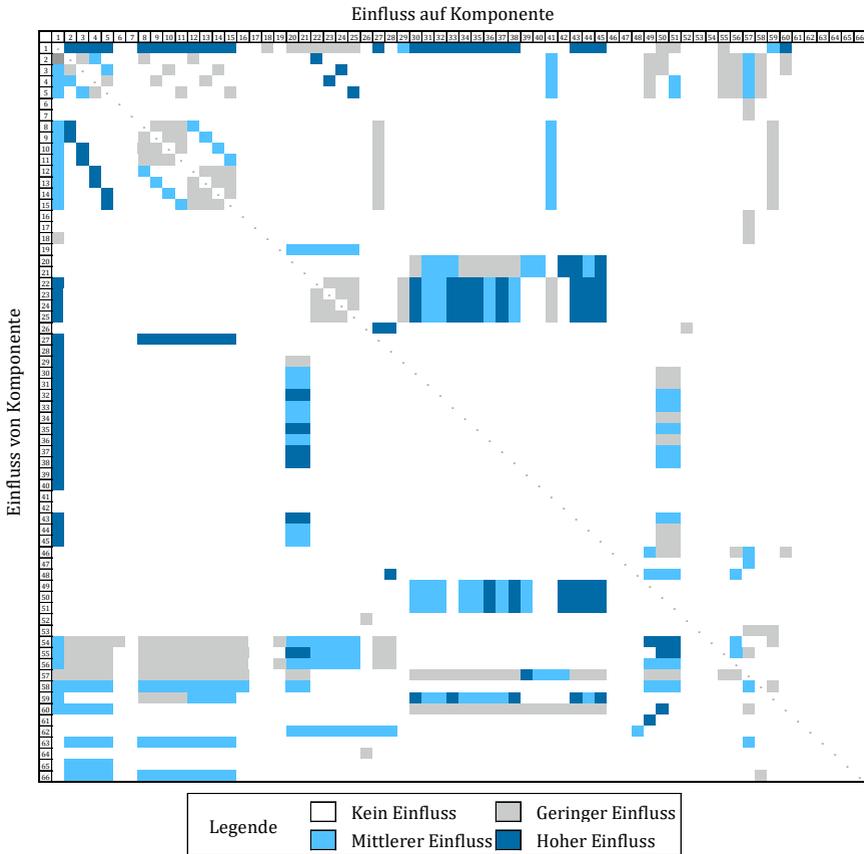


Bild 5.3: Design Structure Matrix für das beispielhaft betrachtete System VTEM

Werden Aktiv- und Passivsummen der einzelnen Komponenten ermittelt, kann das in Bild 5.4 dargestellte Direct System Grid erstellt werden. Hierbei sind die Aktivsummen der einzelnen, als blaue Punkte dargestellten Komponenten über den jeweiligen Passivsummen dargestellt. Wie in Abschnitt 2.5.4 vorgestellt, können die Komponenten durch eine Untergliederung des Schaubilds in die vier Abschnitte „ambivalent“, „aktiv“, „passiv“ und „puffernd“ gruppiert werden. Die Grenzen wurden hierbei durch die Bildung des Medianwertes von jeweils der Aktiv- und Passivsumme berechnet. Zwecks Übersichtlichkeit wurde

auf eine Bezeichnung der einzelnen Komponenten verzichtet und die Zugehörigkeit der einzelnen Komponenten in Tabelle 5.1 dargestellt. Hervorzuheben ist Komponente „1“, welche mit Abstand sowohl die höchste Aktiv- als auch die höchste Passivsumme aufweist.

Ein wesentlicher Vorteil des hier genutzten methodischen Vorgehens ist, dass die Einflüsse vollständig erfasst werden können. Durch die Bewertung und Gruppierung der Komponenten können diejenigen Komponenten und Beziehungen identifiziert werden, welche in den folgenden Untersuchungen bevorzugt untersucht werden sollen.

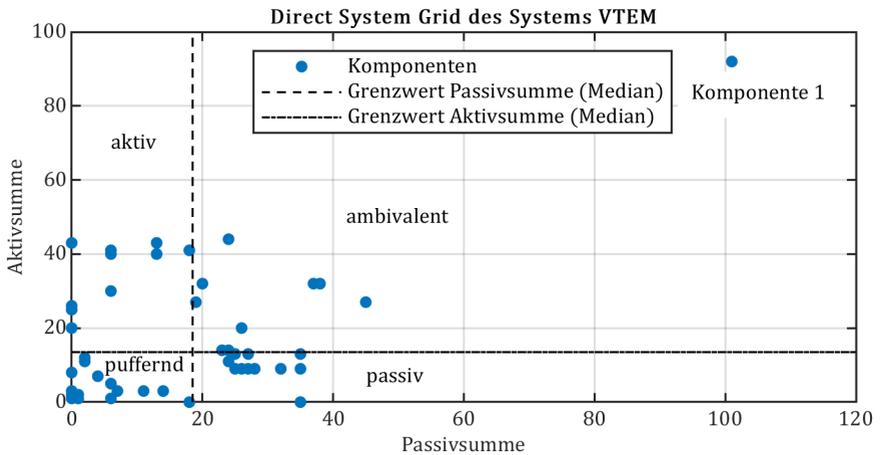


Bild 5.4: Direct System Grid für die einzelnen Komponenten des Systems VTEM

Tabelle 5.1: Gemäß dem DSG (Bild 5.4) gruppierte Komponenten

ambivalent	aktiv	passiv	puffernd
Komponenten Nr. 1-5, 8-15, 20, 21, 27, 49, 50, 51, 57	Komponenten Nr. 22-25, 54-56, 58-60, 62, 63, 66	Komponenten Nr. 30-38, 41, 43-45	Komponenten Nr. 6, 7, 16-19, 26, 28, 29, 39, 40, 42, 46, 47, 52, 53, 61, 64, 65

5.3 Versuchstechnische Voruntersuchungen

Ziel dieses Abschnittes ist es, durch Versuche Informationen, wie dominante Schadensmechanismen oder Ausfallverteilungen, zu ermitteln. Diese Informationen sind für die in Abschnitt 5.4 folgende statistische Versuchsplanung relevant.

Die Beschreibung der versuchstechnischen Voruntersuchungen ist in mehrere Abschnitte untergliedert. In **Abschnitt 5.3.1** werden alle vorliegenden Informationen aufbereitet. Eine Analyse der ermittelten Belastungsverläufe des Systems wird in **Abschnitt 5.3.2** vorgestellt. Möglichkeiten zur Testzeitverkürzung werden in **Abschnitt 5.3.3** evaluiert. Die für Versuche notwendigen Messaufbauten und Analysemöglichkeiten werden in **Abschnitt 5.3.4** vorgestellt. Voruntersuchungen an relevanten mechanischen Komponenten werden in **Abschnitt 5.3.5** beschrieben. Untersuchungen der Zuverlässigkeit der Elektronik werden in **Abschnitt 5.3.6** durchgeführt. In **Abschnitt 5.3.7** wird eine vereinfachte Modellierung zur Abschätzung der Systemzuverlässigkeit vorgestellt.

5.3.1 Erkenntnisse aus vorausgehenden Versuchen

Durch den neuartigen Aufbau des betrachteten Systems können nicht direkt Kenntnisse aus bestehenden Produkten übertragen werden. Vor Beginn dieser Arbeit wurden bereits experimentelle Untersuchungen an Prototypen von Boosterpatrone und Pilotpatrone durchgeführt. Basierend auf den bereits durchgeführten Versuchen und Befragungen von Experten kann der Pilotpatrone bereits eine für die Zielsetzung ausreichende Zuverlässigkeit bescheinigt werden. Die Boosterpatrone wird jedoch als zuverlässigkeitskritisch eingestuft. Somit wurde der Fokus dieser Voruntersuchung auf die Boosterpatrone gelegt.

Die Boosterpatrone des hier betrachteten Systems ist als federrückgestelltes Membransitzventil ausgeführt. Wie in Bild 5.5 veranschaulicht, wird für die Öffnung der Boosterpatrone die Vorsteuerkammer durch die Pilotpatrone mit

Druck beaufschlagt. Durch die Membran wird eine Kraft auf den Kolben entgegen der Federkraft ausgeübt. Wird die Vorspannkraft der Feder überschritten, bewegt sich der Dichtteller aus dem Dichtsitz und es wird ein Querschnitt zwischen Zuluft- und Abluftseite der Boosterpatrone freigegeben. Durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen resultiert durch den freigegebenen Querschnitt ein Durchfluss. Je nach anliegendem Vorsteuerdruck ergibt sich ein geänderter Querschnitt und folglich auch ein geänderter Durchfluss. Es sind folglich beliebige Öffnungsgrade und nicht nur ein vollständiges Öffnen oder Schließen möglich.

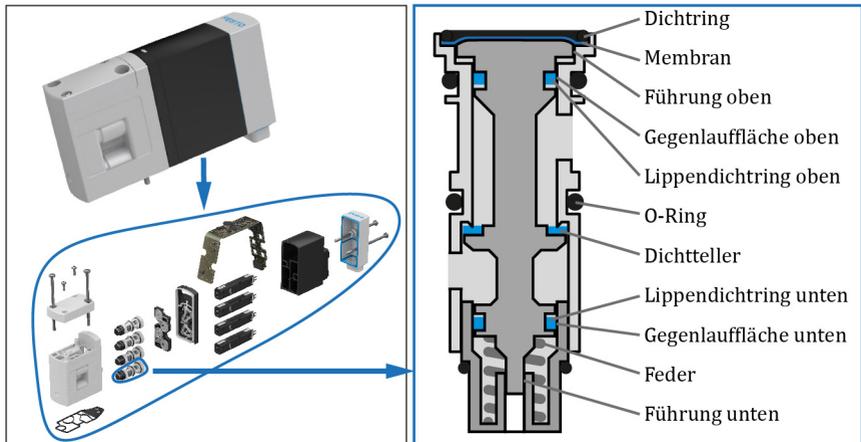


Bild 5.5: Vereinfachte Darstellung des Membransitzventils („Boosterpatrone“) und Einordnung im Gesamtventil basierend auf [3, 30]

Bei der Boosterpatrone sind prinzipiell verschiedene Schadensbilder möglich:

- Leckage (an Membran, Lippendichtringen, Dichtsitz oder an den statischen Dichtungen)
- Zu hohe Hysterese
- Stick-Slip-Bewegung
- Zu starke Verschiebung des Öffnungs- / Schließpunktes
- Vollständiges Öffnen / Schließen nicht mehr gewährleistet
- Zu hohe Schaltzeit

Welches Schadensbild das Ausfallverhalten dominiert oder alternativ ggf. vernachlässigbar ist, war bisher unbekannt. Verschiedene Voruntersuchungen waren zu Beginn dieser Arbeit bereits im Gange. Ein Teil dieser Versuche wurde im Rahmen dieser Arbeit übernommen und weitergeführt. Neben der Durchführung von Messungen zur Identifikation der oben genannten Schadensbilder wurden die Versuchsbedingungen analysiert. Bei einem Lebensdauerversuch können unterschiedliche Temperaturverteilungen an den einzelnen Boosterpatronen ermittelt werden (vgl. Bild 5.6, Wärmebildaufnahmen sind jeweils unten dargestellt). Weiterhin kann bei einer makroskopischen Begutachtung der Boosterpatronen eine Verschmutzung an den Entlüftungsboostern durch den Verschleiß der angeschlossenen Zylinder beobachtet werden. Bei diesem Versuch existieren somit sowohl Unterschiede bei der Temperatur als auch bei dem Verschmutzungsgrad.

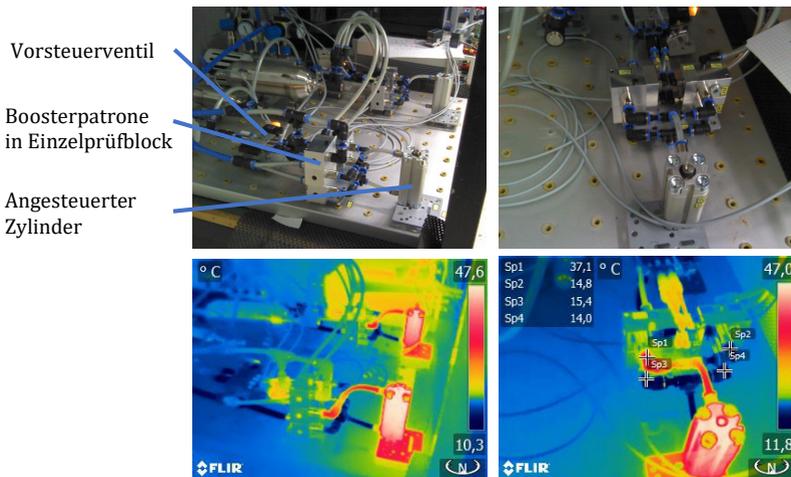


Bild 5.6: Analyse eines bereits bestehenden Lebensdauerversuches

Durch die Auswertung der bereits abgeschlossenen Versuche und der übernommenen Lebensdauerversuche konnten bereits erste Erfahrungen zum Verhalten der Boosterpatrone über die Lebensdauer gesammelt werden. Auch nach mehrjährigem Weiterführen der Lebensdauerversuche konnte jedoch weder ein dominanter Schadensmechanismus ermittelt, noch einer der genannten

Schadensmechanismen ausgeschlossen werden. Lebensdauerverteilungen konnten ebenfalls noch nicht abgeleitet werden. Für eine zielführende statistische Versuchsplanung sind diese Informationen jedoch notwendig (vgl. Abschnitt 4.4).

Im nachfolgenden Abschnitt werden als Grundlage für weitere Untersuchungen Belastungsverläufe verschiedener Anwendungsfälle näher analysiert.

5.3.2 Analyse von Belastungsverläufen

Zur Analyse von Belastungsverläufen kommen unterschiedliche Methoden wie die Klassengrenzenüberschreitungszählung oder die Rainflowzählung in Betracht (vgl. Abschnitt 4.3 sowie [7, 31, 71]).

Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf bereits firmenintern ermittelte Beanspruchungszeitverläufe von ausgewählten Applikationen zugegriffen werden. Wie in Bild 5.7 beispielhaft dargestellt, wurden die verschiedenen Beanspruchungszeitverläufe mittels verschiedener Methoden klassifiziert und näher analysiert. Neben einer Klassengrenzenüberschreitungszählung, Rainflowzählung, Momentanwertzählung und Integration wurde die schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transform, FFT) angewendet. Diese Untersuchung zeigte, dass große Unterschiede zwischen den einzelnen Beanspruchungen existieren. Dies beinhaltet Einflussgrößen, bei welchen ein großer Einfluss auf die Lebensdauer erwartet wird. Die analysierten Belastungen wurden exemplarisch ausgewählt und stellen nur einen Bruchteil der möglichen Anwendungen dar. Dies unterstreicht die Notwendigkeit des hier vorgestellten methodischen Vorgehens mit der Zielsetzung zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten für quasi beliebige Anwendungen. Anstelle von Lebensdaueruntersuchungen jeder einzelnen Applikation wird ein Modell erstellt, mit welchem Lebensdauer kennwerte für die unterschiedlichen Applikationen abgeleitet werden können. Mit welchen Methoden Voruntersuchungen als Grundlage für eine solche Modellerstellung durchgeführt werden können, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

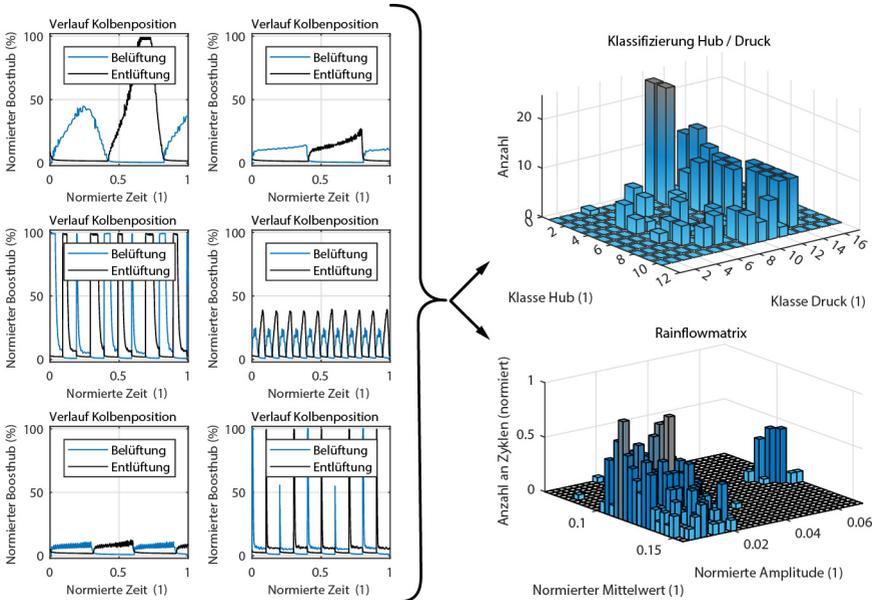


Bild 5.7: Klassifizierung und Analyse verschiedener Belastungsverläufe

5.3.3 Auswahl der Testmethodik und Möglichkeiten der Testzeitverkürzung

Wie in Abschnitt 3.3 vorgestellt, existieren verschiedene Versuchsmethoden zur Zuverlässigkeitsuntersuchung von Komponenten und Systemen. Mit dem Ziel dieser Voruntersuchung, erste Zuverlässigkeitskennwerte abzuleiten, dominierende Schadensmechanismen bei möglichst geringem Versuchsaufwand als Grundlage für eine Zuverlässigkeits-DoE zu ermitteln, wurde gemäß Tabelle 3.1 der Lebensdauerversuch als Versuchsmethode ausgewählt. Für einen Versuchsaufbau gemäß des Sudden-Death Verfahrens standen zum Untersuchungszeitpunkt nicht ausreichend Prüflinge zur Verfügung.

Die Durchführung von Lebensdauerversuchen ist zeit- und kostenintensiv. Daher wurden in Abschnitt 3.4 verschiedene Möglichkeiten der Versuchsverkürzung vorgestellt. Übertragen auf den hier betrachteten Anwendungsfall ergeben sich die folgenden Möglichkeiten.

Überbeanspruchung: Anheben der Belastungen, beispielsweise durch eine Erhöhung des Druckniveaus. Es ist bisher nicht bekannt, wie Zuverlässigkeitskennwerte bei hohen Belastungen auf niedrigere Belastungen umgerechnet werden können. Dennoch können für eine konservative Abschätzung Versuche am Rand der Spezifikation durchgeführt werden. Die ermittelten Zuverlässigkeitskennwerte gelten nur für den untersuchten Betriebspunkt. Es gilt zu bewerten, ob der beobachtete Schadensmechanismus auch unter Nennbedingungen auftreten würde.

Erhöhung der Nutzungsrate: In den zu Beginn durchgeführten Lebensdauerversuchen wird die Boosterpatrone im getakteten Betrieb getestet. Durch eine Erhöhung der Schaltfrequenz können die Versuche prinzipiell beschleunigt werden. Bisher ist nicht bekannt, wie sich eine erhöhte Schaltfrequenz auf die Lebensdauer auswirkt. Bei herkömmlichen Schaltventilen wird angenommen, dass die Schaltfrequenz einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Lebensdauer besitzt (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Zur Abschätzung des Potenzials einer möglichen Erhöhung der Testfrequenz wurden Kurzzeitversuche mit unterschiedlichen Schaltfrequenzen durchgeführt. Hierbei wurde untersucht, wie die Schaltfrequenz den Hubverlauf in einem Schaltspiel beeinflusst. Auch bei erhöhten Schaltfrequenzen sollte der Schaltvorgang idealerweise den gleichen Verlauf aufweisen sowie die gleichen Endposition erreichen. Es wurden unterschiedliche Schaltfrequenzen untersucht. Vier ausgewählte Frequenzen sind in Bild 5.8 dargestellt. Die Ausgangsfrequenz stellt die von Versuchsexperten in bisherigen Versuchen genutzte Schaltfrequenz dar. Bei höheren Frequenzen ist der eigentlich Schaltvorgang vergleichbar zu der Ausgangsfrequenz. Mit höheren Frequenzen werden die Endpositionen jedoch nicht mehr vollständig erreicht. Im Bereich des geschlossenen Boosters (Boosterweg 0) hat dies ein geringeres Eindringen in den

Dichtsitz und potenziell eine geringere Schädigung zur Folge. In vorausgehenden Untersuchungen konnte dem Dichtsitz bereits eine gute Zuverlässigkeit bescheinigt werden. Für die kritisch eingestuften Lippendichtringe wird ein vernachlässigbarer Einfluss durch den minimal geänderten Weg erwartet.

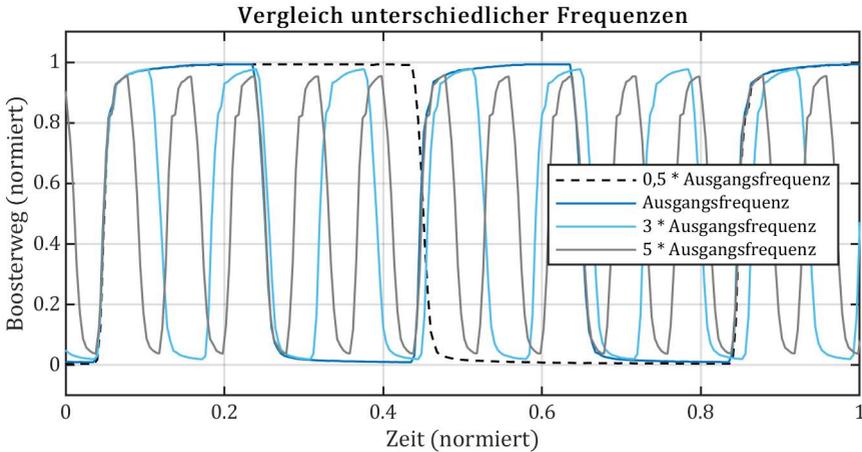


Bild 5.8: Vergleich der Hubverläufe bei unterschiedlichen Ansteuerfrequenzen der Boosterpatrone

Beachtet werden muss, dass mit steigender Frequenz die Eigenerwärmung der Boosterpatronen steigt. Die im Dauerlauf maximal realisierbare Frequenz wird vermutlich durch die Eigenerwärmung begrenzt. Kurzzeitversuche zeigten, dass auch mit fünffacher Ausgangsfrequenz die Prüflinge noch in einem tolerierbaren Temperaturbereich liegen. Eine Erhöhung der Frequenz für eine beschleunigte Versuchsdurchführung erscheint somit bis fünffacher Ausgangsfrequenz prinzipiell möglich.

Anpassung von Konstruktionsparametern: Als Ausfallursache werden Änderungen im tribologischen System der verschiedenen Dichtelemente erwartet. Es gibt jedoch keinen allgemein bekannten Zusammenhang, wie ein Dichtkontakt für eine beispielsweise halbierte Lebensdauer gestaltet werden muss. Eine Anpassung von Konstruktionsparametern kann somit in diesem Fall nicht für eine Versuchsbeschleunigung genutzt werden.

Anpassung der Ausfallgrenze: Bisher ist noch nicht bekannt, bei welchem Schadensmechanismus die Prüflinge ausfallen. Folglich sind nicht ausreichend Informationen vorhanden, um die Anpassung der Ausfallgrenze für eine Versuchsbeschleunigung nutzen zu können.

Zensierte Auswertung der Versuche: Liegen ausreichend Ausfälle vor, kann eine zensierte Auswertung der Versuche für eine Versuchsbeschleunigung genutzt werden. ISO 19973-1 [4, S. 6] fordert bei der Ermittlung von Lebensdauererkennwerten einen Anteil von mindestens 70% ausgefallener Prüflinge. Diese Forderung gilt für Zuverlässigkeitsangaben, welche Kunden zugesichert werden. Für erste Untersuchungen zur Abschätzung von Zuverlässigkeitskennwerten ist auch ein geringerer Anteil ausgefallender Prüflinge denkbar.

Extrapolation von Degradationsmerkmalen: Degradationsmerkmale konnten bei den Prüflingen nicht ermittelt werden und können folglich nicht für eine Versuchsbeschleunigung genutzt werden.

Wie beschrieben, wurde ein Lebensdauer-versuch als zielführender Versuch ausgewählt. Zusammenfassend kommen für weitere Untersuchungen eine zensierte Auswertung, Überbeanspruchung sowie erhöhte Nutzungsrate zur Versuchsbeschleunigung in Betracht. Diese Möglichkeiten werden bei den im Folgenden vorgestellten Voruntersuchungen näher vorgestellt.

5.3.4 Messaufbauten und Analysemöglichkeiten

Während des Dauerlaufs kann üblicherweise nicht überprüft werden, ob die Boosterpatronen noch voll funktionsfähig sind. Daher werden diese zyklisch aus dem Dauerlauf entnommen und in einem spezifischen Messaufbau überprüft. Im Vergleich zu dem vorausgehenden Lebensdauer-versuch (vgl. Abschnitt 5.3.1, Bild 5.6) stehen für die folgenden Voruntersuchungen Boostergehäuse in seriennaher Bauform (vgl. Bild 5.9), anstelle der Einzelprüfblöcke zur Verfügung. Zur Durchführung der Durchflusshysteresemessung (vgl. Abschnitt 5.3.1) ist folglich ein angepasster Messaufbau notwendig.

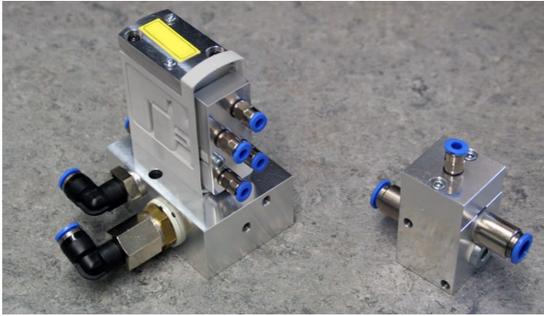


Bild 5.9: Seriennahes Ventilgehäuse für vier Boosterpatronen links und Einzelprüfblock rechts

Der im Rahmen dieser Voruntersuchungen verwendete Messaufbau ist eine Optimierung eines bereits im Unternehmen bestehenden Aufbaus und ist in Bild 5.10 dargestellt. Mit Hilfe von diesem Aufbau können die Durchflusshysteresen der vier Boosterpatronen eines Ventils ohne manuellen Eingriff hintereinander gemessen werden. Hierzu wird die für den jeweiligen Testfall notwendige Verbindung der Zu- und Abluft an die zu messende Boosterpatrone durch Schaltventile realisiert. Der Vorsteuerdruck kann durch ein Proportional-Druckregelventil eingeregelt werden. Mit Hilfe eines firmeneigenen Multifunktionalen Datenerfassungs Systems (MDS) werden die Sollwertvorgabe des Proportional-Druckregelventils und der Schaltventile vorgegeben sowie die Messdaten des Durchflusssensors und der Drucksensoren erfasst.



Bild 5.10: Im Rahmen der Voruntersuchungen verwendeter Messaufbau zur Durchführung der Durchflusshystereseemessung

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Prüflinge werden diese zyklisch aus dem Dauerlauf entnommen und im Versuchslabor in unterschiedlichen Messungen untersucht. Neben Leckagemessungen und Schaltzeitmessungen werden Durchflusshysteresemessungen durchgeführt. Bei dieser Art der Messung wird der Vorsteuerdruck rampenförmig erhöht, eine kurze Zeit gehalten und anschließend wieder rampenförmig auf Umgebungsdruck verringert. Neben dem Vorsteuerdruck wird der sich ergebende Durchfluss durch die Boosterpatrone gemessen. Wird der Durchfluss über den Vorsteuerdruck aufgetragen, ergibt sich der exemplarisch in Bild 5.11 dargestellte in den jeweiligen Achsen normierte Verlauf. Die rechte Seite der Hysteresekurve stellt hierbei den Verlauf beim Öffnungsvorgang, die linke Seite den Verlauf beim Schließvorgang dar. Unterschiede zwischen diesen zwei Verläufen sind auf Reibungseffekte (Hysterese) zurückzuführen. Auf Basis der Durchflusshysteresemessung können verschiedene Kennwerte wie Einschaltdruck, Ausschaltdruck, gemittelte Hysterese und der maximale Durchfluss abgeleitet werden. Ein Ruckgleiten (Stick-Slip-Bewegung, vgl. [97]) kann prinzipiell in der Durchflusshysterese durch Sprünge im Verlauf identifiziert werden. In dem in Bild 5.11 dargestellten Beispiel kann eine für den Betrieb ungünstige Stick-Slip-Bewegung nicht beobachtet werden.

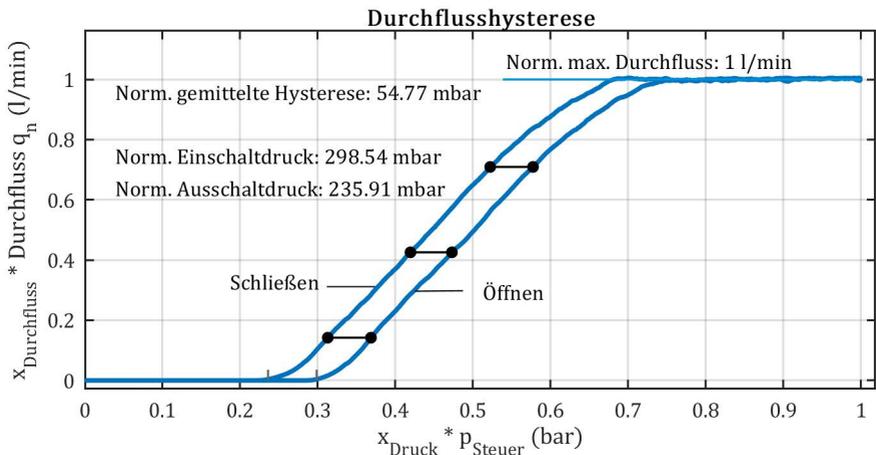


Bild 5.11: Beispielhafte normierte Messung der Durchflusshysterese einer Boosterpatrone

Zur Durchführung der Leckagemessungen werden die Boostergehäuse mittels eines Adapterblockes an ein Leckagemessgerät angeschlossen. Hierbei werden die Arbeitsanschlüsse je nach durchzuführender Messung von Hand angeschlossen.

Können während den Untersuchungen Auffälligkeiten wie Leckage oder eine zu hohe Reibung ermittelt werden, stehen weitere Analysemöglichkeiten zur Verfügung. Mittels einer Röntgenanalyse ist eine zerstörungsfreie Untersuchung der Prüflinge möglich (vgl. Bild 5.12 und Bild 5.13). Hiermit kann beispielsweise überprüft werden, ob der Prüfling inklusive der relevanten Dichtstellen korrekt montiert wurde. Weiterhin ist es möglich, starken Verschleiß an Dichtungen zu identifizieren.



Bild 5.12: Röntgengerät "phoenix nanome|x"

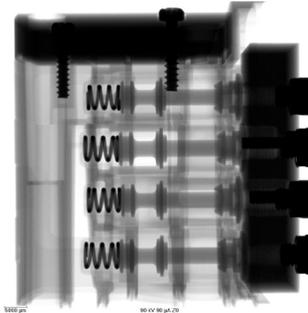


Bild 5.13: Beispielhafte Röntgenaufnahme

Für eine detailliertere Untersuchung der relevanten dynamischen Dichtelemente ist eine Öffnung der Boosterpatrone notwendig. Konstruktionsbedingt ist dieser Vorgang nicht reversibel, d. h. durch die Öffnung der Boosterpatrone wird diese beschädigt und kann somit nicht in weiteren Versuchen verwendet werden.

Für die weiterführenden Analysen stehen unterschiedliche Mikroskope zur Verfügung. Mit Hilfe eines Stereomikroskops sind einfache Analysen der Dichtstellen und Gegenauflflächen möglich (vgl. Bild 5.14 und Bild 5.15). Mittels einer an das Mikroskop angebrachten Kamera können Fotos angefertigt und somit Auffälligkeiten dokumentiert werden.

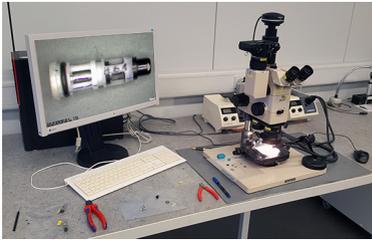


Bild 5.14: Analyse mittels Stereomikroskop

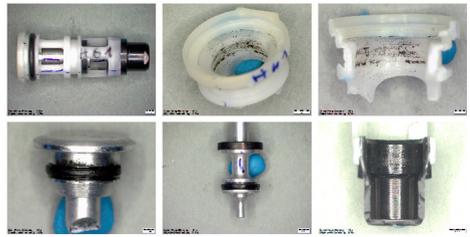


Bild 5.15: Beispielhafte Analysen mit Hilfe des Stereomikroskops

Für tiefscharfe Aufnahmen, eine automatische Bildzusammensetzung aus mehreren Einzelbildern sowie eine dreidimensionale Darstellung des Messobjektes kann das Digitalmikroskop „Keyence VHX-5000“ verwendet werden (vgl. Bild 5.16 und Bild 5.17).

Unter Zuhilfenahme des Laserscanningmikroskops „Keyence VK-9710“ können hochgenau ausgewählte Bereiche eines Messobjektes untersucht werden (vgl. Bild 5.18 und Bild 5.19). Neben einer Ausgabe der Laserintensität und Echtfarben können Höheninformationen bis in den Nanometerbereich abgeleitet werden.

Mit den beschriebenen Mess- und Analysemöglichkeiten sind die Grundlagen für die im folgenden Abschnitt beschriebenen Voruntersuchungen gelegt.

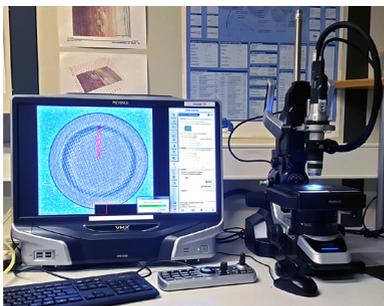


Bild 5.16: Digitalmikroskop „Keyence VHX-5000“ am IMA der Universität Stuttgart

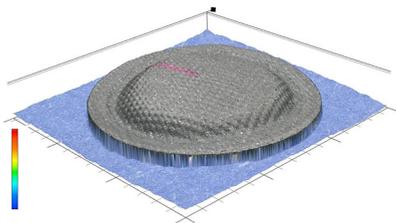


Bild 5.17: Beispielhafte Aufnahme des Digitalmikroskops. Skalierung retuschiert



Bild 5.18: Laserscanningmikroskop "Keyence VK-9710" am IMA der Universität Stuttgart

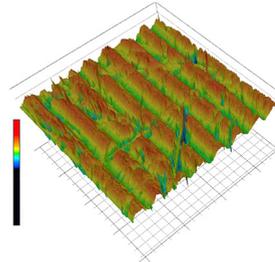
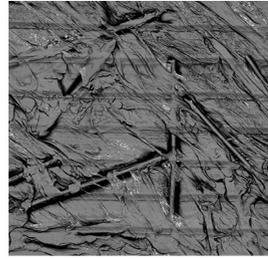


Bild 5.19: Beispielhafte Aufnahmen mit dem Laserscanningmikroskop: 2D-Oberfläche (oben), 3D-Ansicht (unten, Skalierung retuschiert)

5.3.5 Durchführung von Voruntersuchungen

Durch die im Folgenden beschriebenen Voruntersuchungen sollen die Möglichkeiten der Versuchsbeschleunigung bei den Komponenten der Mechanik näher untersucht, sowie dominante Schadensmechanismen mit ersten Lebensdauer-kennwerten ermittelt werden.

Im Rahmen einer ersten Untersuchungsreihe standen 24 Boosterpatronen zur Verfügung. Zur Untersuchung der Möglichkeit der Versuchsbeschleunigung durch eine Erhöhung der Nutzungsrate werden die Prüflinge auf drei Versuchsreihen aufgeteilt. Hierbei wurden die Frequenzen „Ausgangsfrequenz“ (AF), „3·AF“ sowie „5·AF“ gewählt (vgl. Abschnitt 5.3.3). Für diese Versuche wird das nach Spezifikation maximal zulässige Druckniveau gewählt. Hierbei wird die größte Belastung an den Lippendichtringen erwartet. Durch das Anlegen des

Druckes an alle Arbeitsanschlüsse werden alle Boosterpatronen gleich belastet. Weiterhin werden die Boosterpatronen durch den fehlenden Durchfluss nicht gekühlt. Mit der somit erhöhten Temperatur werden ebenfalls eine Erhöhung der Belastung und daraus resultierend eine verringerte Lebensdauer erwartet. Der Einfluss von Strömungskräften auf die Lebensdauer wurde in vorausgehenden Versuchen und Simulationen als gering eingestuft.

Für die beschriebenen Versuche wurde der in Bild 5.20 dargestellte Versuchsaufbau konzipiert und realisiert. Hiermit können alle drei Frequenzen parallel getestet werden. Piezoventile und Ventilelektroniken standen für diese Versuche nicht zur Verfügung. Die pneumatische Ansteuerung der Boosterpatronen wurde daher mittels herkömmlichen Schnellschaltventilen realisiert. Die Schnellschaltventile werden hierbei von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) angesteuert. Die Anzahl der Schaltspiele werden innerhalb dieser SPS gezählt. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Prüflinge wird der Dauerlaufversuch zyklisch unterbrochen und die Prüflinge in gesonderten Messaufbauten untersucht (vgl. Abschnitt 5.3.4).

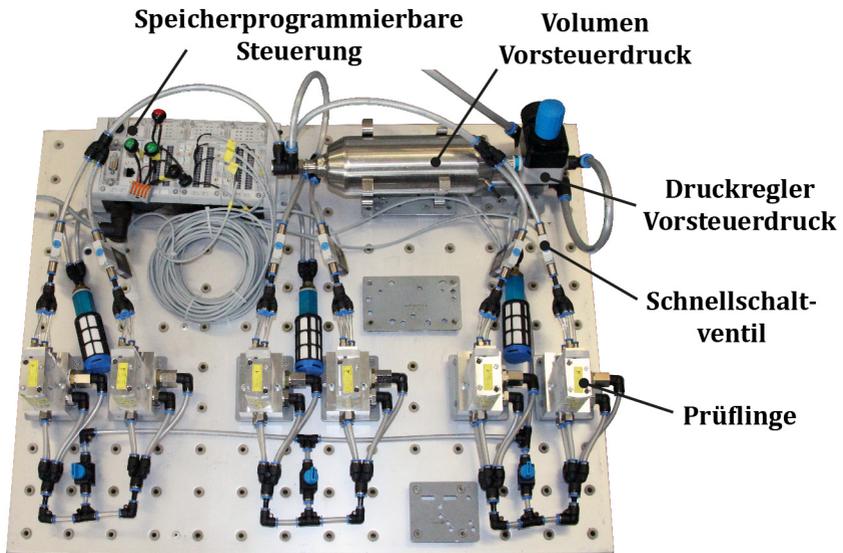


Bild 5.20: Dauerlaufaufbau zur Untersuchung unterschiedlicher Frequenzen

Während des Lebensdauerversuches konnten die in Bild 5.21 dargestellten Ausfälle beobachtet werden. Es ist ersichtlich, dass Prüflinge, welche mit niedrigeren Frequenzen betrieben wurden, anscheinend eine geringere Lebensdauer aufweisen. Unterschiede zwischen den untersuchten Frequenzniveaus sind jedoch statistisch nicht relevant (p-Wert 0,34).

Eine Analyse der Fehlerursachen ist für die Optimierung des Produktes von großem Interesse. Die in den Versuchen beobachteten Ausfälle wurden für eine zeitnahe Fehleranalyse aus dem Versuch entnommen. Durch die ersatzlose Entnahme der Prüflinge aus dem Versuch konnten die verbleibenden Prüflinge jedoch nicht weiter getestet werden.

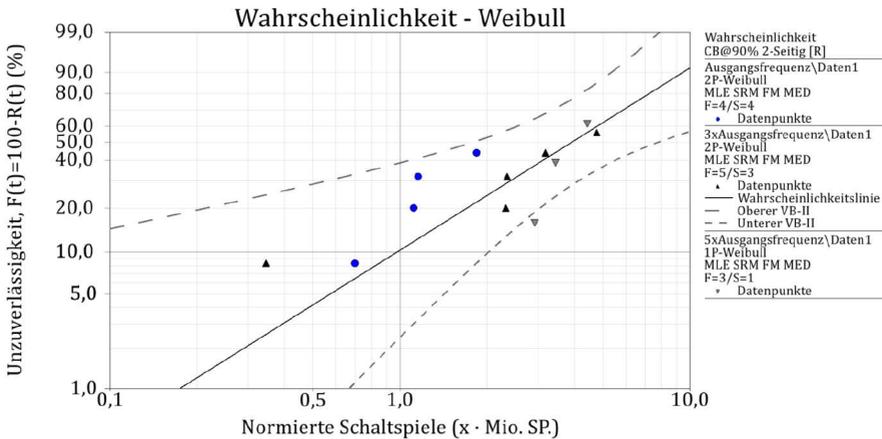


Bild 5.21: Vergleich der Lebensdauer der unterschiedlichen Frequenzniveaus

Bei der Analyse der ausgefallenen Boosterpatronen konnten bei allen getesteten Frequenzniveaus der Schadensmechanismus „Leckage am oberen Lippendichtring“ festgestellt werden. Die Ursache scheint eine Schädigung / Einebnung der glasfaserverstärkten Gegenauflfläche, ein anschließendes Hervorstehen von Glasfasern, sowie schlussendlich eine Schädigung des Lippendichtrings durch die Glasfasern zu sein (vgl. Bild 5.22 und Bild 5.23). Im Bereich des unteren Lippendichtrings ist zwar eine Einebnung der unverstärkten Gegenauflfläche, jedoch kein Ausfall durch Leckage beobachtbar (vgl. Bild 5.24).



Bild 5.22: Schädigung Lippendichtring



Bild 5.23: Schädigung Gegenlauffläche (oberer Lippendichtring)

Bei der Analyse der Gegenlauffläche des oberen Lippendichtrings im unbenutzten Zustand konnte eine nicht-optimale Oberflächengüte beobachtet werden (vgl. Bild 5.25). Durch eine Anpassung des Fertigungsprozesses konnte die Oberflächengüte anschließend verbessert werden.

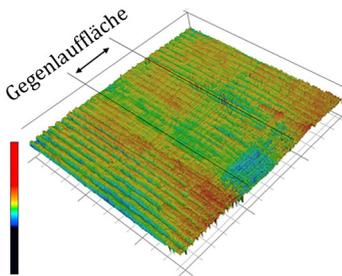


Bild 5.24: Einebnung Gegenlauffläche (unterer Lippendichtring). Skalierung retuschiert



Bild 5.25: Detailansicht der zu optimierenden Oberfläche der unbenutzte Gegenlauffläche (oberer Lippendichtring)

In einer **zweiten Versuchsreihe** standen 16 weitere Boosterpatronen zur Verfügung. Im Vergleich zu den vorausgehenden Versuchen wurde hier ein aktuellerer Konstruktionsstand getestet. Optimierungen der Oberflächengüte waren hier noch nicht umgesetzt. Im Rahmen dieser Versuche konnten vier Piezovorsteuerungen genutzt werden. Die Ansteuerung der Prüflinge kann somit realitätsnäher mit den Piezovenilen statt bisher mit den Schnellschaltventilen realisiert werden.

Basierend auf einer weiterführenden Analyse von Belastungsverläufen (aufbauend auf Abschnitt 5.3.2) wurde ein nicht näher nennbarer Faktor zur näheren Untersuchung ausgewählt. Um den Einfluss des Faktors abschätzen zu können, wurden die Prüflinge in dieser Versuchsreihe in zwei Stufen getestet.

Zur Durchführung dieser zweiten Versuchsreihe kommt der in Bild 5.26 dargestellte Versuchsaufbau zum Einsatz. Der Dauerlaufaufbau ist eine Anpassung des vorausgehenden Aufbaus. Im Gegensatz zum vorausgehenden Aufbau werden die Boosterpatronen von Piezoventilen angesteuert. Die Taktgenerierung erfolgt über die im Ventil integrierte Elektronik. In die Firmware der Ventile wurde die Taktgenerierung so einprogrammiert, dass die Ventile in diesen Versuchen geschaltet werden, sobald diese mit Spannung versorgt werden. Über eine SPS werden die Prüflinge ein- und ausgeschaltet sowie die Zeit im eingeschalteten Zustand gezählt.

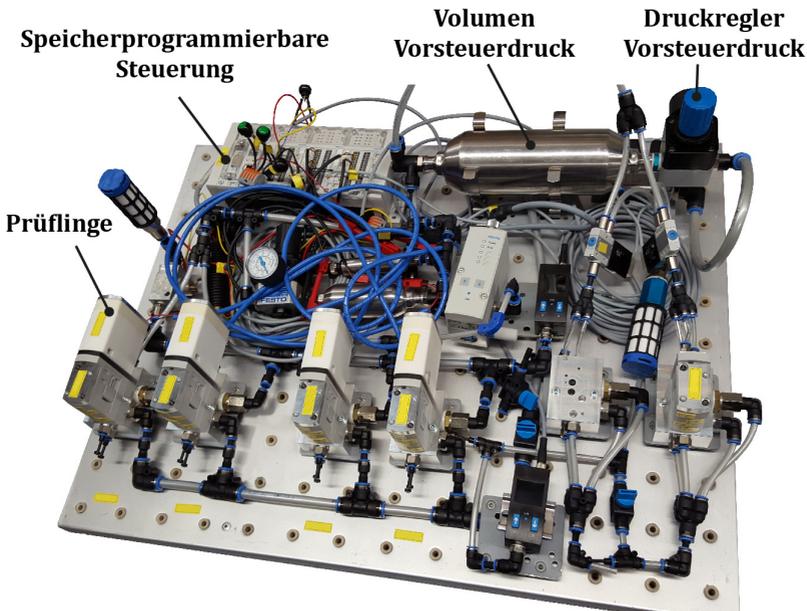


Bild 5.26: Dauerlaufaufbau im Gesamtventil

Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnten bei den Boosterpatronen mit hoher Einstellung des Faktors nach vergleichsweise kurzer Versuchsdauer Ausfälle durch Leckage ermittelt werden ($B_{10,50} = 0,34 \times \text{Mio. Sp.}$). Wie in Bild 5.27 dargestellt, war der Ausfallmechanismus bei den hier durchgeführten Versuchen jedoch nicht Verschleiß, sondern eine Drehung des Lippendichtrings. Dieser Ausfallmechanismus ist auf nicht optimale Toleranzlagen von Lippendichtring und Nut, sowie auf die Geometrie des Lippendichtrings zurückzuführen. Diese Tatsache wurde im Rahmen der Entwicklung entsprechend berücksichtigt und der Ausfallmechanismus folglich beseitigt.



Bild 5.27: Verdrehter Lippendichtring, im Folgenden wurde ein Lippendichtring mit angepasster Geometrie und Toleranzen verwendet

In der Versuchsanordnung mit niedriger Einstellstufe des Faktors konnten auch nach bis zu $138 \times \text{Mio. SP.}$ keine Ausfälle festgestellt werden. Der Einfluss des untersuchten Faktors kann bei einer statistischen Auswertung der ermittelten Lebensdauer kennwerte als statistisch hoch signifikant ($p\text{-Wert} < 0,001$) bewertet werden.

In den vorausgehenden Versuchen konnten Schwachstellen aufgezeigt werden, welche im Rahmen der Entwicklung des hier beispielhaft betrachteten Produktes behoben wurden. Durch eine **abschließende Versuchsreihe** soll im Rahmen der Voruntersuchung der dominierende Schadensmechanismus samt Ausfallverteilung für die konstruktiv angepassten Boosterpatronen ermittelt werden.

In der abschließenden Versuchsreihe kam der in Bild 5.28 dargestellte Versuchsaufbau zum Einsatz. Da für diese Versuche keine Piezovorsteuerungen zur Verfügung standen, wurden die Boosterpatronen wie in der ersten Versuchsreihe mit Schnellschaltventilen angesteuert. Im Gegensatz zu den vorausgehenden Versuchsaufbauten wurde dieser Versuchsaufbau um eine Überwachung der Leckage erweitert. Hierbei wird der Dauerlauf zyklisch

unterbrochen, ein Prüfdruck angelegt und mittels zusätzlicher Schaltventile der Druck an den Prüflingen eingesperrt. Eine Leckage an den Prüflingen wird im Anschluss durch einen abnehmenden Druck bemerkbar. Sinkt der Druck in einer festgelegten Zeitspanne unterhalb einer vorab definierten Grenze, wird der Dauerlauf gestoppt und die Prüflinge im Labor einzeln gemessen. Dies ist notwendig, da in der Messung im Lebensdauerversuch die Leckage nicht den einzelnen Prüflingen zugeordnet werden kann. Wird ein Ausfall festgestellt, so wird der fragliche Prüfling für eine korrekte Funktionsfähigkeit der Leckageüberwachung dem Dauerlauf entnommen.

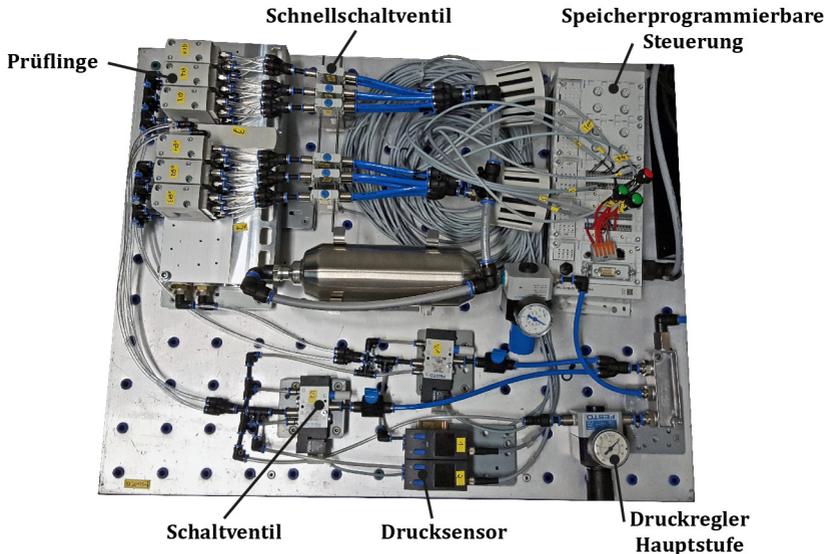


Bild 5.28: Dauerlaufaufbau der abschließenden Versuchsreihe

Im Laufe des Lebensdauerversuches konnten die in Bild 5.29 dargestellten Ausfälle durch Leckage am oberen Lippendichtring der Boosterpatrone erfasst werden. Bei der Untersuchung der Ausfallzeiten konnte beobachtet werden, dass insbesondere die letzten drei Ausfälle sich in der Steigung von den restlichen Ausfällen unterscheiden. Dies ist ein Hinweis auf unterschiedliche Schadensmechanismen. Bei einer anschließenden zerstörenden optischen Analyse ausgewählter Boosterpatronen konnte das Vorkommen unterschiedlicher Schadensmechanismen bestätigt werden.

Zur Ableitung von Lebensdauerkennwerten werden die ersten sechs Ausfälle (gleiche Steigung) genauer untersucht. Alternativ zu einer Approximation mittels 2P-Weibullverteilung können die Ausfalldaten durch eine Lognormalverteilung beschrieben werden (vgl. Bild 5.30). Es kann eine Log-Standardabweichung von 1,2 ermittelt werden. Sollen weitere Versuche zur Ermittlung von Einflüssen unterschiedlicher Faktoren auf die Lebensdauer für den zugrundeliegenden Schadensmechanismus geplant werden, kann die ermittelte Standardabweichung für die Planung der notwendigen Prüfungsanzahl verwendet werden.

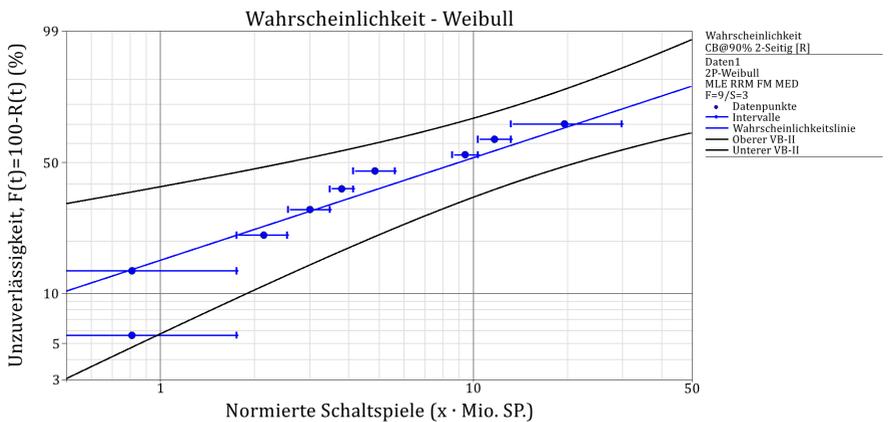


Bild 5.29: Ausfallverteilung aller Ausfälle durch Leckage am oberen Lippendichtring (Weibull)

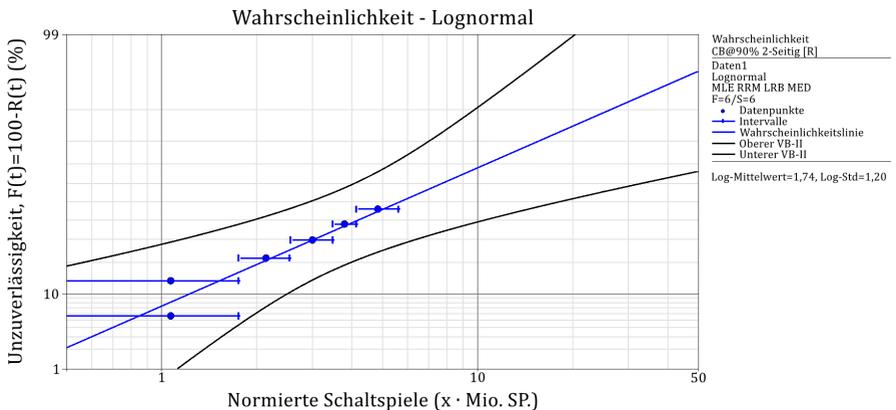


Bild 5.30: Ausfallverteilung der ersten sechs Ausfälle am oberen Lippendichtring (Lognormal)

Zusätzlich zu den Ausfällen durch Leckage am oberen Lippendichtring können bei vergleichsweise hohen Lebensdauern Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring beobachtet werden (vgl. Bild 5.31).

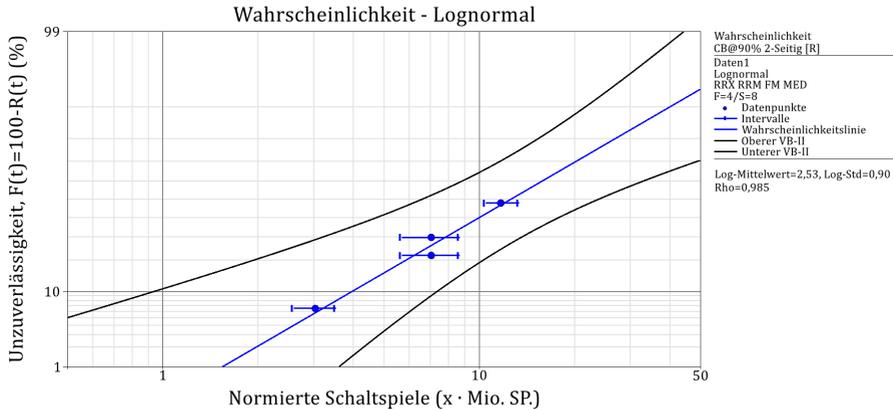


Bild 5.31: Ausfallverteilung Leckage unterer Lippendichtring

Im Rahmen der hier vorgestellten Voruntersuchungen wurden Boosterpatronen durch Lebensdauerversuche näher untersucht. Hierbei konnten dominierende Schadensmechanismen ermittelt werden (Leckage am oberen und unteren Lippendichtring). Die vorgestellten Untersuchungen wurden entwicklungsbegleitend durchgeführt. Während den Versuchen identifizierte Schwachstellen konnten somit direkt an die zuständigen Entwickler gemeldet und im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden.

Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, existieren unterschiedliche Möglichkeiten der Versuchsbeschleunigung. So könnten durch mess- und entsprechend auswertbare Degradationsmerkmale, wie potenziell die Leckage, Versuche verkürzt werden. Bei den hier durchgeführten Versuchen kann ein solches Degradationsmerkmal jedoch nicht ermittelt werden. Durch eine Erhöhung der Ansteuerfrequenz konnten, bei gleichen Schadensmechanismen und statistisch nicht relevanten Unterschieden in der Lebensdauer, Versuche beschleunigt

werden. Hiermit konnten entwicklungsbegleitend Konstruktionsstände untersucht und gefundene Schwachstellen zurückgemeldet werden. Die mechanische Konstruktion konnte somit verbessert werden.

Der Fokus der vorausgehend beschriebenen Versuche lag auf der Mechanik des mechatronischen Systems. Im folgenden Abschnitt soll die Zuverlässigkeit der Elektronik näher betrachtet werden.

5.3.6 Bewertung der Zuverlässigkeit der Elektronik

Im Rahmen des firmeninternen Entwicklungsprozesses wurde mit Hilfe des Parts-Count Verfahrens nach der Siemens Norm 29500 [34] und unter Berücksichtigung der DIN EN 61709 [36] eine Abschätzung der Zuverlässigkeit der Elektronik durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.3 und 2.5.2). Bei der Analyse zeigte die Elektronik der Ventilscheibe eine geringere Lebensdauer als die Controllerplatine auf. Die Ventilelektronik wurde daher im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich experimentell untersucht.

Für den Versuch wurden 30 Ventilelektroniken unter erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit in einem Klimaschrank ausgelagert (vgl. Bild 5.32). Zur Feststellung eines Ausfalles wurden die Prüflinge zyklisch aus dem Klimaschrank entnommen und an einem gesonderten Prüfaufbau vermessen (vgl. Bild 5.33). Mit Hilfe des Prüfaufbaus können die Ventilelektroniken elektrisch und pneumatisch so kontaktiert werden, dass die Ventilelektroniken wie herkömmliche Ventile angesteuert und getestet werden können. Zur Feststellung der Funktionsfähigkeit wurden primär Hubregelungen der Boosterpatronen durchgeführt. Ist eine Hubregelung von einem der vier Boosterpatronen der Ventilelektronik nicht möglich, gilt diese als ausgefallen. Zur Rückführung des Ausfalls auf die ursächliche Komponente wurden die Ventilelektroniken nach dem Feststellen eines Ausfalls jeweils weitergehend untersucht.

Die hierbei ermittelten Ausfallzeitpunkte sind zusammen mit einer Approximation durch eine 2P-Weibullverteilung in Bild 5.34 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass teils starke Abweichungen zwischen der Approximation und den einzel-

nen Ausfallzeitpunkten existieren. Insbesondere sind Bereiche mit unterschiedlichen Steigungen zu erkennen. Dies deutet auf unterschiedliche Ausfallmechanismen hin. Bei einer anschließenden Untersuchung konnten vier unterschiedliche Schadensbilder identifiziert werden. Werden die Ausfälle nach Schadensbild getrennt ausgewertet, können die Ausfallzeiten besser durch eine 2P-Weibullverteilung approximiert werden (vgl. Bild 5.35).



Bild 5.32: Ventil-elektroniken im Klimaschrank

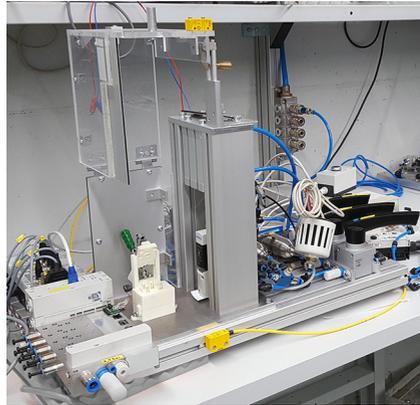


Bild 5.33: Prüfaufbau zur Ermittlung der Funktionsfähigkeit der Ventil-elektroniken

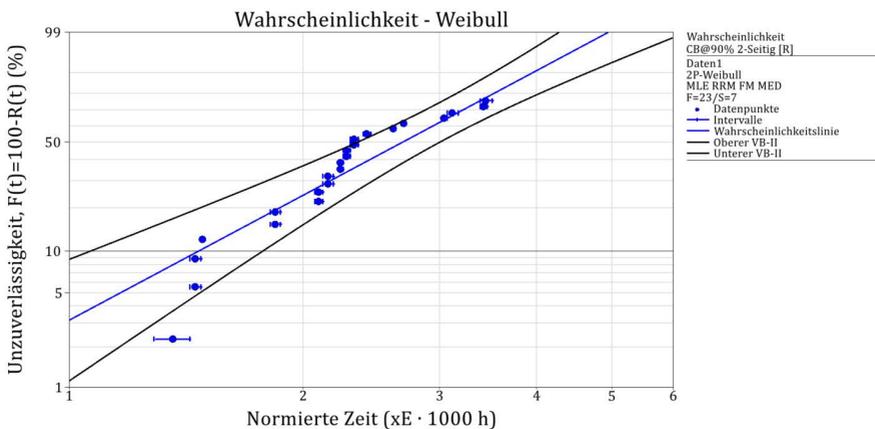


Bild 5.34: Normierte Ausfallverteilung der getesteten Ventil-elektroniken unter erhöhten Belastungen, Übersicht aller Ausfälle

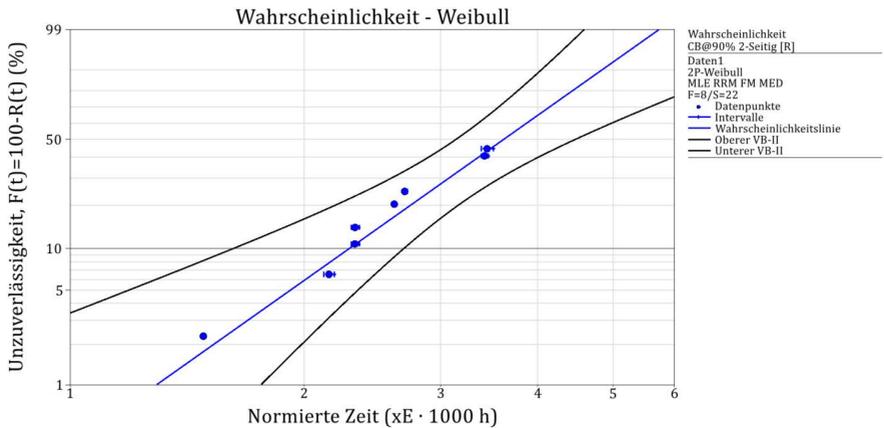


Bild 5.35: Normierte Ausfallverteilung der Ventilelektroniken unter erhöhten Belastungen für Schadensmechanismus „A“

In dieser Versuchsreihe konnten Ausfallzeiten unter erhöhten Belastungen ermittelt werden. Allein durch diesen Versuch kann jedoch noch keine Aussage über die Lebensdauer bei abweichenden Belastungen getroffen werden. Hierfür sind die Auswahl eines passenden Raffungsmodells sowie weitere Versuche zur Parametrierung und Verifikation des Modells notwendig (vgl. Abschnitt 2.5.2). In dem hier beispielhaft betrachteten Anwendungsbeispiel ist die Ausfallzeit der Mechanik unter Nennbedingungen, insbesondere bei der Boosterpatrone, um Größenordnungen kleiner als bei der Elektronik. Somit wurde im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf die zum Untersuchungszeitpunkt deutlich kritischere Mechanik gelegt. Von weiteren Versuchen der Elektronik mit erwarteten Versuchszeiten von jeweils über einem Jahr musste aus Zeitgründen abgesehen werden.

In diesem Abschnitt wurde eine Übersicht gegeben, welche Berechnungen und Versuche zur Absicherung der Elektronikkomponenten durchgeführt wurden. Die ermittelten Kennwerte können in die folgende Abschätzung der Systemzuverlässigkeit mit einfließen.

5.3.7 Erste Abschätzung der Systemzuverlässigkeit

Im Rahmen der vorgestellten Voruntersuchungen konnten unterschiedliche Ausfallmechanismen an den Boosterpatronen beobachtet werden. Soll eine Aussage für die Systemzuverlässigkeit abgeleitet werden, müssen die Zuverlässigkeitskennwerte der einzelnen Komponenten entsprechend in einer Berechnung berücksichtigt werden. Für eine vereinfachte Abschätzung kann hierbei die Booleschen Systemtheorie verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.3). Wie in den Abschnitten 2.4.2 und 5.1 dargestellt, besteht das hier untersuchte System aus den Baugruppen Controller, Verbindungsleiterplatte und Ventilscheibe. In der Ventilscheibe konnte an der Komponente Boosterpatrone die Schadensmechanismen „Leckage am unteren Lippendichtring“ sowie „Leckage am oberen Lippendichtring“ beobachtet werden. Andere Schadensmechanismen, wie z. B. an den Piezoventilen oder der Elektronik, konnte in den Voruntersuchungen der Mechanik nicht beobachtet werden. Auch übersteigt die für die verschiedenen Elektronikkomponenten durch Ausfallratenkataloge abgeschätzte Lebensdauer die bei den Boosterpatronen beobachtete Lebensdauer um ein Vielfaches. Für eine Abschätzung der Systemzuverlässigkeit werden somit nur die dominierenden Schadensmechanismen an der Boosterpatrone betrachtet.

Da das Auftreten eines Schadensmechanismus zum Ausfall des Gesamtsystems führt, wird die Systemzuverlässigkeit im Schaltbetrieb durch eine Reihenschaltung modelliert (vgl. Bild 5.36). Die Zuverlässigkeit des Systems kann folglich durch die Multiplikation der Zuverlässigkeitskennwerte der einzelnen Boosterpatronen und Schadensmechanismen berechnet werden (Gleichung (5.1), vgl. Abschnitt 2.5.5). Die hierbei ermittelte Abschätzung kann mit der zu erreichenden Systemzuverlässigkeit verglichen und auf Erreichung der Vorgaben überprüft werden.

Die lebensdauerbegrenzenden Komponenten waren zum Voruntersuchungszeitpunkt noch in der Entwicklung. Die beobachteten Schwachstellen konnten entsprechend verbessert werden. Nach den jeweiligen Iterationsschleifen zur Verbesserung kann durch Einsetzen der ermittelten Lebensdauer kennwerte in die Gleichung (5.1) die Systemzuverlässigkeit abgeschätzt werden.

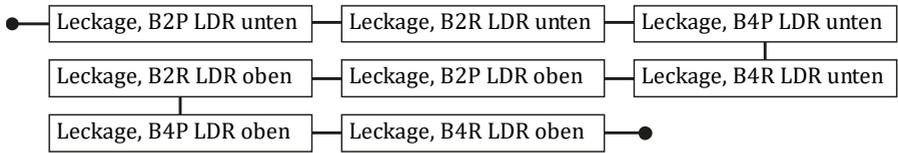


Bild 5.36: Zuverlässigkeitsblattschaubild der vereinfachten Systemstruktur

$$R_{System} = \prod_{i=1}^n R_{Bi} = R_{Leckage, LDR\ unten}^4 \cdot R_{Leckage, LDR\ oben}^4 \quad (5.1)$$

Die Abschätzung der Systemzuverlässigkeit für einen ausgewählten Betriebspunkt stellt das Ende der versuchstechnischen Voruntersuchung dar. Im Folgenden werden Versuche geplant, um Aussagen zur Zuverlässigkeit bei unterschiedlichen Betriebspunkten ermitteln zu können.

5.4 Statistische Planung der Versuche

In diesem Abschnitt wird der Versuchsplan für die mechanischen Komponenten des mechatronischen Systems geplant. Hierzu werden in Abschnitt 5.4.1 die Ziele der Untersuchung definiert. In Abschnitt 5.4.2 werden die möglichen Einflussgrößen vorgestellt. Die Aufstellung und Auswahl eines Versuchsplanes werden in Abschnitt 5.4.3 durchgeführt.

5.4.1 Zieldefinition

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, Faktoren mit Einfluss auf die Lebensdauer zu identifizieren und den quantitativen Einfluss dieser Faktoren zu bestimmen. Dabei soll der mögliche Einfluss von Wechselwirkungen auf die Lebensdauer ebenfalls berücksichtigt werden.

Da in den Voruntersuchungen die Boosterpatrone als zuverlässigkeitskritisch eingestuft wurde, wird der Fokus dieser Untersuchung auf diese Komponente gelegt.

Dennoch sollen relevante Eigenschaftsänderungen sowie mögliche Ausfälle an anderen Komponenten wie Piezoventil, Ventilelektronik oder Controllerelektronik erfasst werden. Die hierbei relevanten Einflussgrößen werden im Folgenden betrachtet.

5.4.2 Erfassung der Einflussgrößen

Zur Erfassung der relevanten Einflussgrößen des zu untersuchenden Systems wurden Informationen aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt. Neben Expertenbefragungen wurden Informationen aus Voruntersuchungen zusammengetragen sowie Normen zu möglichen Umgebungseinflüssen [98, 99] berücksichtigt. Die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Einflussgrößen wurden hierbei als relevant erachtet. Bei der Booster- und Pilotpatrone wird insbesondere durch die Temperatur und den Mediendruck ein Einfluss auf die Lebensdauer erwartet. Bei der Elektronik wird insbesondere durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit ein Einfluss erwartet.

Tabelle 5.2: Übersicht relevanter Einflussgrößen

Boosterpatrone	Elektronik	Pilotpatrone
1. Druck(-verlauf) Zuluft	1. Temperatur Umgebung	1. Ansteuerspannung
2. Druck(-verlauf) A2 / A4	2. Luftfeuchtigkeit Umgebung	2. Temperatur Fluid
3. Druck(-verlauf) Abluft	3. Vibration	3. Luftfeuchtigkeit Fluid
4. Durchfluss	4. Versorgungsspannung	4. Verschmutzung Fluid
5. Ruhezeiten	5. Luftfeuchtigkeit Fluid	5. Vibration
6. Schaltfrequenz	6. Verschmutzung Fluid	6. Temperatur Umgebung
7. Amplitude Booster	7. Temperaturwechsel	7. Luftfeuchtigkeit Umgebung
8. Vorsteuerdruck	8. Temperaturschock	8. Durchfluss
9. Luftfeuchtigkeit Umgebung	9. Temperatur Fluid	9. Schaltfrequenz
10. Luftfeuchtigkeit Fluid	10. Strahlung / EMV	10. Ruhezeiten
11. Verschmutzung Fluid	11. Einbaulage (Temperaturverteilung)	11. Vorsteuerdruck
12. Temperatur Fluid		12. Temperaturwechsel
13. Temperatur Umgebung		13. Temperaturschock
14. Temperaturwechsel		14. Strahlung / EMV
15. Temperaturschock		15. Einbaulage
16. Einbaulage		

Es ist vorgesehen, die Ventile anwendungsnah im Gesamtsystem einer Ventilinsel zu testen. Es befinden sich vier Ventile (16 Boosterpatronen, 32 Pilotpatronen) auf einer Insel. Nicht alle Einflussgrößen können für einzelne Booster- / Pilotpatronen oder Elektroniken getrennt eingestellt werden. Beispielsweise kann in der Regel nur ein Vorsteuerdruck, ein Versorgungsdruck oder eine Umgebungstemperatur je Ventilinsel eingestellt werden. Mittels Sonderlösungen können gewisse Beschränkungen bei Bedarf aufgehoben werden. Dies ist jedoch mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden.

Bei der folgenden Auswahl und Bewertung unterschiedlicher Versuchspläne ist somit die Umsetzbarkeit der jeweiligen Versuchspläne zu berücksichtigen. So könnte ein Versuchsplan mit mehr Prüflingen, der weniger oder gar keine Sonderlösungen vorsieht, einfacher und kostengünstiger zu realisieren sein.

5.4.3 Aufstellung und Auswahl möglicher Versuchspläne

Bei einer statistischen Versuchsplanung wird üblicherweise ein zweistufiges Vorgehen gewählt [57, S. 264]. Zunächst wird mittels eines Screening-Versuchsplanes untersucht, ob die in Frage kommenden Einflussfaktoren einen Einfluss auf die Zielgröße besitzen. Auf Basis dieser Informationen wird eine weitere Versuchsreihe durchgeführt, um den Einfluss dieser ausgewählten Faktoren und ggf. Wechselwirkungen genauer zu quantifizieren. Falls notwendig kommen Versuchspläne zum Einsatz, die auch nichtlineare Einflüsse erfassen können.

Bedingt durch eine deutlich verzögerte Verfügbarkeit von Prüflingen konnte im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit nur eine Versuchsreihe durchgeführt werden. Es wird ein Screening-Versuchsplan weiter ausgebaut, sodass bereits ein erstes Modell abgeschätzt werden kann. Basierend auf Voruntersuchungen und Vorwissen wird der Fokus auf Faktoren gelegt, bei welchen ein großer Einfluss erwartet wird. Ist die Erstellung eines genaueren Modells zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten erforderlich, sind weitere Versuche im Anschluss an diese Arbeit notwendig.

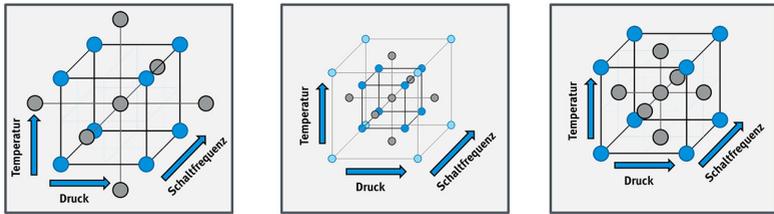
Im Folgenden wird untersucht, welcher Versuchsplan für den hier vorliegenden Anwendungsfall am besten geeignet ist. Prinzipiell mögliche Versuchspläne (vgl. Abschnitt 2.7) werden jeweils evaluiert und auf Eignung geprüft. Neben Screening-Versuchsplänen werden zentrale, flächenzentrierte und vollfaktorielle Versuchspläne untersucht.

Zum **Screening** können verschiedene Versuchspläne wie teilfaktorielle, Plackett-Burman oder die sogenannten optimalen Versuchspläne zum Einsatz kommen [58].

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind keine Informationen über Art und Stärke von Wechselwirkungen vorab bekannt. Ein potenziell unbrauchbar verfälschtes Versuchsergebnis durch eine Überlagerung von Haupteffekten und Zweifachwechselwirkungen bei einer Anwendung des Plackett-Burman Versuchsplanes wird als zu riskant gewertet. Die für optimale Versuchspläne notwendige Modellstruktur ist vor Versuchsbeginn nicht bekannt. Optimale Versuchspläne können somit nicht zielführend eingesetzt werden. Demzufolge kommen nur (teil-)faktorielle Versuchspläne als sinnvolle Screening-Versuchspläne in Frage.

Für eine genauere Modellerstellung können **zentrale** bzw. **flächenzentrierte Versuchspläne** verwendet werden. Beispiele für diese Art der Versuchspläne sind in Bild 5.37 dargestellt. Bei einem zentralen Versuchsplan wird ein vollfaktorieller Versuchsplan (bzw. ein teilfaktorieller Versuchsplan der Mindestauflösung V) durch einen „Stern“ ergänzt [58, S. 199]. Üblicherweise liegt der Stern außerhalb der Einstellungen des (teil-)faktoriellen Versuchsplanes. Können diese neuen Extremwerte im Versuch nicht realisiert werden, können prinzipiell die Grenzen verkleinert, oder ein flächenzentrierter Versuchsplan verwendet werden.

Bei dem flächenzentrierten Versuchsplan ragen die „Sternpunkte“ nicht über den „Würfel“ hinaus. Da der Versuchsplan ungünstige Eigenschaften besitzt (der Versuchsplan ist nicht orthogonal), wird eine Anwendung nur in Ausnahmefällen empfohlen [58, S. 204].



- a) **Zentraler Versuchsplan**
Einstellungen außerhalb den eigentlichen Grenzwerten
- b) **Verkleinerte Grenzen**
Einstellungen entsprechen den eigentlichen Grenzwerten
- c) **Flächenzentrierter Versuchsplan**
Einstellungen entsprechen den eigentlichen Grenzwerten

Bild 5.37: Vergleich zentraler und flächenzentrierter Versuchspläne

Der zentrale Versuchsplan mit Sternpunkt außerhalb der eigentlichen Einstellgrenze (Versuchsplan a) lässt sich meist nicht sinnvoll realisieren. Auch in diesem Anwendungsfall ließe sich ein Boosterhub außerhalb der Einstellgrenzen von Null bis 100 % nicht realisieren. Durch eine Verkleinerung der gesamten Grenzen (Versuchsplan b) ergeben sich realisierbare Versuchsparameter, jedoch können durch die verkleinerten Abstände der Faktorstufen Effekte bei gleichbleibender Prüflingszahl nicht mehr so genau ermittelt werden. Ein flächenzentrierter Versuchsplan (Versuchsplan c) erscheint für die Faktoren Druck und Temperatur geeignet, jedoch werden die Faktoren mit erwartetem kleinem Einfluss mit mehr Stufen als notwendig getestet. Im Vergleich zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit jeweils drei Einstellungen bei Faktoren mit hohem erwartetem Einfluss sowie jeweils zwei Einstellungen bei Faktoren mit kleinem erwartetem Einfluss ergeben sich deutlich mehr Versuche.

Die Vorteile eines zentralen / flächenzentrierten Versuchsplanes können bei den hier durchzuführenden Untersuchungen nicht ausreichend genutzt werden. Nicht alle Versuchspunkte erscheinen notwendig. Insbesondere würden bei den Faktoren mit kleinem erwartetem Einfluss mehr Versuche durchgeführt werden als notwendig erscheinen. Mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan und ausgewählten Faktorstufen kann der Versuchsaufwand bei fokussierter Aussagekraft verringert werden. Im Folgenden werden daher vollfaktorielle Versuchspläne genauer untersucht.

Es werden **vollfaktorielle Versuchspläne** gesucht, welche sich gut umsetzen lassen und sich auf die relevanten Faktoren fokussieren. Der Versuchsplan muss eine möglichst gute Aussagekraft bei möglichst kleiner Anzahl an Versuchen besitzen.

In der Praxis gut umsetzbar sind Versuchspläne, bei welchen vier Ventile (entspricht einer kompletten Insel, bzw. einem ganzzahligen Vielfachen davon) bei einem gleichen Druckniveau betrieben werden. Mit etwas mehr Aufwand kann die Insel auch in zwei Druckzonen unterteilt werden. Pro Temperatur und Druckniveau sollten somit mindestens zwei Ventile, idealerweise jedoch vier Ventile (eine komplette Insel) verwendet werden. Damit können nicht voll besetzte Inseln verhindert und Kosten sowie Aufbauzeit verringert werden.

Um zu prüfen, ob bestimmte Stufenkombinationen von den ausgewählten Faktoren gut umsetzbare Versuchspläne ergeben, werden die prinzipiell möglichen Versuchspläne betrachtet. Die Faktoren A und B werden hierbei mit eins bis sechs Stufen, die restlichen Faktoren mit eins bis vier Stufen betrachtet. Es werden unterschiedliche Replikationen der einzelnen Versuchspunkte berücksichtigt (vgl. Tabelle 5.3). Hierbei ergeben sich mehrere tausend mögliche vollfaktorielle Versuchspläne. Durch eine mathematische Beziehung der vorgestellten Randbedingungen und ein entsprechendes Herausfiltern gut umsetzbarer Versuchspläne kann die Anzahl an näher zu betrachtenden Versuchsplänen jedoch stark reduziert werden. Die gefilterten Versuchspläne sind im Anhang A.1 sowie auszugsweise in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.3: Betrachtete Einstellungen des vollfaktoriellen Versuchsplanes

Faktoren	Stufen
Faktor A	1 - 6
Faktor B	1 - 6
Faktor C	2
Faktor D	2
Faktor E	1 - 2
Faktor F	1 - 2
Replikationen	1-10, 12, 16, 20, 24, 28, 32

Tabelle 5.4: Auszug gut umsetzbarer vollfaktoriellen Versuchspläne mit den folgenden Auswahlkriterien: Ganzzahliges vielfaches halber Inseln bei Randbedingungen A bis C, Gesamtzahl an Versuchen größer 100 und kleiner 250

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Faktor F	Replikationen	Basisversuch	Gesamtzahl an Versuchen	Inseln je Randbedingung A	Inseln je Randbedingung B	Inseln je Randbedingung C
1a	3	3	2	2	1	1	4	36	144	1	3	1
1b	3	3	2	2	1	2	2	72	144	1	3	1
1c	3	3	2	2	2	1	2	72	144	1	3	0,5
1d	3	3	2	2	2	2	1	144	144	1	3	0,5
2a	4	3	2	2	1	1	4	48	192	1	4	1
2b	4	3	2	2	1	2	2	96	192	1	4	1
2c	4	3	2	2	2	1	2	96	192	1	4	0,5
2d	4	3	2	2	2	2	1	192	192	1	4	0,5
...

Auch wenn sich die vorgestellten Versuchspläne gut in der Praxis umsetzen lassen sollten, muss ein Versuchsplan in erster Linie dazu geeignet sein, auch kleine Effekte bei einer möglichst kleinen Anzahl an Versuchen ermitteln zu können. Auf die Auswahl gut umsetzbarer Versuchspläne folgt somit eine Bewertung der statistischen Aussagekraft.

Die Auswertung und Planung einer DoE setzt voraus, dass normalverteilte Daten vorliegen [58]. Für weibullverteilte Daten gibt es aktuell keine Möglichkeit, Eigenschaften eines statistischen Versuchsplans berechnen zu können. Die hier betrachteten Daten können jedoch auch gut mittels einer Lognormalverteilung ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 5.3.5). Durch ein Logarithmieren bzw. Potenzieren der Ausfallzeiten können die Daten somit in eine Normalverteilung transformiert und die sonst üblichen Berechnungsmethoden verwendet werden.

Ein relevantes Maß für die Bewertung statistischer Versuchsplänen ist der erkennbare Effekt pro Standardabweichung [57]. Dieses Maß gibt an, welche Änderungen in Bezug auf die im Versuch auftretende Streuung als statistisch signifikant erkannt werden können. Für ausgewählte Versuchspläne ist diese

Für die Versuche wird davon ausgegangen, dass sich der Schadensmechanismus und somit die Ausfallart der Prüflinge nicht ändert. Bei der Verwendung der Lognormalverteilung zur Approximation und Auswertung der Daten wird folglich eine konstante Standardabweichung verwendet. Der Effekt auf die Lebensdauer der jeweiligen Faktoren wird durch einen geänderten Mittelwert der Lognormalverteilung abgebildet.

Bild 5.38 veranschaulicht die in Tabelle 5.5 aufgeführten erkennbaren Effekte pro Standardabweichung. Den Ausgang bildet eine exemplarische Wahrscheinlichkeitslinie mit Log-Std = 1,2 sowie $B_{10} = 100 \times \text{Mio. SP}$. (Log-Mittelwert = 6,14). Wird dieser Log-Mittelwert mit der in Tabelle 5.5 für Faktor A bei Prüfplan „1a“ aufgeführte Effekt pro Standardabweichung zusammengeführt, so ergeben sich die in Bild 5.38 dargestellten durchgängigen schwarzen Geraden. Liegt der später im Versuch ermittelte Effekt (Differenz zwischen größter und kleinster Einstellung) für Faktor A außerhalb dieser Grenzen, so kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen Effekt geschlossen werden. Analog sind in gestrichelter Linie die erkennbaren Effekte für Versuchsplan „0a“ dargestellt. Es wird deutlich, dass mit Versuchsplan „1a“ deutlich kleinere Effekte erkannt werden können. Durch die Berechnung des erkennbaren Effekts pro Standardabweichung für die einzelnen Versuchspläne kann somit die prinzipielle statistische Eignung bewertet werden. So liegt beispielsweise Versuchsplan „1a“ mit einem Wert von 0,13-0,19 im aussagekräftigen Bereich.

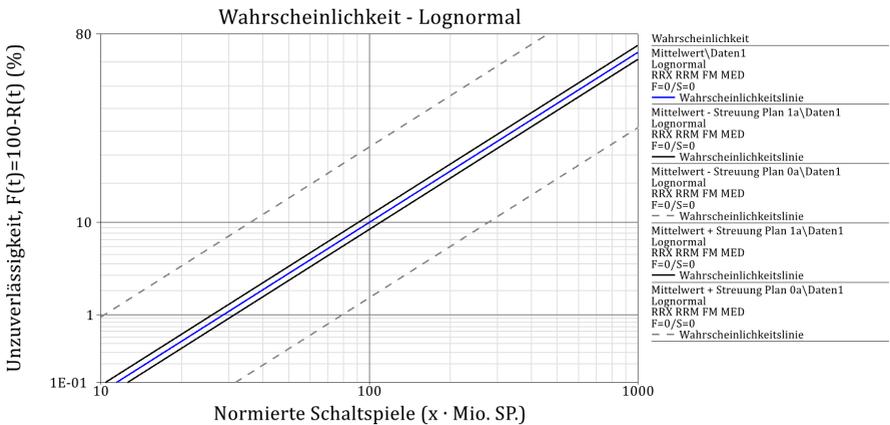


Bild 5.38: Veranschaulichung der erkennbaren Effekte für Faktor A für Prüfpläne „1a“ und „0a“

Versuchspläne zur Erkennung noch kleinerer Effekte sind mit einem vergleichsweise hohen zusätzlichen Versuchsaufwand verbunden. Eine Halbierung der Versuchsanzahl lässt die erkennbaren Effekte in einen unzureichenden Bereich sinken. Bei gleichem Versuchsumfang ist der Aufwand für die praktische Durchführung von Versuchen für die Faktoren E und F erheblich erhöht. Für den in Voruntersuchungen und nach Expertenmeinung abgeschätzten vergleichsweise geringen Einfluss der Faktoren E und F rechtfertigt dies nicht den erhöhten Aufwand für die Versuchspläne „1b“, „1c“ und „1d“. Der Prüfplan „1a“ erscheint somit zielführend und wird im Folgenden näher betrachtet.

Bei der Berechnung des zu erkennenden Effektes pro Standardabweichung wird davon ausgegangen, dass alle Prüflinge ausgefallen sind und dass der exakte Zeitpunkt des Ausfalls bekannt ist. In den folgenden Versuchen wird dies nicht der Fall sein. Aus zeitlichen Gründen können nicht alle Prüflinge bis zum Ausfall getestet werden. Auch kann der exakte Zeitpunkt des Ausfalls nicht genau, sondern nur in einem Intervall ermittelt werden. Bisher gibt es keine Möglichkeit, diesen Einfluss auf die Größe der erkennbaren Effekte zu berechnen. Um diesen Einfluss dennoch abschätzen zu können, wird ein fiktives Lebensdauermodell aufgestellt, für unterschiedliche Bedingungen entsprechende Lebensdauerverteilungen aus Zufallszahlen abgeleitet und mit dem vorausgewählten Versuchsplan entsprechend ausgewertet. Der Ansatz sowie die Koeffizienten des fiktiven Lebensdauermodells sind in Gleichung (5.2) bzw. Tabelle 5.6 dargestellt.

$$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5.2)$$

Tabelle 5.6: Koeffizienten eines fiktiven Lebensdauermodells

Term	Koeffizient
β_0	6,14
β_1	-0,50
β_2	-0,20
β_3	-0,03
β_4	-0,35

Term	Koeffizient
β_{12}	-0,15
β_{13}	-0,05
β_{23}	-0,07
β_{123}	-0,04

Mit Hilfe des fiktiven Lebensdauermodells können die Lebensdauerkennwerte für die einzelnen Versuchspunkte des Versuchsplans „1a“ ermittelt werden. Für jeden Versuchspunkt werden anschließend gemäß dem Versuchsplan jeweils vier (für den Zentralpunkt acht) Zufallszahlen pro Versuchspunkt ermittelt. Die auf diesem Weg generierten Ausfalldaten (siehe Anhang Tabelle A. 2) wurden im Rahmen der Simulationsstudie mit unterschiedlichen Zensierungsgraden ausgewertet. Neben der unzensierten Auswertung als Vergleich wurde eine Intervallzensierung, sowie eine Intervall- und Rechtszensierung mit unterschiedlichen Anteilen an Ausfällen (17 %, 24 %, 43 % und 76 %) betrachtet. In Tabelle 5.7 sind die ermittelten Koeffizienten des fiktiven Lebensdauermodells für die unterschiedlichen Zensierungen dargestellt. Die dazugehörigen p-Werte sind in Tabelle 5.8 aufgeführt. Zwischen der intervallzensierten (es ist jeweils nur das Intervall bekannt, in welchem der Prüfling ausgefallen ist) und der unzensierten Auswertung (die Ausfallzeiten sind alle exakt bekannt) ergeben sich bei den ermittelten Koeffizienten und den p-Werten nur geringfügige Unterschiede.

Die zwei größten Effekte der Terme A und D werden unabhängig von der Zensierung als signifikant erkannt. Dies gilt ebenfalls für die Intervall- und Rechtszensierungen. Insbesondere gilt dies schon für die erste Intervall- und Rechtszensierung bis $12 \times \text{Mio. SP.}$ („Int. & R. 12“), bei welcher nur 17 % der Prüflinge in ca. 1 % der Versuchszeit der unzensierten Versuchsreihe ausgefallen sind. Mit steigender Versuchsdauer bzw. steigendem Anteil an Ausfällen bei den intervall- und rechtszensierten Auswertungen kann in der Regel eine genauere Ermittlung der Koeffizienten beobachtet werden.

Wie in der Simulationsstudie gezeigt wurde, ist es mit dem ausgewählten Versuchsplan prinzipiell möglich, auch bei intervall- und rechtszensierten Ausfalldaten signifikante Terme zu identifizieren und die Koeffizienten der Terme abzuschätzen. Für das Ziel der hier vorgesehenen Untersuchung, der Identifikation signifikanter Effekte und zum Ableiten eines ersten Modells, erscheint der ausgewählte Versuchsplan somit geeignet. Soll ein genaueres Modell erstellt werden, ist dennoch eine zweite Versuchsreihe notwendig.

Unter Abstimmung mit Verantwortlichen aus Entwicklung, Versuch und Forschung wurde der vollfaktorielle Versuchsplan „1a“ mit den vier Faktoren A, B, C und D ausgewählt. Die realen Faktoren unterliegen der Geheimhaltung. Im

Vergleich zu zentralen bzw. flächenzentrierten Versuchsplänen können die Versuche zielgerichteter durchgeführt und Versuchsaufwand eingespart werden. Eine weitere Reduzierung der Versuche, beispielsweise durch einen teilfaktoriellen Versuchsplan, ergibt eine deutlich schlechtere Erkennbarkeit signifikanter Effekte.

Im Rahmen der DoE werden komplette VEVm Ventilscheiben in Lebensdauer- versuchen getestet. Umfang der Versuche sind 40 Ventile bei 37 unterschiedlichen Bedingungen. Tabelle A. 3 des Anhangs zeigt eine Übersicht der einzelnen Versuchspunkte. Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung der geplanten Versuche beschrieben.

Tabelle 5.7: Ermittelte Koeffizienten des fiktiven Lebensdauermodells

Term	Vor- gabe	Unzen- siert	Intervall- zensiert	Int. & R. 12	Int. & R. 16	Int. & R. 40	Int. & R. 100
Max. SP. (x · Mio.)		1062	1062	12	16	40	100
Anteil Ausfälle		100 %	100 %	17 %	24 %	43 %	76 %
Rechtzensiert				x	x	x	x
Intervallzensiert			x	x	x	x	x
Std	1,2	1,13	1,14	1,06	1,04	1,17	1,13
Intercept	6,14	6,30	6,30	6,36	6,26	6,39	6,29
A	-0,50	-0,67	-0,68	-0,98	-0,81	-0,84	-0,68
B	-0,20	-0,29	-0,29	-0,45	-0,24	-0,29	-0,30
C	-0,03	0,08	0,09	0,09	0,12	0,12	0,06
D	-0,35	-0,37	-0,37	-0,40	-0,43	-0,36	-0,35
A · B	-0,15	-0,28	-0,27	-0,06	-0,40	-0,33	-0,19
A · C	-0,05	-0,06	-0,05	0,08	0,11	0,04	-0,04
B · C	-0,07	-0,13	-0,13	-0,26	-0,26	-0,13	-0,15
A · B · C	-0,04	-0,24	-0,23	-0,23	-0,27	-0,32	-0,20

Tabelle 5.8: P-Werte des fiktiven Lebensdauermodells (p-Werte < 0,1 sind grau hervorgehoben)

Term	Erwar- tung	Unzen- siert	Intervall- zensiert	Int. & R. 12	Int. & R. 16	Int. & R. 40	Int. & R. 100
Intercept		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
A		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B		0,011	0,014	0,066	0,159	0,047	0,013
C		0,372	0,353	0,641	0,372	0,315	0,563
D		0,000	0,000	0,012	0,002	0,002	0,000
A · B		0,051	0,059	0,827	0,058	0,069	0,195
A · C		0,599	0,669	0,725	0,536	0,773	0,712
B · C		0,247	0,277	0,278	0,142	0,375	0,205
A · B · C		0,096	0,110	0,421	0,198	0,073	0,179

5.5 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Umsetzung des vorausgehend beschriebenen Versuchsplanes wird in diesem Abschnitt vorgestellt und ist in Bild 5.39 übersichtlich dargestellt.

Die zur Versuchsdurchführung notwendigen Dauerlaufprüfstände werden in Abschnitt 5.5.1 vorgestellt. Zur Feststellung der Funktionsfähigkeit werden die Prüflinge zyklisch in spezifischen Messaufbauten vermessen.

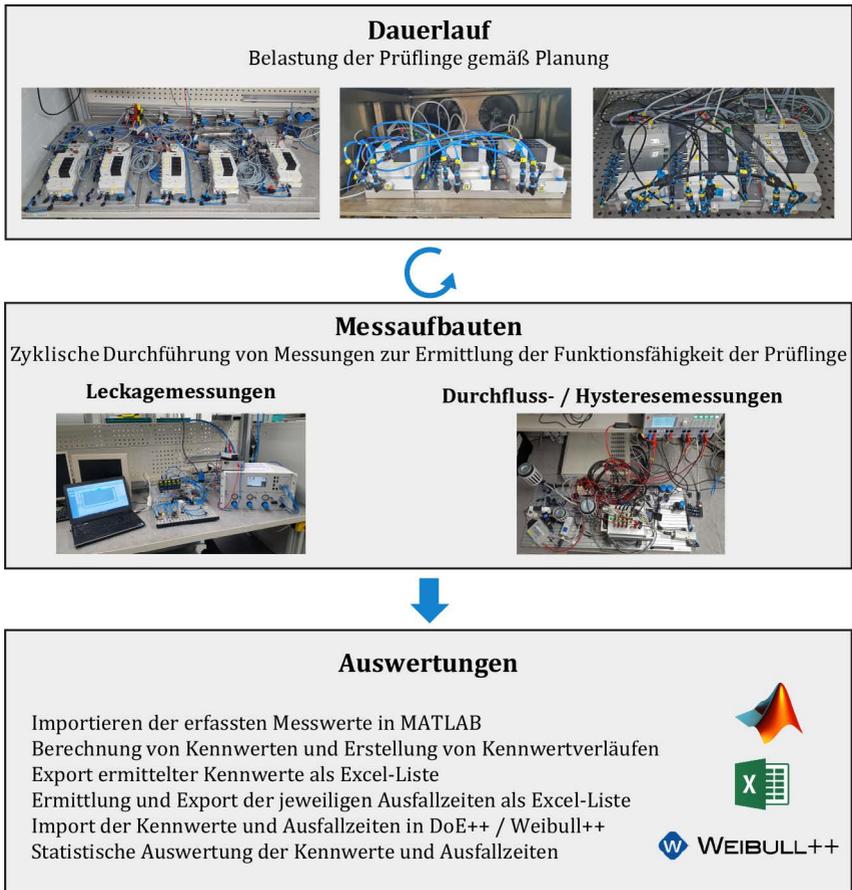


Bild 5.39: Vorgehensweise zur Versuchsdurchführung und Messdatenauswertung

Die Messaufbauten und Vorgehensweise zur Messdatenaufbereitung sind in Abschnitt 5.5.2 beschrieben. Eine Auswahl der im Versuch aufgetretenen Schadensmechanismen wird in Abschnitt 5.5.3 vorgestellt. Auswertungen basierend auf den erfassten Messdaten erfolgen beispielhaft für die Pilotpatrone in Abschnitt 5.5.4 sowie für die Boosterpatrone in Abschnitt 5.5.5.

5.5.1 Dauerlaufprüfstände

Zur Belastung der Prüflinge im Dauerlauf wurde im Rahmen dieser Arbeit ein gesonderter Prüfaufbau entwickelt. Der Prüfaufbau ist in Bild 5.40 dargestellt. Während der Lebensdauerversuche wird der Versorgungsdruck („Druck Dauerlauf“) eingespeist. Durch den Betrieb im Lebensdauerversuch wird das durch Schläuche und Anschlussprofil gebildete Zusatzvolumen zyklisch be- und entlüftet. Durch eine Drossel in Form eines Drosselrückschlagventils wird der Durchfluss stark reduziert. Die Drossel wird so eingestellt, dass sich in Relation zur Zuluftseite eine definierte Druckdifferenz einstellt. Der in der Ventillinsel integrierte Druckregler zur Regelung des Vorsteuerdruckes ist gemäß der vorgegebenen Systemgrenzen (vgl. Abschnitt 5.1) nicht Teil des in diesen Versuchen zu prüfenden Systems. Um einen definiert geregelten Steuerdruck für die Ventile zur Verfügung stellen zu können, wird der Druckregler jeweils durch eine gesondert angefertigte Überbrückung ersetzt.

In dem hier vorgestellten Aufbau kann die Leckage der zu belastenden Ventile abgeschätzt werden. Bei der zyklisch durchgeführten Leckagemessung werden die Dauerläufe pausiert und ein vom Dauerlaufdruck unabhängiger Druck auf die Ventile aufgeschaltet. Mittels externer Magnetventile kann zwischen Betriebsdruck und Prüfdruck gewechselt werden. Weiterhin kann der Prüfdruck durch die Magnetventile eingesperrt werden. Durch eine entsprechende Verschaltung der Magnetventile sowie eines Rückschlagventils liegt der Prüfdruck an allen Anschlüssen (1, 2, 3 und 4) an. Die indirekte Messung der Leckage der relevanten Dichtstellen durch eine Messung mittels Druckabfall wird somit ermöglicht. Steigt die Leckage im System, hat dies eine nichtlineare Erhöhung des Druckabfalls zur Folge. Die Druckwerte können durch die Drucksensoren der Dauerlaufventile ermittelt werden. Es sind somit keine zusätzlichen Sensoren notwendig.

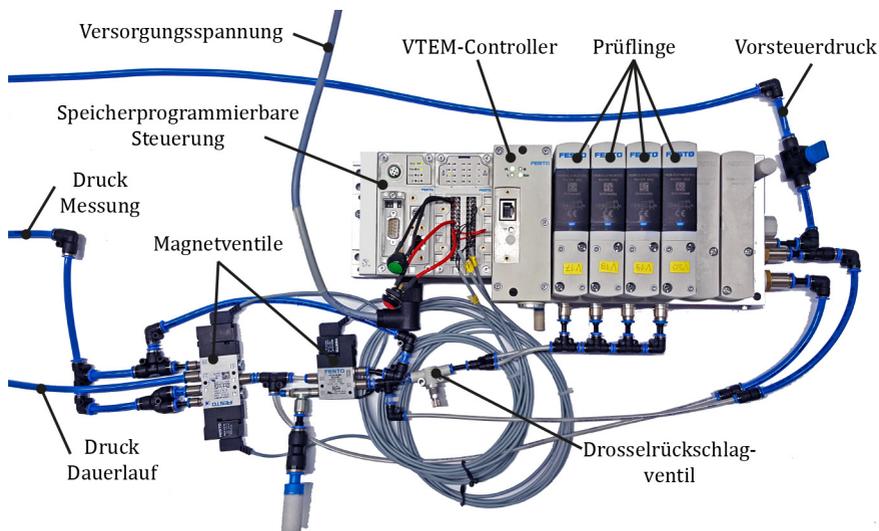


Bild 5.40: Übersicht eines Dauerlaufprüfaufbaus

Mittels der beschriebenen indirekten Leckagemessung kann abgeschätzt werden, ob an den zu testenden Ventilen bereits Leckage auftritt. Für eine Identifikation des Ursprungs der Leckage sowie zur Erfassung genauer Leckagekennwerte sind jedoch weitere Messungen in einem gesonderten Messaufbau notwendig (vgl. Abschnitt 5.5.2). In Ruhestellung der Magnetventile liegt kein Druck an Kanal 1 der Insel an, Kanal 3 ist entlüftet. Dies ermöglicht einen einfachen und sicheren Austausch der Dauerlaufventile.

Sollwerte für die Prüflinge werden in dem hier verwendeten Prüfaufbau ausgehend von einer SPS mittels des VTEM-Controllers vorgegeben. Hierbei können je Ventil unterschiedliche Sollwerte übergeben werden. Auf der SPS werden dabei die Anzahl an Schaltspielen für die einzelnen Booster erfasst. Bei Bedarf kann die Ansteuerung für einzelne Booster deaktiviert werden. Somit kann die Belastung für auffällige Prüflinge gestoppt, während die restlichen Prüflinge weiter belastet werden. Damit die zyklischen Messungen in externen Messaufbauten verlässlich zu vergleichbaren Zeitpunkten stattfinden, stoppt der Dauerlaufprüfaufbau bei einer jeweils vorher definierten Schaltspielzahl. Gestartet und gestoppt werden die Dauerläufe über rote und grüne Taster an der SPS (vgl. Bild 5.40).

Zur Durchführung der geplanten Versuche wurde der vorgestellte Dauerlaufprüfaufbau wie in Bild 5.41 dargestellt mehrfach aufgebaut und somit alle Prüflinge parallel im Dauerlauf betrieben.

In einem Teil der Lebensdauerversuche werden Prüflinge auch unter definierten hohen und niedrigen Temperaturen betrieben. Damit die Prüflinge auch sicher unter diesen Bedingungen belastet werden, ist eine Temperaturüberwachung implementiert. Hierzu ermittelt eine separate SPS mittels Temperatursensor die Temperatur des Temperaturschranks in welchem die Prüflinge betrieben werden. Liegt diese Temperatur innerhalb eines definierten Bereichs, wird ein digitales Signal auf die Dauerlauf-SPS übergeben. Nur wenn dieses Signal anliegt werden die Prüflinge belastet. Befindet sich die Temperatur außerhalb des definierten Bereichs, wird dieses Signal nicht ausgegeben und der Lebensdauerversuch gestoppt bzw. nicht gestartet.

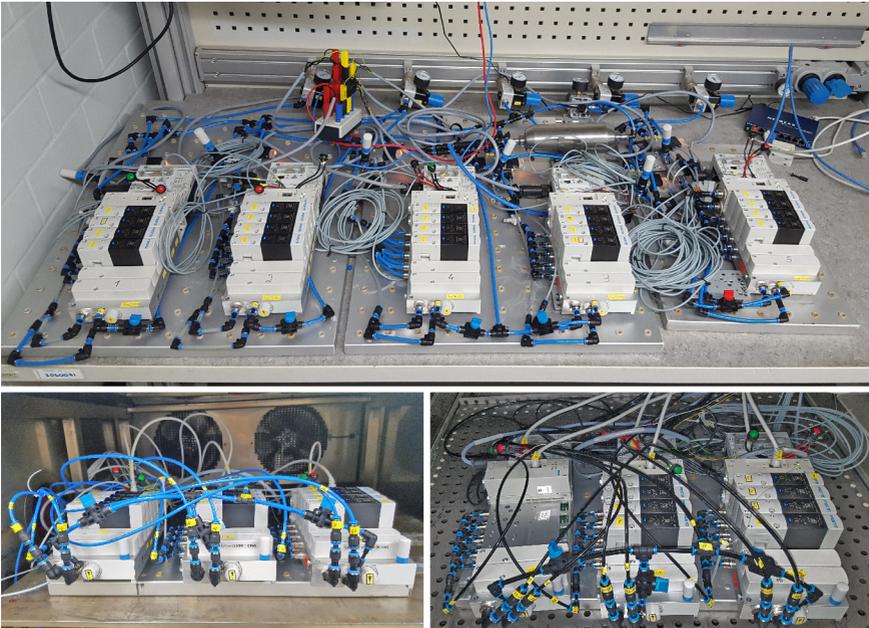


Bild 5.41: Dauerlaufprüfaufbauten bei Raumtemperatur (oben), niedriger Temperatur (unten links) sowie hoher Temperatur (unten rechts)

Mit den beschriebenen Dauerlaufprüfaufbauten können die Prüflinge in einem Dauerlauf belastet werden. Zur zyklischen Erfassung des Zustandes der Prüflinge kommen die im folgenden Abschnitt beschriebenen Messaufbauten zum Einsatz.

5.5.2 Automatisierte Messungen und Messdatenaufbereitung

Zur Erfassung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Prüflinge werden diese, wie vorausgehend in Bild 5.39 veranschaulicht, zyklisch aus dem Dauerlauf entnommen und in gesonderten Messaufbauten detaillierter untersucht. Zur Durchführung der Messungen kommen zwei Messaufbauten zum Einsatz: der Leckagemessaufbau sowie der Durchflusshysteremessaufbau.

Zur Messung der Leckage eines Prüflings wird dieser üblicherweise per Hand mit einem Leckagemessgerät verbunden. Soll für den jeweiligen Prüfling eine andere Leckagemessung durchgeführt werden, muss der Prüfling auf eine andere Weise mit dem Leckagemessaufbau verbunden werden. Dieser manuelle Messvorgang ist sowohl fehleranfällig als auch zeitaufwändig.

Für die Versuche der geplanten Zuverlässigkeits-DoE kommt der in Bild 5.42 dargestellte automatisierte Aufbau zum Einsatz. Mit Hilfe dieses Aufbaus ist es möglich, verschiedene Leckagemessungen des zu prüfenden Ventils automatisch durchzuführen. Weiterhin können diese Messungen bei drei unterschiedlichen Druckniveaus durchgeführt werden.

Bei der Durchführung der Leckagemessungen der Ventile kann konstruktionsbedingt die gemessene Leckage nicht immer eindeutig einem Booster zugeordnet werden (vgl. Bild 2.9). Ein Ausbau der Boosterpatronen und eine Vermessung in einem Einzelprüfblock ist prinzipiell denkbar. Bei einem Umbau verändern sich jedoch bestimmte Eigenschaften und für den Betrieb notwendige Kalibrierwerte. Ein Ausbau der Boosterpatronen während der Dauerlaufversuche ist somit nicht umsetzbar.

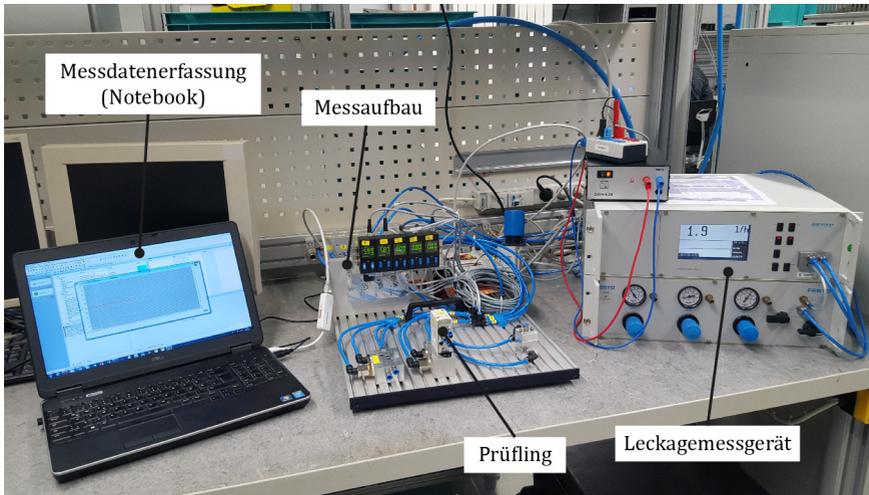


Bild 5.42: Aufbau zur automatisierten Messung der Leckage

Im Rahmen der Dauerlaufversuche werden jeweils die in Tabelle 5.9 aufgeführten Messungen durchgeführt. Die Bezeichnung „IN ...“ beschreibt hierbei Messungen, bei denen Leckage in ein Volumen hinein gemessen wird. Bei den „AN ...“ Messungen wird die aus einem Volumen herausströmende Leckage gemessen.

Tabelle 5.9: Messgrößen der durchgeführten Leckagemessungen

Nr.	Messgröße: dynamische Dichtungen	Statische O-Ringe	Druckeinspeisung	Messung
1	B2P: Dichtsitz + Lippendichtring unten B4P: Dichtsitz + Lippendichtring unten	B2P: Unten + Mitte B4P: Unten + Mitte	IN 1	IN 1
2	B2P: Dichtsitz	B2P: Mitte	IN 1	AN 2
3	B4P: Dichtsitz	B4P: Mitte	IN 1	AN 4
4	B2P: Lippendichtring oben B2R: Dichtsitz + Lippendichtring unten	B2P: Oben B2R: Unten + Mitte	IN 1 + IN 2	IN 2
5	B4P: Lippendichtring oben B4R: Dichtsitz + Lippendichtring unten	B4P: Oben B4R: Unten + Mitte	IN 1 + IN 4	IN 4
6	B2R: Lippendichtring oben B4R: Lippendichtring oben	B2R: Oben B4R: Oben	IN 1/2/4 + IN 3	IN 3

Zur Bestimmung weiterer Ventilkennwerte wurde der in Bild 5.43 dargestellte Durchflusshysteresemessaufbau entwickelt. Mit Hilfe dieses Messaufbaus ist es

möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Messungen durchzuführen. Kern des Aufbaus ist die in Abschnitt 5.3.4 beschriebene Durchflusshysteresemessung der Boosterpatronen. Auch in dem hier genutzten Aufbau kann die notwendige Strömungsrichtung zur Messung der einzelnen Boosterpatronen mittels Magnetventilen eingestellt werden (vgl. Bild 5.44). Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Messaufbauten ist nun zusätzlich die Messung der Durchflusshysteresemessung der Piezovorsteuerung möglich. Hierzu werden für die jeweils zu messenden Piezovenile die Ansteuerspannung rampenförmig von einem dSPACE Echtzeitsystem vorgegeben und der sich ergebende Durchfluss erfasst.

Wie auch im vorausgehenden Messaufbau (vgl. Abschnitt 5.3.4) erfolgt die Erfassung der analogen Sensoren sowie die Ansteuerung der Magnetventile mittels eines firmeneigenen Multifunktionalen Datenerfassungs Systems (MDS). Durch eine Anbindung an ein dSPACE Echtzeitsystem können ventilinterne Sensorwerte erfasst, interne Sollwerte vorgegeben sowie im Ventil gespeicherte Kennwerte ausgelesen werden.

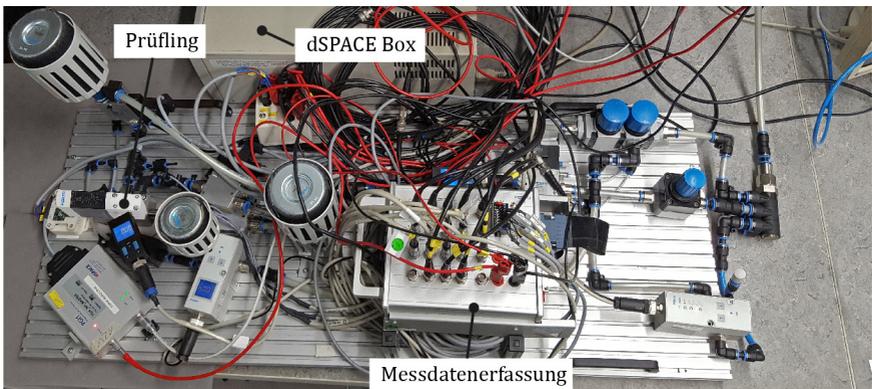


Bild 5.43: Durchflusshysteresemessaufbau

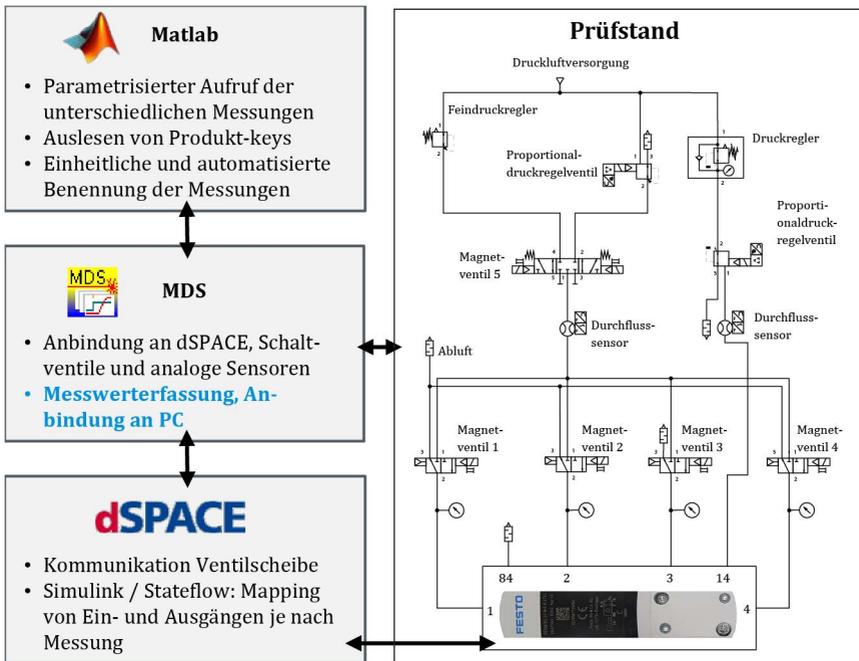


Bild 5.44: Schematische Darstellung des DurchflusshystereseMessaufbaus

Der Aufruf der unterschiedlichen Messungen wird bei dem hier vorgestellten Messaufbau mittels Matlab realisiert. Für das Ziel einer fehlerfreien Durchführung der Messungen wurden die folgenden Absicherungen implementiert:

- **Systemcheck:**
Beim Einschalten des Systems, sowie nach spätestens 24h in Betrieb, wird ein Systemcheck durchgeführt. Hierbei werden wichtige Einstellungen des Prüfstandes erfasst und automatisch ausgewertet. Liegt ein Parameter außerhalb eines vorher definierten Bereichs, muss der ursächliche Fehler behoben werden bevor eine neue Messung gestartet werden kann.
- **Erkennung der korrekten Montage des Ventils:**
Vor einer Druckbeaufschlagung wird überprüft, ob eine Kommunikation mit der Ventilscheibe möglich ist. In einem zweiten Schritt wird überprüft, ob das Ventil korrekt aufgeschraubt ist und die erforderliche Flachdichtung des Ventils vorhanden ist. Dazu wird die Leckage

mittels einer Druckabfallmessung ermittelt. Somit können verfälschte Messungen verursacht durch eine fehlerhafte Montage des Prüflings verhindert werden.

- **Automatische Erkennung des Ventils und Vorauswahl der durchzuführenden Messungen:**

Durch ein Auslesen des im Ventil gespeicherten einzigartigen Produktkeys können die einzelnen Prüflinge auf dem Messaufbau identifiziert werden. Dies ermöglicht eine automatische Auswahl der je nach Prüfetappe unterschiedlichen Messungen. Durch das Abspeichern des Produktkeys können die durchgeführten Messungen eindeutig einem Prüfling zugeordnet werden.

Unter Verwendung des vorgestellten Durchflusshysteresemessaufbaus wurden zyklisch während der Lebensdauerversuche die in Tabelle 5.10 dargestellten Messungen durchgeführt. Neben dem bereits erwähnten Systemcheck zur Überprüfung des Messaufbaus wurden regelmäßig im Ventil gespeicherte Kennwerte ausgelesen und falls erforderlich eine Neuermittlung der Kennwerte durchgeführt. Zur Abschätzung der Leckage aller Boosterpatronen wurde analog zum Dauerlaufprüfaufbau eine indirekte Leckagemessung realisiert.

Tabelle 5.10: Übersicht der an den jeweiligen Ventilen zyklisch durchgeführten Messungen

Messung	Anzahl Messungen
Überprüfung Messaufbau („Systemcheck“)	1
Auslesen von im Ventil gespeicherten Kennwerten der Boosterpatrone, der Piezovorsteuerung, des Produktkeys sowie falls erforderlich Neuermittlung funktionsrelevanter interner Ventilkennwerte	7
Druckabfallmessung (indirekte Messung der kumulierten Leckage an der Hauptstufe)	1
Hubregelungen für unterschiedliche Sollwertprofile bei unterschiedlichen Randbedingungen	16
Durchflusshysteresemessung der Boosterpatrone	8
Hubhysteresemessung der Boosterpatrone bei unterschiedlichen Druckniveaus bei unterschiedlichen Randbedingungen	8
Durchflusshysteresemessung der Piezovorsteuerungen bei unterschiedlichen Druckniveaus	24

Zur Bewertung der Booster-Lageregelung wurden Hubregelungen für unterschiedliche Sollwertprofile bei unterschiedlichen Randbedingungen (wie z. B. Druck an der Hauptstufe) durchgeführt. Die wesentlichen Messungen mit diesem Messaufbau sind die Durchfluss- und die Hubhysterese-messung der Boosterpatrone sowie die Durchflusshysterese-messung der Piezovorsteuerung.

Bei der Durchflusshysterese-messung der Boosterpatrone wird analog zu den in den Voruntersuchungen durchgeführten Messung vorgegangen (Abschnitt 5.3.4). Der Ablauf zur Messung der Hubhysterese-messung der Boosterpatrone läuft ähnlich wie die Durchflusshysterese-messung ab. Auch hier wird der Vorsteuerdruck über die Zeit mit einer konstanten Rate erhöht, eine definierte Zeitdauer gehalten und anschließend in einer konstanten Rate wieder verringert. Die zu erfassende Zielgröße ist jedoch nicht der Durchfluss, sondern der sich ergebende Boosterhub. Auch hiermit lassen sich Kennwerte wie die Hysterese der Boosterpatrone ermitteln. Da bei dieser Messung kein Durchfluss in der Hauptstufe stattfindet, können alle vier Boosterpatronen parallel gemessen werden. Eine Messung bei unterschiedlichen Druckniveaus ermöglicht die Identifikation einer Druckabhängigkeit der Reibung.

Zur Durchflussmessung der Piezovorsteuerung wird bei einem konstanten Vorsteuerdruck die Spannung analog zu den Durchflusshysterese-messungen der Boosterpatrone rampenförmig variiert. Es muss jedoch beachtet werden, dass für die Messung eines Belüftungsbiegers, der dazugehörige Entlüftungsbieger voll geöffnet sein muss und umgekehrt. Denn nur so kann ein Durchfluss durch die Vorsteuerstufe realisiert werden. Zur Ermittlung von Druckabhängigkeiten der gemessenen Kennlinien und Kennwerte werden die Messungen bei unterschiedlichen Druckniveaus durchgeführt. Exemplarische Durchflusshysterese-messungen für Belüftungs- und Entlüftungspiezo sind normiert in Bild 5.45 und Bild 5.46 dargestellt.

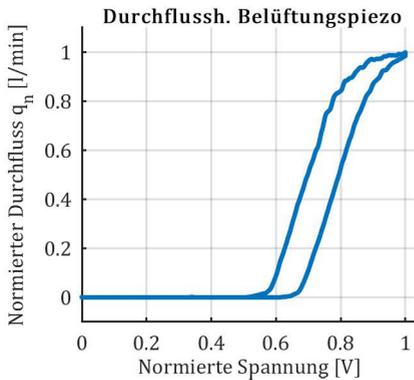


Bild 5.45: Normierte Durchflusshysterese eines Belüftungspiezos

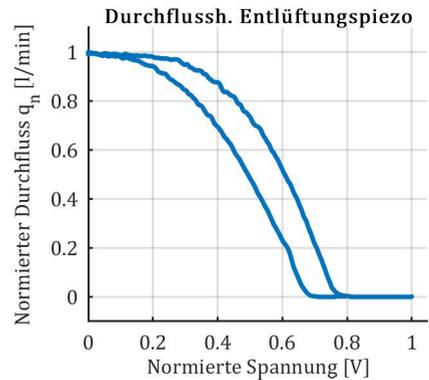


Bild 5.46: Normierte Durchflusshysterese eines Entlüftungspiezos

Zur weiterführenden Auswertung der erfassten Messdaten müssen diese zusätzlich aufbereitet werden. Es wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Konvertierung der Messdaten in MATLAB.
2. Berechnung definierter Kennwerte (wie z. B. maximaler Durchfluss).
3. Zusammenführung von Kennwerten aus unterschiedlichen Messreihen.
4. Abspeichern der Kennwerte und Export als Excelliste.

Die berechneten und zusammengeführten Kennwerte stellen die Basis für weiterführende Auswertungen mit folgenden Fragestellungen dar:

- Wie verhalten sich relevante Kennwerte über die Lebensdauer?
- Welchen Einfluss haben Versuchsbedingungen auf die ermittelten Kennwerte?
- Zu welchem Zeitpunkt können Ausfälle beobachtet werden?

Auswertungen zu diesen Fragestellungen werden in den folgenden Abschnitten durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden vorab eine Auswahl an aufgetretenen Schadensmechanismen vorgestellt.

5.5.3 Analyse unterschiedlicher Schadensmechanismen

Im Rahmen der Durchführung der Versuche konnten mehr als zwei Dutzend unterschiedliche Schadensbilder beobachtet werden. Exemplarisch werden in diesem Abschnitt fünf der Schadensbilder vorgestellt: Frühausfall eines Piezobiegers, Schwingen der Hubregelung, überkreuzende Hysteresekurve, Verschleiß am oberen Lippendichtring und Leckage am unteren Lippendichtring.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte nach kürzester Betriebszeit ein **Ausfall eines Piezobiegers** beobachtet werden (Bild 5.47). Hierbei trat ein Spannungsdurchschlag in der Piezokeramik auf. Als Ursache für dieses Fehlerbild werden fertigungstechnische Ursachen vermutet. Um die Wahrscheinlichkeit zu minimieren, dass Piezobieger mit diesem Fehler frühzeitig im Feld ausfallen, wurden aus Gründen der Geheimhaltung nicht näher nennbare Maßnahmen getroffen.

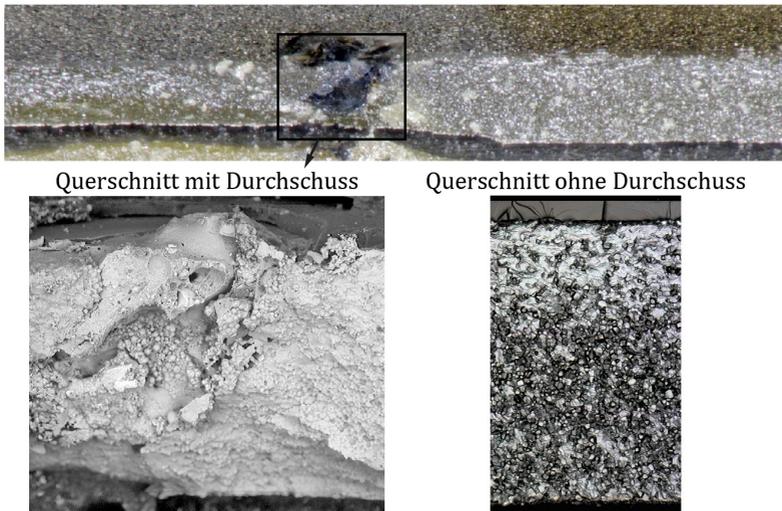


Bild 5.47: Querschnitt durch einen Piezobieger mit Spannungsdurchschlag (oben), Detailsicht Spannungsdurchschlag (unten links) sowie Detailsicht ohne Spannungsdurchschlag (unten rechts)

Bei der Auswertung der Durchflusshysterese-messungen der Lebensdauer- versuche kann bei einer Boosterpatrone die in Bild 5.48 dargestellte Hysterese- messung beobachtet werden. Hierbei ist ein **Überkreuzen der Hysterese- kurve** bei ca. 70 % des Hubs zu erkennen. Da eine negative Reibungshysterese physikalisch nicht plausibel ist, lässt sich dieses Phänomen allein durch Rei- bung nicht beschreiben.

Dieses Verhalten konnte bei drei Wiederholungsmessungen sowohl mittels Durchflusssensor, als auch mit dem im Ventil integrierten Hubsensor beobach- tet werden. Bei einer weiteren Messung zu einem späteren Schaltspielstand konnte dieses Verhalten erneut bei drei Wiederholungsmessungen beobachtet werden. Ein Messfehler kann demnach ausgeschlossen werden.

Um das beobachtete Verhalten beschreiben zu können, müsste beim Öffnungs- vorgang Energie gespeichert, und am Anfang des Schließvorgangs in das Sys- tem eingebracht werden.

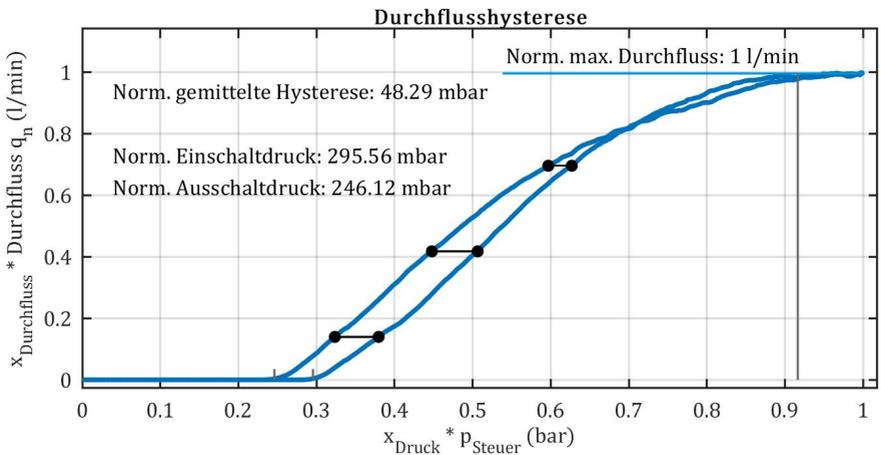


Bild 5.48: Überkreuzende Durchflusshysterese

Bild 5.49 zeigt eine Röntgenuntersuchung des fraglichen Prüflings. Hierbei ist eine Verkippung / Verformung des oberen Lippendichtrings erkennbar. Bei der Öffnung des Boosters bewegen sich Kolben und Lippendichtring in dieser Ansicht nach links. Bleibt der Kontaktpunkt des Lippendichtrings an der Gegen- lauffläche annähernd in der gleichen Position, spannt sich der Lippendichtring

weiter auf. Somit entsteht eine in Schließrichtung zusätzlich wirkende Kraft. Wird der Booster geschlossen, bauen sich die Kräfte ab und der Booster bekommt hierdurch zusätzlich Energie. Die überkreuzende Hysterese lässt sich somit erklären.

Wie in Bild 5.49 ersichtlich, ergeben sich unterschiedliche Abstände zwischen Kolben und der Gegenlauffläche des oberen Lippendichtrings. Ursache für diese nicht-zentrische Lage und eine folgende Verkippung / Verformung des Lippendichtrings könnte eine schiefe Montage der Boosterpatrone sein.

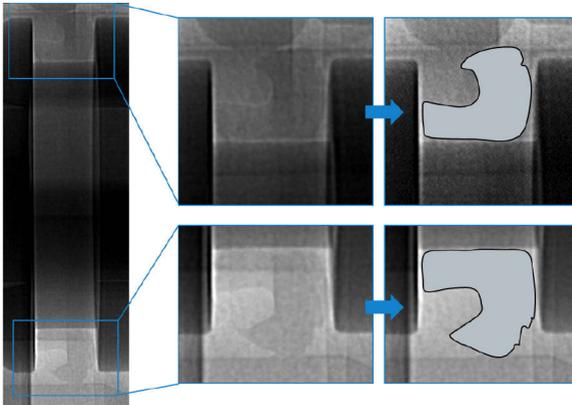


Bild 5.49: Röntgenuntersuchung Prüfling B4R, Ventil 8 (3,75 x · Mio. SP.)

Vereinzelt kann starke Leckage am oberen Lippendichtring im Verlauf des Lebensdauerversuches ermittelt werden. Wie in Bild 5.50 und Bild 5.51 deutlich wird, ist ein starker **Verschleiß am oberen Lippendichtring** hierfür die Ursache. Im Einzelprüfblock konnte bei dem hier dargestellten Prüfling eine Leckage von der 25-fachen Ausfallgrenze bei 6 bar ermittelt werden.

Eine Schädigung der Gegenlauffläche, ein Hervorstehen der darin enthaltenen Glasfasern und anschließender Schädigung des Lippendichtrings wurde bereits in der Voruntersuchung (vgl. Abschnitt 5.3.5) beobachtet und wird hier nicht weiter beschrieben.

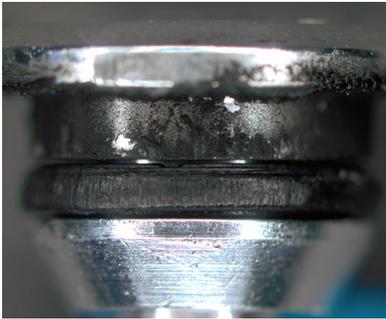


Bild 5.50: Verschleiß oberer Lippendicht- ring an Prüfling B4R, Ventil 28

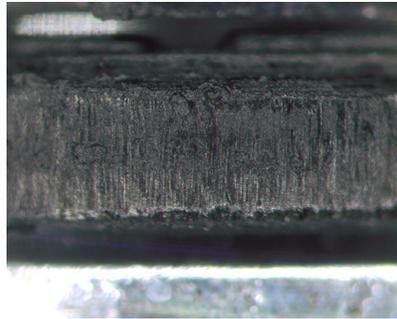


Bild 5.51: Verschleiß oberer Lippendicht- ring an Prüfling B4R, Ventil 28 (Detail)

Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte gehäuft **Leckage am unteren Lippendichtring** festgestellt werden. Dieses Fehlerbild wird durch einen fehlerhaften Montageprozess, durch welchen der untere Lippendichtring nur zur Hälfte mit Fett versorgt wurde, begünstigt.

Bei Prüflingen mit Leckage am unteren Lippendichtring konnte hauptsächlich das in Bild 5.52 dargestellte Schadensbild beobachtet werden. Es zeigt sich eine Abtrennung und Anhäufung von im Schmierfett enthaltenen Bestandteilen. Die hierdurch entstandenen Plateaus im Dichtspalt können zu Leckage in den dazwischenliegenden Tälern führen. Dieses Schadensbild ist belastungsabhängig. Unter bestimmten Belastungen kann dieses Schadensbild sehr früh oder teils gar nicht in der zur Verfügung stehenden Versuchszeit beobachtet werden.

Für die Serienfertigung wurde der Montageprozess angepasst sowie auf ein anderes Fett umgestellt, welches den beschriebenen Effekt der „Plateaubildung“ nicht aufzeigt. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche standen jedoch noch keine angepassten Prüflinge zur Verfügung.

Die Leckage am unteren Lippendichtring wird im Abschnitt 5.6 zur Ableitung eines Lebensdauermodells detailliert ausgewertet. Zuvor wird in den folgenden zwei Abschnitten exemplarisch dargestellt, welche relevanten Eigenschaftsänderungen an der Pilotpatrone und der Boosterpatrone sich aus den durchgeführten Versuchen ergänzend ableiten lassen.

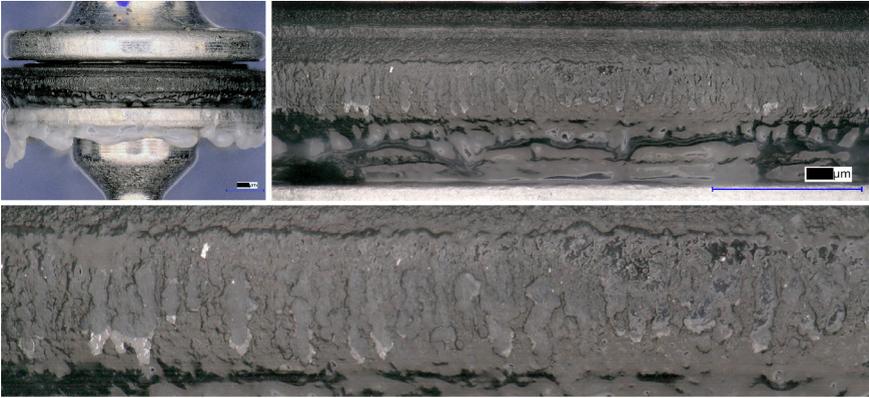


Bild 5.52: „Plateaubildung“ am unteren Lippendichtring

5.5.4 Eigenschaftsänderungen der Pilotpatrone

Eine für die Hubregelung der Boosterpatrone wichtige Kenngröße ist die Spannung, ab welcher Durchfluss an den Belüftungsbiegern bzw. kein Durchfluss an den Entlüftungsbiegern anliegt. Ist diese Spannung unzureichend bekannt, kann eine ungenaue Hubregelung der Boosterposition die Folge sein.

Im Folgenden soll exemplarisch die Schließspannung der Entlüftungsbieger näher betrachtet werden. Hierzu wurden zu den Durchflusshysteresemessungen der Entlüftungsbieger Kennwerte für die jeweiligen Messungen abgeleitet (vgl. Abschnitt 5.5.2). Der Verlauf des Kennwertes Schließspannung in Abhängigkeit der Lebensdauer ist für einen Prüfling in Bild 5.53 dargestellt. Hierbei ist die Änderung der Schließspannung auf den initial vor Versuchsstart gemessenen Wert bezogen. Die ermittelten Kennwerte ändern sich zu Beginn der Versuche vergleichsweise stark, pendeln sich im Verlauf der Versuche aber auf ein annähernd konstantes Niveau ein.

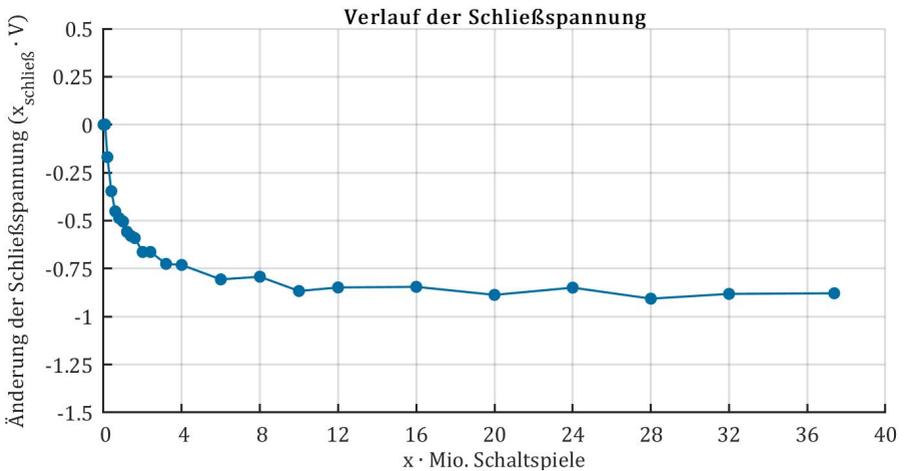


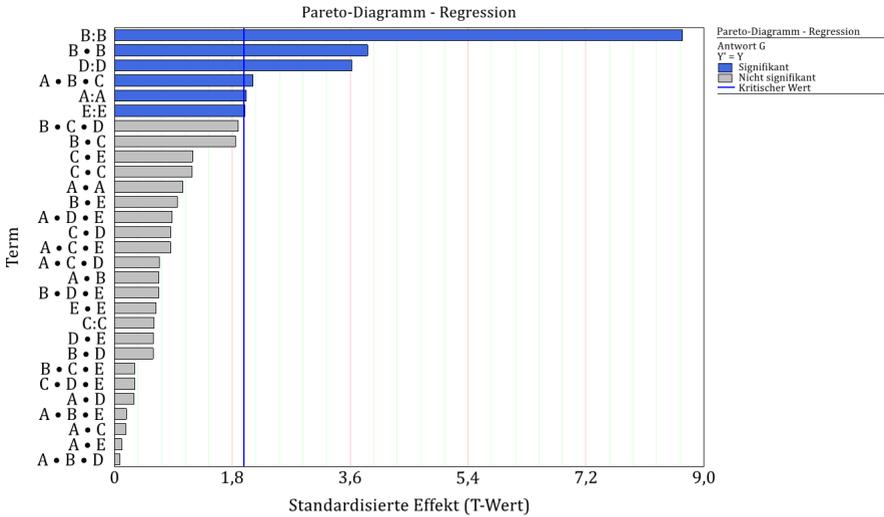
Bild 5.53: Normierter Verlauf der Schließspannung der Entlüftungspiezobieger in Abhängigkeit der Lebensdauer

Im Folgenden soll das Niveau betrachtet werden, auf welches sich die einzelnen Piezobieger annähern. Die Schließspannung aller Entlüftungspiezobieger nimmt im Laufe der Versuche ab. Zum einfacheren Verständnis wird nachfolgend der absolute Wert der Spannungsänderung betrachtet.

Es wird näher untersucht, inwiefern die im Dauerlauf getesteten Faktoren A, B, C und D einen Einfluss auf den Piezodrift haben. Weiterhin wird bei dieser Auswertung mit dem Faktor E untersucht, inwieweit die Justage der einzelnen Piezobieger einen Einfluss auf die beobachtete Spannungsänderung zeigt. Die Justagespannungen sind zwischen 0 und 1 normiert (kleinste sowie größte beobachtete Justagespannung).

Als Zielgröße dieser Untersuchung wird die absolute Spannungsänderung des Schließpunktes der Entlüftungsbieger vom jeweiligen Initialwert vor Versuchsstart bis zum Mittelwert aus den Messungen bei 8, 10 und 12 x · Mio. SP verwendet. Die ermittelten Kennwerte sind im Anhang in Tabelle A. 10 aufgeführt.

In Bild 5.54 ist ein Pareto-Diagramm zur Ermittlung der statistisch signifikanten Faktoren des Piezodrifts mit dem Risikoniveau 0,05 dargestellt. Den größten Einfluss ergibt sich durch den Faktor B sowie dessen quadratischem Anteil.



Risikoniveau = 0,05; Kritischer Wert = 1,980099

Bild 5.54: Pareto-Diagramm zur Ermittlung signifikanter Faktoren des Drifts der Entlüftungsbieger

Weiterhin zeigt Faktor D einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsänderung. Die Faktoren B, D, E sowie der quadratische Anteil B • B zeigen p-Werte << 0,001 auf (vgl. Tabelle 5.11). In Bild 5.55 ist ein Residuen-Histogramm des gewählten Modellansatzes dargestellt. Die verbleibenden Residuen sind für einen praktischen Nutzen ausreichend klein.

Tabelle 5.11: Analyse-Übersicht der signifikanten Faktoren des Drifts der Entlüftungsbieger

Term	Effekt	p-Wert
Intercept		0,000
A:A	0,056	0,052
B:B	-0,331	0,000
C:C	0,021	0,350
D:D	0,105	0,000
E:E	-0,110	0,000
B • C	0,068	0,016
A • B • C	0,085	0,020
B • B	-0,225	0,000

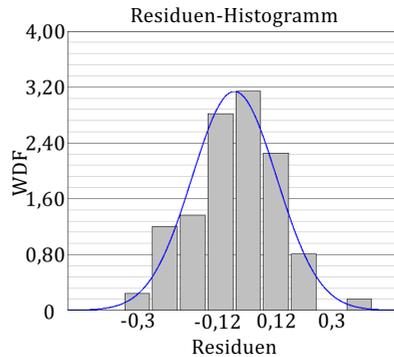


Bild 5.55: Residuen-Histogramm des Modellansatzes

Die Planung der DoE basierte auf der Zielgröße Lebensdauer der Boosterpatrone. Wie dieses Beispiel zeigt, können dennoch auch weitere Zielgrößen untersucht werden. Die hieraus gewonnenen Informationen dienen zum allgemeinen Verständniserwerb des untersuchten Systems und können in der Weiterentwicklung des Systems verwendet werden. Wie im folgenden Abschnitt vorgestellt wird, können auch an der Boosterpatrone weitere relevante Eigenschaftsänderungen abgeleitet werden.

5.5.5 Eigenschaftsänderungen der Boosterpatrone

Eine betriebsrelevante Kenngröße der Ventilscheibe ist die Hysterese (Reibung) in der Boosterpatrone. Die Hysterese hat einen Einfluss auf die Hubregelung der Boosterpatrone. Ist die Hysterese höher als erwartet, kann die Hubregelung träge und ggf. ungenau sein. Bei einer niedrigeren Hysterese als angenommen können Überschwinger oder eine schwingende Hubregelung die Folge sein.

Zur Vermessung der Hubhysterese wird der Vorsteuerdruck der Boosterpatrone mit einer konstanten Änderungsrate erhöht, eine definierte Zeitdauer gehalten und anschließend ebenfalls mit einer konstanten Änderungsrate verringert (vgl. Bild 5.56). Während der Messung wird der sich ergebende zeitliche Verlauf des Boosterhubs erfasst. Zur Ermittlung der Hysterese wird der Boosterhub über dem Vorsteuerdruck aufgetragen (Bild 5.57). Der im Folgenden weiter genutzte Kennwert der Hubhysterese setzt sich aus dem Mittelwert der Hysterese bei 20 %, 50 % und 80 % zusammen.

Wird der so ermittelte Kennwert der Hubhysterese über die Lebensdauer betrachtet, ergibt sich der in Bild 5.58 dargestellte Verlauf. Weiterhin sind Kennwertverläufe für Messungen bei unterschiedlichen Druckniveaus dargestellt. Die dargestellten Messpunkte sind jeweils die Mittelwerte aller getesteten Prüflinge. Es ist erkennbar, dass eine hohe Druckabhängigkeit der Hysterese vorliegt. Dies ist in der Geometrie des verwendeten Lippendichtrings begründet.

Der Lippendichtring ist so ausgelegt, dass mit einem höheren Druck die Dichtfläche stärker angepresst wird. Dies ist für die Abdichtung eines erhöhten Druckniveaus notwendig.

In den in Bild 5.58 dargestellten Verläufen ist ebenfalls erkennbar, dass die Hysterese zu Beginn der Lebensdauerversuche stark abnimmt und sich einem annähernd konstanten Niveau angleicht.

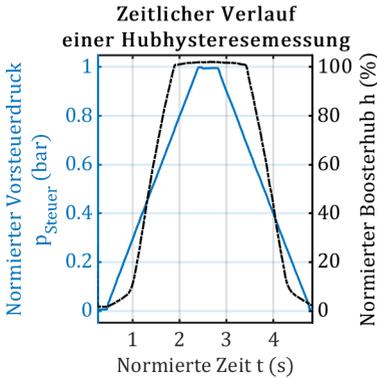


Bild 5.56: Zeitlicher Verlauf einer Hubhysteresemessung der Boosterpatrone

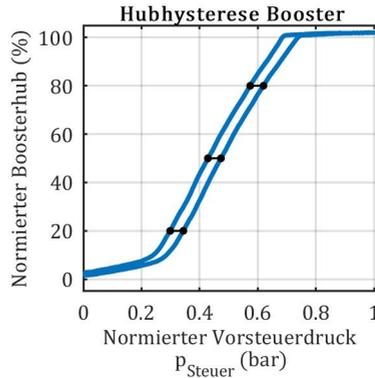


Bild 5.57: Normierte Hubhysterese einer Boosterpatrone

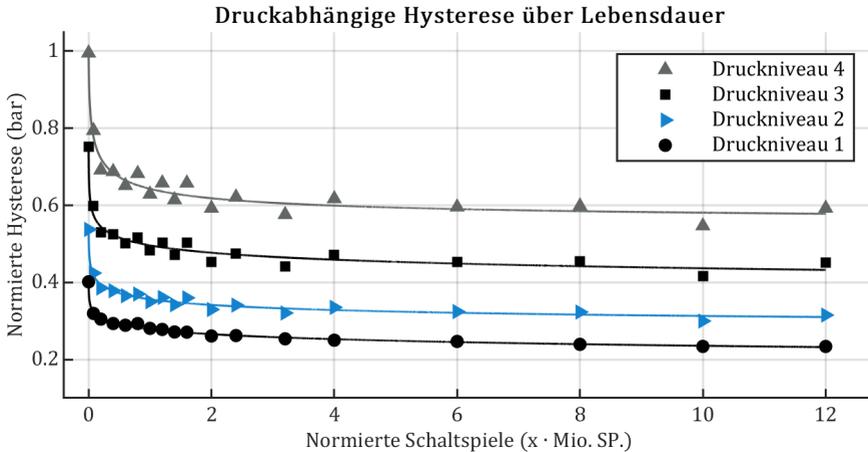


Bild 5.58: Über alle Prüflinge gemittelte druckabhängige Hubhysterese der Boosterpatronen in Abhängigkeit der Lebensdauer

Bei der Analyse der Kennwertverläufe der Hubhysterese bei den einzelnen Boosterpatronen konnte bei Prüfling 12 der statistischen Versuchsplanung an der Boosterpatrone B4R der in Bild 5.59 dargestellte Hubhystereseverlauf beobachtet werden. Auffällig ist hierbei eine stark ansteigende Hysterese ab etwa der Hälfte des hier betrachteten Versuchszeitraums. Bei einem höheren Druckniveau zeigt sich teils eine überproportional hohe Zunahme der Hysterese. Für eine zerstörungsfreie Untersuchung des fraglichen Prüflings wurden Röntgenaufnahmen angefertigt. Ergebnisse der Röntgenuntersuchung sind für den unteren Lippendichtring in Bild 5.60 und für den oberen Lippendichtring in Bild 5.61 dargestellt. Während die Form des unteren Lippendichtringes dem Sollzustand entspricht, können am oberen Lippendichtring Abnutzungerscheinungen beobachtet werden. Die ballige Auflage am oberen Lippendichtring ist verschwunden. Dieser liegt nun eher flächig, bzw. mit der Spitze auf der Gegenauflage auf. Eine zur Druck beaufschlagten Seite hin verschobene Abdichtstelle erhöht hierbei die druckabhängige Anpressung des Lippendichtrings. Die beobachtete hohe Hysterese bei hohen Druckniveaus lässt sich somit durch Abnutzung am oberen Lippendichtring erklären.

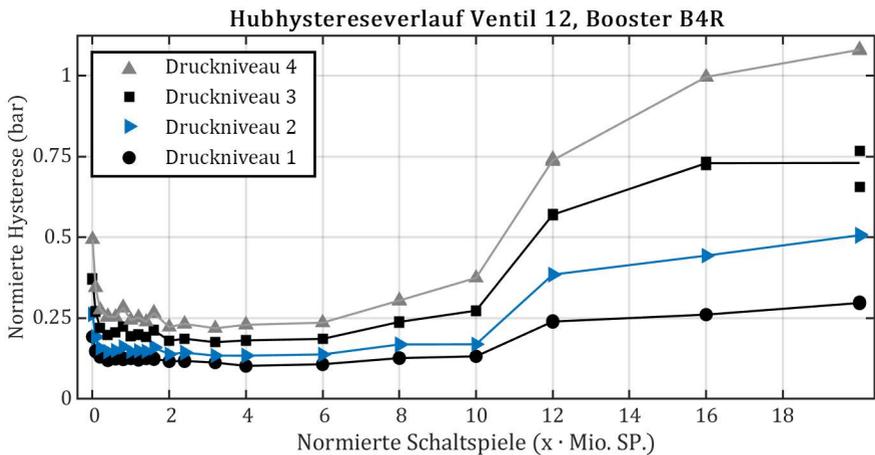


Bild 5.59: Hubhystereseverlauf der Boosterpatrone B4R von Prüfling 12

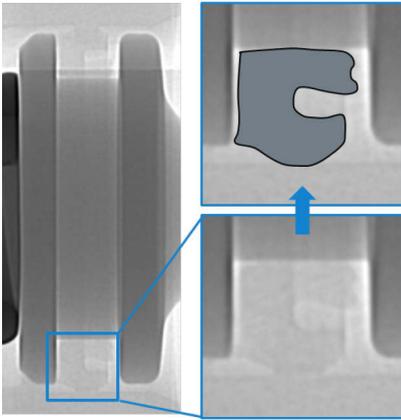


Bild 5.60: Röntgenaufnahme des unteren Lippendichtrings von Booster B4R, Ventil 12

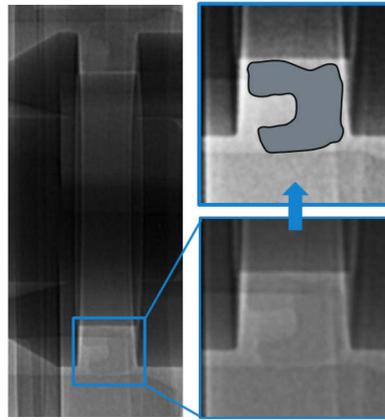


Bild 5.61: Röntgenaufnahme des oberen Lippendichtrings von Booster B4R, Ventil 12

In diesem und dem vorausgehenden Abschnitt konnte exemplarisch gezeigt werden, welche Informationen sich aus den erhobenen Messdaten ableiten lassen. Zum Untersuchungszeitpunkt war der Schadensmechanismus der Leckage am unteren Lippendichtring dominant. Wie für diesen Schadensmechanismus ein Lebensdauermodell abgeleitet werden kann, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

5.6 Ableitung eines Lebensdauermodells

Im Rahmen dieses Abschnittes wird der Ausfall durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone näher untersucht. Ziel ist es, Lebensdauerwerte für unterschiedliche Bedingungen zu ermitteln, relevante Einflussfaktoren zu identifizieren und damit ein erstes Modell der Lebensdauer abzuleiten.

In Abschnitt 5.6.1 wird vorgestellt, wie basierend auf den in Versuchen erfassten Leckagekennwerten die jeweiligen Ausfallzeiten ermittelt werden. Abschnitt 5.6.2 zeigt, wie basierend auf den Ausfallzeiten signifikante Faktoren bestimmt und ein Lebensdauermodell abgeleitet werden kann. Zur Abschät-

zung der Aussagekraft des ermittelten Lebensdauermodells werden in Abschnitt 5.6.3 drei Überprüfungsversuche durchgeführt und die vorhergesagten Lebensdauern mit den experimentell ermittelten Ausfalldaten verglichen.

5.6.1 Ermitteln von Ausfallzeiten

Wie in Abschnitt 5.5.2 vorgestellt, werden spezifische Leckagemessungen zyklisch während der Lebensdauerexperimente durchgeführt. Die Leckage der unteren Lippendichtringe kann für die Booster B2R mit der Messung „IN 2“, für die Booster B4R mit der Messung „IN 4“ und die Summenleckage der unteren Lippendichtringen für die Booster B2P und B4P mit der Messung „IN 1“ ermittelt werden (vgl. Tabelle 5.9 aus Abschnitt 5.5.2). Wie in Abschnitt 5.5.2 erläutert, wäre ein Ausbau und die Vermessung der einzelnen Booster zwar prinzipiell möglich, jedoch nicht praktikabel umsetzbar.

Damit die Messungen „IN 1“ dennoch bei der Auswertung berücksichtigt werden können, wird die Grenze, ab welcher ein Prüfling als ausgefallen gilt, angepasst. Bei den Messungen „IN 2“ und „IN 4“ gelten die Prüflinge ab der Leckage $L \geq 1 \cdot x_L$ l/h als ausgefallen (x_L bezeichnet hierbei die normierte Ausfallgrenze). Für die Messung „IN 1“ gilt die normierte Ausfallgrenze $L \geq 1,4 \cdot x_L$ l/h für den ersten Ausfall sowie $L \geq 2,2 \cdot x_L$ l/h für den jeweils zweiten Ausfall. Bei einem Vergleich der sich hierbei ergebenden Ausfallzeiten in einem Konturplot zeigen sich sehr ähnliche Ausfallverteilungen (vgl. Bild 5.62). Hierbei ist der ermittelte Vertrauensbereich des „Formparameters“ über dem Lageparameter der Lognormalverteilung aufgetragen.

Die komplette Vorgehensweise zur Ermittlung der Ausfallzeiten durch Leckage an den Boosterpatronen ist in Bild 5.39 dargestellt. Die im Dauerlauf belasteten Prüflinge werden für zyklische Messungen dem Dauerlauf entnommen und spezifischen Messungen unterzogen. Hierbei werden u. a. die Leckagekennwerte „IN 1“, „IN 2“ und „IN 4“ ermittelt.

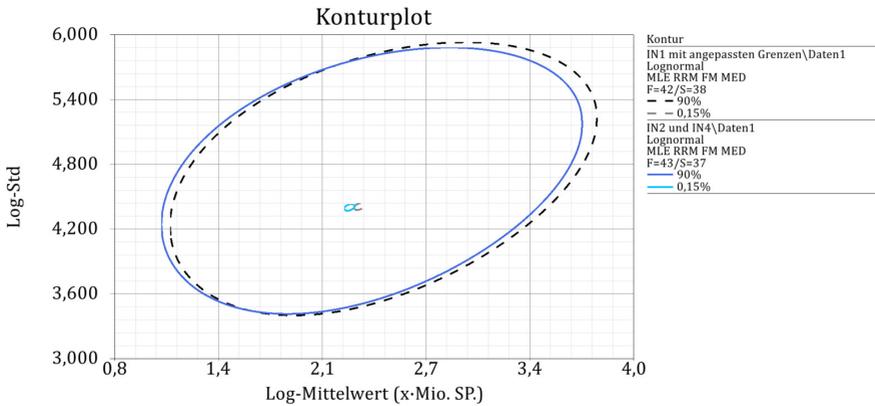


Bild 5.62: Vergleich der Ausfälle durch Leckage bei den Messungen IN 2 und IN 4 (durchgängige blaue Linien) zu den Ausfällen durch angepasste Ausfallgrenzen bei den Messungen IN 1 (gestrichelte schwarze / graue Linien) mittels eines Konturplots

Für eine weitere Verarbeitung der erfassten Messwerte werden die Leckagekennwerte in Matlab importiert. Die Messwerte werden um eine zyklisch ermittelte Eigenleckage des verwendeten Messaufbaus korrigiert. Basierend auf den Leckagekennwerten werden bei Überschreiten der spezifischen Ausfallgrenze die jeweiligen Ausfallzeitpunkte ermittelt. Liegt nur eine Messung oberhalb der spezifischen Ausfallgrenze und sind die zwei folgenden Messungen unterhalb der Ausfallgrenze, wird dies im Rahmen dieser Auswertungen nicht als Ausfall gewertet. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche werden die Intervalle erfasst, in denen die jeweiligen Prüflinge ausgefallen sind. Unter Zuhilfenahme der jeweils erfassten Leckagekennwerte bei Ausfall sowie der letzten Messung vor dem Ausfall kann ein genauerer Ausfallzeitpunkt mittels linearer Interpolation approximiert werden.

Die mittels des beschriebenen Vorgehens ermittelten Ausfallzeiten der jeweiligen Prüflinge sind in Tabelle A. 4 des Anhangs dargestellt. Diese Ausfallzeiten bilden die Basis für die im Folgenden beschriebene statistische Auswertung zur Ermittlung eines Lebensdauermodells.

5.6.2 Ableitung eines ersten Lebensdauermodells

Ziel der folgenden Auswertung ist die Identifikation relevanter Einflussfaktoren basierend auf den vorausgehend ermittelten Lebensdauerkenntwerten sowie die Aufstellung eines ersten Modells der Lebensdauer.

Bei der Analyse der im Dauerlauf für die unterschiedlichen Versuchspunkte ermittelten Ausfallzeiten (Tabelle A. 4 des Anhangs) zeigen sich die folgenden Herausforderungen:

- Im betrachteten Parameterraum konnten sehr große Unterschiede in den empirisch ermittelten Lebensdauern von größer Faktor 1000 ermittelt werden.
- Es traten bereits vor der ersten Zwischenmessung Ausfälle auf. Ein genauerer Ausfallzeitpunkt kann in diesem Zeitbereich auch unter Zuhilfenahme der gemessenen Leckagekennwerte nur ungenau interpoliert werden.
- Es kann ein „Abknicken“ der Wahrscheinlichkeitslinie beobachtet werden (vgl. Bild 5.63). Auch bei gleichen Versuchsbedingungen gibt es teils einen großen Unterschied zwischen den jeweils ermittelten Ausfallzeiten und den zu Versuchsende noch funktionsfähigen Prüflingen. Bei den 16 Prüflingen des Zentralpunktes fielen elf Prüflinge bis $1 \times \text{Mio. SP.}$ aus, die restlichen fünf Prüflinge fielen auch nach $32 \times \text{Mio. SP.}$ nicht aus (vgl. Tabelle A. 4 des Anhangs). Hieraus ergibt sich eine teils große Streuung der ermittelten Ausfalldaten. Bei zunehmender Streuung können vorhandene Effekte mit verringerter Wahrscheinlichkeit erkannt werden.

Zur Berücksichtigung der aufgeführten Herausforderungen werden die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen durchgeführt.

Es werden nur Ausfälle betrachtet, welche vor dem in Bild 5.63 dargestellten „Knick“ in der Wahrscheinlichkeitslinie bei $1,6 \times \text{Mio. SP.}$ liegen. Eine wahrscheinliche Ursache für den Knick sind geänderte Schadensmechanismen. Damit wird der Fokus der hier durchgeführten Auswertung auf den im ersten Abschnitt dominanten Schadensmechanismus gelegt. Weiterhin wurden die in Tabelle A. 4 des Anhangs aufgeführten Daten auf Abweichungen untersucht und

Anpassungen vorgenommen. Lag unter gleichen Versuchsbedingungen nur ein Ausfall vor, welcher nur durch knappes Überschreiten der Ausfallgrenze und ggf. zusätzlich in der vergleichsweise ungenaueren IN 1 Messung zustande kam (hier werden zwangsläufig mehrere Dichtstellen parallel gemessen, vgl. Tabelle 5.9), wird der entsprechende Prüfling als suspendiert und nicht als Ausfall gewertet.

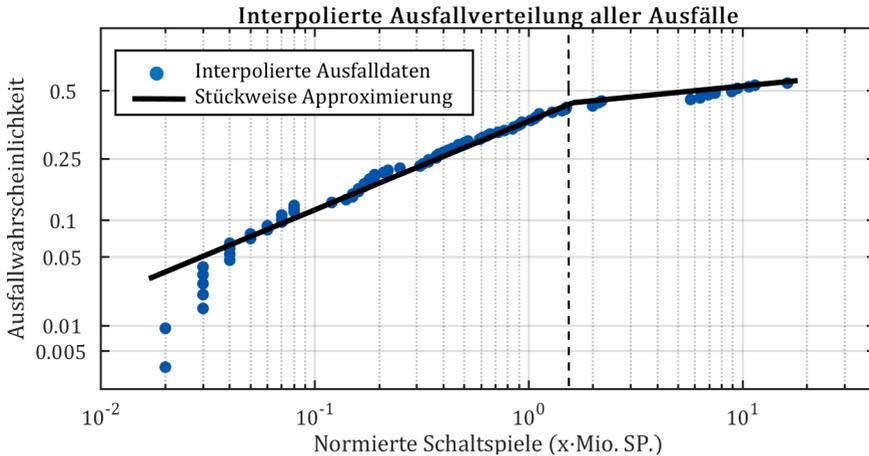


Bild 5.63: Übersicht aller ermittelten Ausfälle

Sind unter gleichen Versuchsbedingungen bis auf einen Prüfling alle Prüflinge ausgefallen, wird die für die Auswertung genutzte Lebensdauer des noch funktionierenden Prüflings auf die Lebensdauer des zuletzt ausgefallenen Prüflings gesetzt. Dadurch werden die Zuverlässigkeitskennwerte konservativer ermittelt. Weiterhin kann die Streuung der Messwerte reduziert werden.

In der Auswertung werden für Ausfallzeiten ab der ersten Zwischenmessung ($0,08 \times \text{Mio. SP}$) die interpolierten Ausfallzeiten verwendet. Somit können die zusätzlichen Informationen aus den Leckagemessungen genutzt werden. Für Ausfälle vor der ersten Zwischenmessung liefert eine lineare Interpolation nicht zwangsläufig genaue Ergebnisse (vgl. Bild 5.64).

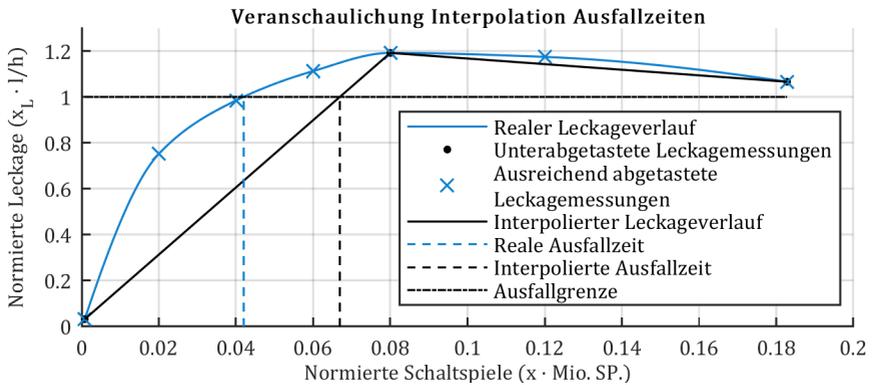


Bild 5.64: Veranschaulichung der Interpolation der Ausfallzeiten

Es kann sich eine erhebliche Differenz zwischen realer und interpolierter Ausfallzeit ergeben, wenn der reale Leckageverlauf durch zu wenige Messungen erfasst wird. Durch die Interpolation werden Ausfallzeiten ermittelt, welche in der Regel größer als in Realität sind. Zur Berücksichtigung dieses Sachverhaltes, wird in dieser Auswertung für die Ausfälle vor der ersten Zwischenmessung konservativ ein intervallzensierter Ausfall zwischen der Nullmessung und des interpolierten Ausfallzeitpunktes verwendet.

Alle Prüflinge, bei welchen kein Ausfall ermittelt werden konnte, wurden im Dauerlauf bis mindestens $12 \times \text{Mio. SP.}$ betrieben. Auch wenn einzelne Prüflinge im Dauerlauf länger betrieben wurden, wird im Folgenden für eine bessere Vergleichbarkeit die maximale Schaltspielzahl generell auf $12 \times \text{Mio. SP.}$ begrenzt.

Die derart aufbereiteten Daten sind die Basis für weitere Auswertungen und sind zur Nachvollziehbarkeit in Tabelle A. 5 des Anhangs aufgeführt.

Durch eine statistische Auswertung können die im Pareto-Diagramm in Bild 5.65 dargestellten Effekte mit dem Risikoniveau 0,05 als signifikant ermittelt werden. Die ermittelten Koeffizienten sowie die jeweiligen p-Werte sind in Tabelle 5.12 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die ermittelte Standardabweichung der zugrunde gelegten Lognormalverteilung mit 2,36 deutlich größer als die im Zentralpunkt ermittelbare Standardabweichung von 0,78 ist (vgl. Bild 5.66).

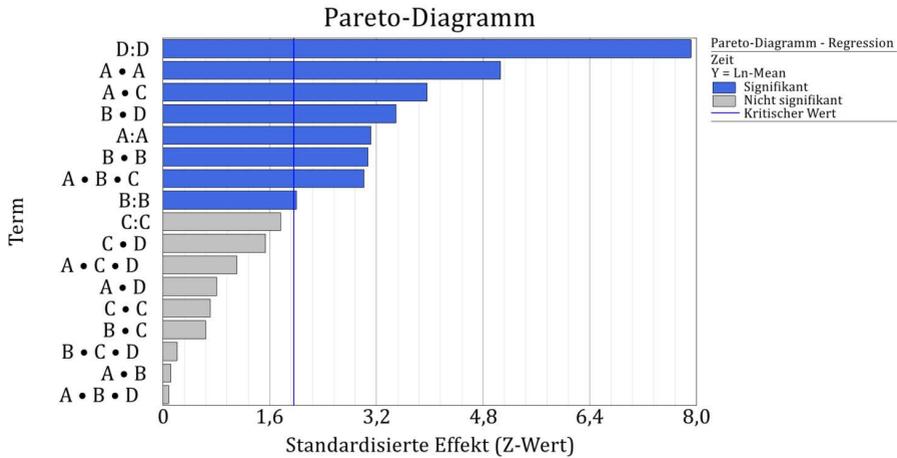
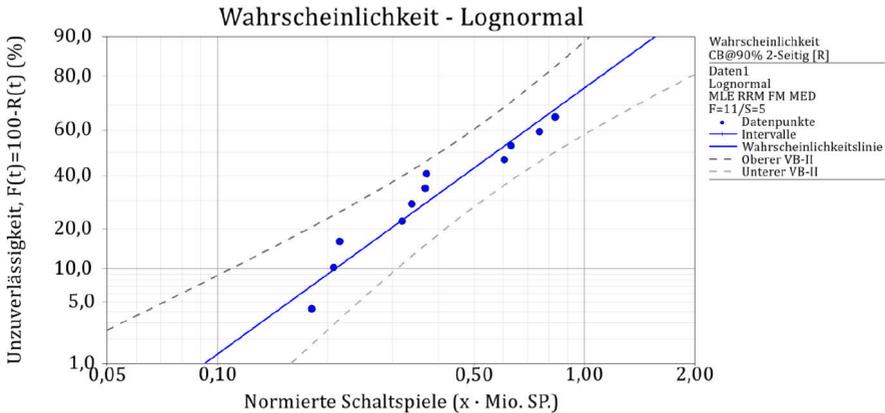


Bild 5.65: Pareto-Diagramm zur Veranschaulichung der signifikanten Effekte



Log-Mittelwert=-0,559658, Log-Std=0,784309

Bild 5.66: Ausfallverteilung des Mittelpunktes der DoE

Bei dem gewählten Modellansatz wird angenommen, dass der Schadensmechanismus und somit der „Formparameter“ der Ausfallverteilung (Log-Std) über die jeweiligen Versuchspunkte gleichbleiben. Der Versuchspunkt mit den meisten Prüflingen unter gleichen Versuchsbedingungen ist der Zentralpunktversuch der DoE. Es wird somit erwartet, dass der hierbei ermittelte „Formparameter“ von Log-Std = 0,78 (90 % Vertrauensbereich: 0,55 ... 1,12) über den getesteten Parameterraum gleichbleibt.

Tabelle 5.12: Vergleich der Koeffizienten und p-Werte

Term	Koeffizienten		p-Wert	
	1: Log-Std aus DoE	2: Log-Std aus Zentralpunkt	1: Log-Std aus DoE	2: Log-Std aus Zentralpunkt
Log-Std	2,36	0,80	-	-
Intercept	-0,38	-0,59	0,3323	0,0000
A	1,58	1,12	0,0000	0,0000
B	-0,80	-0,54	0,0315	0,0000
C	-0,75	-0,51	0,0068	0,0000
D	-2,65	-1,92	0,0000	0,0000
A • C	-1,88	-1,28	0,0000	0,0000
B • D	-1,34	-0,89	0,0004	0,0000
A • B • C	-1,42	-0,88	0,0029	0,0000
A • C • D	0,71	0,46	0,0785	0,0008
A • A	2,99	2,02	0,0000	0,0000
B • B	1,50	0,95	0,0027	0,0000

Durch die statistische Auswertung werden parallel zu den Koeffizienten und den Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Effekte der „Formparameter“ Log-Std ermittelt. Hierbei werden die Ausfalldaten aus allen getesteten Versuchspunkten genutzt. Streuungen innerhalb und zwischen den einzelnen Versuchspunkten, sowie die deutlich geringere Prüflingsanzahl (vier Prüflinge) je Versuchsbedingungen gegenüber dem Zentralpunktversuch (16 Prüflinge) können Ursache für eine abweichende Schätzung von Log-Std sein.

Für die statistische Auswertung und Modellableitung kann Log-Std fix vorgegeben werden. Die Koeffizienten und p-Werte des Modells mit Log-Std = 0,8 (konservativ gerundeter Wert des Zentralpunktversuches) sind in Tabelle 5.12 dargestellt. Die bisher als signifikant ermittelten Terme werden weiterhin als signifikant ermittelt. Zusätzlich werden nun die Terme A • C • D sowie A • B • C • D als signifikant bewertet. Der Term A • C • D wird wie in Tabelle 5.12 aufgeführt in das Modell aufgenommen. Zur Vermeidung einer Überanpassung und aufgrund des vergleichsweise geringen Einflusses wird der Term A • B • C • D vernachlässigt und nicht in den Modellansatz übernommen. Da in Tabelle 5.12 nur Koeffizienten und dazugehörige p-Werte des Modellansatzes aufgeführt sind, ist der Term A • B • C • D nicht enthalten.

Zum Vergleich der zwei Modelle aus Tabelle 5.12 wurden die Vorhersagen der Modelle in den getesteten Versuchspunkten mit den Messungen verglichen. Ein Histogramm der verbleibenden Fehler ist in Bild 5.67 dargestellt. Wurde in der Realität an einem Versuchspunkt kein Ausfall festgestellt und wurde durch ein Modell eine größere Lebensdauer ermittelt, wurde dies nicht als Fehler betrachtet. Es zeigt sich, dass das Modell mit dem vorgegebenen Log-Std eine geringere Streuung der Restfehler aufweist. Das Modell mit der vorgegebenen Log-Std von 0,8 soll somit im Folgenden verwendet werden.

Die in Bild 5.67 dargestellten maximalen verbleibenden Restfehler sind vergleichsweise groß. Die Fehler beziehen sich auf die vom Modell vorhergesagten logarithmierten B_{50} -Werte und gehen somit exponentiell auf die vorhergesagten Schaltspiele ein.

Das Ziel dieser Versuchsreihe war es, signifikante Effekte zu ermitteln und ein erstes Modell abzuleiten. Diese Ziele wurden erreicht. Im folgenden Abschnitt soll näher untersucht werden, inwiefern mit dem ermittelten Modell ein praktischer Nutzen abgeleitet werden kann.

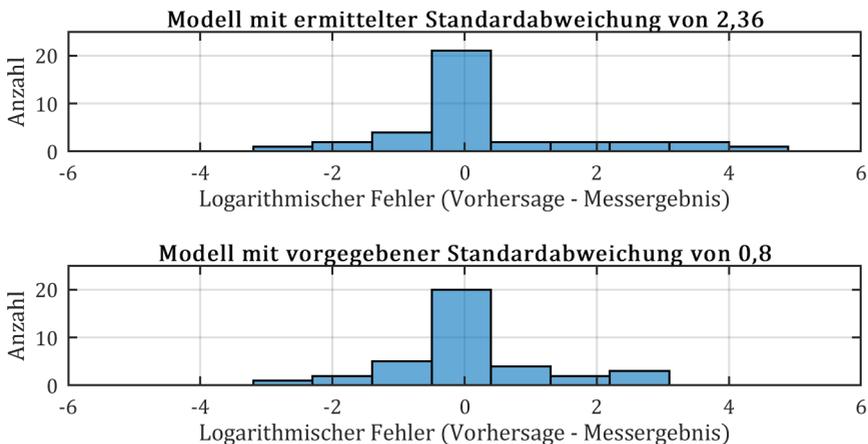


Bild 5.67: Histogramme der Fehler aus Vorhersagen und Messergebnissen

5.6.3 Abgleich des Lebensdauermodells

Zur Überprüfung der Aussagekraft des ermittelten Lebensdauermodells wurden weitere Versuche durchgeführt. In einer ersten Versuchsreihe wird überprüft, wie gut die Vorhersage des Lebensdauermodells in interpolierten Punkten stimmt. Durch eine zweite Versuchsreihe wird getestet, wie gut das Lebensdauermodell auf nacheinander verschiedene synthetische Belastungen angewendet werden kann. Wie gut das Lebensdauermodell auf beliebige (nicht synthetische) Belastungen übertragen werden kann, wird in einer finalen Versuchsreihe auf die Probe gestellt.

Überprüfungsversuch eins

Für eine Überprüfung, wie gut Vorhersagen in interpolierten Punkten mit der Realität übereinstimmen, wurde ein Versuch mit den in Tabelle 5.13 aufgelisteten Versuchsparametern durchgeführt. Der Versuchsaufbau entspricht dem sonst üblichen Aufbau, die Ventilinsel befindet sich in einem Temperaturschrank (vgl. Bild 5.68). In diesem Versuch wurden 16 Booster (vier Ventile) getestet.

Tabelle 5.13: Versuchsbedingung für Überprüfungsversuch eins

Faktor	Einstellung codiert (-1... 1)
A	$x_1 = 0,200$
B	$x_2 = 0,345$
C	$x_3 = 0,500$
D	$x_4 = 0,600$



Bild 5.68: Versuchsaufbau Überprüfungsversuch eins

Die Vorhersage für den gewählten Betriebspunkt lässt sich mit dem Modellansatz aus Gleichung (5.3) basierend auf Gleichung (2.12) berechnen. Durch Einsetzen der ermittelten Koeffizienten aus Tabelle 5.12 lässt sich ein B_{10} Wert von $0,045 \times \text{Mio. SP.}$ ermitteln (vgl. Gleichungen (5.3) bis (5.5)).

$$\mu = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \beta_{134} x_1 x_3 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 = -2,08 \tag{5.3}$$

$$B_{50} = e^\mu = e^{-2,08} = 0,125 \text{ x Mio. SP.} \tag{5.4}$$

$$B_{10} = e^{\mu - 1,2816 \cdot \sigma} = e^{-2,08 - 1,2816 \cdot 0,8} = e^{-3,105} = 0,045 \text{ x Mio. SP.} \tag{5.5}$$

Ein Vergleich der durch reale Versuche ermittelten Ausfälle (Ausfalldaten in Tabelle A. 6 des Anhangs) sowie der vorhergesagten Ausfallzeit ist in Bild 5.69 dargestellt. Der vorhergesagte Lebensdauer kennwert (gestrichelte blaue Linie) ist deutlich größer als in den realen Versuchen (durchgängige schwarze Linie). Für die Vorhersage wurde zusätzlich ein Vertrauensbereich des B_{10} -Wertes berechnet. Hierzu wurden jeweils neue Koeffizienten für den Modellansatz mit dem 90 %-Vertrauensbereich von Std-Log (0,55 und 1,1) ermittelt. Für jedes Modell werden Voraussagen mit einem 90 %-Vertrauensbereich berechnet. Der somit ermittelte kleinste bzw. größte B_{10} -Wert bildet den dargestellten Vertrauensbereich.

Wie bereits erwähnt, konnten in den Versuchen der DoE sehr große Unterschiede in den empirisch ermittelten Lebensdauern von größer Faktor 1000 beobachtet werden. Auch wenn sich die Vertrauensbereiche von Vorhersage und Überprüfungsversuch eins nur knapp überschneiden, kann die Lebensdauer vor diesem Hintergrund akzeptabel approximiert werden.

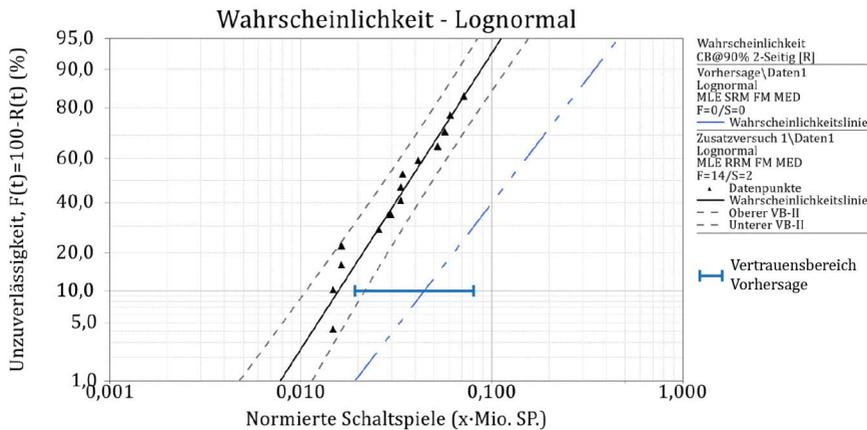


Bild 5.69: Vergleich von Vorhersage und realen Daten von Überprüfungsversuch eins

In diesem Überprüfungsversuch wurde ein definierter Betriebspunkt getestet. Wie gut sich die Lebensdauer bei ändernden Betriebspunkten vorhersagen lässt, wird im Folgenden untersucht.

Überprüfungsversuch zwei

Im zweiten Überprüfungsversuch wird untersucht, wie gut die Vorhersage des Lebensdauermodells für nacheinander folgende unterschiedliche synthetische Belastungen ist. Hierbei werden in drei Betriebspunkten die folgenden Szenarien betrachtet:

1. Ventile halten sehr lange: „Der Kunde ist zufrieden, die Ventile fallen auch unter Extrembedingungen sehr selten aus“.
2. Die Ventile fallen sehr schnell aus: „Der Kunde hat seinen Prozess verändert, jetzt fallen die Ventile sehr schnell aus“.
3. Die Ventile fallen nun nicht mehr so schnell wie bei Szenario zwei (aber schneller als bei Szenario eins) aus: „Was muss der Kunde machen, damit die Ventile wieder länger halten?“.

Die Einstellungen der Faktoren, welche den jeweiligen Betriebspunkten entsprechen, sind in Tabelle 5.14 zusammengefasst. Analog wie in Überprüfungsversuch eins, kann durch das Einsetzen der Faktoreinstellungen in den gewählten Modellansatz (Gleichung (5.3)) die Lebensdauer für die jeweiligen Betriebspunkte ermittelt werden.

Beim Übergang zwischen den jeweiligen Betriebspunkten muss die Vorschädigung aus den vorausgegangenen Belastungen berücksichtigt werden. Hierzu wird die in Bild 5.70 dargestellte Vorgehensweise verwendet. In schwarzen Linien sind die vorhergesagten Ausfallverteilungen für die jeweiligen Betriebspunkte eingezeichnet. Für diese Untersuchung stehen 28 Boosterpatronen (7 Ventile zur Verfügung).

Tabelle 5.14: Faktoreinstellungen und Vorhersagen für die jeweils gewählten Betriebspunkte

Faktor	Betriebspunkt 1	Betriebspunkt 2	Betriebspunkt 3
A	1	0	0
B	1	1	0
C	1	1	1
D	-1	1	0
Vorhersage μ	2,636	-3,504	-1,107
Vorhersage $B_{50}(x \cdot \text{Mio. SP.})$	14,00	0,030	0,331
Vorhersage $B_{10}(x \cdot \text{Mio. SP.})$	5,0	0,011	0,12

Im Rahmen dieses Überprüfungsversuches sollen die Prüflinge in Betriebspunkt eins bis $0,8 x \cdot \text{Mio. SP.}$ belastet werden. Die Zeit im Dauerlauf ist durch die für die gesamte Versuchsreihe zur Verfügung stehenden Zeit beschränkt. Wie in Bild 5.70 ersichtlich ist, liegt die Ausfallwahrscheinlichkeit bei $0,8 x \cdot \text{Mio. SP.}$ für Betriebspunkt eins bei etwas über 0,01 %. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für die 5 % Vertrauensgrenze des ersten von 28 Prüflingen liegt bei 0,18 % (vgl. [7, S. 476]). Für den Betriebspunkt eins wird folglich kein Ausfall erwartet.

Beim Übergang zu Betriebspunkt zwei wird die Ausfallwahrscheinlichkeit beibehalten und die entsprechende Schaltspielzahl bei Betriebspunkt zwei ermittelt (vgl. gestrichelter Pfeil in Bild 5.70). Die nun folgenden Schaltspiele in Betriebspunkt zwei werden auf die hiermit ermittelte Startschaltspielzahl aufaddiert.

Betriebspunkt zwei soll solange betrieben werden, bis 40 % der Prüflinge ausgefallen sind. Somit ergeben sich für die Vorhersage $0,023 x \cdot \text{Mio. SP.}$ für Betriebspunkt zwei. Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Vorschädigung erfolgt analog.

In Bild 5.71 ist die wie beschrieben erstellte Vorhersage den Ausfalldaten des realen Versuches gegenübergestellt (Ausfalldaten siehe Tabelle A. 7 des Anhangs). Im ersten Betriebspunkt fielen wie vorhergesagt keine Prüflinge aus. Der zweite Betriebspunkt wurde im realen Versuch nach Erreichen der 40 % Ausfallwahrscheinlichkeit nach $0,020 x \cdot \text{Mio. SP.}$ etwas früher als in der Vorhersage beendet. Die Prüflinge fielen hierbei wie vorhergesagt sehr schnell aus.

Im dritten Betriebspunkt fielen die Prüflinge auch in Realität deutlich langsamer als im zweiten Betriebspunkt aus.

Die qualitativen Vorhersagen konnten bei der vorgestellten Versuchsreihe mit nacheinander folgenden unterschiedlichen Belastungen eingehalten werden.

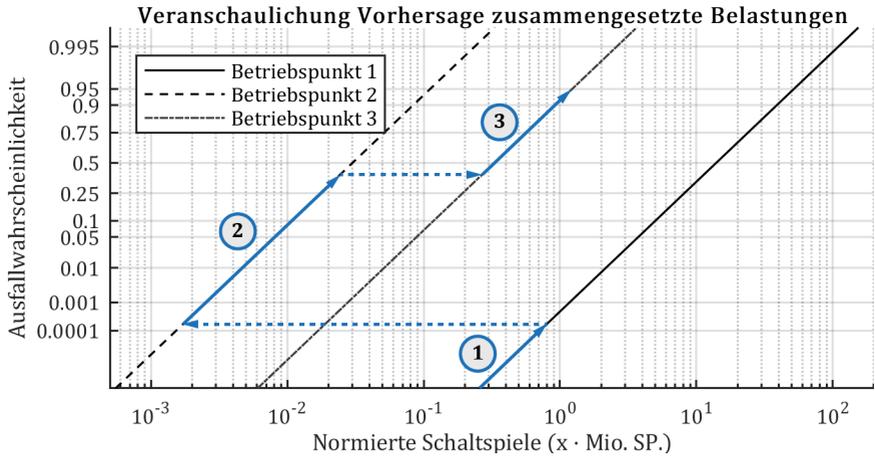


Bild 5.70: Veranschaulichung der Vorhersage der zusammengesetzten Belastungen

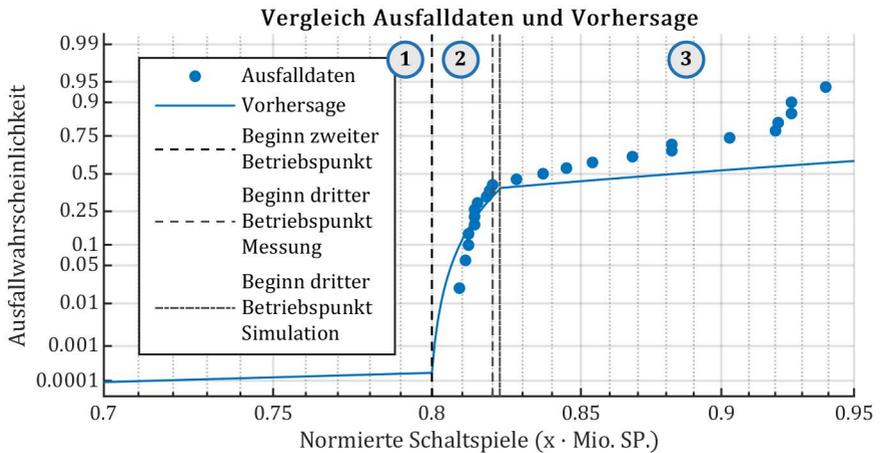


Bild 5.71: Vergleich von Vorhersage und Ausfalldaten des zweiten Überprüfungsversuches

Auch die quantitativen Vorhersagen konnten mit verhältnismäßig geringen Abweichungen durch reale Versuche bestätigt werden. Die am Anfang dieses Überprüfungsversuches definierten drei Szenarien konnten somit mit dem ermittelten Modell erfolgreich durchgeführt werden.

Überprüfungsversuch drei

In einem dritten Überprüfungsversuch soll abschließend überprüft werden, inwiefern sich das Lebensdauermodell im bestehenden Zustand bereits auf Kundenapplikationen anwenden lässt. Hierfür werden exemplarisch die in Bild 5.72 dargestellten Hubverläufe einer Applikation genutzt. Dabei wird die Belastung auf einen Arbeitsanschluss und somit zwei Boosterpatronen betrachtet. Es werden beide Profile in Überprüfungsversuch drei getestet.

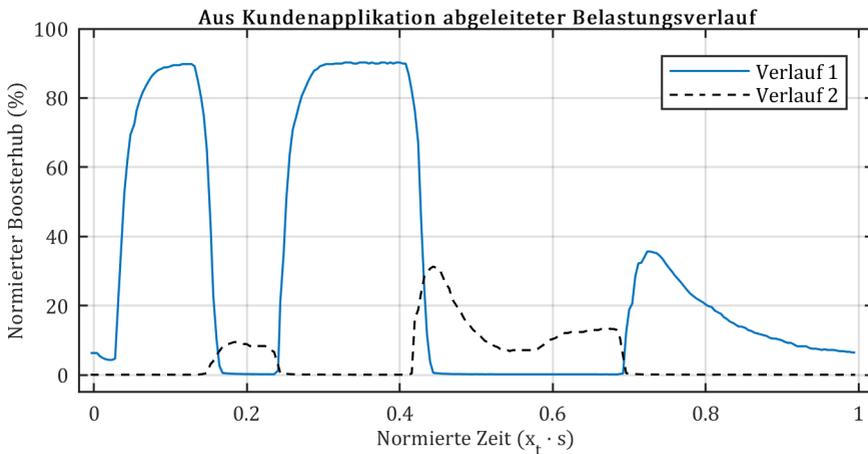


Bild 5.72: Aus Kundenapplikation abgeleiteter Belastungsverlauf für Überprüfungsversuch drei

Für die Versuche standen insgesamt 32 Boosterpatronen (acht Ventile zur Verfügung). Jeder Verlauf wurde somit auf jeweils 16 Boosterpatronen getestet. Auf jedem Ventil wurden beide Verläufe getestet. Die Boosterpatronen „B2R“ und „B4R“ wurden jeweils mit Verlauf eins belastet, die Boosterpatronen „B2P“ und „B4P“ mit Verlauf zwei.

Zur Vorhersage einer Lebensdauer unter Nutzung des erstellten Lebensdauermodells müssen die Verläufe jeweils in Abschnitte unterteilt werden, für welche Vorhersagen erstellt werden können. Tabelle 5.15 und Tabelle 5.16 zeigen die Faktoreinstellungen für die unterschiedlichen Abschnitte für die betrachteten Verläufe. Auf eine nähere Erläuterung, wie die einzelnen Faktoreinstellungen abgeleitet werden, kann ohne eine Offenlegung der realen Bedeutungen der einzelnen Faktoren nicht eingegangen werden.

Tabelle 5.15: Faktoreinstellungen und Vorhersagen für Verlauf eins

A	B	C	D	Vorhersage μ	Vorhersage B_{50} ($x \cdot \text{Mio. SP.}$)	Vorhersage B_{10} ($x \cdot \text{Mio. SP.}$)
-0,7	0	-1	1	-2,374	0,093	0,033
-0,7	0	-1	1	-2,374	0,093	0,033
-0,7	0	-1	-0,47	-0,023	0,977	0,351

Tabelle 5.16: Faktoreinstellungen und Vorhersagen für Verlauf zwei

A	B	C	D	Vorhersage μ	Vorhersage B_{50} ($x \cdot \text{Mio. SP.}$)	Vorhersage B_{10} ($x \cdot \text{Mio. SP.}$)
-0,7	0	-1	-1	0,824	2,280	0,818
-0,7	0	-1	-0,8	0,505	1,657	0,594
-0,7	0	-1	-1	0,824	2,280	0,818

Für die Zusammenführung der einzelnen Abschnitte zu einer Vorhersage für das jeweilige Profil wird ein analoges Vorgehen wie bei Überprüfungsversuch zwei (vgl. Bild 5.70) genutzt. Im Gegensatz zum Überprüfungsversuch zwei wird nun jedoch nach jeweils einem Schaltspiel zwischen den Betriebspunkten gewechselt. Ein Durchlauf aller drei Betriebspunkte mit jeweils einem Schaltspiel wird für die betrachteten Verläufe als ein Schaltspiel betrachtet. Hiermit können die Vorhersagen wie in Tabelle 5.17 dargestellt berechnet werden. Die Vertrauensbereiche der Vorhersage wurden wie in Überprüfungsversuch eins beschrieben berechnet.

Tabelle 5.17: Vorhersagen für die zwei getesteten Belastungsverläufe von Überprüfungsversuch drei

Verlauf	B_{10} (x · Mio. SP.)	$B_{10,min}$ (x · Mio. SP.)	$B_{10,max}$ (x · Mio. SP.)
Verlauf eins	0,0160	0,0062	0,030
Verlauf zwei	0,2422	0,122	0,373

Die Ausfallverteilungen der beiden Verläufe sind in Bild 5.73 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ausfalldaten für die unterschiedlichen Verläufe sich entgegen der Erwartungen praktisch nicht unterscheiden. Für Verlauf eins ergibt sich ein B_{10} -Wert von $0,0054 \times$ Mio. SP. (90 % VB: 0,0043 ... 0,0068), für Verlauf zwei ein B_{10} -Wert von $0,0052 \times$ Mio. SP. (90 % VB: 0,0039 ... 0,0064).

Bei Profil eins wird die Lebensdauer größer als in Realität vorhergesagt. Die Vertrauensbereiche zwischen Vorhersage und Messung überschneiden sich jedoch. Für Profil eins kann mit dem erstellten Modell somit bereits eine akzeptable Schätzung der Lebensdauer durchgeführt werden.

Bei Profil zwei wird die Lebensdauer erheblich größer als in Realität vorhergesagt. Die Vertrauensbereiche zwischen Vorhersage und Messung überschneiden sich nicht.

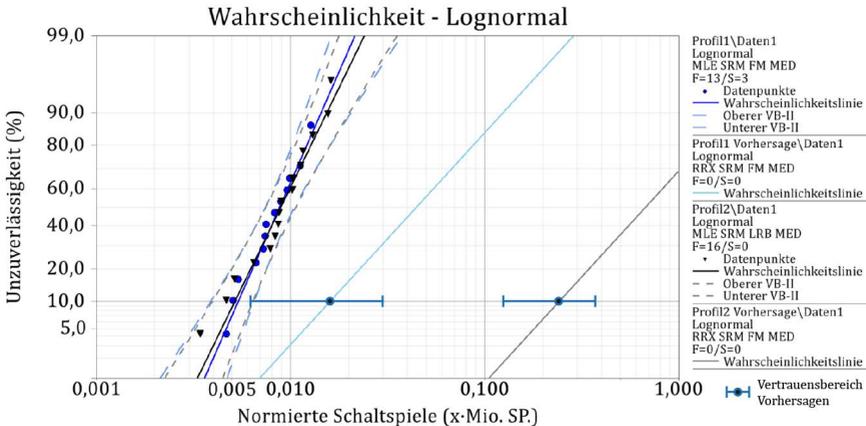


Bild 5.73: Ausfalldaten für die zwei getesteten Belastungsprofile des Überprüfungsversuches drei

Für die beobachteten Abweichungen kommen mehrere Ursachen in Frage. Die in den Versuchen der statistischen Versuchsplanung verwendeten Prüflinge zeigten im Unterschied zu den vorausgehenden Untersuchungen fertigungstechnische Mängel auf. In den Versuchen dominierte ein Schadensmechanismus, welcher in vorausgehenden Versuchen eine untergeordnete Rolle spielte. Basierend auf den Versuchsergebnissen der Voruntersuchungen und dem bisherigen Expertenwissen wurden die Grenzen der jeweiligen Faktoren festgelegt. Für Faktor C wurde unterhalb der ausgewählten unteren Grenze kein weiterer Effekt erwartet. In weiteren Einzelversuchen konnte jedoch strichprobenartig ein Einfluss von Faktor C unterhalb der Einstellungen in den Versuchen der DoE beobachtet werden. Die getesteten Verläufe der Kundenapplikationen liegen bei Faktor C unter den getesteten Einstellungen. Für die Vorhersage wurde Faktor C auf die untersuchten Einstellungen von -1 bis 1 limitiert. Im Zusammenhang mit vorhandenen Wechselwirkungen sind somit Abweichungen zur Vorhersage verständlich. Wie vorausgehend beschrieben, sind die hier durchgeführten Versuche zur Identifikation relevanter Faktoren und zur Ableitung eines ersten Modells vorgesehen (vgl. Abschnitt 5.4.3). Bereits vor Versuchsbeginn wurde deutlich gemacht, dass für die Erstellung eines genaueren Modells weitere Versuche notwendig sind.

Als **Fazit der drei durchgeführten Überprüfungsversuche** kann festgehalten werden, dass mit dem im vorausgehenden Abschnitt erstellten Lebensdauermodell bereits akzeptable Vorhersagen erstellt werden konnten. Bei interpolierten Belastungen in Überprüfungsversuch eins ergaben sich überschneidende Vertrauensbereiche von Vorhersage und Realität. Bei den nacheinander folgenden Belastungen in Überprüfungsversuch zwei konnte eine sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Vorhersage gemacht werden. In Überprüfungsversuch drei wurden aus einer beispielhaften Kundenapplikation zwei Belastungsprofile abgeleitet und getestet. Bei einem Profil zeigte sich ein Überschneiden der Vertrauensbereiche von Vorhersage und Realität. Im zweiten Belastungsprofil zeigten sich deutliche Abweichungen in der Vorhersage und den realen Messdaten. Dennoch ist eine grobe Einschätzung der zu erwartenden Lebensdauer möglich.

Das ermittelte Lebensdauermodell wurde basierend auf einer erweiterten Screening-Versuchsreihe ermittelt. Ziel dieses Modells war es, die Lebensdauer im untersuchten Parameterraum in einer ersten Näherung zu beschreiben. Auch wenn das erstellte Lebensdauermodell noch deutliches Optimierungspotential aufweist, konnten dennoch zufriedenstellende Aussagen abgeleitet werden.

Nachdem die mechanischen Komponenten in den vorausgehenden Abschnitten detailliert untersucht wurden, wird im Folgenden der Fokus auf die Firmware sowie die regelungstechnischen Algorithmen in der Firmware gelegt.

5.7 Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Robustheit der Algorithmen der Firmware

Bei dem in dieser Arbeit exemplarisch untersuchten mechatronischen System kommen Regelalgorithmen an zwei unterschiedlichen Komponenten vor: den Motion Apps auf dem Ventilcontroller und bei der Regelung der Boosterpatrone in der Ventilscheibe.

Ein zuverlässig funktionierendes Ventil ist die Grundlage für darauf aufbauende Motion Apps. Es gilt zu beachten, dass die Firmware bzw. die Algorithmen wie eine Hubregelung der Boosterposition nicht nur bei einem Ventil im Neuzustand unter einer Betriebsbedingungen funktionieren soll. Eigenschaftsänderungen betriebsrelevanter Parameter können sich von Ventil zu Ventil unterscheiden und können sowohl von den Betriebsbedingungen als auch von der Lebensdauer abhängig sein. In den vorausgehenden Abschnitten wurde beschrieben, wie Untersuchungen der Mechanik (Ventilscheibe) bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt werden können. Durch diese Versuche können relevante Eigenschaftsänderungen der Mechanik für die untersuchten Betriebsbedingungen in Abhängigkeit der Lebensdauer identifiziert und in Zusammenhang mit der Funktionsfähigkeit der Firmware gebracht werden.

Wird die Firmware der Ventilscheibe weiterentwickelt, sind zur Evaluation und Absicherung der durchgeführten Änderungen jeweils weitere Versuche notwendig. Die durchgeführten Versuche sind zeit-, arbeits- und kostenintensiv. Eine Anforderung an die Vorgehensweise zu den weiteren entwicklungsbegleitenden Untersuchungen ist es, den Aufwand für weitere Iterationsschritte zu reduzieren. Dennoch sollen Aussagen für die unterschiedlichen Betriebspunkte sowie Eigenschaftsänderungen unterschiedlicher Ventile abgeleitet werden können.

Bei der Firmware bzw. den Algorithmen der Motion Apps des übergeordneten Controllers ergeben sich ähnliche Herausforderungen. Auch hier gilt es, die Funktionsfähigkeit der Motion Apps für die jeweils möglichen Eigenschaften der Ventilscheibe zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen bei den einzelnen Motion Apps applikationsspezifische Parameter wie Schlauchlänge oder Zylindertyp berücksichtigt werden. Es gilt abzusichern, dass die Motion App bei den unterschiedlichen Bedingungen ordnungsgemäß funktioniert. Bei der Weiterentwicklung der jeweiligen Motion Apps müssen durchgeführte Änderungen evaluiert und abgesichert werden. Somit ergibt sich auch hier die Anforderung, den Versuchsaufwand für die einzelnen Iterationsschritte bei gleichzeitig größtmöglicher Aussagekraft so gering wie möglich zu halten.

Das in Abschnitt 4.7 vorgeschlagene Vorgehen (Bild 4.6 und Bild 4.7) kann sowohl zur Absicherung der Regelalgorithmen in der Ventilscheibe als auch zur Absicherung der Motion Apps verwendet werden. Die Algorithmen werden jeweils modellbasiert entwickelt. Somit sind MiL-Simulationen mit vergleichsweise geringem Aufwand umsetzbar. Während die Nutzung von HiL-Simulationen im beispielhaft begleiteten Projektumfeld bereits etabliert war, wurden MiL-Simulationen noch nicht eingesetzt.

Im Rahmen der Arbeit wurde basierend auf den in der zur Entwicklung bereits vorhandenen Simulationsmodellen eine MiL-Simulationsumgebung gemäß Bild 4.7 aufgebaut. Basierend auf der Auswahl an Faktoren und deren Einstellgrenzen können ein oder mehrere statistische Versuchspläne zur automati-

schen Testfallgenerierung ausgewählt werden. Nach der Durchführung der Simulationen können die ermittelten Kennwerte in einer Übersichtstabelle analysiert werden. Hierbei können Simulationsdurchläufe mit unerwünschtem Verhalten einfach identifiziert werden.

Die MiL-Simulationsumgebung wurde beispielhaft für eine sich zum Zeitpunkt der Arbeit in Entwicklung befindende Motion App angewendet. Durch die Motion App wird ein Pneumatikzylinder auf eine vorgegebene Position eingeregelt. Ein Auszug der Auswertung eines Simulationsdurchlaufes ist in Bild 5.74 dargestellt. Es ist ein durch den Kunden vorgebbaren sprungförmiger Sollwert, der daraus in der Motion App berechnete interne Sollwert sowie der simulierte Istwert dargestellt. Kennwerte wie beispielsweise der maximale stationäre Regelfehler werden je Simulationsdurchlauf berechnet und in einer Übersichtsliste zusammengefasst.

Die erarbeitete MiL-Simulationsumgebung zeigte sich im Praxiseinsatz als sehr hilfreich. Insbesondere durch die Nutzung der statistischen Versuchsplanung müssen nicht zeitaufwändig manuell einzelne Versuchspunkte definiert werden. Durch die systematischen Versuchspunkte konnten entwicklungsbegleitend einfach und schnell Fehler identifiziert werden, welche bisher unbekannt waren und in manuellen Versuchen schwierig oder gar nicht erkannt worden wären.

Durch die agile Entwicklungsweise sind Entwicklungsstände zyklisch zu testen. Mittels einer Automatisierung der Simulationen kann die Entwicklung beschleunigt werden. Es kann in Regressionstests einfach überprüft werden, ob durch eine Änderung der Motion App ein Fehlverhalten in bisher fehlerfreien Bereichen erzeugt wird. Durch eine im Vergleich zu realen Versuchen schnelle Versuchsdurchführung können Änderungen am zu entwickelnden Algorithmus effizient evaluiert werden.

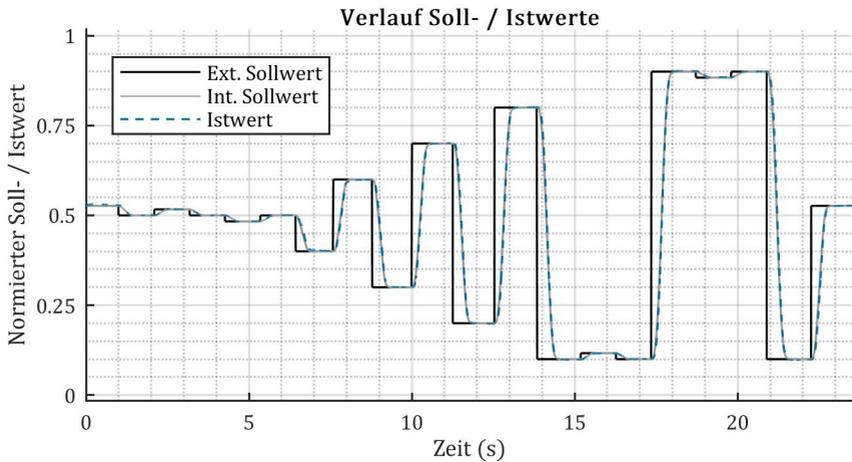


Bild 5.74: Auszug aus der Auswertung eines Simulationsdurchlaufes der beispielhaft untersuchten Motion App

Wie auch im Vorgehen in Bild 4.6 dargestellt, ist im Praxiseinsatz die Nutzung von HiL-Simulationen für die Absicherung von Motion Apps ein wesentlicher Bestandteil. Ergänzend zu den Versuchen in der MiL-Umgebung können hierbei Untersuchungen zur Rechenzeit, Parametrierbarkeit und zum Fehlerhandling der jeweiligen Motion Apps durchgeführt werden.

Durch die Informationen aus MiL- und HiL-Simulationen können kritische Versuchspunkte identifiziert und reale Versuche gezielter durchgeführt werden. Ohne Nutzung von MiL- und HiL-Simulationen könnten die notwendigen Robustheitsuntersuchungen nicht, oder nur mit sehr großem Aufwand realisiert werden.

Die Regelalgorithmen stellen einen Teil der Firmware des mechatronischen Systems dar. Die Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

5.8 Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware

Neben Zuverlässigkeitsbewertungen für die Mechanik und Elektronik gilt es, eine Bewertung für die Softwarekomponenten durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze verfolgt: Eine Bewertung basierend auf Anzahl und Zeiten von rückgemeldeten Ausfällen sowie eine Bewertung basierend auf Ausfällen in Versuchen. Auf beide Ansätze wird im Folgenden eingegangen.

Während der Entwicklung und Absicherung der Softwarekomponenten des untersuchten Produktes wurden gefundene Fehler durch die Entwicklungs- und Versuchsverantwortlichen in einem Application Lifecycle Management System erfasst. Für ein systematisches Erfassen der Ausfälle kann die im vorausgehenden Abschnitt beschriebene Vorgehensweise genutzt werden. Basierend auf der Anzahl gemeldeter Ausfälle und des jeweiligen Zeitpunktes können weiterführende Auswertungen durchgeführt werden. Eine mögliche Auswertung ist in Bild 5.75 dargestellt. Mit blauen Punkten ist hierbei die kumulierte Anzahl an erfassten Ausfällen über der Zeit dargestellt. Die kumulierte Anzahl an Ausfällen ist hierbei in dem betrachteten Zeitraum auf den Maximalwert eins normiert. Die Zeit ist aus Geheimhaltungsgründen mit einem nicht nennbaren Faktor normiert.

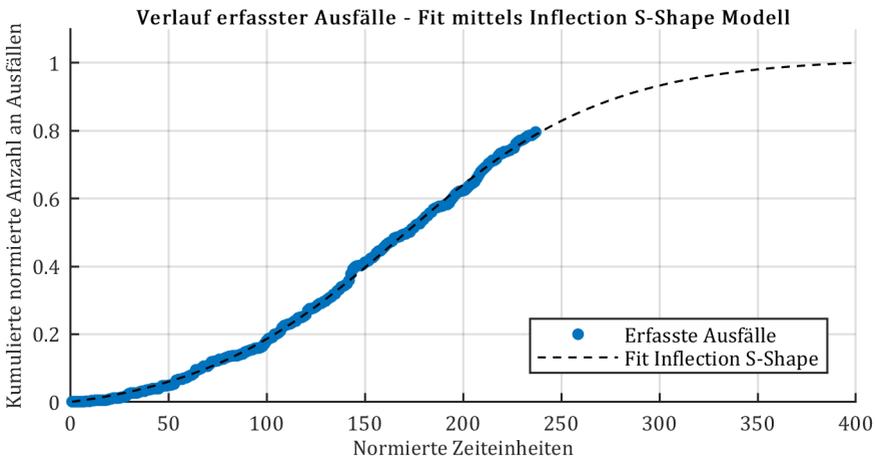


Bild 5.75: Verlauf der vom Entwicklungs- und Versuchsteam erfassten Ausfällen

Zusätzlich zu den erfassten Ausfällen ist in Bild 5.75 eine Approximation durch ein Inflection S-Shape Modell (vgl. [51, 100]) dargestellt. Mit Hilfe dieses Modells kann der Verlauf der erfassten Ausfälle gut approximiert werden. Weiterhin kann mit Hilfe des Modells extrapoliert werden. Durch die somit aufgestellte Prognose kann abgeschätzt werden, wie viele neue Ausfälle in der Software in Zukunft noch entdeckt werden. Damit ist es möglich, für die Software eine Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, in dem in einem vorgegebenen Zeitraum ein neuer Ausfall entdeckt wird. Diese Informationen können im Entwicklungsprozess verwendet werden, um eine Aussage zur Reife der Software abzuleiten.

Der in Bild 5.75 dargestellte Verlauf beinhaltet alle zurückgemeldeten Ausfälle aller Softwarekomponenten. Für eine detaillierte Betrachtung einzelner Softwarekomponenten ist eine Auswertung nur mit den Ausfällen der jeweils betrachteten Softwarekomponente denkbar.

Ein weiterer Ansatz zur Zuverlässigkeitsbewertung für die Softwarekomponenten des betrachteten mechatronischen Systems ist die Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten auf Basis von durchgeführten Versuchen. Während die Software an sich nicht altert, ändern sich die Eigenschaften der Hardware und Elektronik über die Lebensdauer. So kann beispielsweise eine zu hohe Änderung des Öffnungspunktes der Piezobieger (vgl. Abschnitt 5.5.4) die Hubregelung der Boosterpatrone stark negativ beeinflussen. Wird die spezifizierte Hubregelgüte nicht mehr erreicht, gilt die Hubregelung als ausgefallen. Die während des Versuches beobachteten Ausfälle können analog zu den Ausfällen der Mechanik ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 2.2).

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung von Lebensdauer kennwerten lag der Fokus auf der Mechanik. Ausfälle durch Softwarekomponenten wurden erfasst und analysiert. Nach Möglichkeit wurde nach dem Auftreten eines Fehlers durch eine Neukalibrierung des Ventils dieses wieder in einen funktionsfähigen Zustand versetzt. Nur so konnten die Versuche zur Ermittlung von Lebensdauer kennwerten der Mechanik weiter

durchgeführt werden. Dennoch wurden durch die systematisch durchgeführten Versuche Fehler in der Firmware identifiziert und an die Entwickler zur Verbesserung zurückgemeldet. In zukünftigen Firmwareversionen können die identifizierten Fehler stark reduziert oder eliminiert werden. Für den getesteten Firmwarestand können basierend auf den beobachteten Zeiten bis zu den jeweiligen Ausfällen Zuverlässigkeitskennwerte abgeschätzt werden. Im Vergleich zum ersten vorgestellten Ansatz zur Zuverlässigkeitsbewertung der Firmware ergibt sich ein wesentlicher Vorteil: Es können Zuverlässigkeitskennwerte für die relevanten Ausfallmechanismen bei den jeweiligen Betriebspunkten abgeleitet werden. Diese Zuverlässigkeitskennwerte können bei der folgenden quantitativen Modellierung der Systemzuverlässigkeit berücksichtigt werden.

5.9 Quantitative Modellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit

In den vorausgehenden Abschnitten wurde beschrieben, wie Zuverlässigkeitskennwerte für die Elemente der Mechanik, Elektronik und Software ermittelt werden können. Ziel der Untersuchung ist es, eine Gesamtzuverlässigkeit des betrachteten Systems zu ermitteln. Wie in den Abschnitten 2.5.5 und 4.9 beschrieben, können unterschiedliche Modellierungsmethoden wie die Boolesche Systemtheorie, Markov-Graphen oder Petrinetze zum Einsatz kommen. Die im Folgenden vorgestellte Modellierung wurde mittels Petrinetzen realisiert. Ein wesentlicher Grund für die Modellierung mittels Petrinetze ist die Möglichkeit, Wechselwirkungen innerhalb des Systems abbilden zu können.

Während im Rahmen dieser Arbeit auch deutlich komplexere Modellierungen betrachtet wurden, soll im Folgenden eine auf das Wesentliche reduzierte Modellierung betrachtet werden. Eine Übersicht der Modellierung ist in Bild 5.76 dargestellt.

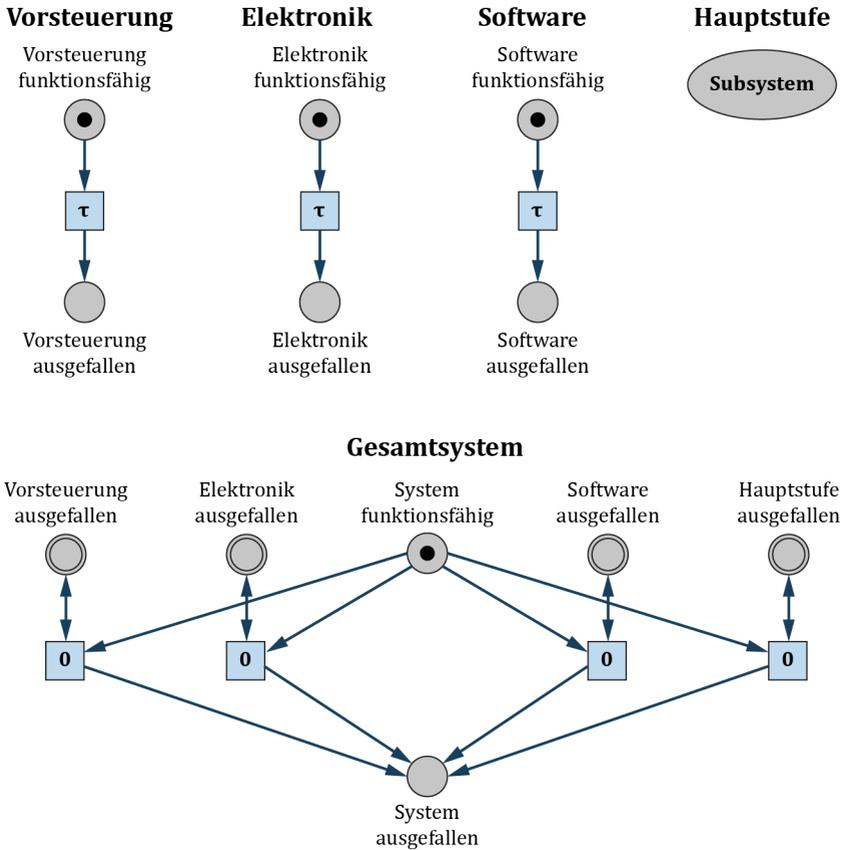


Bild 5.76: Mittels Petrinetzen modelliertes System

Das in Bild 5.76 dargestellte System unterteilt sich in die Elemente Vorsteuerung, Elektronik, Software und Hauptstufe. Fällt eines dieser Elemente aus, gilt das System als ausgefallen. Die Zuverlässigkeitskennwerte der Elemente Vorsteuerung, Elektronik und Software wurden jeweils zusammengefasst. Mit dem Zuverlässigkeitskennwert für die Vorsteuerung werden alle acht Piezobieger berücksichtigt. Der Zuverlässigkeitskennwert der Elektronik ist repräsentativ für die Ventilelektronik, Verkettungsplatine und Controllerelektronik. Mittels des Zuverlässigkeitskennwertes für die Software können Ausfälle durch eine nicht mehr korrekt funktionierende Applikation berücksichtigt werden.

Ausfälle durch die Hauptstufe sind mit Wechselwirkungen modelliert und in einem Subsystem gegliedert. Das Subsystem Hauptstufe ist in Bild 5.77 dargestellt. Die Hauptstufe ist dann ausgefallen, wenn eine der vier Boosterpatronen defekt ist. Alle vier Boosterpatronen sind gleich modelliert. Die Modellierung soll am Beispiel der Boosterpatrone B2P vorgestellt werden. Die Boosterpatrone B2P kann durch auftretende Leckage direkt vom Zustand funktionsfähig in den Zustand ausgefallen übergehen. Tritt ein Schwingen der Hubregelung auf, befindet sich der Booster B2P in einem Zustand mit einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit und kann hierdurch mit vergleichsweise höherer Wahrscheinlichkeit in den Zustand ausgefallen wechseln.

Eine schwingende Druckregelung kann unter bestimmten Vorbedingungen dann begünstigt werden, wenn die Reibung der Boosterpatrone über die Lebensdauer abnimmt. Wie vorausgehend in Bild 5.58 dargestellt wurde, nimmt die Reibung der Boosterpatrone zu Versuchsbeginn stark ab. Während mit der hohen Reibung zu Versuchsbeginn die Regelung im Normalbetrieb arbeitet, ist mit abnehmender Reibung ein Schwingen möglich. Nicht bei allen Boosterpatronen sinkt die Reibung so stark, dass ein Schwingen auftritt. Mit dem Übergang in den Zustand „Schwingen nicht mehr möglich“ kann dies abgebildet werden.

Durch eine Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Replikationen des vorausgehend beschriebenen Petrinetzes (ECSPN) und den in vorausgehenden Abschnitten ermittelten Lebensdauer kennwerten kann die in Bild 5.78 veranschaulichte Systemzuverlässigkeit ermittelt werden. Die Simulation wurde beispielhaft für den Zentralpunkt ($A = B = C = D = 0$) durchgeführt. Für andere Betriebspunkte kann die Simulation analog durchgeführt werden.

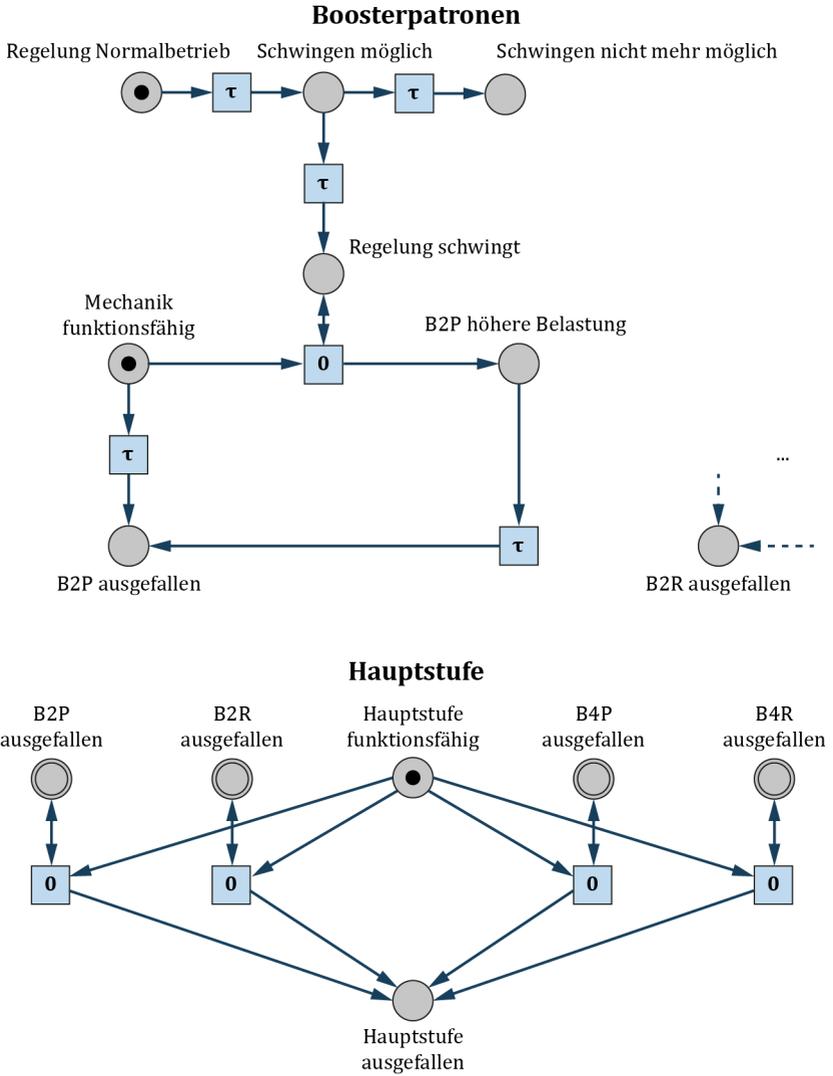


Bild 5.77: Modellierung des Subsystems „Hauptstufe“

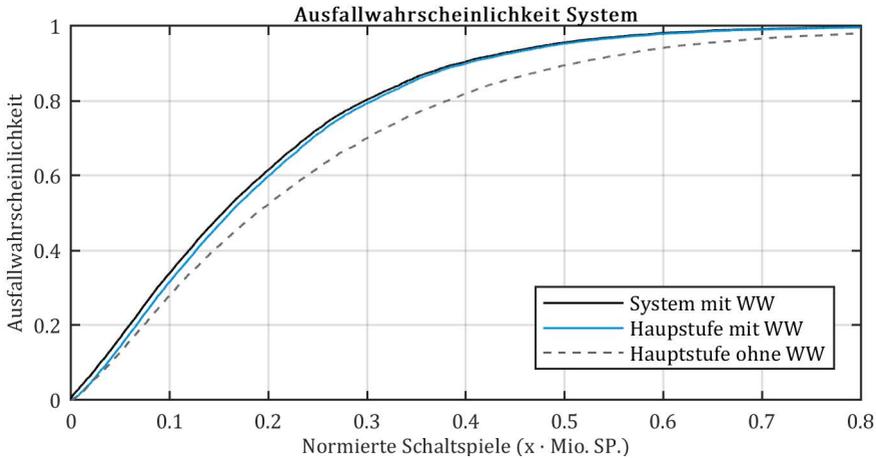


Bild 5.78: Simulierte Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Systemebene

Neben der Ausfallverteilung des Gesamtsystems ist die Hauptstufe, wie vorausgehend beschrieben mit Wechselwirkungen, sowie zum Vergleich die Hauptstufe ohne Wechselwirkungen in Bild 5.78 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit für die Hauptstufe mit Wechselwirkungen die Systemausfallwahrscheinlichkeit dominiert. Insbesondere bei niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeiten ergeben sich vergleichsweise geringe Abweichungen zwischen der Hauptstufe mit Wechselwirkungen und der Systemmodellierung. Im Vergleich zur Modellierung der Hauptstufe ohne Wechselwirkungen sind jeweils deutliche Abweichungen erkennbar.

Mit Hilfe der hier gezeigten Modellierung und Simulation wird die Anforderung erfüllt, Lebensdauer kennwerte auf Systemebene abzuleiten. Bei Anwendung des ermittelten Lebensdauermodells kann weiterhin die Anforderung erfüllt werden, Lebensdauer kennwerte für unterschiedliche Betriebsbedingungen zu ermitteln.

Welche Ansätze verfolgt werden können, um ein unter Laborbedingungen ermitteltes Lebensdauermodell mit Felddaten abzugleichen und zu erweitern, wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

5.10 Zuverlässigkeits-Monitoring

Die in Abschnitt 5.5 beschriebenen Versuche zur Ermittlung der Lebensdauer-kennwerte als Basis für eine Ermittlung des Lebensdauermodells wurden mit erheblichem Aufwand durchgeführt. Soll das Lebensdauermodell weiter verbessert werden sind weitere Versuche notwendig. Neben Laborversuchen ist hierbei die Nutzung der Informationen von Ausfällen aus dem Feld denkbar. Eine Herausforderung bei der Nutzung von Felddaten ist, dass die Belastungen und die Belastungsdauer der einzelnen Prüflinge in der Regel unbekannt sind. Ohne diese Informationen kann ein Lebensdauermodell jedoch nicht erweitert werden.

Das hier betrachtete mechatronische System beinhaltet eine Vielzahl an Sensoren. Es gibt jeweils Temperatur- und Drucksensoren für die Umgebung, für den Versorgungs- und den Abluftdruck sowie für jeden einzelnen Arbeitsanschluss. Innerhalb jedes Ventils können die Boosterpositionen und die an den Piezobie-gern anliegenden Spannungen erfasst werden. Wesentliche Informationen zur Erfassung der Betriebsbelastungen sind somit prinzipiell vorhanden. Das Ab-speichern des zeitlichen Verlaufs der Sensordaten mit der bestehenden Hard-ware ist jedoch aus Speicherplatzgründen nicht durchführbar. Eine Möglichkeit zur Verringerung der anfallenden Daten ist die Klassifizierung der Sensordaten analog zu Abschnitt 5.3.2. Anstelle des zeitlichen Verlaufes des Boosterhubs würde beispielsweise nur abgespeichert, wie oft der Booster mit welcher Amplitude bewegt wurde.

Basierend auf den sich ergebenden Möglichkeiten wurde unter Berücksichti-gung der Grenzen der verwendeten Hardware (Speicherplatz, Rechenleistung, ...) ein Konzept zur klassifizierten Datenerfassung erstellt. Damit ergibt sich prinzipiell die Möglichkeit eines Condition-Monitorings. Hiermit kann abgelei-tet werden, wie lange Ventile üblicherweise bei den aktuell aufgezeichneten Be-dingungen überleben.

5.11 Zusammenfassung und Bewertung der exemplarischen Anwendung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde das in Kapitel 4 vorgeschlagene gesamtheitliche Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme exemplarisch für das neuartige mechatronische System „Festo Motion Terminal“ angewendet. Den notwendigen ersten Schritt der Anwendung stellen die **Definition der Zuverlässigkeitsziele und Systemgrenzen** des zu untersuchenden Systems dar (**Abschnitt 5.1**).

In der **qualitativen Analyse** in **Abschnitt 5.2** wurden ein Funktionsblockdiagramm und Wechselwirkungen mittels Design Structure Matrix und Direct System Grid erfasst und bewertet. Das Funktionsblockdiagramm stellt eine gute Übersicht des zu analysierenden Systems dar und vereinfacht darauffolgende Analysen. Mit Hilfe der Design Structure Matrix und der Auswertung mittels Direct System Grid konnten Beziehungen zwischen Komponenten bewertet werden. Hierbei wurde eine Komponente mit besonders hohem Einfluss identifiziert. Ein Nachteil der Bewertung mittels einer Design Structure Matrix ist, dass der Aufwand quadratisch mit der Anzahl an zu bewertenden Komponenten steigt. Für komplexe Systeme mit einer hohen Anzahl an Komponenten kann die Design Structure Matrix folglich nur mit sehr hohem Aufwand durchgeführt werden.

Im Rahmen von **versuchstechnischen Voruntersuchungen (Abschnitt 5.3)** wurde die Grundlage für eine statistische Versuchsplanung gelegt. Für eine besonders relevante Komponente wurden Belastungsverläufe analysiert, relevante Schadensmechanismen identifiziert, Messaufbauten und Analysemöglichkeiten auf- und ausgebaut, Möglichkeiten der Testzeitverkürzung untersucht sowie erste Ausfallverteilungen für einzelne Betriebspunkte ermittelt. Insbesondere die Untersuchungen zur Testzeitverkürzung zeigten sich als sinnvoll. Es wurde eine Möglichkeit gefunden, die Versuche in kürzerer Zeit durchzuführen. Weiterhin konnte in vergleichsweise kurzer Zeit ein bisher nicht betrachteter Schadensmechanismus identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Durch die exemplarische entwicklungsbegleitende Anwendung wurden zwangsläufig mehrere Iterationen der Voruntersuchung durchgeführt. Erst wenn eine Mindestanforderung in Bezug auf Lebensdauer und auftretender Schadensmechanismen erfüllt ist, ist eine Durchführung aufwändiger Versuche im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung gerechtfertigt.

Neben Untersuchungen zur Mechanik wurden Zuverlässigkeitsanalysen der Elektronik durchgeführt. Zur Abschätzung der Lebensdauer wurde eine Berechnung mittels Ausfallratenkatalogen umgesetzt. Weiterhin wurden experimentelle Untersuchungen realisiert. Aus Ressourcen- und Zeitgründen konnte nur eine Versuchsreihe durchgeführt werden, sodass ein Raffungsmodell nicht parametrisiert werden konnte. Durch die experimentellen Versuche konnten dennoch relevante Informationen abgeleitet werden. So wurden potenziell besonders relevante Schadensmechanismen sowie deren Folgen aufgezeigt.

In **Abschnitt 5.4** wurde die Durchführung einer **statistischen Versuchsplanung** vorgestellt. Hierbei wurden unterschiedliche Versuchspläne betrachtet. Zur Berücksichtigung von zensierten Ausfalldaten wurden für ausgewählte Versuchspläne mittels eines fiktiven Lebensdauermodells Ausfalldaten simuliert und ausgewertet. Hierbei zeigte sich, dass auch bei zensierten Ausfalldaten relevante Terme noch als signifikant ermittelt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die mittels fiktivem Lebensdauermodell abgeleiteten Ausfallzeiten aus Zeitgründen manuell ausgewertet. Würde eine automatisierte Auswertung realisiert werden, könnten deutlich mehr Iterationen durchgeführt werden. Hiermit könnten Streuungen in den Lebensdauerdaten besser berücksichtigt werden.

Die **Durchführung der geplanten Versuche** wurde in **Abschnitt 5.5** beschrieben. Die für diese Versuche speziell entwickelten Dauerlauf- und Messaufbauten wurden jeweils vorgestellt. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Lebensdauer der Prüflinge in Abhängigkeit unterschiedlicher Betriebsbedingungen ermittelt. Neben diesen Ausfallzeiten konnten jedoch noch weitere Informationen aus den Versuchen abgeleitet werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnten Ausfälle durch mehr als zwei Dutzend unterschiedliche Schadensbil-

der erfasst werden. Einige dieser Schadensbilder waren in herkömmlichen Versuchen noch nicht beobachtet worden. Somit konnten Verbesserungsmöglichkeiten für das mechatronische System abgeleitet werden.

Neben Ausfällen, wie z. B. durch Leckage, konnten in den Versuchen Eigenschaftsänderungen relevanter Komponenten erfasst werden. Diese Eigenschaftsänderungen sind für den Betrieb des mechatronischen Systems, beispielsweise bei einer Regelaufgabe, besonders relevant. Die in den Versuchen ermittelten Eigenschaftsänderungen können folglich bei einer Reglerauslegung berücksichtigt werden.

Basierend auf den versuchstechnisch ermittelten Lebensdauer kennwerten wurden in **Abschnitt 5.6** die **zuverlässigkeitsbeeinflussenden Faktoren** sowie ein **Lebensdauermodell** bestimmt. Bei den zusätzlich durchgeführten Überprüfungsversuchen konnten akzeptable Übereinstimmungen zwischen Vorhersage und Versuchsergebnissen gezeigt werden.

Als Nachteil der Vorgehensweise kann der hohe versuchstechnische Aufwand zur Ermittlung eines Lebensdauermodells gesehen werden. Als Ergebnis der Versuche ergibt sich jedoch nicht nur ein Lebensdauermodell, sondern weiterhin die Kenntnis der relevanten Schadensmechanismen sowie Information zu den Eigenschaftsänderungen von Komponenten. Insbesondere bei neuen Produkten, bei welchen noch wenig Erfahrung vorhanden ist, kann ein rascher Erkenntnisgewinn wertvoll sein. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass mit herkömmlichen Versuchsmethoden der Aufwand zur Ermittlung der genannten Informationen in der Regel deutlich höher ist.

Neben der Mechanik wurden entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur **Robustheit von Regelalgorithmen der Firmware** in **Abschnitt 5.7** vorgestellt. Im Rahmen der Arbeit wurde eine MiL-Simulationsumgebung für eine Applikation aufgebaut. Mittels statistischer Versuchsplanung kann die korrekte Funktionsweise der Applikation effizient in einem vorgegebenen Parameterraum untersucht werden. Dieses Vorgehen zeigte sich in der Praxis als sehr hilfreich.

In **Abschnitt 5.8** wurde vorgestellt, wie eine **Approximation des Verlaufs der erfassten Ausfälle der Firmware** mittels mathematischer Modelle durchgeführt werden kann. Mit Hilfe dieser Approximation können Aussagen zur Zuverlässigkeit der Firmware abgeleitet werden. Es kann abgeschätzt werden, wieviel Zeit noch notwendig ist, um eine Mindestgüte der Firmware realisieren zu können. Auch wenn diese Prognosen mit Unsicherheiten verbunden sind, kann damit eine Plausibilisierung der Projektlaufzeit durchgeführt werden.

Die **Zuverlässigkeitsmodellierung und Berechnung der Systemzuverlässigkeit** wurde in **Abschnitt 5.9** vorgestellt. Hierbei wurde eine vereinfachte Modellierung mittels Petrinetzen (ECSPN) vorgestellt und die Systemlebensdauer exemplarisch berechnet. Dieser Schritt ist notwendig, um basierend auf den ermittelten Lebensdauer kennwerten der einzelnen Komponenten auf die Systemlebensdauer zu schließen. Durch die Modellierung mittels Petrinetzen ist es möglich, auch Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten abbilden zu können. Für eine aussagekräftige Berechnung der Systemzuverlässigkeit sind Lebensdauer kennwerte der einzelnen Schadensmechanismen entscheidend. Auch wenn eine detaillierte Zuverlässigkeitsmodellierung basierend auf qualitativen Methoden und Annahmen erstellt werden kann, sind die üblicherweise nur durch Versuche zu ermittelnden Lebensdauer kennwerte der bestimmende Anteil der Systemlebensdauer.

Zum **Ableich der vorhergesagten Ausfallzeiten mit Felddaten** wurden in **Abschnitt 5.10** die Möglichkeiten eines Zuverlässigkeits-Monitorings beschrieben. Die Umsetzung des Zuverlässigkeits-Monitorings ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Der praktische Nutzen dieses Schrittes kann hier folglich nicht bewertet werden. Bei der Bewertung des konzeptionellen Ansatzes der Speicherung von Betriebsbelastungen des mechatronischen Systems durch firmeninterne Experten konnte positives Feedback erhalten werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein ganzheitliches Vorgehen zur Zuverlässigkeitsanalyse neuartiger mechatronischer Systeme vorgestellt. Das Vorgehen ermöglicht das entwicklungsbegleitende Ableiten quantitativer Zuverlässigkeitskennwerte auf Systemebene ohne Vorwissen für unterschiedliche Kundenanwendungen bei Berücksichtigung von Wechselwirkungen.

Im Vergleich zu bereits bestehenden Vorgehensweisen wurde insbesondere aufgezeigt, wie entwicklungsbegleitend Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Betriebsbedingungen ermittelt werden können. Die hierfür notwendigen Versuche wurden mittels einer Zuverlässigkeits-DoE geplant. In herkömmlichen Versuchsplanungen wurden bisher nur unzensurierte Ausfälle berücksichtigt. In dieser Arbeit wurde ein iteratives Vorgehen zur Abschätzung des Einflusses von rechts- und intervallzensurierten Ausfällen beschrieben. Die so geplanten Versuche wurden in umfangreichen Versuchsreihen umgesetzt. Mit den erhobenen rechts- und intervallzensurierten Ausfalldaten konnten signifikante Effekte ermittelt und ein vereinfachtes Lebensdauermodell abgeleitet werden. In Zusatzversuchen wurden Vorhersagen des Lebensdauermodells mit empirisch ermittelten Lebensdauer kennwerten verglichen. Hierbei zeigte sich eine praktisch relevante Übereinstimmung.

Zur Bewertung der Funktionsfähigkeit der Prüflinge wurde im Rahmen der exemplarischen Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise eine Vielzahl an Messungen durchgeführt. Basierend auf diesen Messungen können nicht nur Ausfallzeiten abgeleitet, sondern weiterhin Eigenschaftsänderungen der Mechanik über die Lebensdauer in Abhängigkeit der getesteten Faktoren ermittelt werden. Durch das systematische Testen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen konnten innerhalb der durchgeführten Versuche weiterhin Schadensmechanismen beobachtet werden, welche in den sonst üblichen Versuchen bisher nicht erfasst wurden.

Zur Absicherung der Funktionsfähigkeit des mechatronischen Systems müssen die Eigenschaftsänderungen der Mechanik bei der Absicherung der Firmware berücksichtigt werden. Hierzu wurde beschrieben, wie mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung systematisch Parameterräume abgetestet werden können. Zur Ableitung von Zuverlässigkeitskennwerten auf Systemebene wurde eine Modellierung mittels Petrinetzen beschrieben.

Ein Nachteil der vorgestellten Vorgehensweise ist der große versuchstechnische Aufwand zur Durchführung der Versuche der statistischen Versuchsplanung. Nicht jeder Anwendungsfall rechtfertigt einen solch hohen Aufwand. Sollen jedoch Zuverlässigkeitskennwerte für unterschiedliche Anwendungen abgeleitet werden und ist kein Vorwissen vorhanden, so müssen die Zuverlässigkeitskennwerte üblicherweise versuchstechnisch ermittelt werden. Die Zuverlässigkeits-DoE stellt hierfür die effizienteste Möglichkeit dar. Je nach Anwendungsfall kann bereits das systematische Erfassen von Schadensmechanismen und der Eigenschaftsänderungen der Mechanik in den unterschiedlichen Betriebsbedingungen den Aufwand einer Screening-Versuchsreihe rechtfertigen.

Für die Zukunft ist eine Überarbeitung der Vorgehensweise zur Planung der Zuverlässigkeits-DoE denkbar. Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen iterativen Vorgehen zur Versuchsplanung können Versuchspläne für intervall- und rechtszensierte Ausfalldaten bewertet werden. Dieses Vorgehen ist im Vergleich zur Planung herkömmlicher Versuche relativ aufwändig. Durch eine Automatisierung des iterativen Vorgehens könnte der Aufwand reduziert werden. Aus methodischer Sicht wäre jedoch eine Vorgehensweise zu bevorzugen, bei welcher sich Aussagen zur statistischen Signifikanz von Faktoren auch bei intervall- und rechtszensierten Ausfalldaten verallgemeinert ableiten lassen können.

7 Literatur

- [1] **BERTSCHE, Bernd; GÖHNER, P.; JENSEN, U.; SCHINKÖTHER, W.** und **WUNDERLICH, H.-J.** *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen.* Berlin u.a.: Springer, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-85089-2.
- [2] **ISERMANN, Rolf.** *Mechatronische Systeme. Grundlagen.* 2., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540323365.
- [3] **FESTO SE & CO. KG.** *Digital Simplicity: Weltneuheit Festo Motion Terminal VTEM* [online], 2019 [Zugriff am: 28. Juni 2020]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/468013/Broschuere_Festo_Motion_Terminal_de_V08_M.pdf
- [4] **ISO. 19973-1,** *Pneumatic fluid power — Assessment of component reliability by testing — Part 1: General procedures.*
- [5] **ISO. 19973-2,** *Pneumatic fluid power — Assessment of component reliability by testing — Part 2: Directional control valves.*
- [6] **FESTO SE & CO. KG.** *Produktlebensdauer bei Festo* [online]. *Survivaltraining für Produkte von Festo – Qualität für ein langes Arbeitsleben* [Zugriff am: 7. Dezember 2019]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/293238/Produktlebensdauer_bei_Festo_135501_DE_08_2013.pdf
- [7] **BERTSCHE, Bernd** und **LECHNER, G.** *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten.* 3., überarb. u. erw. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2004. ISBN 3-540-20871-2.
- [8] **MEYNA, Arno** und **PAULI, B.** *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren.* 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2010. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 978-3-446-41966-7.

-
- [9] **PHAM, Hoang**, Hg. *Springer Handbook of Engineering Statistics*. London: Springer-Verlag London Limited, 2006. ISBN 1-85233-806-7.
- [10] **HEDDERICH, Jürgen** und **SACHS, L.** *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2016. ISBN 978-3-662-45690-3.
- [11] **HÄRTLER, Gisela**. *Statistik für Ausfalldaten. Modelle und Methoden für Zuverlässigkeitsuntersuchungen*, 2016. ISBN 978-3-662-50302-7.
- [12] **MEEKER, William Q.** und **ESCOBAR, L.A.** *Statistical methods for reliability data*. New York: Wiley, 1998. Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics section. ISBN 0-471-14328-6.
- [13] **BERTSCHE, Bernd**. *Reliability in automotive and mechanical engineering. Determination of component and system reliability ; with 66 tables*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540339694.
- [14] **WEIBULL, Waloddi**. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 293-297.
- [15] **BIROLINI, Alessandro**. *Reliability engineering. Theory and practice : with 190 figures, 60 tables, 140 examples, and 70 problems for homework*. Seventh edition. Berlin: Springer, 2014. ISBN 978-3-642-39534-5.
- [16] **ABERNETHY, Robert B.** *The new Weibull handbook. Reliability & statistical analysis for predicting life, safety, risk, support costs, failures and forecasting warranty claims, substantiation and accelerated testing, using Weibull, log normal, crow-AMSAA, probit, and Kaplan-Meier models*. 5. ed. North Palm Beach, Fla.: R.B. Abernethy, 2006. ISBN 978-0-9653062-3-2.
- [17] **RINNE, Horst**. *The Weibull distribution. A handbook*. Boca Raton Fla. u.a.: CRC, 2009. ISBN 978-1-4200-8743-7.
- [18] **PFEUFER, Hans-Joachim**. *FMEA - Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse*. München: Hanser, 2015. Pocket Power. 64. ISBN 3446441700.
- [19] **Department of Defense**, *Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. Washington, DC.

- [20] **VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.** *VDA 4.2 Quality Assurance before series production. System FMEA*, 1996.
- [21] **VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V.** *VDA 3.2 Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten*. 4. komplett überarbeitete Ausgabe, 2016.
- [22] **DIN EN. 61025**, *Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006); Deutsche Fassung EN 61025:2007*.
- [23] **DIN. 25424 Teil 1**, *Fehlerbaumanalyse Methode und Bildzeichen*.
- [24] **DIN. 25424 Teil 2**, *Fehlerbaumanalyse Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes*.
- [25] **NAUNHEIMER, Harald; BERTSCHE, B.; LECHNER, G.; RYBORZ, J. und NOVAK, W.** *Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. 2., bearbeitete und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-30625-2.
- [26] **DIN EN. 61078**, *Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit – Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren (IEC 61078:2006)*.
- [27] **MURRENHOFF, Hubertus; GAUCHEL, W.; MEUSER, M. und SCHULTZ, A.** *Grundlagen der Fluidtechnik Teil 2: Pneumatik*. 2. Aufl. Aachen: Shaker, 2006. Reihe Fluidtechnik. 3. ISBN 383224638x.
- [28] **WATTER, Holger**. *Hydraulik und Pneumatik. Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation ; mit 23 Tabellen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008. Studium. ISBN 978-3-8348-0539-3.
- [29] **FESTO SE & CO. KG.** *Ventile CPE* [online] [Zugriff am: 3. Januar 2018]. Verfügbar unter: https://www.festo.com/cat/de_de/products_020200
- [30] **FESTO SE & CO. KG.** *Firmeneigene Darstellung*. Esslingen, 2018.
- [31] **HAIBACH, Erwin**. *Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Berlin: Springer, 2006. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-29363-7.

-
- [32] **ROOS, Eberhard** und **MAILE, K.** *Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung ; mit 50 Tabellen.* 2., neu bearb. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2005. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-22034-8.
- [33] **MIL-HDBK-217F**, *Reliability prediction of electronic equipment.*
- [34] **SN. 29500**, *Ausfallraten und Erwartungswerte von Bauelementen.* Siemens AG München.
- [35] **TR 62380**, *Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.*
- [36] **DIN EN. 61709**, *Elektrische Bauelemente - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung (IEC 61709:2011); Deutsche Fassung EN 61709:2011.*
- [37] **LIENIG, Jens** und **BRÜMMER, H.** *Elektronische Gerätetechnik. Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte.* Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-642-40961-5.
- [38] **JAKOB, Frank; KIMMELMANN, M.** und **BERTSCHE, B.** Methodik zur Auswahl von Raffungsmodellen für beschleunigte Versuche. *Konstruktion*, 11-12/2015, 86-90.
- [39] **JAKOB, Frank.** *Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung.* Stuttgart: Institut für Maschinenelemente, 2017. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. Bericht Nr. 174. ISBN 9783936100754.
- [40] **VISWANADHAM, Puligandla** und **SINGH, P.** *Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages.* Boston, MA: Springer US, 1998. ISBN 978-1-4613-7763-4.
- [41] **ESCOBAR, Luis A.** und **MEEKER, W.Q.** A Review of Accelerated Test Models [online]. *Statistical Science*, 2006, 21(4), 552-577. ISSN 0883-4237. DOI 10.1214/088342306000000321
- [42] **NELSON, Wayne B.** *Accelerated Testing. Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis.* Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2009. Wiley Series in Probability and Statistics. v.344. ISBN 9780471697367.

- [44] **ARRHENIUS, Svante.** Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren [online]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1889, 4(1), 226-248. ISSN 2196-7156. DOI 10.1515/zpch-1889-0416
- [45] **LAUBER, Rudolf** und **GÖHNER, P.** *Prozessautomatisierung 1. Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik.* Dritte, völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. ISBN 978-3-540-65318-9.
- [46] **DIN EN. 62628,** *Leitlinien zu Softwareaspekten der Zuverlässigkeit (IEC 62628:2012); Deutsche Fassung EN 62628:2012.*
- [47] **LAUBER, Rudolf** und **GÖHNER, P.** *Prozessautomatisierung 2. Modellierungskonzepte und Automatisierungsverfahren, Softwarewerkzeuge für den Automatisierungsingenieur, Vorgehensweise in den Projektphasen bei der Realisierung von Echtzeitsystemen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. ISBN 978-3-540-65319-6.
- [48] **HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE.** *Out of control. Why controls system go wrong and how to prevent failure.* 2. ed. Sudbury: HSE Books, 2003. HSG. 238. ISBN 978-0-7176-2192-7.
- [49] **VDI. VDI 2206,** *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.*
- [50] **ALBERS, Albert; DÜSER, T.; SANDER, O.; ROTH, C.** und **HENNING, J.** *X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme* [online]. *ATZelektronik*, 2010, 5(5), 60-65. ISSN 1862-1791. DOI 10.1007/BF03224034
- [51] **PHAM, Hoang.** *System software reliability.* London: Springer-Verlag London Limited, 2007. Springer series in reliability engineering. ISBN 1-85233-950-0.
- [52] **PANDEY, Ajeet K.** und **GOYAL, N.K.** *Early Software Reliability Prediction.* India: Springer India, 2013. 303. ISBN 978-81-322-1175-4.

-
- [53] **BELLI, Fevzi; GROCHTMANN, M.** und **JACK, O.** Erprobte Modelle zur Quantifizierung der Software-Zuverlässigkeit [online]. *Informatik-Spektrum*, 1998, 21(3), 131-140. ISSN 0170-6012. DOI 10.1007/s002870050094
- [54] **YAMADA, Shigeru.** *Software Reliability Modeling*. Tokyo: Springer Japan, 2014. ISBN 978-4-431-54564-4.
- [55] **TIPLER, Paul A.; MOSCA, G.** und **WAGNER, J.** *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Aufl. 2015. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-642-54166-7.
- [56] **FISHER, Ronald A.** *The Design of Experiments*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1935.
- [57] **SIEBERTZ, Karl; VAN BEBBER, D.** und **HOCHKIRCHEN, T.** *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: Springer, 2010. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-05492-1.
- [58] **KLEPPMANN, Wilhelm.** *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 7., aktualisierte und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser, 2011. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 978-3-446-42774-7.
- [59] **GÄNG, Jochen.** *Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen*. Zugl.: Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2011. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, 2012. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. 136.
- [60] **STEWART, Donald V.** The design structure system [online]. A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1981, EM-28(3), 71-74. ISSN 0018-9391. DOI 10.1109/TEM.1981.6448589
- [61] **EPPINGER, Steven D.** und **BROWNING, T.R.** *Design structure matrix methods and applications*. Cambridge Mass. u.a.: MIT Press, 2012. Engineering systems. ISBN 978-0-262-01752-7.

-
- [62] **MÜLLER, Frank; GRÖBER, J.; RIEKER, T.; ZEILER, P.** und **BERTSCHE, B.** Development-based Reliability Modelling and Analysis with Petri Nets considering Interactions. In: *Proc. of European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017)*.
- [63] **REIBNITZ, Ute** von. *Szenario-Technik*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1992. ISBN 978-3-409-23431-3.
- [64] **BIROLINI, Alessandro**. *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. ISBN 978-3-662-09609-3.
- [65] **PETRI, Carl A.** *Kommunikation mit Automaten*. Zugl.: Bonner Diss. Als Ms. gedr. Bonn: Rheinisch-Westfälisches Institut f. instrumentelle Mathematik an d. Univ, 1962. Schriften des Rheinisch-Westfälischen Institutes für Instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn. Nr 2.
- [66] **REISIG, Wolfgang**. *Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2010. ISBN 978-3-8348-1290-2.
- [67] **POZSGAI, Peter**. *Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2006. Stuttgart: IMA, 2006. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. Bericht Nr. 118. ISBN 3936100195.
- [68] **TROST, Monika**. *Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2008. Stuttgart: IMA, 2008. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. Bericht Nr. 128. ISBN 3936100292.
- [69] **GIRAULT, Claude** und **VALK, R.** *Petri Nets for Systems Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-642-07447-9.
- [70] **JENSEN, Kurt**. *Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Volume 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. Monographs in Theoretical Computer Science An EATCS Series. ISBN 978-3-662-03241-1.

-
- [71] **KÖHLER, Michael; JENNE, S.; PÖTTER, K. und ZENNER, H.** *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-13163-9.
- [72] **MONTGOMERY, Douglas C.** *Design and analysis of experiments*. Eighth edition. Hoboken NJ: John Wiley & Sons Inc, 2013. ISBN 9781118146927.
- [73] **RELIASOFT CORPORATION.** *Experiment Design & Analysis Reference* [online] [Zugriff am: 2. Mai 2020]. Verfügbar unter: http://reliawiki.org/index.php/Experiment_Design_and_Analysis_Reference
- [74] **WU, Chien-Fu J. und HAMADA, M.S.** *Experiments. Planning, Analysis, and Optimization*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-471-69946-0.
- [75] **GENSCHEL, Ulrike und MEEKER, W.Q.** A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation [online]. *Quality Engineering*, 2010, 22(4), 236-255. ISSN 0898-2112. DOI 10.1080/08982112.2010.503447
- [76] **GUO, Huairui und METTAS, A.** Design of Experiments and Data Analysis. In: *RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium*, 2012.
- [77] **JÄGER, Patrick.** *Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007. Stuttgart: IMA, 2007. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. Bericht Nr. 121. ISBN 3936100225.
- [78] **HABCHI, Georges und BARTHOD, C.** An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application [online]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 155, 236-254. ISSN 09518320. DOI 10.1016/j.ress.2016.06.013
- [79] **YANG, Guangbin.** *Life cycle reliability engineering*. Hoboken N.J.: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0471715298.

- [80] **GRÖBER, Jan; GAUCHEL, W.; ZEILER, P.** und **BERTSCHE, B.** Anpassung bestehender Zuverlässigkeitsmethoden für eine entwicklungsbegleitende Ermittlung eines Lebensdauermodells. In: H. BINZ, B. BERTSCHE, D. ROTH und W. BAUER, Hg. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017. Produktentwicklung im disruptiven Umfeld*. Stuttgart, 2017.
- [81] **YANG, Guangbin.** Accelerated life tests at higher usage rates [online]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(1), 53-57. ISSN 00189529. DOI 10.1109/TR.2004.841730
- [82] **YANG, Guangbin** und **ZAGHATI, Z.** Accelerated Life Tests at Higher Usage Rates: A Case Study. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006*, 2006.
- [83] **NELSON, Wayne B.** *Applied Life Data Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2004. Wiley Series in Probability and Statistics. v.577. ISBN 0-471-64462-5.
- [84] **BAI, D. S.** und **YUN, H.J.** Accelerated life tests for products of unequal size [online]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1996, 45(4), 611-618. ISSN 00189529. DOI 10.1109/24.556583
- [85] **STOHRER, Matthias; LUCAN, K.** und **BERTSCHE, B.** Planung eines Zuverlässigkeits-DoE im Spannungsfeld zwischen Test-Design und Erfolgswahrscheinlichkeit. In: *VDI-Berichte Nr. 2307*, 2017, S. 269-280.
- [86] **DAZER, Martin; STOHRER, M.; KEMMLER, S.** und **BERTSCHE, B.** Planning of reliability life tests within the accuracy, time and cost triangle. In: *2016 IEEE Accelerated Stress Testing & Reliability Conference (ASTR)*, S. 1-9.
- [87] **GRÖBER, Jan; MÜLLER, F.; GAUCHEL, W.; ZEILER, P.** und **BERTSCHE, B.** Extended Reliability Analysis of Mechatronic Systems based on Information Obtained by Design of Experiments. In: *Proc. of European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017)*.

- [88] **MATINNEJAD, Reza; NEJATI, S.; BRIAND, L.; BRUCKMANN, T.** und **POULL, C.** Search-based automated testing of continuous controllers [online]. Framework, tool support, and case studies. *Information and Software Technology*, 2015, 57, 705-722. ISSN 09505849. DOI 10.1016/j.infsof.2014.05.007
- [89] **GRÜNFELDER, Stephan.** *Software-Test für Embedded Systems. Ein Praxishandbuch für Entwickler, Tester und technische Projektleiter.* 2., aktualisierte Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2017. ISBN 978-3-96088-148-3.
- [90] **ISO. 26262-6:2018(E),** *Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit - Teil 6: Produktentwicklung auf Softwareebene.*
- [91] **LIGGESMEYER, Peter.** *Software-Qualität. Testen, Analysieren und Verifizieren von Software.* 2. Aufl. s.l.: Spektrum Akademischer Verlag, 2009. ISBN 978-3-8274-2056-5.
- [92] **HOFFMANN, Dirk W.** *Software-Qualität.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-35699-5.
- [93] **DIN ISO/IEC. 15504-4,** *Informationstechnik — Prozess-Assessment — Teil 5: Beispiel für ein Prozess-Assessmentmodell.*
- [94] **VDA QMC WORKING GROUP 13 / AUTOMOTIVE SIG.** *Automotive SPICE Process Assessment / Reference Model* [online] [Zugriff am: 16. Juni 2019]. Verfügbar unter: <http://www.automotivespice.com/download/>
- [95] **WITTE, Frank.** *Metriken für das Testreporting.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-19844-2.
- [96] **TSAI, Wei-Tek** und **QI, G.** *Combinatorial Testing in Cloud Computing.* Singapore: Springer Singapore, 2017. ISBN 978-981-10-4480-9.
- [97] **POPOV, Valentin L.** *Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik.* 2., überarb. Aufl. Heidelberg u.a.: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-13301-5.
- [98] **DIN EN. 60068-1,** *Umgebungseinflüsse – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden.*

- [99] **VDI. 4005 Blatt1**, *Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse.*
- [100] **ANJUM, Mohd.; HAQUE, M.A.** und **AHMAD, N.** Analysis and Ranking of Software Reliability Models Based on Weighted Criteria Value [online]. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2013, 5(2), 1-14. ISSN 20749007. DOI 10.5815/ijitcs.2013.02.01

A. Anhang

A.1 Mögliche vollfaktorielle Versuchspläne

Tabelle A. 1: Praktikabel umsetzbare vollfaktorielle Versuchspläne mit den folgenden Auswahlkriterien: Ganzzahliges Vielfaches halber Inseln bei Randbedingungen A bis C, Gesamtzahl an Versuchen größer 100 und kleiner 250

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Faktor F	Replikationen	Basisversuch	Gesamtzahl an Versuchen	Inseln je Randbedingung A	Inseln je Randbedingung B	Inseln je Randbedingung C
1a	3	3	2	2	1	1	4	36	144	1	3	1
1b	3	3	2	2	1	2	2	72	144	1	3	1
1c	3	3	2	2	2	1	2	72	144	1	3	0,5
1d	3	3	2	2	2	2	1	144	144	1	3	0,5
2a	4	3	2	2	1	1	4	48	192	1	4	1
2b	4	3	2	2	1	2	2	96	192	1	4	1
2c	4	3	2	2	2	1	2	96	192	1	4	0,5
2d	4	3	2	2	2	2	1	192	192	1	4	0,5
3a	5	3	2	2	1	1	4	60	240	1	5	1
3b	5	3	2	2	1	2	2	120	240	1	5	1
3c	5	3	2	2	2	1	2	120	240	1	5	0,5
3d	5	3	2	2	2	2	1	240	240	1	5	0,5
4a	3	5	2	2	1	1	4	60	240	1	3	1
4b	3	5	2	2	1	2	2	120	240	1	3	1
4c	3	5	2	2	2	1	2	120	240	1	3	0,5
4d	3	5	2	2	2	2	1	240	240	1	3	0,5
5a	5	3	2	2	1	1	2	60	120	0,5	2,5	0,5
5b	5	3	2	2	1	2	1	120	120	0,5	2,5	0,5
6a	6	3	2	2	1	1	2	72	144	0,5	3	0,5
6b	6	3	2	2	1	2	1	144	144	0,5	3	0,5

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Faktor F	Replikationen	Basisversuch	Gesamtzahl an Versuchen	Inseln je Randbedingung A	Inseln je Randbedingung B	Inseln je Randbedingung C
7a	3	5	2	2	1	1	2	60	120	0,5	1,5	0,5
7b	3	5	2	2	1	2	1	120	120	0,5	1,5	0,5
8a	4	5	2	2	1	1	2	80	160	0,5	2	0,5
8b	4	5	2	2	1	2	1	160	160	0,5	2	0,5
9a	5	5	2	2	1	1	2	100	200	0,5	2,5	0,5
9b	5	5	2	2	1	2	1	200	200	0,5	2,5	0,5
10a	6	5	2	2	1	1	2	120	240	0,5	3	0,5
10b	6	5	2	2	1	2	1	240	240	0,5	3	0,5
11a	2	1	2	2	1	1	16	8	128	4	8	4
11b	2	1	2	2	1	2	8	16	128	4	8	4
11c	2	1	2	2	2	1	8	16	128	4	8	2
11d	2	1	2	2	2	2	4	32	128	4	8	2
12a	2	1	2	2	1	1	20	8	160	5	10	5
12b	2	1	2	2	1	2	10	16	160	5	10	5
13a	2	1	2	2	1	1	24	8	192	6	12	6
13b	2	1	2	2	1	2	12	16	192	6	12	6
13c	2	1	2	2	2	1	12	16	192	6	12	3
13d	2	1	2	2	2	2	6	32	192	6	12	3
14a	2	1	2	2	1	1	28	8	224	7	14	7
15a	2	2	2	2	1	1	8	16	128	2	4	2
15b	2	2	2	2	1	2	4	32	128	2	4	2
15c	2	2	2	2	2	1	4	32	128	2	4	1
15d	2	2	2	2	2	2	2	64	128	2	4	1
16a	2	2	2	2	1	1	12	16	192	3	6	3
16b	2	2	2	2	1	2	6	32	192	3	6	3
17a	2	3	2	2	1	1	8	24	192	2	4	2
17b	2	3	2	2	1	2	4	48	192	2	4	2
17c	2	3	2	2	2	1	4	48	192	2	4	1
17d	2	3	2	2	2	2	2	96	192	2	4	1

Tabelle A. 2: Auf Basis des fiktiven Lebensdauermodells generierte Zufallsdaten

Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Ausfallzeitpunkt (x · Mio. SP.)	Intervall letzte Messung (x · Mio. SP.)	Intervall Ausfall (x · Mio. SP.)
1	1	1	-1	4,26	4	6
1	1	1	-1	2,03	2	2,4
1	1	1	-1	7,59	6	8
1	1	1	-1	13,69	12	16
0	-1	1	-1	152,17	120	160
0	-1	1	-1	77,18	60	80
0	-1	1	-1	43,88	40	60
0	-1	1	-1	88,75	80	100
-1	0	-1	1	10,79	10	12
-1	0	-1	1	60,67	60	80
-1	0	-1	1	146,69	120	160
-1	0	-1	1	41,26	40	60
0	1	-1	1	98,20	80	100
0	1	-1	1	15,88	12	16
0	1	-1	1	80,49	80	100
0	1	-1	1	4,71	4	6
1	1	1	1	9,76	8	10
1	1	1	1	18,32	16	20
1	1	1	1	2,63	2,4	3,2
1	1	1	1	1,57	1,4	1,6
1	-1	-1	1	10,75	10	12
1	-1	-1	1	16,01	16	20
1	-1	-1	1	111,33	100	120
1	-1	-1	1	6,54	6	8
0	-1	-1	-1	216,45	200	240
0	-1	-1	-1	45,29	40	60
0	-1	-1	-1	29,41	28	32
0	-1	-1	-1	40,57	40	60
-1	1	1	-1	1061,79	800	4000
-1	1	1	-1	39,06	32	40
-1	1	1	-1	503,20	400	800
-1	1	1	-1	90,64	80	100
-1	0	1	-1	48,48	40	60
-1	0	1	-1	206,70	200	240
-1	0	1	-1	102,30	100	120
-1	0	1	-1	79,95	60	80
1	-1	1	-1	83,32	80	100
1	-1	1	-1	26,39	24	28
1	-1	1	-1	592,72	400	800
1	-1	1	-1	52,62	40	60
-1	-1	1	-1	252,72	240	280
-1	-1	1	-1	325,24	320	400
-1	-1	1	-1	31,32	28	32

Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Ausfallzeitpunkt (x · Mio. SP.)	Intervall letzte Messung (x · Mio. SP.)	Intervall Ausfall (x · Mio. SP.)
-1	-1	1	-1	561,87	400	800
-1	0	-1	-1	277,61	240	280
-1	0	-1	-1	34,75	32	40
-1	0	-1	-1	124,31	120	160
-1	0	-1	-1	28,42	28	32
-1	1	-1	-1	365,30	320	400
-1	1	-1	-1	80,83	80	100
-1	1	-1	-1	248,62	240	280
-1	1	-1	-1	89,60	80	100
0	0	-1	1	37,19	32	40
0	0	-1	1	14,90	12	16
0	0	-1	1	15,54	12	16
0	0	-1	1	21,51	20	24
0	-1	1	1	610,97	400	800
0	-1	1	1	94,53	80	100
0	-1	1	1	65,26	60	80
0	-1	1	1	64,32	60	80
0	-1	-1	1	545,82	400	800
0	-1	-1	1	53,15	40	60
0	-1	-1	1	67,38	60	80
0	-1	-1	1	14,70	12	16
0	0	1	-1	49,99	40	60
0	0	1	-1	14,71	12	16
0	0	1	-1	98,43	80	100
0	0	1	-1	22,90	20	24
1	1	-1	-1	140,05	120	160
1	1	-1	-1	88,14	80	100
1	1	-1	-1	25,15	24	28
1	1	-1	-1	17,72	16	20
1	0	1	-1	5,67	4	6
1	0	1	-1	81,86	80	100
1	0	1	-1	82,60	80	100
1	0	1	-1	26,18	24	28
0	1	1	-1	487,41	400	800
0	1	1	-1	79,62	60	80
0	1	1	-1	80,37	80	100
0	1	1	-1	40,13	40	60
0	0	1	1	63,86	60	80
0	0	1	1	10,41	10	12
0	0	1	1	22,62	20	24
0	0	1	1	7,69	6	8
1	0	-1	1	3,92	3,2	4
1	0	-1	1	1,89	1,6	2
1	0	-1	1	115,81	100	120
1	0	-1	1	1,50	1,4	1,6
1	-1	-1	-1	742,89	400	800

Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Ausfallzeitpunkt (x · Mio. SP.)	Intervall letzte Messung (x · Mio. SP.)	Intervall Ausfall (x · Mio. SP.)
1	-1	-1	-1	110,07	100	120
1	-1	-1	-1	3,48	3,2	4
1	-1	-1	-1	39,48	32	40
-1	-1	1	1	137,83	120	160
-1	-1	1	1	20,87	20	24
-1	-1	1	1	123,86	120	160
-1	-1	1	1	13,72	12	16
0	1	1	1	21,80	20	24
0	1	1	1	120,63	120	160
0	1	1	1	30,37	28	32
0	1	1	1	85,72	80	100
-1	1	-1	1	44,83	40	60
-1	1	-1	1	18,32	16	20
-1	1	-1	1	76,75	60	80
-1	1	-1	1	44,20	40	60
1	1	-1	1	174,24	160	200
1	1	-1	1	5,06	4	6
1	1	-1	1	15,23	12	16
1	1	-1	1	2,34	2	2,4
1	0	1	1	103,20	100	120
1	0	1	1	32,36	32	40
1	0	1	1	80,22	80	100
1	0	1	1	10,81	10	12
-1	-1	-1	-1	149,12	120	160
-1	-1	-1	-1	414,02	400	800
-1	-1	-1	-1	61,09	60	80
-1	-1	-1	-1	171,97	160	200
0	0	-1	-1	10,05	10	12
0	0	-1	-1	38,19	32	40
0	0	-1	-1	47,03	40	60
0	0	-1	-1	23,44	20	24
-1	1	1	1	6,12	6	8
-1	1	1	1	57,36	40	60
-1	1	1	1	54,19	40	60
-1	1	1	1	85,73	80	100
-1	-1	-1	1	137,90	120	160
-1	-1	-1	1	15,10	12	16
-1	-1	-1	1	59,09	40	60
-1	-1	-1	1	51,33	40	60
1	0	-1	-1	145,67	120	160
1	0	-1	-1	105,00	100	120
1	0	-1	-1	13,51	12	16
1	0	-1	-1	3,92	3,2	4
1	-1	1	1	8,76	8	10
1	-1	1	1	76,02	60	80
1	-1	1	1	23,00	20	24

Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Ausfallzeitpunkt (x · Mio. SP.)	Intervall letzte Messung (x · Mio. SP.)	Intervall Ausfall (x · Mio. SP.)
1	-1	1	1	18,17	16	20
0	1	-1	-1	20,66	20	24
0	1	-1	-1	22,52	20	24
0	1	-1	-1	83,11	80	100
0	1	-1	-1	118,40	100	120
-1	0	1	1	80,80	80	100
-1	0	1	1	54,61	40	60
-1	0	1	1	178,95	160	200
-1	0	1	1	35,44	32	40
0	0	0	0	36,41	32	40
0	0	0	0	11,46	10	12
0	0	0	0	47,23	40	60
0	0	0	0	31,10	28	32
0	0	0	0	10,92	10	12
0	0	0	0	72,28	60	80
0	0	0	0	51,33	40	60
0	0	0	0	440,56	400	800

A.2 Versuchspunkte der statistischen Versuchsplanung

Tabelle A. 3: Ausgewählter Versuchsplan

V. Nr.	A	B	C	D
32	-1	1	1	1
33	0	1	-1	-1
34	0	1	-1	1
35	0	1	1	-1
36	0	1	1	1
37	1	1	-1	-1
38	1	1	-1	1
39	1	1	1	-1
40	1	1	1	1

V. Nr.	A	B	C	D
17	-1	-1	-1	-1
18	-1	-1	-1	1
19	-1	-1	1	-1
20	-1	-1	1	1
21	0	-1	-1	-1
22	0	-1	-1	1
23	0	-1	1	-1
24	0	-1	1	1
25	1	-1	-1	-1
26	1	-1	-1	1
27	1	-1	1	-1
28	1	-1	1	1
29	-1	1	-1	-1
30	-1	1	-1	1
31	-1	1	1	-1

Ventil Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D
1	-1	0	-1	-1
2	-1	0	-1	1
3	-1	0	1	-1
4	-1	0	1	1
5	0	0	-1	-1
6	0	0	-1	1
7	0	0	1	-1
8	0	0	1	1
9	1	0	-1	-1
10	1	0	-1	1
11	1	0	1	-1
12	1	0	1	1
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0

A.3 Ausfallzeiten durch Leckage am unteren Lippendichtring

Tabelle A. 4 zeigt eine Übersicht der Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone. Es sind die folgenden Informationen dargestellt:

- V. #: Ventilnummer.
- Messung: Durchgeführte Messung zur Ermittlung der Leckage der einzelnen Boosterpatronen.
- A...D: Faktor A...D der statistischen Versuchsplanung.
- F/S: Zustand des Prüflings. Ausgefallen (F) oder Suspendiert (S).
- SP. funktionsfähig: Normierte Schaltspiele bei der letzten durchgeführten Messung vor einem Ausfall ($x \cdot \text{Mio. SP.}$).
- SP. Ausfall: Normierte Schaltspiele bei Detektion eines Ausfalls ($x \cdot \text{Mio. SP.}$).
- L. funktionsfähig: Normierte Leckage bei der letzten durchgeführten Messung vor einem Ausfall.
- L. Ausfall: Normierte Leckage bei Detektion eines Ausfalls. Bei einer Leckage ≥ 1 gilt der Prüfling als ausgefallen.
- SP. Ausfall interp.: Linear interpolierte Schaltspiele bei Ausfall ($x \cdot \text{Mio. SP.}$).

Tabelle A. 4: Ermittelte Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone

V. #	Messung	A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
1	IN 2	-1	0	-1	-1	F	0,8	1	0,59	1,46	0,89
1	IN 4	-1	0	-1	-1	F	0,08	0,2	0,85	1,30	0,12
1	IN 1 A. 1	-1	0	-1	-1	F	0,4	0,6	0,94	1,51	0,42
1	IN 1 A. 2	-1	0	-1	-1	F	0,8	1	0,86	1,41	0,85
2	IN 2	-1	0	-1	1	S	16	-	0,04	-	-
2	IN 4	-1	0	-1	1	F	6	8	0,93	1,30	6,39
2	IN 1 A. 1	-1	0	-1	1	F	6	8	0,91	1,04	7,43
2	IN 1 A. 2	-1	0	-1	1	S	16	-	0,90	-	-
3	IN 2	-1	0	1	-1	S	32	-	0,28	-	-
3	IN 4	-1	0	1	-1	F	1,6	2	0,76	1,01	1,99
3	IN 1 A. 1	-1	0	1	-1	F	1	1,2	0,84	1,12	1,11

V. #	Messung	A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall in-terp.
3	IN 1 A. 2	-1	0	1	-1	F	1,4	1,6	0,98	1,10	1,43
4	IN 2	-1	0	1	1	F	0,4	0,6	0,80	1,13	0,52
4	IN 4	-1	0	1	1	S	32	-	0,01	-	-
4	IN 1 A. 1	-1	0	1	1	S	32	-	0,05	-	-
4	IN 1 A. 2	-1	0	1	1	S	32	-	0,03	-	-
5	IN 2	0	0	-1	-1	F	0,08	0,2	0,79	1,13	0,15
5	IN 4	0	0	-1	-1	F	1	1,2	0,96	1,52	1,02
5	IN 1 A. 1	0	0	-1	-1	F	0,2	0,4	0,88	1,10	0,31
5	IN 1 A. 2	0	0	-1	-1	F	1	1,2	0,91	1,13	1,08
6	IN 2	0	0	-1	1	S	16	-	0,19	-	-
6	IN 4	0	0	-1	1	F	0,4	0,6	0,81	1,01	0,59
6	IN 1 A. 1	0	0	-1	1	F	0,0008	0,08	0,03	1,15	0,07
6	IN 1 A. 2	0	0	-1	1	F	1	1,2	0,78	1,14	1,12
7	IN 2	0	0	1	-1	S	40	-	0,06	-	-
7	IN 4	0	0	1	-1	S	40	-	0,07	-	-
7	IN 1 A. 1	0	0	1	-1	S	40	-	0,21	-	-
7	IN 1 A. 2	0	0	1	-1	S	40	-	0,13	-	-
8	IN 2	0	0	1	1	F	0,2	0,4	0,76	1,05	0,37
8	IN 4	0	0	1	1	F	0,0008	0,08	0,01	2,23	0,04
8	IN 1 A. 1	0	0	1	1	F	0,0008	0,08	0,01	1,35	0,06
8	IN 1 A. 2	0	0	1	1	F	0,08	0,2	0,86	1,06	0,17
9	IN 2	1	0	-1	-1	S	20	-	0,06	-	-
9	IN 4	1	0	-1	-1	S	20	-	0,17	-	-
9	IN 1 A. 1	1	0	-1	-1	F	0,2	0,4	0,27	1,00	0,40
9	IN 1 A. 2	1	0	-1	-1	S	20	-	0,02	-	-
10	IN 2	1	0	-1	1	S	20	-	0,10	-	-
10	IN 4	1	0	-1	1	S	20	-	0,22	-	-
10	IN 1 A. 1	1	0	-1	1	S	20	-	0,44	-	-
10	IN 1 A. 2	1	0	-1	1	S	20	-	0,28	-	-
11	IN 2	1	0	1	-1	F	1,4	1,6	0,78	1,27	1,49
11	IN 4	1	0	1	-1	F	1,2	1,4	0,85	1,19	1,29
11	IN 1 A. 1	1	0	1	-1	F	0,6	0,8	0,50	2,30	0,66
11	IN 1 A. 2	1	0	1	-1	F	0,6	0,8	0,32	1,46	0,72
12	IN 2	1	0	1	1	F	16	20	0,24	14,45	16,21
12	IN 4	1	0	1	1	F	0,0008	0,08	0,06	1,02	0,08
12	IN 1 A. 1	1	0	1	1	S	32	-	0,88	-	-
12	IN 1 A. 2	1	0	1	1	S	32	-	0,56	-	-
13	IN 2	0	0	0	0	F	0,08	0,2	0,48	1,09	0,18
13	IN 4	0	0	0	0	F	0,2	0,4	1,00	1,04	0,21
13	IN 1 A. 1	0	0	0	0	F	0,2	0,4	0,99	1,06	0,22
13	IN 1 A. 2	0	0	0	0	F	0,8	1	0,97	1,12	0,84
14	IN 2	0	0	0	0	S	32	-	0,39	-	-
14	IN 4	0	0	0	0	F	0,2	0,4	0,78	1,03	0,37
14	IN 1 A. 1	0	0	0	0	F	0,2	0,4	0,86	1,06	0,34
14	IN 1 A. 2	0	0	0	0	S	32	-	0,23	-	-
15	IN 2	0	0	0	0	F	0,2	0,4	0,91	1,05	0,32

V. #	Messung	A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
15	IN 4	0	0	0	0	S	32	-	0,23	-	-
15	IN 1 A. 1	0	0	0	0	F	0,6	0,8	0,96	1,52	0,61
15	IN 1 A. 2	0	0	0	0	S	32	-	0,17	-	-
16	IN 2	0	0	0	0	S	32	-	0,09	-	-
16	IN 4	0	0	0	0	F	0,2	0,4	0,77	1,03	0,38
16	IN 1 A. 1	0	0	0	0	F	0,6	0,8	0,81	1,73	0,64
16	IN 1 A. 2	0	0	0	0	F	0,6	0,8	0,52	1,10	0,77
17	IN 2	-1	-1	-1	-1	S	12	-	0,28	-	-
17	IN 4	-1	-1	-1	-1	S	12	-	0,05	-	-
17	IN 1 A. 1	-1	-1	-1	-1	S	12	-	0,02	-	-
17	IN 1 A. 2	-1	-1	-1	-1	S	12	-	0,02	-	-
18	IN 2	-1	-1	-1	1	F	0,2	0,4	0,69	1,13	0,34
18	IN 4	-1	-1	-1	1	S	12	-	0,06	-	-
18	IN 1 A. 1	-1	-1	-1	1	F	2	2,4	0,86	3,16	2,02
18	IN 1 A. 2	-1	-1	-1	1	F	2	2,4	0,55	2,01	2,12
19	IN 2	-1	-1	1	-1	S	24	-	0,07	-	-
19	IN 4	-1	-1	1	-1	S	24	-	0,35	-	-
19	IN 1 A. 1	-1	-1	1	-1	F	2	2,4	0,54	1,51	2,19
19	IN 1 A. 2	-1	-1	1	-1	S	24	-	0,34	-	-
20	IN 2	-1	-1	1	1	F	0,4	0,6	0,81	1,20	0,50
20	IN 4	-1	-1	1	1	F	0,08	0,2	0,50	1,02	0,19
20	IN 1 A. 1	-1	-1	1	1	F	0,8	1	0,86	1,08	0,92
20	IN 1 A. 2	-1	-1	1	1	S	20	-	0,05	-	-
21	IN 2	0	-1	-1	-1	S	12	-	0,35	-	-
21	IN 4	0	-1	-1	-1	S	12	-	0,11	-	-
21	IN 1 A. 1	0	-1	-1	-1	S	12	-	0,04	-	-
21	IN 1 A. 2	0	-1	-1	-1	S	12	-	0,03	-	-
22	IN 2	0	-1	-1	1	F	0,4	0,6	0,63	2,48	0,44
22	IN 4	0	-1	-1	1	F	0,08	0,2	0,32	1,39	0,16
22	IN 1 A. 1	0	-1	-1	1	F	0,08	0,2	0,98	1,81	0,08
22	IN 1 A. 2	0	-1	-1	1	F	0,08	0,2	0,62	1,15	0,17
23	IN 2	0	-1	1	-1	S	24	-	0,12	-	24,00
23	IN 4	0	-1	1	-1	S	24	-	0,13	-	24,00
23	IN 1 A. 1	0	-1	1	-1	S	24	-	0,39	-	24,00
23	IN 1 A. 2	0	-1	1	-1	S	24	-	0,25	-	24,00
24	IN 2	0	-1	1	1	F	0,4	0,6	0,62	1,71	0,47
24	IN 4	0	-1	1	1	F	0,08	0,2	0,26	1,13	0,18
24	IN 1 A. 1	0	-1	1	1	F	0,08	0,2	0,37	1,09	0,19
24	IN 1 A. 2	0	-1	1	1	F	0,4	0,6	0,88	1,22	0,47
25	IN 2	1	-1	-1	-1	S	12	-	0,31	-	-
25	IN 4	1	-1	-1	-1	S	12	-	0,42	-	-
25	IN 1 A. 1	1	-1	-1	-1	F	0,8	1	0,90	1,06	0,93
25	IN 1 A. 2	1	-1	-1	-1	S	12	-	0,23	-	-
26	IN 2	1	-1	-1	1	S	12	-	0,33	-	-
26	IN 4	1	-1	-1	1	S	12	-	0,50	-	-
26	IN 1 A. 1	1	-1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,05	1,60	0,05

V. #	Messung	A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall in-terp.
26	IN 1 A. 2	1	-1	-1	1	S	12	-	0,38	-	-
27	IN 2	1	-1	1	-1	F	1,4	1,6	0,94	1,06	1,50
27	IN 4	1	-1	1	-1	S	20	-	0,43	-	-
27	IN 1 A. 1	1	-1	1	-1	S	20	-	0,31	-	-
27	IN 1 A. 2	1	-1	1	-1	S	20	-	0,20	-	-
28	IN 2	1	-1	1	1	F	10	12	0,61	1,70	10,71
28	IN 4	1	-1	1	1	F	8	10	0,60	1,38	9,02
28	IN 1 A. 1	1	-1	1	1	S	16	-	0,32	-	-
28	IN 1 A. 2	1	-1	1	1	S	16	-	0,20	-	-
29	IN 2	-1	1	-1	-1	F	8	10	0,64	1,43	8,90
29	IN 4	-1	1	-1	-1	S	12	-	0,65	-	-
29	IN 1 A. 1	-1	1	-1	-1	S	12	-	0,71	-	-
29	IN 1 A. 2	-1	1	-1	-1	S	12	-	0,45	-	-
30	IN 2	-1	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,05	4,02	0,02
30	IN 4	-1	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,10	1,06	0,08
30	IN 1 A. 1	-1	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,06	2,33	0,03
30	IN 1 A. 2	-1	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,04	1,49	0,05
31	IN 2	-1	1	1	-1	S	28	-	0,78	-	-
31	IN 4	-1	1	1	-1	F	6	8	0,98	1,08	6,33
31	IN 1 A. 1	-1	1	1	-1	S	28	-	0,55	-	-
31	IN 1 A. 2	-1	1	1	-1	S	28	-	0,35	-	-
32	IN 2	-1	1	1	1	F	0,08	0,2	0,27	1,38	0,16
32	IN 4	-1	1	1	1	F	0,08	0,2	0,34	1,48	0,15
32	IN 1 A. 1	-1	1	1	1	F	0,08	0,2	0,55	1,41	0,14
32	IN 1 A. 2	-1	1	1	1	F	0,2	0,4	0,89	1,35	0,25
33	IN 2	0	1	-1	-1	F	10	12	0,54	1,18	11,43
33	IN 4	0	1	-1	-1	S	12	-	0,81	-	-
33	IN 1 A. 1	0	1	-1	-1	F	4	6	0,35	1,10	5,72
33	IN 1 A. 2	0	1	-1	-1	S	12	-	0,97	-	-
34	IN 2	0	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,02	2,02	0,04
34	IN 4	0	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,02	2,32	0,03
34	IN 1 A. 1	0	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,03	3,15	0,03
34	IN 1 A. 2	0	1	-1	1	F	0,0008	0,08	0,02	2,01	0,04
35	IN 2	0	1	1	-1	S	28	-	0,55	-	-
35	IN 4	0	1	1	-1	S	28	-	0,53	-	-
35	IN 1 A. 1	0	1	1	-1	S	28	-	0,47	-	-
35	IN 1 A. 2	0	1	1	-1	S	28	-	0,30	-	-
36	IN 2	0	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,01	1,98	0,04
36	IN 4	0	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,07	2,66	0,03
36	IN 1 A. 1	0	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,04	4,44	0,02
36	IN 1 A. 2	0	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,03	2,83	0,03
37	IN 2	1	1	-1	-1	F	6	8	0,88	1,14	6,92
37	IN 4	1	1	-1	-1	S	12	-	0,90	-	-
37	IN 1 A. 1	1	1	-1	-1	F	8	10	0,71	1,10	9,47
37	IN 1 A. 2	1	1	-1	-1	S	12	-	0,95	-	-
38	IN 2	1	1	-1	1	S	12	-	0,49	-	-

V. #	Messung	A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
38	IN 4	1	1	-1	1	S	12	-	0,29	-	-
38	IN 1 A. 1	1	1	-1	1	S	12	-	0,08	-	-
38	IN 1 A. 2	1	1	-1	1	S	12	-	0,05	-	-
39	IN 2	1	1	1	-1	S	24	-	0,74	-	-
39	IN 4	1	1	1	-1	S	24	-	0,35	-	-
39	IN 1 A. 1	1	1	1	-1	S	24	-	0,30	-	-
39	IN 1 A. 2	1	1	1	-1	S	24	-	0,19	-	-
40	IN 2	1	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,03	1,08	0,07
40	IN 4	1	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,14	1,20	0,06
40	IN 1 A. 1	1	1	1	1	F	0,0008	0,08	0,06	1,12	0,07
40	IN 1 A. 2	1	1	1	1	F	1	1,2	0,89	1,28	1,06

Tabelle A. 5: Für statistische Auswertung aufbereitete Messdaten der Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone

A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall
-1	0	-1	-1	F	0,8944	0,8944
-1	0	-1	-1	F	0,12	0,12
-1	0	-1	-1	F	0,4208	0,4208
-1	0	-1	-1	F	0,8496	0,8496
-1	0	-1	1	S	1,6	1,6
-1	0	-1	1	S	1,6	1,6
-1	0	-1	1	S	1,6	1,6
-1	0	1	-1	S	1,6	1,6
-1	0	1	-1	S	1,6	1,6
-1	0	1	-1	F	1,1136	1,1136
-1	0	1	-1	F	1,4344	1,4344
-1	0	1	1	F	0,5216	0,5216
-1	0	1	1	S	0,6	0,6
-1	0	1	1	S	0,6	0,6
-1	0	1	1	S	0,6	0,6
0	0	-1	-1	F	0,1528	0,1528
0	0	-1	-1	F	1,0152	1,0152
0	0	-1	-1	F	0,3128	0,3128
0	0	-1	-1	F	1,0824	1,0824
0	0	-1	1	S	1,2	1,2
0	0	-1	1	F	0,592	0,592
0	0	-1	1	F	0,0008	0,0696
0	0	-1	1	F	1,1208	1,1208
0	0	1	-1	S	12	12
0	0	1	-1	S	12	12
0	0	1	-1	S	12	12

A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall
0	0	1	-1	S	12	12
0	0	1	1	F	0,3664	0,3664
0	0	1	1	F	0,0008	0,036
0	0	1	1	F	0,0008	0,0592
0	0	1	1	F	0,1656	0,1656
1	0	-1	-1	S	12	12
1	0	-1	-1	S	12	12
1	0	-1	-1	S	0,2	0,3992
1	0	-1	-1	S	12	12
1	0	-1	1	S	12	12
1	0	-1	1	S	12	12
1	0	-1	1	S	12	12
1	0	1	-1	F	1,4896	1,4896
1	0	1	-1	F	1,2872	1,2872
1	0	1	-1	F	0,656	0,656
1	0	1	-1	F	0,7192	0,7192
1	0	1	1	S	0,08	0,08
1	0	1	1	F	0,0008	0,0784
1	0	1	1	S	0,08	0,08
1	0	1	1	S	0,08	0,08
0	0	0	0	F	0,1832	0,1832
0	0	0	0	F	0,2104	0,2104
0	0	0	0	F	0,2184	0,2184
0	0	0	0	F	0,8448	0,8448
0	0	0	0	S	1	1
0	0	0	0	F	0,3736	0,3736
0	0	0	0	F	0,3432	0,3432
0	0	0	0	S	1	1
0	0	0	0	F	0,3232	0,3232
0	0	0	0	S	1	1
0	0	0	0	F	0,6136	0,6136
0	0	0	0	S	1	1
0	0	0	0	S	1	1
0	0	0	0	F	0,3768	0,3768
0	0	0	0	F	0,6408	0,6408
0	0	0	0	F	0,7656	0,7656
-1	-1	-1	-1	S	12	12
-1	-1	-1	-1	S	12	12
-1	-1	-1	-1	S	12	12
-1	-1	-1	-1	S	12	12
-1	-1	-1	1	F	0,3416	0,3416
-1	-1	-1	1	S	2,2	2,2
-1	-1	-1	1	S	2	2,024
-1	-1	-1	1	S	2	2,1232
-1	-1	1	-1	S	12	12
-1	-1	1	-1	S	12	12

A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall
-1	-1	1	-1	S	2	2,1896
-1	-1	1	-1	S	12	12
-1	-1	1	1	F	0,4976	0,4976
-1	-1	1	1	F	0,1944	0,1944
-1	-1	1	1	F	0,924	0,924
-1	-1	1	1	S	1	1
0	-1	-1	-1	S	12	12
0	-1	-1	-1	S	12	12
0	-1	-1	-1	S	12	12
0	-1	-1	-1	S	12	12
0	-1	-1	1	F	0,44	0,44
0	-1	-1	1	F	0,156	0,156
0	-1	-1	1	F	0,0832	0,0832
0	-1	-1	1	F	0,1664	0,1664
0	-1	1	-1	S	12	12
0	-1	1	-1	S	12	12
0	-1	1	-1	S	12	12
0	-1	1	-1	S	12	12
0	-1	1	1	F	0,4696	0,4696
0	-1	1	1	F	0,1824	0,1824
0	-1	1	1	F	0,1856	0,1856
0	-1	1	1	F	0,4728	0,4728
1	-1	-1	-1	S	12	12
1	-1	-1	-1	S	12	12
1	-1	-1	-1	S	0,8	0,928
1	-1	-1	-1	S	12	12
1	-1	-1	1	S	12	12
1	-1	-1	1	S	12	12
1	-1	-1	1	S	0,0008	0,0496
1	-1	-1	1	S	12	12
1	-1	1	-1	S	1,4	1,4992
1	-1	1	-1	S	12	12
1	-1	1	-1	S	12	12
1	-1	1	-1	S	12	12
1	-1	1	1	S	10	10,7088
1	-1	1	1	S	8	9,0232
1	-1	1	1	S	12	12
1	-1	1	1	S	12	12
-1	1	-1	-1	S	8	8,9008
-1	1	-1	-1	S	12	12
-1	1	-1	-1	S	12	12
-1	1	-1	-1	S	12	12
-1	1	-1	1	F	0,0008	0,02
-1	1	-1	1	F	0,0008	0,0752
-1	1	-1	1	F	0,0008	0,0336
-1	1	-1	1	F	0,0008	0,0536
-1	1	1	-1	S	12	12

A	B	C	D	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall
-1	1	1	-1	S	6	6,3304
-1	1	1	-1	S	12	12
-1	1	1	-1	S	12	12
-1	1	1	1	F	0,1584	0,1584
-1	1	1	1	F	0,1488	0,1488
-1	1	1	1	F	0,1432	0,1432
-1	1	1	1	F	0,2456	0,2456
0	1	-1	-1	S	10	11,4256
0	1	-1	-1	S	12	12
0	1	-1	-1	S	4	5,7208
0	1	-1	-1	S	12	12
0	1	-1	1	F	0,0008	0,0392
0	1	-1	1	F	0,0008	0,0344
0	1	-1	1	F	0,0008	0,0256
0	1	-1	1	F	0,0008	0,04
0	1	1	-1	S	12	12
0	1	1	-1	S	12	12
0	1	1	-1	S	12	12
0	1	1	-1	S	12	12
0	1	1	1	F	0,0008	0,0408
0	1	1	1	F	0,0008	0,0296
0	1	1	1	F	0,0008	0,0184
0	1	1	1	F	0,0008	0,028
1	1	-1	-1	S	6	6,9216
1	1	-1	-1	S	12	12
1	1	-1	-1	S	8	9,4704
1	1	-1	-1	S	12	12
1	1	-1	1	S	12	12
1	1	-1	1	S	12	12
1	1	-1	1	S	12	12
1	1	-1	1	S	12	12
1	1	1	-1	S	12	12
1	1	1	-1	S	12	12
1	1	1	-1	S	12	12
1	1	1	1	F	0,0008	0,0736
1	1	1	1	F	0,0008	0,0648
1	1	1	1	F	0,0008	0,0712
1	1	1	1	F	1,0576	1,0576

Tabelle A. 6: Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone bei Überprüfungsversuch 1 (A = 0,2; B = 0,345; C = 0,5 und D = 0,6)

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
41	IN 2	F	0,0200	0,0400	0,799	1,080	0,0344
41	IN 4	F	0,0200	0,0400	0,893	1,218	0,0264
41	IN 1 A. 1	F	0,0200	0,0400	0,765	1,089	0,0344
41	IN 1 A. 2	S	0,4753	-	0,300	-	-
42	IN 2	F	0,0008	0,0200	0,036	1,354	0,0152
42	IN 4	S	0,4753	-	0,448	-	-
42	IN 1 A. 1	F	0,0008	0,0200	0,021	1,177	0,0168
42	IN 1 A. 2	F	0,0200	0,0400	0,749	1,082	0,0352
43	IN 2	F	0,0008	0,0200	0,000	1,370	0,0152
43	IN 4	F	0,0400	0,0600	0,888	1,048	0,0536
43	IN 1 A. 1	F	0,0008	0,0200	0,050	1,181	0,0168
43	IN 1 A. 2	F	0,0400	0,0600	0,984	1,113	0,0424
44	IN 2	F	0,0400	0,0600	0,799	1,017	0,0584
44	IN 4	F	0,0600	0,0800	0,963	1,296	0,0624
44	IN 1 A. 1	F	0,0200	0,0400	0,917	1,072	0,0304
44	IN 1 A. 2	F	0,0600	0,0800	0,800	1,091	0,0736

Tabelle A. 7: Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone durch wechselnde Belastungen bei Überprüfungsversuch 2. Die Prüflinge Ventil 45 B4R sowie Ventil 51 B2P zeigten anderweitige Ausfälle auf und sind nicht Teil dieser Auswertung

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
45	IN 2	F	0,920	0,960	0,965	1,201	0,926
45	IN 1 A. 1	F	0,808	0,812	0,773	1,573	0,809
45	IN 1 A. 2	F	0,808	0,812	0,492	1,001	0,812
46	IN 2	F	0,818	0,820	0,658	1,088	0,819
46	IN 4	F	0,880	0,920	0,998	1,064	0,882
46	IN 1 A. 1	F	0,820	0,880	0,966	1,230	0,828
46	IN 1 A. 2	F	0,920	0,960	0,931	1,073	0,939
47	IN 2	F	0,812	0,818	0,796	1,342	0,814
47	IN 4	F	0,812	0,818	0,820	1,547	0,814
47	IN 1 A. 1	F	0,812	0,818	0,625	1,389	0,815
47	IN 1 A. 2	F	0,820	0,880	0,798	1,050	0,868
48	IN 2	F	0,818	0,820	0,984	1,297	0,818
48	IN 4	F	0,820	0,880	0,951	1,126	0,837
48	IN 1 A. 1	F	0,920	0,960	0,971	1,168	0,926
48	IN 1 A. 2	S	1,040	-	0,807	-	-
49	IN 2	F	0,820	0,880	0,864	1,109	0,854

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
49	IN 4	F	0,920	0,960	0,999	1,226	0,920
49	IN 1 A. 1	F	0,812	0,818	0,788	1,409	0,814
49	IN 1 A. 2	F	0,880	0,920	0,977	1,017	0,903
50	IN 2	F	0,820	0,880	0,825	1,251	0,845
50	IN 4	F	0,920	0,960	0,998	1,183	0,921
50	IN 1 A. 1	F	0,808	0,812	0,433	1,022	0,812
50	IN 1 A. 2	F	0,818	0,820	0,830	1,027	0,820
51	IN 2	F	0,880	0,920	0,985	1,209	0,882
51	IN 4	F	0,808	0,812	0,334	1,238	0,811

Tabelle A. 8: Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone bei Überprüfungsversuch 3, Verlauf 1

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
52	IN 2	S	0,160	-	0,393	-	-
52	IN 4	F	0,024	0,036	0,945	1,227	0,0263
53	IN 2	F	0,004	0,008	0,503	1,075	0,0074
53	IN 4	F	0,008	0,016	0,916	1,525	0,0091
54	IN 2	F	0,008	0,016	0,587	1,240	0,0130
54	IN 4	F	0,024	0,036	0,861	1,013	0,0350
55	IN 2	F	0,008	0,016	0,904	2,435	0,0085
55	IN 4	F	0,008	0,016	0,582	1,529	0,0115
57	IN 2	F	0,004	0,008	0,766	1,533	0,0052
57	IN 4	F	0,004	0,008	0,303	1,056	0,0077
58	IN 2	F	0,004	0,008	0,657	1,581	0,0055
58	IN 4	F	0,004	0,008	0,476	1,224	0,0068
59	IN 2	F	0,004	0,008	0,434	1,065	0,0076
59	IN 4	F	0,008	0,016	0,860	1,388	0,0102
60	IN 2	F	0,004	0,008	0,816	1,706	0,0048
60	IN 4	F	0,008	0,016	0,787	1,700	0,0098

Tabelle A. 9: Ausfälle durch Leckage am unteren Lippendichtring der Boosterpatrone bei Überprüfungsversuch 3, Verlauf 2

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
52	IN 1 A. 1	F	0,008	0,016	0,765	1,528	0,0105
52	IN 1 A. 2	F	0,016	0,024	0,972	1,373	0,0166
53	IN 1 A. 1	F	0,008	0,016	0,526	1,575	0,0116

V. #	Messung	F / S	SP. funkt.	SP. Ausfall	L. funkt.	L. Ausfall	SP. Ausfall interp.
53	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,335	1,002	0,0160
54	IN 1 A. 1	F	0,004	0,008	0,750	1,532	0,0053
54	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,975	1,312	0,0086
55	IN 1 A. 1	F	0,008	0,016	0,975	2,878	0,0081
55	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,620	1,832	0,0105
57	IN 1 A. 1	F	0,008	0,016	0,743	2,423	0,0092
57	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,473	1,542	0,0119
58	IN 1 A. 1	F	0,001	0,004	0,037	1,185	0,0035
58	IN 1 A. 2	F	0,004	0,008	0,754	1,131	0,0066
59	IN 1 A. 1	F	0,004	0,008	0,888	1,452	0,0048
59	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,924	1,576	0,0090
60	IN 1 A. 1	F	0,008	0,016	0,886	1,905	0,0089
60	IN 1 A. 2	F	0,008	0,016	0,564	1,212	0,0134

A.4 Kennwertverläufe Vorsteuerung

Tabelle A. 10: Einfluss getesteter Faktoren auf die Schließspannung der Entlüftungspiezobieger (anderweitig ausgefallene Prüflinge, welche nicht für die Auswertung genutzt werden können wurden aussortiert)

Bezeichnung	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Antwort
V. 1, E2Pr	-1	0	-1	-1	-1,000	0,885
V. 1, E2Rr	-1	0	-1	-1	-0,463	0,416
V. 1, E4Rr	-1	0	-1	-1	-0,901	0,822
V. 2, E2Pr	-1	0	-1	1	-0,009	0,766
V. 2, E2Rr	-1	0	-1	1	-0,203	1,000
V. 3, E2Pr	-1	0	1	-1	-0,553	0,612
V. 3, E2Rr	-1	0	1	-1	-0,594	0,553
V. 3, E4Pr	-1	0	1	-1	-0,161	0,528
V. 3, E4Rr	-1	0	1	-1	-0,185	0,439
V. 4, E2Rr	-1	0	1	1	-0,187	0,686
V. 4, E4Pr	-1	0	1	1	-0,391	0,734
V. 4, E4Rr	-1	0	1	1	-0,385	0,707
V. 5, E2Pr	0	0	-1	-1	-0,206	0,661
V. 5, E2Rr	0	0	-1	-1	-0,341	0,434
V. 5, E4Pr	0	0	-1	-1	-0,695	0,680
V. 5, E4Rr	0	0	-1	-1	-0,661	0,851
V. 6, E2Pr	0	0	-1	1	-0,236	0,765
V. 6, E2Rr	0	0	-1	1	0,045	0,666
V. 6, E4Pr	0	0	-1	1	-0,533	0,844
V. 6, E4Rr	0	0	-1	1	-0,274	0,676
V. 7, E2Pr	0	0	1	-1	-0,652	0,812
V. 7, E2Rr	0	0	1	-1	-0,380	0,590
V. 7, E4Pr	0	0	1	-1	-0,455	0,774
V. 7, E4Rr	0	0	1	-1	-0,334	0,771
V. 8, E2Pr	0	0	1	1	-0,349	0,563
V. 8, E2Rr	0	0	1	1	-0,102	0,400
V. 8, E4Pr	0	0	1	1	-0,367	0,654
V. 8, E4Rr	0	0	1	1	-0,571	0,523
V. 9, E2Pr	1	0	-1	-1	0,120	0,637
V. 9, E2Rr	1	0	-1	-1	-0,115	0,589
V. 9, E4Pr	1	0	-1	-1	0,213	0,653
V. 9, E4Rr	1	0	-1	-1	0,523	0,509
V. 10, E2Pr	1	0	-1	1	0,540	0,471
V. 10, E2Rr	1	0	-1	1	0,201	0,785
V. 10, E4Pr	1	0	-1	1	-0,391	0,704
V. 10, E4Rr	1	0	-1	1	0,300	0,744
V. 11, E2Pr	1	0	1	-1	-0,476	0,588
V. 11, E2Rr	1	0	1	-1	-0,156	0,740
V. 11, E4Pr	1	0	1	-1	-0,652	0,708

Bezeichnung	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Antwort
V. 11, E4Rr	1	0	1	-1	-0,857	0,682
V. 12, E2Pr	1	0	1	1	-0,027	0,805
V. 12, E2Rr	1	0	1	1	-0,247	0,883
V. 12, E4Pr	1	0	1	1	0,467	0,674
V. 12, E4Rr	1	0	1	1	0,443	0,763
V. 13, E2Pr	0	0	0	0	0,226	0,470
V. 13, E2Rr	0	0	0	0	0,183	0,505
V. 13, E4Pr	0	0	0	0	0,453	0,759
V. 13, E4Rr	0	0	0	0	0,166	0,488
V. 14, E2Pr	0	0	0	0	-0,083	0,483
V. 14, E2Rr	0	0	0	0	0,349	0,726
V. 14, E4Pr	0	0	0	0	0,806	0,427
V. 14, E4Rr	0	0	0	0	0,319	0,616
V. 15, E2Pr	0	0	0	0	0,100	0,455
V. 15, E2Rr	0	0	0	0	0,490	0,378
V. 15, E4Pr	0	0	0	0	0,270	0,710
V. 15, E4Rr	0	0	0	0	0,241	0,717
V. 16, E2Pr	0	0	0	0	0,363	0,513
V. 16, E2Rr	0	0	0	0	0,343	0,589
V. 16, E4Pr	0	0	0	0	0,509	0,443
V. 16, E4Rr	0	0	0	0	-0,649	0,532
V. 17, E2Pr	-1	-1	-1	-1	0,153	0,696
V. 17, E2Rr	-1	-1	-1	-1	-0,234	0,634
V. 17, E4Pr	-1	-1	-1	-1	-0,589	0,608
V. 17, E4Rr	-1	-1	-1	-1	-0,324	0,593
V. 18, E2Pr	-1	-1	-1	1	-0,092	0,464
V. 18, E2Rr	-1	-1	-1	1	0,035	0,777
V. 18, E4Pr	-1	-1	-1	1	0,006	0,793
V. 18, E4Rr	-1	-1	-1	1	0,166	0,694
V. 19, E2Pr	-1	-1	1	-1	0,767	0,545
V. 19, E2Rr	-1	-1	1	-1	0,687	0,584
V. 19, E4Pr	-1	-1	1	-1	-0,197	0,852
V. 19, E4Rr	-1	-1	1	-1	-0,530	0,673
V. 20, E2Pr	-1	-1	1	1	-0,227	0,748
V. 20, E2Rr	-1	-1	1	1	0,030	0,796
V. 20, E4Pr	-1	-1	1	1	0,407	0,709
V. 20, E4Rr	-1	-1	1	1	0,340	0,819
V. 21, E2Pr	0	-1	-1	-1	-0,224	0,447
V. 21, E2Rr	0	-1	-1	-1	-0,144	0,401
V. 21, E4Pr	0	-1	-1	-1	-0,196	0,686
V. 21, E4Rr	0	-1	-1	-1	-0,558	0,805
V. 22, E2Pr	0	-1	-1	1	0,474	0,546
V. 22, E2Rr	0	-1	-1	1	0,583	0,750
V. 22, E4Pr	0	-1	-1	1	0,484	0,750
V. 22, E4Rr	0	-1	-1	1	0,087	0,966
V. 23, E2Pr	0	-1	1	-1	0,570	0,466
V. 23, E2Rr	0	-1	1	-1	0,480	0,633

Bezeichnung	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Antwort
V. 23, E4Pr	0	-1	1	-1	0,155	0,649
V. 23, E4Rr	0	-1	1	-1	0,084	0,473
V. 24, E2Pr	0	-1	1	1	0,013	0,630
V. 24, E2Rr	0	-1	1	1	-0,094	0,809
V. 24, E4Pr	0	-1	1	1	0,614	0,503
V. 24, E4Rr	0	-1	1	1	0,190	0,456
V. 25, E2Pr	1	-1	-1	-1	-0,522	0,543
V. 25, E2Rr	1	-1	-1	-1	-0,155	0,901
V. 25, E4Pr	1	-1	-1	-1	-0,215	0,604
V. 25, E4Rr	1	-1	-1	-1	-0,310	0,777
V. 27, E2Pr	1	-1	1	-1	0,153	0,574
V. 27, E2Rr	1	-1	1	-1	-0,518	0,568
V. 27, E4Pr	1	-1	1	-1	-0,250	0,836
V. 27, E4Rr	1	-1	1	-1	0,308	0,655
V. 28, E2Pr	1	-1	1	1	-0,230	0,761
V. 28, E2Rr	1	-1	1	1	-0,183	0,711
V. 28, E4Pr	1	-1	1	1	-0,521	0,725
V. 28, E4Rr	1	-1	1	1	0,058	0,739
V. 29, E2Pr	-1	1	-1	-1	0,390	0,000
V. 29, E2Rr	-1	1	-1	-1	0,366	0,090
V. 29, E4Pr	-1	1	-1	-1	0,471	0,228
V. 29, E4Rr	-1	1	-1	-1	0,585	0,351
V. 30, E2Pr	-1	1	-1	1	0,175	0,255
V. 30, E2Rr	-1	1	-1	1	0,015	0,173
V. 31, E2Pr	-1	1	1	-1	-0,144	0,254
V. 31, E2Rr	-1	1	1	-1	0,168	0,248
V. 31, E4Pr	-1	1	1	-1	-0,303	0,130
V. 31, E4Rr	-1	1	1	-1	0,051	0,418
V. 32, E2Pr	-1	1	1	1	0,057	0,390
V. 32, E2Rr	-1	1	1	1	0,075	0,365
V. 32, E4Rr	-1	1	1	1	-0,086	0,496
V. 33, E2Pr	0	1	-1	-1	0,052	0,436
V. 33, E2Rr	0	1	-1	-1	0,493	0,151
V. 33, E4Pr	0	1	-1	-1	0,059	0,356
V. 33, E4Rr	0	1	-1	-1	0,048	0,397
V. 34, E2Pr	0	1	-1	1	-0,128	0,180
V. 34, E2Rr	0	1	-1	1	0,163	0,441
V. 34, E4Pr	0	1	-1	1	0,146	0,711
V. 34, E4Rr	0	1	-1	1	-0,075	0,114
V. 35, E2Pr	0	1	1	-1	0,023	0,320
V. 35, E2Rr	0	1	1	-1	0,236	0,187
V. 35, E4Pr	0	1	1	-1	-0,267	0,256
V. 35, E4Rr	0	1	1	-1	1,000	0,259
V. 36, E2Pr	0	1	1	1	-0,104	0,587
V. 36, E2Rr	0	1	1	1	0,154	0,361
V. 36, E4Pr	0	1	1	1	-0,139	0,504
V. 36, E4Rr	0	1	1	1	0,124	0,485

Bezeichnung	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Antwort
V. 37, E2Pr	1	1	-1	-1	-0,996	0,291
V. 37, E2Rr	1	1	-1	-1	-0,875	0,336
V. 37, E4Pr	1	1	-1	-1	-0,659	0,237
V. 37, E4Rr	1	1	-1	-1	-0,214	0,205
V. 38, E2Pr	1	1	-1	1	-0,684	0,287
V. 38, E2Rr	1	1	-1	1	-0,893	0,378
V. 38, E4Pr	1	1	-1	1	-0,391	0,468
V. 38, E4Rr	1	1	-1	1	-0,277	0,418
V. 39, E2Pr	1	1	1	-1	-0,357	0,453
V. 39, E2Rr	1	1	1	-1	-0,490	0,642
V. 39, E4Pr	1	1	1	-1	-0,782	0,442
V. 39, E4Rr	1	1	1	-1	-0,459	0,469
V. 40, E2Pr	1	1	1	1	0,279	0,504
V. 40, E2Rr	1	1	1	1	0,171	0,427
V. 40, E4Pr	1	1	1	1	0,288	0,596
V. 40, E4Rr	1	1	1	1	0,060	0,718

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Gröber, Jan
Geburtsdatum/-ort: 8. Juli 1987 in Tübingen
Familienstand: Ledig
Eltern: Dr. Dipl.-Psych. Ulrike Wilde-Gröber
Dr. med. Jürgen Gröber
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Schulbildung

Von 1998 bis 2007 Abitur an der Geschwister Scholl Schule in Tübingen

Studium

Von 2008 bis 2014 Studium an der Universität Stuttgart
Studienrichtung: Maschinenbau
Abschluss: Master of Science

Berufstätigkeit

Von 2014 bis 2018 Doktorand am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart sowie der Festo SE & Co. KG
Seit 2018 Ingenieur bei der Festo SE & Co. KG

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

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Nauhheimer	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 Qualitätsinformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelfmann	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 Wälzfräseherstellung 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 Getriebelastkollektiven 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 Loseilgeräusche 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. Haier	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 Getriebebelastkollektive 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. Schüppenbauer	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-Wellendichting, Gegenauflfläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Loseilen 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 Spirallrille - 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 Dichtungsgegenauflflächen

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 Gegenläufigen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsergüsse 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. Kläiber	Betriebs- und Benutzungsbedingungen 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 – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenläufige
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 Wellendichtungen 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 Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
162	S. M. Neuburger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschetendichtungen 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-Wellendichtungen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehalteter Dichtungsgegenläufigen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebsstrangerprobung
170	J. Gözl	Manschettendichtungen 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	Klauenschaltetelemente 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-Wellendichtringen
190	M. Dazer	Zuverlässigkeitstestplanung mit Berücksichtigung von Vorwissen aus stochastischen Lebensdauerberechnungen
191	J. Totz	Funktionsuntersuchungen an Dichtsystemen mit weichgeschliffenen Dichtungsgegenläufflächen und Radial-Wellendichtringen aus NBR
192	M. Stoll	Entwicklung und Funktionsanalyse rückenstrukturierter Manschettendichtringe 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