

Andreas Pichler, BSc

Zuverlässigkeitsmethoden für Entwicklung und Serie mechatronischer Systeme

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Studienrichtung Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Fischer

Betreuer: Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mario Hirz

Graz, im September 2017

In Kooperation mit:

LOGICDATA, Electronic & Software Entwicklungs GmbH



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit enthält eine Aufbereitung statistischer Zuverlässigkeitsmethoden, mit denen Daten aus Lebensdaueruntersuchungen ausgewertet werden. Die Ausarbeitung erfolgt anhand eines praktischen Problems.

Die Aufgabenstellung bezieht sich auf mechatronische Produkte, welche in Haltbarkeitsstudien die geforderten Zuverlässigkeitswerte nicht erreichen. Nach einer ersten Fehleranalyse werden Einflussfaktoren für die produktspezifische Lebensdauer aufgezeigt. Diese Faktoren werden anschließend in mehreren praktisch durchgeführten Lebensdauertests variiert, um unterschiedliche Ausfalldaten zu erhalten.

Als Grundlage für die Auswertungen aller Testreihen wird die Weibull-Funktion herangezogen. Mit dieser Verteilungsfunktion werden quantitative Zuverlässigkeitswerte berechnet und die unterschiedlichen Ausfalldaten statistisch verglichen. Anhand der Ergebnisse wird der Ausfallgrund der defektanfälligen Produkte festgestellt und ihr Lebensdauerverhalten bewertet.

Das Resultat dieser Arbeit ist die Lösung eines spezifischen Qualitätsproblems mithilfe von statistischen Verfahren. Durch eine konstruktive Modifikation der betroffenen Produkte kann deren Lebensdauer so weit gesteigert werden, dass die Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllt werden.

Abstract

This master thesis shows in an exemplary way, how to analyze data that is generated in durability tests. The focus lies on statistical reliability-methods.

More precisely, the task relates to mechatronic products that have problems in reaching their required durability and reliability.

At first this thesis determines by an error analysis specific factors that influences the product lifetime. Afterwards these factors are varied in a series of durability tests in order to gain data regarding different failures.

Taking the Weibull function as a basis, data resulting from the test series is compared with statistical methods, which subsequently leads to quantitative reliability values. As a result it is shown that the reasons for the durability failures and the general product behavior in durability tests are comprehensible.

Based on the cognitions of this thesis, a change in the design of the product leads to an increased lifetime and to a satisfying performance concerning its required reliability.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir während des Verfassens dieser Diplomarbeit mit Rat und persönlicher Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Allen voran danke ich Herrn Dipl.-Ing Philipp Polz für die Ermöglichung der Arbeit, die kompetente fachliche Beratung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Bei Associate Prof. Dr. Mario Hirz bedanke ich mich für die gute Betreuung. Er ist mir trotz seines engen Terminplans auf der Universität immer zur Verfügung gestanden und war mir eine große Stütze im Abschluss dieser Arbeit.

Ich danke meinen Eltern Christa und Martin, die mich im Laufe meiner gesamten Schul- und Studienzeit stets unterstützten und motivierten. Bei meiner Familie und Freunden bedanke ich mich, da sie mir genügend Freiraum zum Verfassen dieser Diplomarbeit zur Verfügung stellten.

Ein weiterer Dank gebührt meinen Studienkollegen, mit denen ich in den letzten fünf Jahren einen Großteil meiner Zeit verbracht und viele Prüfungen durchgestanden habe. Danke für die gute Zusammenarbeit!

Abschließend möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Firma LOGICDATA, besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Pucher, für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Problembeschreibung	3
1.3	Aufgabenstellung und Vorgehensweise	3
1.4	Ziele.....	4
2	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1	Begriffe und Definitionen.....	5
2.2	Wichtige Lebensdauervertelungen	8
2.2.1	Normalverteilung.....	8
2.2.2	Lognormalverteilung	11
2.2.3	Weibull-Verteilung.....	12
2.3	Statistische Auswertung von Lebensdauerersuchen.....	15
2.3.1	Statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens	15
2.3.2	Weibull-Gerade aus Ranggrößen-Verteilung	19
2.3.3	Vertrauensbereiche	21
2.3.4	Parameterbestimmung	23
2.3.5	Interpretation der Steigung	24
2.3.6	Nachweis einer geforderten Bq-Lebensdauer.....	25
2.4	Weitere Zuverlässigkeitsmethoden	27
2.4.1	Raffungstests	27
2.4.2	Vergleich von zwei Weibull-Verteilungen.....	28
2.4.3	Zensierte Tests.....	29
2.4.4	Success-Run	31
2.4.5	Wöhler-Diagramm.....	32
3	Analyse.....	36
3.1	Bedienelemente	36
3.1.1	Touch-Basic.....	36
3.1.2	Touch-Inlay	37
3.1.3	Integrierte Mikroschalter	38
3.1.4	Vergleich des mechanischen Aufbaus.....	39
3.1.5	Kraftanalyse.....	40
3.2	Schadensbild.....	45
3.3	Testgeräte	46
3.3.1	Kurbeltriebtestgerät	47
3.3.2	Pneumatiktestgerät	49

3.3.3	Betätigungszyklus.....	50
3.4	Einflussparameter	51
4	Versuchsreihen.....	53
4.1	Vorgehensweise.....	53
4.2	Parameterauswahl.....	54
4.3	Parametervariation.....	54
4.4	Durchführung der Versuchsreihen	55
4.5	Testergebnisse	56
4.6	Ausreißertest.....	57
5	Interpretation der Testergebnisse	60
5.1	Statistische Vergleiche	60
5.1.1	Vergleich der Testgeräte.....	60
5.1.2	Vergleich unterschiedlicher Nennlast.....	63
5.1.3	Vergleich unterschiedlicher Kraftverläufe	65
5.2	Aussage über Festigkeitsbereiche.....	68
5.2.1	Zeitfestigkeitsbereich	68
5.2.2	Dauerfestigkeitsbereich	70
5.2.3	Verifizierung des Wöhler-Diagramms	71
5.3	Success-Run	73
5.4	Ausfall- und Überlebensgrund	75
6	Zusammenfassung	78
	Literaturverzeichnis	80
	Abbildungsverzeichnis	82
	Tabellenverzeichnis	85
	Anhang	86

1 Einleitung

Jedes Unternehmen das Produkte entwickelt, herstellt und verkauft, hat zum Ziel langfristige Gewinne einzufahren und wirtschaftlichen Fortbestand zu garantieren. Um sich am Markt erfolgreich durchzusetzen ist es notwendig, dem Kunden preiswerte Ware in hoher Qualität und Zuverlässigkeit zu liefern. Nur so können nicht absehbare Folgekosten, hervorgerufen durch von Reparatur oder Wartung, minimiert und die Kundenerwartungen bestmöglich erfüllt werden.

In vielen marktorientierten Unternehmen wird ein quantitativer Wert der Zuverlässigkeit vorge-schrieben, der von den angebotenen Produkten erreicht werden muss. Um diesen nachzuweisen, sind Lebensdaueruntersuchungen notwendig, bei denen die Produkte bis zum Versagen getestet werden. Mithilfe der aus den Tests gewonnen Daten können Zuverlässigkeitswerte berechnet und mit den Vorgaben verglichen werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem Qualitätsproblem, das im Zuge von Lebensdauer-tests gewisser Produkte von LOGICDATA auftritt. Wie die Problematik entsteht und welche Kon-sequenzen mit ihr einhergehen, wird mit diesem Kapitel durchleuchtet. Zu Beginn erfolgt die Be-schreibung der Ausgangssituation und der Problemstellung. Danach werden die Aufgabenstellung und die damit verbundene Herangehensweise zur Lösungsfindung erläutert.

1.1 Ausgangssituation

In Entwicklungsprozessen ist es vorgesehen, dass für jedes Produkt eine Spezifikation definiert wird. In ihr sind alle Anforderungen aufgelistet, die vom Produkt zu erfüllen sind, damit es für die Serien-produktion und den späteren Verkauf freigegeben werden kann. Ein Teil dieser Anforderungen be-trifft auch Qualitätskriterien, die einen vorgeschrieben Wert für die Zuverlässigkeit, der vom Produkt erreicht werden muss, vorgeben. Die Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Produktes, seine Funk-tionen über die Zeit nicht zu verlieren. Sie ist ein Wahrscheinlichkeitswert und wird deswegen in Prozent oder in Parts-per-million (ppm) angegeben. Ist in der Spezifikation zum Beispiel eine 99,5 % Zuverlässigkeit vorgegeben, dürfen nach einer definierten Zeit von einer Million Produkten 5.000 im Feld ausgefallen sein (entspricht 5.000 ppm). Damit diese Zahl vor dem Verkauf bestätigt wer-den kann, müssen Lebensdauer-tests durchgeführt werden.

LOGICDATA entwickelt mechatronische Systeme für elektrisch verstellbare Möbel. Das Unterneh-men bietet Gesamtlösungen an, um beispielsweise die Höhe eines Bürotisches per Knopfdruck indi-

viduell zu verstellen. Eine schematische Darstellung des Systems bietet Abbildung 1.1. Die Schnittstelle zwischen Benutzer (1) und dem Bewegungssystem (5) stellt das sogenannte Bedienelement (2) dar. Der Benutzer kann frei über den Bewegungszeitpunkt entscheiden, indem er das Bedienelement betätigt und so lange gedrückt hält, bis die gewünschte Höhe bzw. ein Endanschlag des Antriebssystems (4) erreicht ist. Das Bedienelement stellt einen mechanischen Schalter dar, der die Betätigung durch den Benutzer erkennt und diese Information an die Steuerungseinheit (3) weitergibt. Bei diesem Produkttyp ist die Lebensdauer in Betätigungen definiert. Die Spezifikation des Bedienelementes schreibt eine Zuverlässigkeit von 500 *ppm* vor, die nach 60.000 Betätigungen gewährleistet sein muss. Dieser Wert stammt aus der Berechnung der notwendigen Lebensdauer über die Garantiezeit des Antriebssystems.

Studien haben gezeigt, dass der Benutzer die Bedienelemente im Regelfall mit einer Kraft von 10 *N* betätigt. LOGICDATA führt demnach mit diesem Kraftniveau Lebensdauerversuche durch. Für die autonome Betätigung im Dauerlauf werden zwei Testgeräte eingesetzt, deren Belastungsprinzipien unterschiedlich sind. Tritt ein Defekt des Bedienelementes auf, wird dieser vom Testgerät erkannt und der Lebensdauerversuch beendet. Mit den erhaltenen Ausfalldaten lässt sich die erreichte Zuverlässigkeit rechnerisch bestimmen.

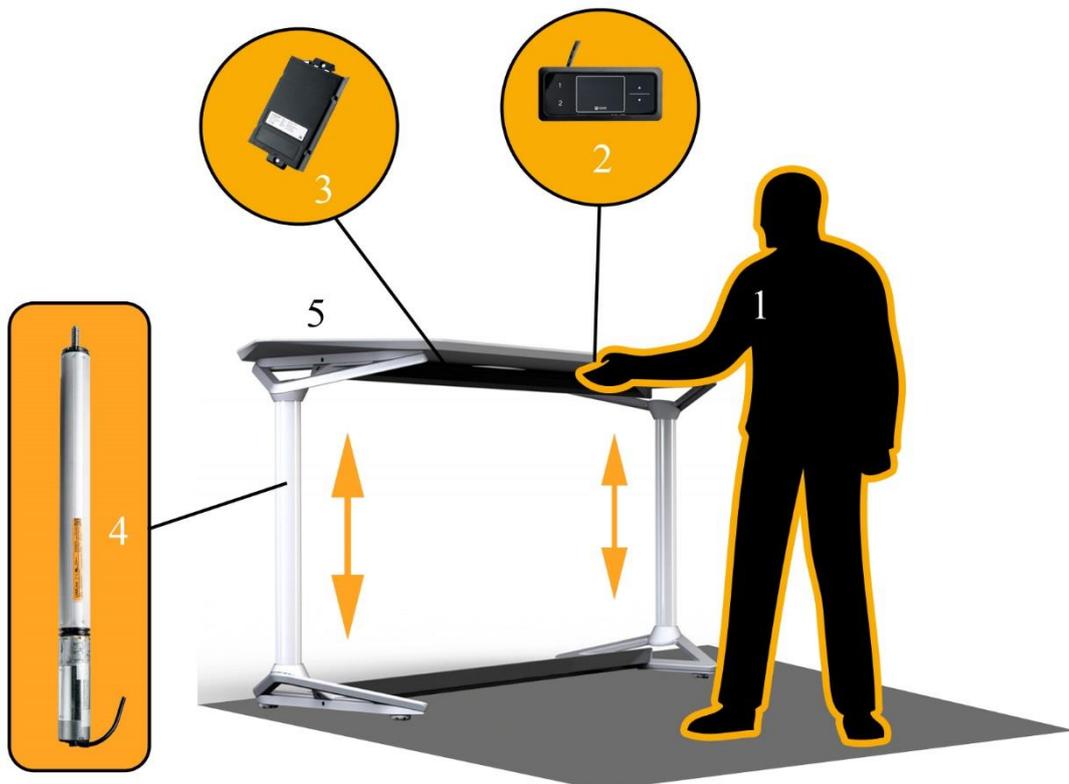


Abbildung 1.1: Antriebssystem eines höhenverstellbaren Bürotisches: (1) Benutzer, (2) Bedienelement, (3) Steuerungseinheit, (4) Antriebssystem, (5) Bürotisch

1.2 Problembeschreibung

In einer ganzen Produktpalette werden Bedienelemente unterschiedlicher Bauform angeboten. Die Differenzen liegen hauptsächlich im mechanischen Aufbau, im Design und in der Montagesituation. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sind die Produktausführungen funktionell gleich gestaltet, indem die Bedienelemente untereinander aus ähnlichen oder denselben Komponenten bestehen. Jedes Produkt folgt einer eigenen Spezifikation. So kommt es, dass für alle unterschiedlichen Bedienelemente eigene Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt werden müssen. Die geforderte Zuverlässigkeit ist mit 500 *ppm* bei 60.000 Betätigungszyklen für alle Produkte dieselbe.

Im Zuge von Lebensdaueruntersuchungen entstehen bei bestimmten Bedienelementen Qualitätsprobleme. Ausfälle treten so häufig auf, dass die in der Spezifikation angegebene Zuverlässigkeit nicht erreicht wird. Konkret kann eine Ausfallwahrscheinlichkeit von über 50 % bei 60.000 Betätigungszyklen nachgewiesen werden (entspricht einer Zuverlässigkeit von 500.000 *ppm*). Dies bedeutet, dass fünf von zehn Bedienelementen die geforderte Lebensdauer im Test nicht erreichen. In diesem Fall müssen Änderungen am Produkt vorgesehen werden, welche eine Steigerung der Lebensdauer bewirken. Danach ist der Lebensdaueruntersuchung erneut durchzuführen. Diese Vorgehensweise muss solange wiederholt werden, bis es zum Erreichen der geforderten Zuverlässigkeit kommt.

Ein anderer Typ von Bedienelementen hingegen, der sich vom Aufbau nicht wesentlich zu den Defektanfälligen unterscheidet, kann Zuverlässigkeitswerte von unter 100 *ppm* verzeichnen und kann die Qualitätsvorgaben in der Spezifikation problemlos erfüllen. Es gibt demnach eindeutige Unterschiede in der erreichten Zuverlässigkeit ähnlicher Bedienelemente. Die Gründe für diese Diskrepanz sind LOGICDATA unklar.

1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Ausgehend von der Problemstellung soll durch diese Arbeit das Lebensdauerverhalten der verschiedenen Bedienelemente verstanden werden. Es soll herausgefunden werden, warum ähnliche Bedienelemente starke Unterschiede in der erreichten Lebensdauer aufweisen. Um diese Frage zu beantworten, sind statistische Verfahren und Methoden anzuwenden. In der Zuverlässigkeitstheorie existiert eine Vielzahl an unterschiedlicher Literatur, die sich mit diesen Themen beschäftigt. Anhand einer entsprechenden fachlichen Recherche sollen die für diese Arbeit wichtigsten Grundlagen erarbeitet und zusammengefasst werden.

Eine umfangreiche Problemanalyse ist Voraussetzung für die Detektion jener Parameter, die das Lebensdauerverhalten beeinflussen. Aus diesem Grund ist es notwendig, defekte Bedienelemente soweit zu untersuchen, bis der Ausfallgrund und das damit verbundene Schadensbild charakterisiert

werden kann. Es ist üblich, dass Lebensdauertests vor ihrer technischen Freigabe mit automatisierten Geräten durchgeführt werden. Ob diese Prüfgeräte realistische und vor allem vergleichbare Ausfalldaten generieren, soll eine weitere Analyse der Testgeräte zeigen.

Weiters ist die Durchführung mehrerer praktischer Versuchsreihen vorgesehen. Die aus der Analyse hervorgehenden Einflussparameter auf die Lebensdauer sollen zuvor bewertet und in weiterer Folge soweit reduziert werden, dass der Testaufwand verringert werden kann. Die aus den durchgeführten Lebensdauertests gewonnenen Daten sind so aufzubereiten, dass statistische Vergleiche und Auswertungen möglich sind.

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Ausfalldaten, die aus Lebensdauertests stammen, ist deren statistische Interpretation unabdingbar. Wesentlich ist, dass hierzu mit entsprechender Methodik gearbeitet wird. Es sollen statistische Vergleiche der Versuchsreihen durchgeführt werden, mit deren Aussage signifikanter Unterschiede nachweisbar, oder nicht nachweisbar sind.

1.4 Ziele

Diese Arbeit soll beim Auftraggeber als Nachschlagewerk und gleichzeitig als Musterbeispiel für statistische Auswertungen von Lebensdauertests dienen. Die hier beschriebenen und angewendeten Methoden sollen soweit aufbereitet sein, dass sie auch von Laien angewendet werden können, die auf diesem Gebiet über wenig bis keine Fachkenntnis verfügen.

Der wichtigste Punkt ist die richtige Interpretation der Testergebnisse, weil daraus die quantitativen Werte für die im Lebensdauerversuch erreichte Zuverlässigkeit berechnet werden. Sie sind von großer Bedeutung, da mit diesen Werten über die Erfüllung der Qualitätsanforderungen aus der Spezifikation entschieden wird. Im Zuge dieser Arbeit sollen dazu statistische Verfahren eingesetzt werden, um quantitativ abgesicherte Werte zu erhalten.

Ein weiteres Ziel ist es, die Ausfallmechanismen der Bedienelemente zu verstehen, um damit das konträre Lebensdauerverhalten erklären zu können. Mit diesem Wissen sollen konstruktive Verbesserungsvorschläge präsentiert werden, die zu einer Erhöhung der Anzahl an ertragbaren Betätigungen führen. Es soll außerdem nachgewiesen werden, ob diverse Änderungen an den defektanfälligen Bedienelementen zu einer Zuverlässigkeitssteigerung führen.

2 Theoretische Grundlagen

In der Zuverlässigkeitstechnik sind stochastische Analysen von Lebensdauerverhalten unvermeidlich. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel einige Teilgebiete aus der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik fundamental erklärt. Zu Beginn sind Begriffe und Definitionen aus der Zuverlässigkeitstechnik angeführt, die in weiterer Folge in dieser Arbeit vorkommen. Danach folgt eine kompakte Beschreibung jener Lebensdauerverteilungen, die für Zuverlässigkeitsanalysen wichtig sind. Außerdem wird die statistische Auswertung von Lebensdauerexperimenten ausführlich behandelt, bevor das Kapitel mit der Beschreibung von weiteren Zuverlässigkeitsmethoden abgeschlossen wird.

2.1 Begriffe und Definitionen

Die in diesem Abschnitt erläuterten Begriffe bzw. Kenngrößen stammen aus der Statistik und Zuverlässigkeitstechnik. Es handelt sich bei dieser Aufzählung um eine Auswahl der wichtigsten Definitionen. Weitere Begriffe sind in der Fachliteratur [1] und [2] zu finden.

Ausfallwahrscheinlichkeit

Eine Betrachtungseinheit bezeichnet man als ausgefallen, wenn seine vordefinierten Anforderungen nicht weiter erfüllt werden. *„Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ausfalls im Zeitintervall $[0, t]$ wird als Ausfallwahrscheinlichkeit bezeichnet.“* [3, p. 6]

Die grundlegendste mathematische Definition der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ ist

$$F(t) = P(\tau \leq t), \quad (2.1)$$

wobei $P(\tau \leq t)$ für die Wahrscheinlichkeit steht, dass die Lebensdauer τ der Betrachtungseinheit die vorgegebene Zeit t unterschreitet. Die Lebensdauer τ ist eine Zufallsgröße, für die stets $\tau \geq 0$ gültig ist. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird auch als Verteilungsfunktion bezeichnet. Sie ist eine stetige Funktion, die von $F(0) = 0$ bis $F(\infty) = 1$ monoton ansteigt.

Zuverlässigkeit

„Die Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ [4, p. 27] Mathematisch ergibt sich die Zuverlässigkeit $R(t)$ als Komplement zur vorhin definierten Ausfallverteilungsfunktion $F(t)$ und stellt die Wahrscheinlichkeit für den Nichtausfall einer Betrachtungseinheit im Zeitintervall $[0, t]$ dar. Dies ist der Fall, wenn die Lebensdauer τ den Wert t überschreitet. Die Funktion

$$R(t) = P(\tau \geq t) = 1 - F(t) \quad (2.2)$$

fällt monoton in ihrem Definitionsbereich von $R(0) = 1$ bis $R(\infty) = 0$. [3, p. 6]

Grundgesamtheit und Stichprobe

Eine gängige und einfache Definition für den Begriff Grundgesamtheit beschreibt [5]: „Eine Grundgesamtheit ist die Menge aller möglichen Objekte, über die man im Zuge einer statistischen Erhebung eine Aussage machen möchte. Die Größe der Grundgesamtheit kann begrenzt oder unbegrenzt sein.“ Als Stichprobe wird eine Teilmenge aus der Grundgesamtheit bezeichnet. In statistischen Untersuchungen wird versucht, mit geeigneten Methoden und Berechnungsverfahren von einer oder mehreren Stichproben auf die Grundgesamtheit zu schließen.

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$, kurz Dichtefunktion, ist die zeitliche Ableitung der Verteilungsfunktion $F(t)$. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zu einem exakten Zeitpunkt t an und wird über

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.3)$$

berechnet. Voraussetzung ist, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ eine stetige Zufallsgröße beschreibt und somit selbst stetig ist. Im Gegensatz dazu stehen diskrete Verteilungsfunktionen, die Sprungstellen aufweisen und sich nicht ohne weiteres stetig differenzieren lassen. [3, p. 7], [6, pp. 41-44]

Erwartungswert und arithmetischer Mittelwert

Unter dem Erwartungswert $E(x)$ versteht man in der Statistik eine analytisch berechnete Kennzahl, die dem Mittelwert einer Zufallsgröße entspricht. Für die stetige Zufallsgröße X mit der Dichte f berechnet sich ihr Erwartungswert zu

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx. \quad (2.4)$$

Der arithmetische Mittelwert \bar{x} lässt sich aus einer empirischen Versuchsreihe ermitteln. Dazu werden n Versuche durchgeführt und die Merkmalswerte x_1, x_2, \dots, x_n aufsummiert. Der Quotient aus dieser Summe und der Anzahl an Versuchen ergibt den arithmetischen Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.5)$$

Der Erwartungswert und der arithmetische Mittelwert sind in der Regel unterschiedlich. Für ein Experiment mit einer (unendlich) großen Anzahl an Versuchen, nähert sich der Mittelwert dem Erwartungswert an.

Quantil

Ein Quantil ist eine Kennzahl zur Beschreibung einer bestimmten Lage innerhalb einer Zufallsgröße. Der Wert des Quantils x_q ist jener Schrankenwert, der mit der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit q von der Zufallsgröße X unterschritten wird. Allgemein lässt sich Quantil x_q schreiben als

$$P(X \leq x_q) = q, 0 \leq q \leq 1. \quad (2.6)$$

Hierzu ein kurzes Beispiel. Betrachtet wird die Verteilung des Bruttojahreseinkommens der unselbstständig Erwerbstätigen in Österreich im Jahr 2015. Das 10%-Quantil dieser Verteilung liegt bei 2.471 €. [7, p. 36] Aus dieser Kennzahl folgt, dass 10 % der betrachteten Personengruppe weniger und 90 % mehr als 2.471 € verdienen. In Tabelle 2.1 sind häufig verwendete Quantile mit deren alternativen Bezeichnungen aufgelistet.

Tabelle 2.1: Häufig verwendete Quantile

Quantil	Übliche Bezeichnung	Kurzzeichen
25 %	Unteres Quartil	Q_1
50 %	Median, mittleres Quartil	Q_2
75 %	Oberes Quartil	Q_3

Die Differenz zwischen oberem und unterem Quartil wird als Interquartilsabstand bezeichnet. [5]

Varianz und Standardabweichung

Die Varianz $V(x)$ beschreibt die quadratische Abweichung einer Zufallsgröße X von ihrem Erwartungswert $E(X)$. Diese Kennzahl gilt als Maß für die Streuung einer Verteilung und wird mathematisch definiert durch

$$\text{Var}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 f(x) dx. \quad (2.7)$$

Ein weiteres wichtiges Streumaß ist die Standardabweichung σ . Sie berechnet sich per Definition über

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (2.8)$$

und ist somit die Quadratwurzel aus der Varianz. Besitzt die Zufallsgröße X eine große Standardabweichung, so kann man pauschal annehmen, dass es wahrscheinlich ist, Werte zu erhalten, die weit vom Erwartungswert entfernt liegen. Da die Standardabweichung die gleiche Dimension wie die Zufallsgröße aufweist, ist sie für direkte Vergleiche besser geeignet als die Varianz. [5, p. 37]

2.2 Wichtige Lebensdauerverteilungen

In der Stochastik existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Diese dienen dazu, das Eintreten eines zufälligen Ereignisses einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Verteilungen behandelt, die in der Zuverlässigkeitstechnik verwendet werden. Da die Lebensdauer einer Betrachtungseinheit als Zufallsvariable aufgefasst werden kann, spricht man von sogenannten Lebensdauerverteilungen. Die Normalverteilung wird für Lebensdaueruntersuchungen nur äußerst selten angewendet. Dennoch sind viele Grundbegriffe und Maßzahlen, die aus der Normalverteilung stammen, so wichtig, dass sie trotzdem erläutert werden. Die Lognormalverteilung wird vereinzelt im Maschinenbau, öfter in der Werkstofftechnik eingesetzt. Die in Zuverlässigkeitsuntersuchungen am häufigsten verwendete Lebensdauerverteilung ist die Weibull-Verteilung. [2, p. 40]

2.2.1 Normalverteilung

Die Normalverteilung ist in der Literatur häufig anzufinden. Viele natur-, wirtschafts- und ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen können mit ihr exakt oder zumindest in guter Näherung beantwortet werden. Für das Entstehen einer Normalverteilung ist ein additives Zusammenwirken vieler, voneinander unabhängigen Einflüssen verantwortlich. [8, p. 134], [2, p. 60]

Für die mathematische Beschreibung der Dichtefunktion $f(t)$ werden zwei Parameter benötigt – der Lageparameter t_m und die Standardabweichung σ . Der Lageparameter entspricht dem Mittelwert der Verteilung. Sind diese Parameter bekannt, ist die Funktion

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.9)$$

eindeutig definiert. Wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich ist, ergibt sich eine um den Lageparameter symmetrisch liegende Funktion. Das bedeutet, dass bei einer Normalverteilung der Mittelwert t_m , der Median t_{med} und der Modalwert t_{mod} zusammenfallen und ident sind. In der Literatur wird häufig auf das alternative Formelzeichen μ zurückgegriffen. Die Standardabweichung gilt als Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und entspricht dem halben Abstand zwischen den Wendepunkten auf der Verteilungskurve. [2, p. 41]

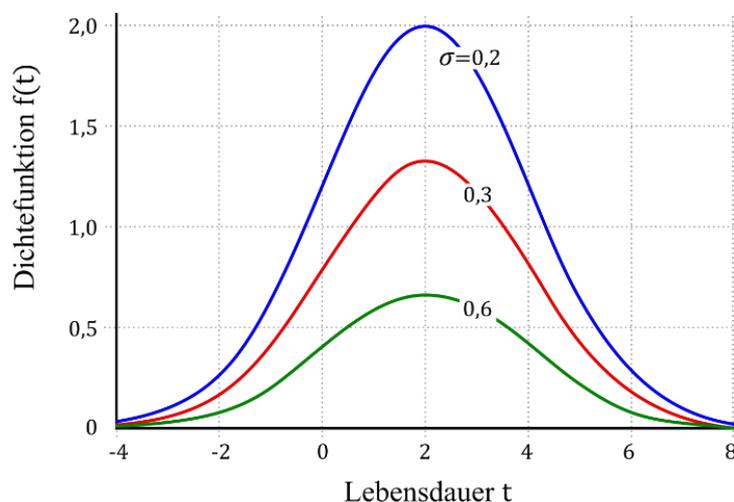


Abbildung 2.1: Dichtefunktion der Normalverteilung für unterschiedliche Standardabweichungen σ bei konstantem Lageparameter $t_m = 2$

Ein wesentlicher Nachteil für Lebensdaueruntersuchungen ist, dass durch die Variation der Parameter nur eine Skalierung der Funktion erreicht werden kann. Der symmetrische Verlauf der Dichtefunktion bleibt für beliebige Parameterwerte stets erhalten.

Des Weiteren geht aus Gleichung (2.9) hervor, dass die Dichtefunktion für alle reellen Zahlen, also auch für negative, definiert ist. Bei Lebensdaueruntersuchungen ist es naheliegend, dass keine negativen Ausfallzeiten existieren können, sondern diese frühestens zum Zeitpunkt Null starten. Zusätzlich haben Auswertungen von Lebensdaueranalysen im Maschinenbau gezeigt, dass deren Verteilung oft asymmetrisch (rechtsschief) ist und mit einer symmetrischen Funktion nur bedingt bis schlecht beschreibbar ist. Aus diesen Gründen wird es nicht empfohlen, die Normalverteilung zur Beschreibung von Ausfalldaten heranzuziehen. [4, p. 15], [2, p. 42]

Boxplot

Um einen schnellen Eindruck über empirisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen – im Besonderen über die Normalverteilung – und deren Maßzahlen zu erhalten, kann die Darstellung als Boxplot genutzt werden. Im Gegensatz zum Histogramm ist der Boxplot in seiner Abbildung kompakt. Unterschiedliche Verteilungen können leicht und schnell verglichen werden, wenn sie als Boxplot nebeneinander und in gleicher Skalierung dargestellt sind. [8, p. 136]

Die Linie im geschlossenen Rechteck liegt auf Höhe des Medians. Innerhalb dieser Box liegen 50 % aller Werte, wobei die obere und untere Linie des Rechtecks durch die jeweiligen Quartile begrenzt ist. Die Höhe des Rechtecks repräsentiert daher den Interquartilsabstand. Die oberste und unterste horizontale Linie des Boxplots nennt man Antennen. In der Fachliteratur gibt es unterschiedliche Definitionen auf welcher Höhe diese Begrenzungslinien liegen. Häufig folgt man der Darstellungsvariante von John W. Tukey, die besagt, dass die Länge der Antenne maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstandes aufweisen darf. Kommen in der Verteilung Werte vor, die außerhalb der Antennen liegen, werden diese Wertepunkte als Ausreißer betrachtet und gesondert dargestellt. Gibt es innerhalb der betrachteten Verteilung keine Werte, die mehr als dem 1,5-fachen Interquartilsabstand vom oberen bzw. unteren Quartil entfernt sind, liegt die Antenne auf der Höhe des Maximal- bzw. Minimalwertes. [9, pp. 2–4]

In Abbildung 2.2 ist der Boxplot einer beispielhaften Verteilung dargestellt. Der kleinste vorkommende Wert liegt weniger als dem 1,5-fachen Interquartilsabstand vom unteren Quartil entfernt. Daher repräsentiert die untere Antenne das Minimum. Nach oben hin gibt es Werte, die mehr als dem 1,5-fachen Interquartilsabstand vom oberen Quartil entfernt liegen. Diese sind als Punkte über der oberen Antenne dargestellt.

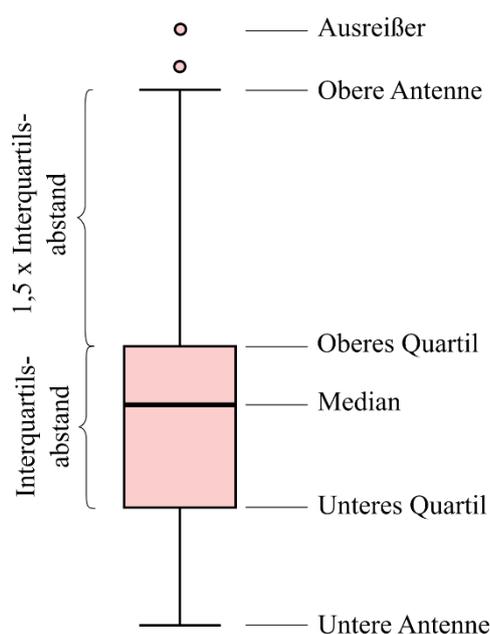


Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung des Boxplots einer beispielhaften Verteilung

2.2.2 Lognormalverteilung

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erwähnt, handelt es sich bei Lebensdauerverteilungen um schiefe Häufigkeitsverteilungen. Die Entstehung einer schiefen Lage kann auf das multiplikative Zusammenwirken vieler Zufallsgrößen zurückgeführt werden. Ein weiterer Grund für asymmetrische Verteilungen kann sein, dass Schranken existieren, welche durch die vorkommenden Werte nicht unter- bzw. überschritten werden. Wie bereits erläutert, können Ausfallzeiten nicht negativ sein. Gilt der Wert null als linke Schranke, kommt man durch Logarithmieren der Verteilung annähernd auf normalverteilte Werte. In Abbildung 2.3 ist zu erkennen, dass mit Hilfe der Lognormalverteilungen, deren Dichtefunktion $f(t)$ über

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-t_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

beschrieben wird, schiefe Verteilungen wesentlich besser abbildbar sind, als mit der Normalverteilung. [8, p. 141], [2, p. 60]

Ein Vorteil ist, dass sich viele Berechnungsverfahren und –methoden, die für die Normalverteilung gültig sind, auf die Lognormalverteilung übertragen lassen. Dem gegenüber steht der Nachteil, dass sich wie bei der Normalverteilung, das Integral der Ausfallfunktion nicht elementar lösen lässt und man auf numerische Methoden oder Tabellen zurückgreifen muss. [2, p. 59]

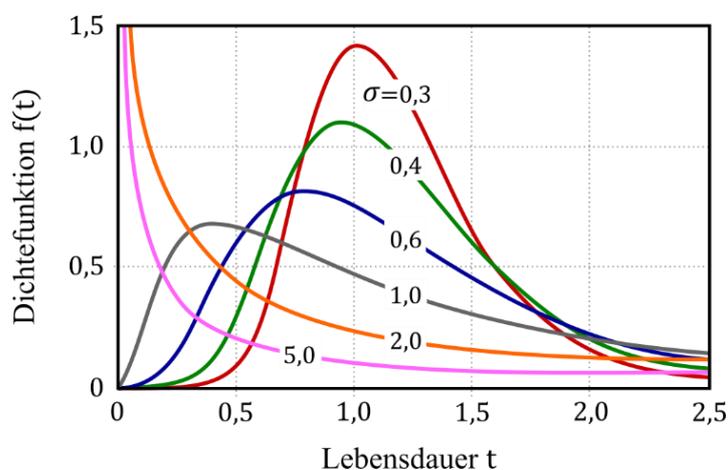


Abbildung 2.3: Dichtefunktion $f(t)$ der Lognormalverteilung für unterschiedliche Standardabweichungen σ bei konstantem t_m

2.2.3 Weibull-Verteilung

Die nach dem schwedischen Ingenieur Waloddi Weibull benannte Verteilung ist universell einsetzbar. Mit einer einzigen Gleichung lassen sich unterschiedlichste Ausfallverhalten kompakt und schnell beschreiben. Ursprünglich wurde sie entwickelt, um Ergebnisse von Materialprüfungen, im Speziellen Bruch- und Ermüdungsfestigkeiten von Werkstoffen, mathematisch beschreiben zu können. Im Laufe der Zeit hat sie sich in Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Maschinenbau durchgesetzt und ist heute die am öftesten verwendete Häufigkeitsverteilung im Zuge von Lebensdaueruntersuchungen. [10, p. 57]

Die Weibull-Verteilung wird zumeist als zweiparametrische oder dreiparametrische Verteilung angewendet. Die Verwendung von zwei Parametern ist die einfachste Möglichkeit eine Weibull-Verteilung zu beschreiben. Die dreiparametrische Form kommt zum Einsatz, wenn für die Lebensdaueruntersuchung eine ausfallfreie Zeit des Bauteils oder Produkts relevant ist. Dies ist dann der Fall, wenn der Ausfall weitreichende Konsequenzen mit sich bringt, beispielsweise im Flugzeugbau oder in der Raumfahrt. Für Lebensdaueruntersuchungen, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt und analysiert werden, trifft das nicht zu. Aus diesem Grund wird ausschließlich mit der zweiparametrischen Weibull-Verteilung gearbeitet. Sie ist auf den folgenden Seiten detailliert beschrieben.

Zweiparametrische Weibull-Verteilung

Wie der Name sagt, besitzt die zweiparametrische Weibull-Verteilung zwei Parameter, den Formparameter b und den Lageparameter T . Letzterer wird in Zuverlässigkeitsanalysen als charakteristische Lebensdauer bezeichnet. Die Dichtefunktion $f(t)$ lässt sich mathematisch in folgender Weise beschreiben:

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}. \quad (2.11)$$

Durch die Variation des Parameters b wird die Gestalt der Dichtefunktion $f(t)$ deutlich verändert (vergleiche Abbildung 2.4). Kleine Formparameter ($b < 1$) beschreiben eine hohe Ausfallhäufigkeit zu Beginn der Lebensdauer, die in späterer Folge kontinuierlich abnimmt. Man kann von einer annähernden Exponentialverteilung sprechen, während für $b = 1$ die Ausfälle exakt exponentialverteilt sind. Ist $b > 1$, startet die Dichtefunktion stets bei 0, erreicht ein globales Maximum, bevor sie wieder abfällt. Für noch größere Werte des Formparameters ($b > 3,5$) gleicht die Dichtefunktion in guter Näherung einer Normalverteilung. [2, p. 46]

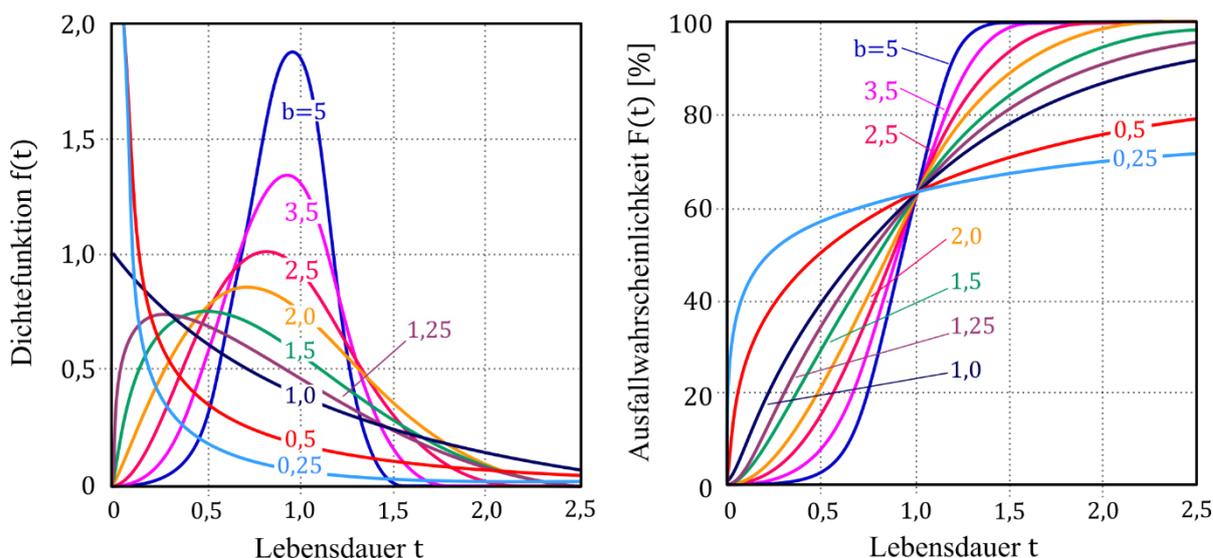


Abbildung 2.4: Dichtefunktionen $f(t)$ und Verteilungsfunktionen $F(t)$ für unterschiedliche Formparameter b einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung mit Lageparameter $T = 1$

Aus Gleichung (2.3) geht hervor, dass sich die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ über das Integral der Dichtefunktion $f(t)$ berechnen lässt. Für die Weibull-Verteilung ergibt sich die Funktion $F(t)$ zu

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}. \quad (2.12)$$

Setzt man in dieser Gleichung für t die charakteristische Lebensdauer T ein, ergibt sich – unabhängig vom Wert des Formparameters b – für die Ausfallwahrscheinlichkeit stets $F(t = T) = 0,623$. Das bedeutet, dass der charakteristischen Lebensdauer T immer eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 62,3 % zugewiesen werden kann. Dies ist in Abbildung 2.4 ersichtlich, weil sich die gesamte Kurvenschar der unterschiedlichen Ausfallwahrscheinlichkeiten im Punkt $F(t = T)$ treffen.

Darstellung im Weibull-Netz

Wie aus Abbildung 2.4 hervorgeht, ergeben sich für die Ausfallwahrscheinlichkeiten meist typische s-förmige Kurvenverläufe. In der Praxis bewährt es sich, diese Kurve in einem Diagramm als Gerade darzustellen, indem eine bestimmte Skalierung der Abszisse und Ordinate vorgenommen wird. Durch Umstellen, zweimaliges Logarithmieren und das Anwenden der Rechenregeln für den Logarithmus, kann Gleichung (2.12) folgendermaßen formuliert werden:

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = b \cdot \ln(t) - b \cdot \ln(T). \quad (2.13)$$

Durch entsprechendes Substituieren kann diese Gleichung als Geradengleichung in der Form

$$y = k \cdot x + d \quad (2.14)$$

dargestellt werden, wobei $k = b$ die Steigung der Geraden repräsentiert und $d = -b \cdot \ln(T)$ ihren Achsenabschnitt. Die Abszisse erfährt mit $x = \ln(t)$ eine einfache Logarithmierung, während die Ordinate mit $y = \ln\{-\ln[1 - F(t)]\}$ doppeltlogarithmisch dargestellt wird.

Ein Diagramm, in dem die Achsen einer solchen Skalierung entsprechen, nennt man Weibull-Netz oder Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier. Alle zweiparametrischen Weibull-Verteilungen können in solch einem Diagramm als Geraden dargestellt und als Weibull-Geraden bezeichnet werden. Ihre Steigungen sind ein direktes Maß für den Formparameter b . Es ist üblich, dass rechts neben dem Weibull-Netz eine zweite, lineare Ordinate hinzugefügt wird, die als Maß für den Formparameter b gilt. Sein Wert kann grafisch durch das parallele Verschieben der Weibull-Geraden durch den Pol P auf der rechten Ordinate abgelesen werden. Der zweite Parameter, die charakteristische Lebensdauer T , ergibt sich als Abszissenwert, wenn die Weibull-Gerade eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $F(t) = 63,2\%$ erreicht. In Abbildung 2.5 ist eine Weibull-Verteilung und die grafische Ermittlung deren Parameter abgebildet.

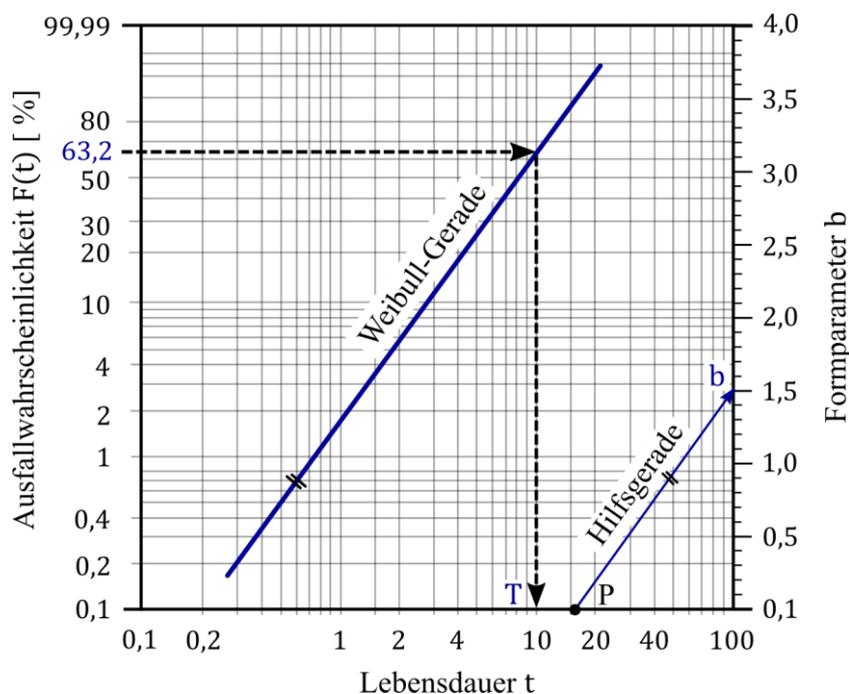


Abbildung 2.5: Darstellung der Weibull-Verteilung als Gerade im Weibull-Netz mit der grafischen Ermittlung ihrer Parameter $b = 1,5$ und $T = 10$

Eine solche Darstellung der Weibull-Verteilung bietet mehrere Vorteile. Zum einen ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit, wenn man mehrere Geraden in dasselbe Diagramm abbildet. Zum anderen kann eine einfache und rasche Auswertung von Lebensdauerversuchen erfolgen, wenn die Ausfalllaufzeiten mit ihren entsprechenden Ausfallwahrscheinlichkeiten in das Weibull-Netz eingetragen werden. Die statistische Vorgehensweise wird im folgenden Abschnitt erklärt. [2, p. 53]

2.3 Statistische Auswertung von Lebensdaueruntersuchungen

Dieser Abschnitt behandelt die statistische Auswertung von Ausfallzeiten von Systemen oder Bauteilen im Zuge von Lebensdauerstudien. Die statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens gilt als Grundlage und wird zu Beginn ausführlich erläutert. Es wird gezeigt, wie aus der Streuung der Ranggrößen auf eine repräsentative Weibull-Gerade geschlossen wird. Der Vertrauensbereich dieser Geraden gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit einer Fehleinschätzung. Es werden Methoden aufgezeigt, die eine rechnerische Ermittlung der Weibull-Parameter ermöglichen. Der Nachweis einer geforderten Zuverlässigkeit anhand der statistischen Auswertung von Lebensdaueruntersuchungen mit Weibull rundet diesen Abschnitt ab.

2.3.1 Statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens

In Lebensdaueruntersuchungen fallen Produkte zu einem zufälligen Zeitpunkt aus, auch wenn sich die Produkte und Testbedingungen nicht unterscheiden. Man spricht hier von der Streuung der Ausfallzeitpunkte. Aus diesem Grund macht eine statistische Beschreibung des Ausfallverhaltens Sinn, vor allem dann, wenn es sich um eine Stichprobe mit nur wenigen Probanden handelt.

Dieser Abschnitt wird anhand eines Beispiels erklärt. Hierbei handelt es sich um eine fiktive Lebensdaueruntersuchung von $n = 20$ baugleichen Wälzlagern, die bis zu ihrem Ausfall getestet werden. Die Anzahl der Umdrehungen, die sie fehlerfrei ertragen, wird erfasst und die jeweiligen Ausfallzeitpunkte notiert (siehe Tabelle 2.2). Anschließend wird eine statistische Vorgehensweise beschrieben, mit der von der Streuung der Ausfallzeiten auf die dahinterstehende Verteilungsfunktion geschlossen werden kann.

Tabelle 2.2: Streuung der Ausfallzeitpunkte in Umdrehungen bei einer beispielhaften Lebensdaueruntersuchung von 20 baugleichen Wälzlagern

i	T_i	i	T_i	i	T_i	i	T_i
1	550.000	6	950.000	11	300.000	16	490.000
2	710.000	7	1360.000	12	460.000	17	420.000
3	380.000	8	810.000	13	570.000	18	790.000
4	520.000	9	580.000	14	890.000	19	980.000
5	590.000	10	540.000	15	1150.000	20	500.000

Klassierung

Unter Klassierung versteht man die Unterteilung der Zeitachse in konstante Intervalle, denen die Ausfallpunkte entsprechend zugeordnet werden. Dabei wird jedem Ausfall innerhalb einer Klasse der Wert der Klassenmitte zugeordnet. Es soll erwähnt werden, dass es sich hierbei um eine unpräzise Methode handelt, weil einer gewissen Anzahl von Ausfällen eine einzige Häufigkeit zugeordnet wird und dadurch Informationen verloren gehen. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Klassenbreite gewählt wird, umso geringer ist der Informationsverlust. Wird die Klasse zu eng gewählt, können auf der Zeitachse Lücken entstehen, wenn in diesem Zeitfenster keine Ausfälle beobachtet werden. Dies würde in späterer Folge dazu führen, dass eine kontinuierliche Beschreibung des Ausfallverhaltens, durch eine mathematisch stetige Funktion, nicht möglich ist. Die Zeitachse soll also in nicht zu wenig, aber auch nicht in zu viele Klassen aufgeteilt werden. Als Richtwert für die Breite Γ einer Klasse empfiehlt [2, p. 28] folgenden Zusammenhang:

$$\Gamma \approx \frac{MAX(T_i) - MIN(T_i)}{1 + 3,32 \lg(n)} \quad (2.15)$$

Im Beispiel der getesteten Wälzlager erhält man mit obiger Gleichung eine Klassenbreite von $\Gamma = 200.000$ Umdrehungen.

Histogramm der Ausfallhäufigkeiten

Eine einfache Möglichkeit das Ausfallverhalten übersichtlich darzustellen, ist das sogenannte Histogramm der Ausfallhäufigkeiten. Der Abszissenwert repräsentiert die Lebensdauer. Klassische Beispiele für ihre Dimension sind Stunden, Umdrehungen, Kilometer, Lastwechsel etc. Auf der Ordinate wird die absolute Ausfallhäufigkeit h_{abs} oder die relative Ausfallhäufigkeit h_{rel} aufgetragen. Erstere ist gleich der Anzahl an Ausfälle innerhalb einer Klasse n_A . In der Regel wird aber die relative Ausfallhäufigkeit h_{rel} angegeben, die sich aus dem Verhältnis

$$h_{rel} = \frac{n_A}{n} \quad (2.16)$$

berechnen lässt. Sie ist der Quotient aus der Anzahl an Ausfälle innerhalb Klasse n_A und der Gesamtanzahl der Ausfälle innerhalb der Stichprobe n . Das sich für das Wälzlagerbeispiel ergebende Histogramm der Ausfallhäufigkeiten ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Man erhält eine anschauliche Übersicht über die Verteilung der Ausfälle. So lässt sich unter Anderem erkennen, dass die meisten Wälzlager zwischen 300.000 und 500.000 Umdrehungen ausgefallen sind. Es gibt nur vereinzelte Lager, die mehr als 1.100.000 Umdrehungen überleben.

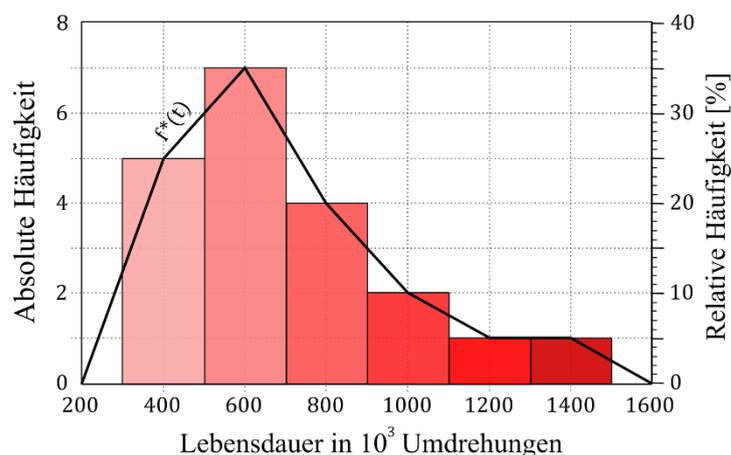


Abbildung 2.6: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten mit empirischer Dichtefunktion $f^*(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch (Klassenbreite $\Gamma = 200.000$ Umdrehungen)

Des Weiteren ist in Abbildung 2.6 die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ zu erkennen, die sich durch die lineare Verbindung der Klassenmittelpunkte auf Höhe der jeweiligen Häufigkeit ergibt.

Dichtefunktion

Die empirische Dichtefunktion $f^*(t)$ ist eine unstetige Verteilung, welche sich ausschließlich aus realen Versuchen ermitteln lässt. Vor allem für eine kleine Anzahl an Versuchswerten kann diese Funktion stark von der idealen Dichtefunktion $f(t)$ abweichen. Diese Funktion wird durch den Grenzübergang mit $n \rightarrow \infty$ gefunden. Mit Gleichung (2.15) führt das dazu, dass die empfohlene Klassenbreite b immer enger wird, während die dazugehörigen Häufigkeitswerte im Wesentlichen unverändert bleiben. Durch diese theoretische Näherung ergibt sich das Histogramm der Ausfallhäufigkeiten als glatte und stetige Kurve, welche die eigentliche Dichtefunktion $f(t)$ darstellt. [2, p. 28]

Das Histogramm in Abbildung 2.7 zeigt, wie sich die Verteilung der Ausfälle für das Wälzlagerbeispiel ergeben könnte, wenn eine (unendlich) große Anzahl an Lager auf ihre Lebensdauer getestet werden würde.

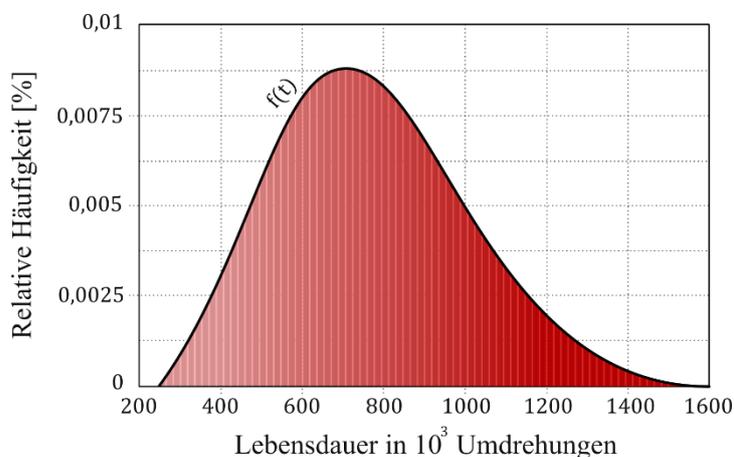


Abbildung 2.7: Mögliches Histogramm der Ausfallhäufigkeiten mit Dichtefunktion $f(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch, wenn Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$

Histogramm der Summenhäufigkeiten

Die Ausfallhäufigkeit gibt an, wie viele Ausfälle zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. in einem Intervall vorliegen. Oft ist es jedoch bedeutender zu wissen, wie viele Teile bis zu einem gewissen Zeitpunkt ausgefallen sind. Addiert man die beobachteten Ausfälle mit fortlaufender Intervallzahl, wird das Histogramm der Summenhäufigkeiten gebildet. [2, p. 29]

Mathematisch lässt sich die Summenhäufigkeit $H(m)$ der m -ten Klasse über die relative Häufigkeit h_{rel} beschreiben. Sie wird über

$$H(m) = \sum_{i=1}^m h_{rel}(i) \quad (2.17)$$

berechnet. Die Darstellung in Abbildung 2.8 zeigt die nacheinander summierten Klassen für das Wälzlagerbeispiel. Analog zum Histogramm der Ausfallhäufigkeiten lässt sich auch hier, durch Verbinden der Klassenmittelpunkte der jeweiligen Summenhäufigkeiten, eine empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$ abbilden.

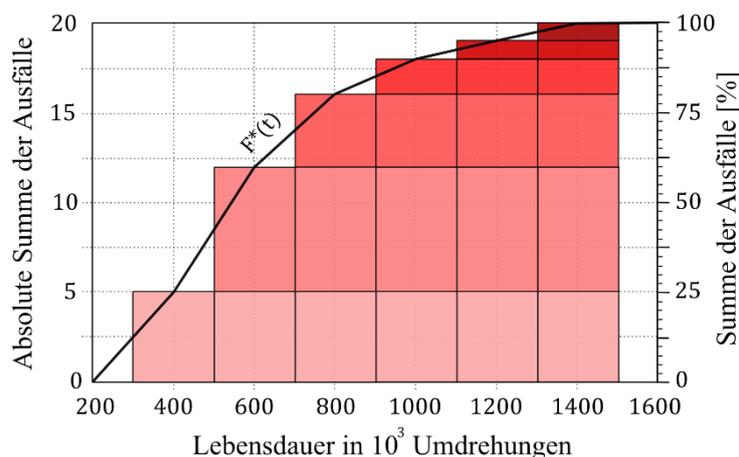


Abbildung 2.8: Histogramm der Summenhäufigkeiten mit empirischer Verteilungsfunktion $F(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch

Verteilungsfunktion bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit

Für die Ermittlung der stetigen Verteilungsfunktion $F(t)$ gelten die gleichen Überlegungen wie bei der Ermittlung der Dichtefunktion $f(t)$. Für den Grenzübergang mit $n \rightarrow \infty$ werden die Klassenbreiten immer kleiner und der Umriss des entstehenden Histogramms nähert sich einer glatten Kurve. Eine Eigenschaft dieser idealen Verteilungsfunktion ist, dass sie stets bei $F(t) = 0$ beginnt, dann monoton ansteigt, bis sie $F(t) = 1$ erreicht wenn alle Teile ausgefallen sind (siehe Abbildung 2.9). Den mathematischen Zusammenhang zwischen Dichtefunktion $f(t)$ und Verteilungsfunktion $F(t)$ gibt Gleichung (2.3). Das Integral über diese Gleichung beschreibt die Summe der Ausfälle als Funktion der Zeit. In der Literatur wird für die Verteilungsfunktion auch der Begriff „Ausfallwahrscheinlichkeit“ verwendet. Beide verwenden die Funktionsvariable $F(t)$. [2, p. 31]

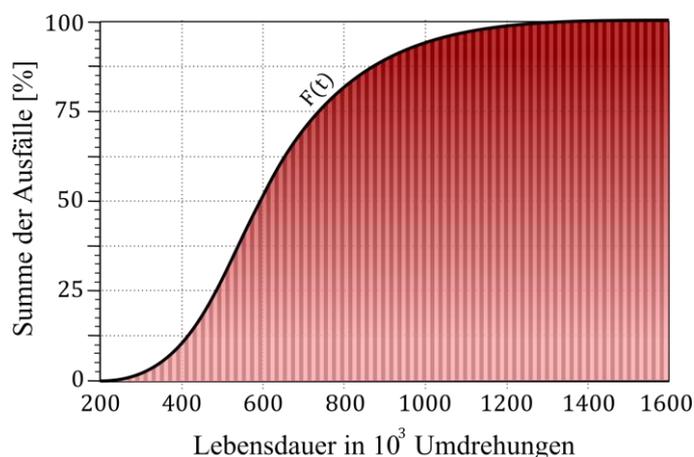


Abbildung 2.9: Mögliches Histogramm der Summenhäufigkeiten mit Verteilungsfunktion $F(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch, wenn Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$

In der statistischen Auswertung von Lebensdaueranalysen wird versucht, diese ideale Verteilungsfunktion durch die Weibull-Funktion zu beschreiben. Das sich hierbei ergebende Problem ist, dass nur eine begrenzte Anzahl an Stichproben untersucht werden kann. Das hat zur Folge, dass mit Weibull nur die Annäherung an eine empirische Verteilungsfunktion $F^*(t)$ möglich ist und so ein Fehler entsteht. Eine statistisch sinnvolle Vorgehensweise, mit der dieser Fehler minimiert werden kann, ist auf den folgenden Seiten erklärt.

2.3.2 Weibull-Gerade aus Ranggrößen-Verteilung

In Zuverlässigkeitsuntersuchungen wird versucht, mit einer beschränkten Anzahl an Stichproben Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zu ziehen. Prüft man zum Beispiel eine Stichprobe im Umfang von $n = 20$ Bauteilen, ergeben sich in der Regel 20 unterschiedliche Lebensdauerwerte t_i . Ordnet man diese entsprechend $t_i < t_{i+1}$, werden diese aufsteigend sortierten Lebensdauerwerte als Ranggrößen bezeichnet. Die Rangzahl entspricht dem Index i . [2, p. 77]

Im oberen Beispiel ist nach Ausfall der ersten Ranggröße $1/20$ der Stichprobe ausgefallen. Fällt nach der ersten die zweite Ranggröße aus, sind es bereits $2/20$ usw. Es wäre also möglich, der ersten Ranggröße eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $F(t_1) = 1/20 = 5\%$ zuzuordnen, der zweiten Ranggröße $F(t_2) = 2/20 = 10\%$. Die Ausfallverteilung der geprüften Bauteile innerhalb dieser Stichprobe könnte auf diese Weise in Form einer Summenhäufigkeit beschrieben werden. Es gilt zu beachten, dass hier nur eine Stichprobe der Grundgesamtheit untersucht wird. Es ist naheliegend, dass wenn eine zweite Stichprobe im gleichen Umfang untersucht wird, sich die Streuung der Ausfallzeiten anders verhält, als die der ersten Stichprobe. Die Ranggrößen der Stichproben sind unterschiedlich, folgen aber einer bestimmten Verteilung.

Die wahrscheinlichkeitstheoretische Herleitung der Ranggrößen-Verteilung ist aufwendig und wird an dieser Stelle nicht behandelt. In der Fachliteratur findet sich folgende Aussage: „Die mathematische Herleitung der Ranggrößen-Verteilung führt zu einer multinominalen Verteilung (Trinomial-

Verteilung), die eine erweiterte Binominal-Verteilung darstellt.“ [2, p. 78] Hierfür muss die Verteilung der Ausfallzeiten (Weibull-Verteilung) schon bekannt sein. In der Regel ist dies nicht der Fall, denn meist soll diese Verteilung ermittelt werden. „Über weitere theoretische Überlegungen und einer Transformation erhält man die gesuchte Dichtefunktion für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Ranggrößen.“ [2, p. 79] Das Ergebnis ist eine Beta-Verteilung $\varphi_n(u)$ mit der Betavariablen u , welche als Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_i)$ interpretiert werden kann. [2, p. 80]

Abbildung 2.10 gibt eine dreidimensionale Veranschaulichung der Streuungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten in einer Stichprobe im Umfang von $n = 30$. Die Grafik lässt sich beispielhaft wie folgt interpretieren: Der 15. Ranggröße kann eine Ausfallwahrscheinlichkeit von zirka 20 % bis 90 % zugewiesen werden. Viel wahrscheinlicher ist es, dass sie bei etwa 60 % liegt, da hier die Dichtefunktion der 15. Ranggrößen-Verteilung ihr Maximum aufweist.

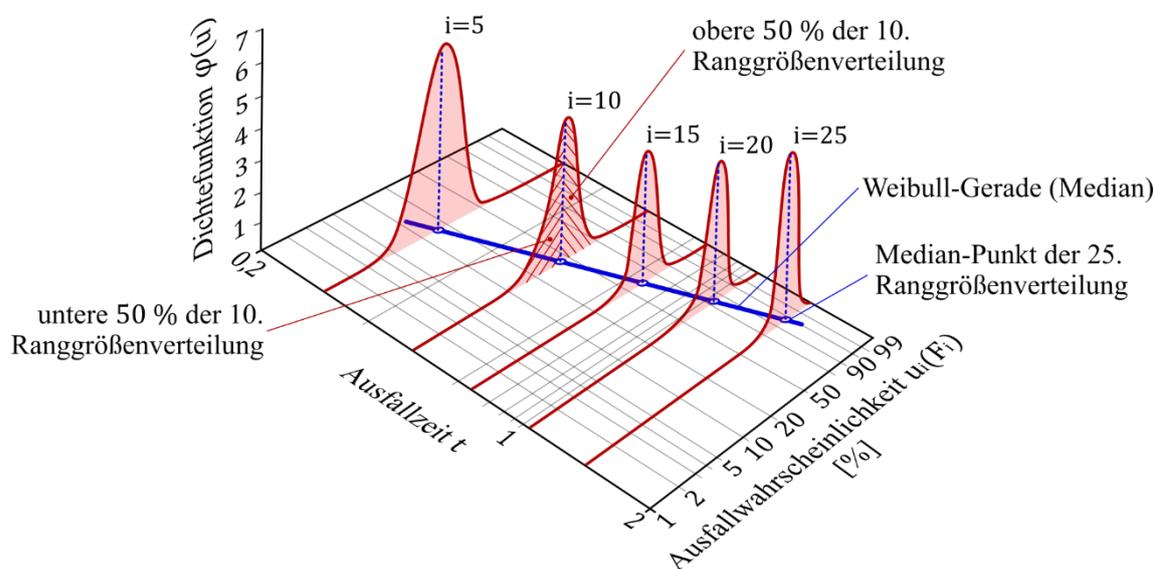


Abbildung 2.10: Dichtefunktionen der Ranggrößen-Ausfallwahrscheinlichkeiten mit den abgeleiteten Medianwerten und der Weibull-Gerade [2, p. 82]

Ziel ist es, den unterschiedlichen Ausfallzeiten eine Ausfallwahrscheinlichkeit zuzuordnen, die mit großer Wahrscheinlichkeit zutrifft. Dazu dienen drei Schätzwerte: Der arithmetische Mittelwert, der Modalwert und der Median. Diese lassen sich jeweils aus der Dichtefunktion $\varphi(u)$ ableiten. In der Praxis wird vor allem der Median verwendet. Für ihn gibt es keine geschlossene Lösung, aber die Näherungsgleichung

$$F(t_i) \approx \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (2.18)$$

die für viele Untersuchungen absolut ausreichend ist. Bei Eintragung der Medianpunkte in das Weibull-Netz kann im Idealfall eine Gerade – die Weibull-Gerade – gelegt werden (siehe Abbildung 2.10). Durch die Formulierung anhand der Medianwerte ist zu erwarten, dass in 50 % der Fälle die tatsächlich zuzuordnende Ausfallwahrscheinlichkeit über der Weibull-Geraden liegt und in den restlichen 50 % darunter. [2, pp. 80-81]

2.3.3 Vertrauensbereiche

Wie in Abschnitt 2.3.2 erwähnt, wird durch die ermittelte Weibull-Gerade nur die betrachtete Stichprobe beschrieben. Eine zweite Stichprobe aus der Grundgesamtheit würde eine Weibull-Gerade ergeben, die mehr oder weniger von der Weibull-Gerade der ersten Stichprobe abweicht. Grund ist die Streuung der Ranggrößen. Es stellt sich die Frage, in welchem Bereich die tatsächliche Gerade zu erwarten ist. Dazu wird ein sogenannter Vertrauensbereich definiert, der in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Ranggrößenverteilung steht. Üblicherweise wird ein Vertrauensbereich von $P_A = 90\%$ angegeben. Dieser Bereich wird durch die 5%-Vertrauensgrenze und die 95%-Vertrauensgrenze gebildet. Die Vertrauensgrenzen ergeben sich wiederum über einzelne Grenzpunkte. Diese Punkte können über das Integral der Dichtefunktion $\varphi(u)$ für jede einzelne Ranggröße berechnet werden (siehe Abbildung 2.11). Der einfachere Weg führt über Tabellen, in denen die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Grenzpunkte für jede Ranggröße eines bestimmten Stichprobenumfangs angegeben sind. [2, pp. 82-83]

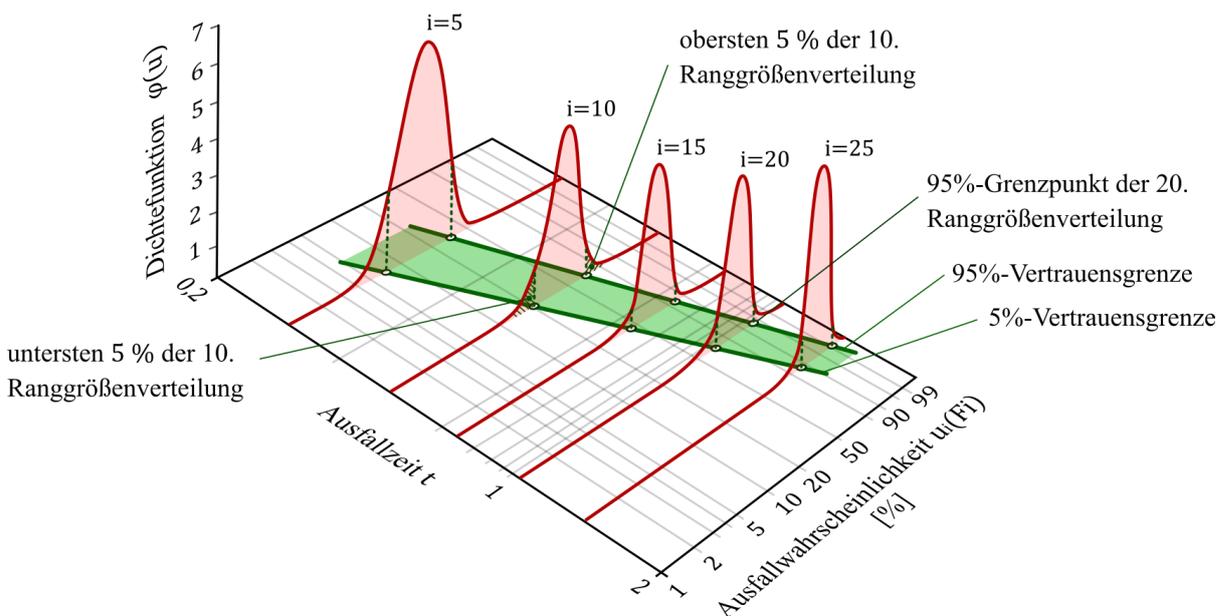


Abbildung 2.11: 90 %-Vertrauensbereich der Dichtefunktionen der Ranggrößen-Ausfallwahrscheinlichkeiten [2, p. 83]

Eine Veranschaulichung zur Interpretation des Vertrauensbereiches bietet Abbildung 2.11. Durch das Verbinden der entsprechenden Grenzpunkte aller Ranggrößen erhält man eine obere und eine untere Vertrauensgrenze. Die Weibull-Gerade aus den Median-Punkten liegt bei obiger Definition in 90 % der Fälle innerhalb des Vertrauensbereichs. Im Weibull-Netz ergeben sich die Darstellungen der Vertrauensgrenzen als gekrümmte Kurven (siehe Abbildung 2.12). Basis für diese Grafik ist die beispielhafte Lebensdaueruntersuchung von Wälzlagern aus Abschnitt 2.3.1.

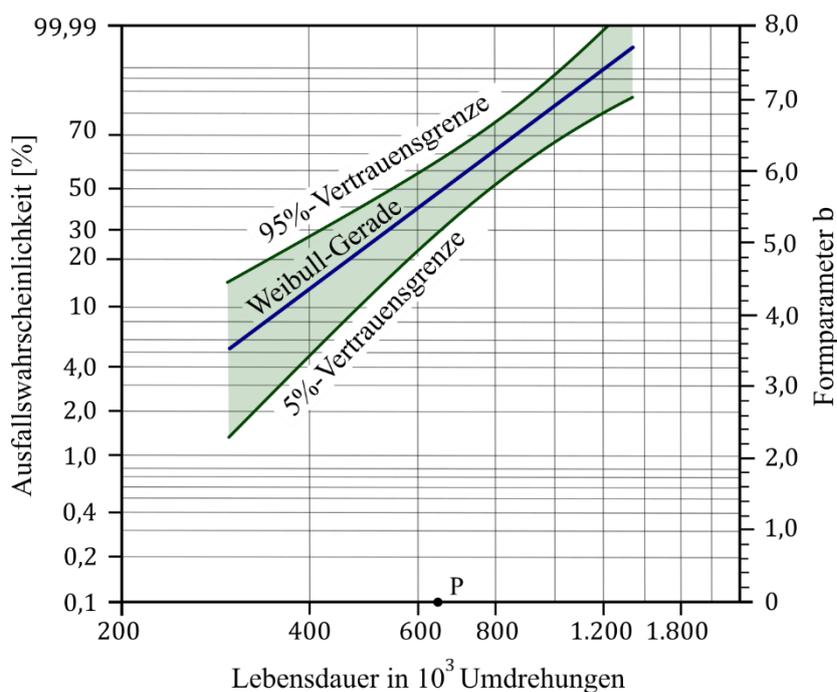


Abbildung 2.12: Die aus dem Wälzlager-Lebensdauerversuch abgeleitete Weibull-Gerade mit dem 90%-Vertrauensbereich, dargestellt im Weibull-Netz

Besonders wenn nur ein kleiner Stichprobenumfang vorhanden ist, ist eine Betrachtung des Vertrauensbereiches unerlässlich, da in diesem Fall die Abweichung zur tatsächlichen Geraden erheblich sein kann. Steigt der Stichprobenumfang, wird der Vertrauensbereich enger, bis er für etwa $n > 50 \dots 100$ zur Gänze vernachlässigt werden kann. [2, p. 84]

Vertrauensbereiche der Weibull-Parameter

Die Weibull-Gerade einer bestimmten Stichprobe kann eine beliebige Lage innerhalb des im Weibull-Netz aufgespannten Vertrauensbereichs einnehmen. Das heißt, dass unterschiedliche Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit auch unterschiedliche Steigungen aufweisen können. Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 gezeigt, ist die Steigung der Weibull-Gerade ein direktes Maß für den Formparameter b . Dies führt dazu, dass die charakteristische Lebensdauer T einzelner Stichproben unterschiedlich sein kann. Es kann aus dem Vertrauensbereich der Weibull-Geraden ein Vertrauensbereich für die Weibull-Parameter abgeleitet werden. [2, pp. 91-92]

Die obere und untere Vertrauensgrenze für die Parameter b und T ergeben sich durch jene Weibull-Geraden, die die innenliegenden Tangenten an die Vertrauensbereiche darstellen. Die grafische Ermittlung dieser Maximal- und Minimalwerte gestaltet sich im Weibull-Netz einfach. Eine analytische Berechnung des Vertrauensbereichs für die Weibull-Parameter über die Beta-Verteilung ist hingegen mit erheblichem Aufwand verbunden. An dieser Stelle kommen Näherungsgleichungen zum Einsatz, welche die Berechnung wesentlich vereinfachen. Nach [11] kann mit folgender Gleichung der Vertrauensbereich für den Formparameter b berechnet werden:

$$b \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{K}{n}}} \leq b \leq b \left(1 + \sqrt{\frac{K}{n}} \right) \quad (2.19)$$

Die Konstante K ist – entsprechend Tabelle 2.3 – vom gewählten Vertrauensbereich abhängig.

Tabelle 2.3: Konstante K in Abhängigkeit vom Vertrauensbereich

Vertrauensbereich	K
90 [%]	1,4
95 [%]	2,0
99 [%]	3,4

Nach [12] können für die charakteristische Lebensdauer T der Weibull-Verteilung die Vertrauensgrenzen mit Hilfe der χ^2 -Verteilung über

$$T \left(\frac{2n}{\chi_{2n,1-\alpha/2}^2} \right)^{1/b} \leq T \leq T \left(\frac{2n}{\chi_{2n,\alpha/2}^2} \right)^{1/b} \quad (2.20)$$

berechnet werden. Dabei ist $\alpha = 1 - P_A$. Für den richtigen Umgang mit der χ^2 -Verteilung sei auf [12] verwiesen.

2.3.4 Parameterbestimmung

Aus Abschnitt 2.2.3 geht hervor, dass die zweiparametrische Weibull-Verteilung durch die Parameter b und T definiert ist. Die grafische Bestimmung der Parameter im Weibull-Netz ist zwar eine einfache und überschaubare Methode, wird aber heutzutage in der Praxis nicht mehr angewendet. Diese konservative Vorgehensweise bringt viele Nachteile, wie Ungenauigkeit, Inflexibilität, hoher Zeitaufwand etc. mit sich. Viel eher kommen rechnerbasierte Auswertungsmethoden zum Einsatz, die in zahlreichen Statistik-Softwareprogrammen implementiert sind. [2, p. 101]

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Intervallschätzung der unbekanntenen Weibull-Parameter. Die bekanntesten analytischen Methoden sind die Regressionsanalyse, die Maximum-Likelihood-Methode und die Momenten-Methode. Im Folgenden wird die Regressionsanalyse genauer beleuchtet, da innerhalb dieser Diplomarbeit mit dieser Methode gearbeitet wird. Eine detaillierte Beschreibung weiterer Methoden ist in [13] zu finden.

Regressionsanalyse

Ziel einer Regressionsanalyse im Zuge einer statistischen Auswertung von Lebensdauerversuchen ist es, eine Verteilung $F(t)$ zu finden, welche die Ausfallpunkte „bestmöglich“ beschreibt. Mit Gleichung (2.12) können im Anschluss die Weibull-Parameter b und T berechnet werden. Bei der Regressionsanalyse wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewendet. Hier wird im Weibullnetz eine Gerade so um die Wertepaare t_i und $F(t_i)$ gelegt, dass die Summe der Abstands-Quadrate in Abszissen- (Least-Square ΔX) oder Ordinatenrichtung (Least-Square ΔY) zwischen allen Datenpunkten und der Geraden so klein wie möglich – also zum Minimum – wird. [14, p. 183]

In [8, p. 146] wird empfohlen, die Fehlerquadrate in horizontaler Richtung (ΔX) zu minimieren. Das macht vor allem dann Sinn, wenn die Lebensdauerwerte nicht exakt bekannt sind (Ausfälle werden nicht sofort erkannt). Ein Maß für die Qualität der Schätzung bzw. dafür, wie gut die Regression funktioniert, ist das Bestimmtheitsmaß R^2 . Für die Berechnung dieser Kennzahl sei auf [14, p. 187] verwiesen. Als Ergebnis erhält man für R^2 Werte im geschlossenen Intervall zwischen null und eins. Dabei stellt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 1$ den Optimalfall dar, weil dann alle Wertepaare exakt auf der Regressions-Gerade liegen. Um statistische abgesicherte Aussagen über das Lebensdauerverhalten von Bauteilen machen zu können, wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,9$ empfohlen und $R^2 > 0,95$ angestrebt. Liegt das Bestimmtheitsmaß unterhalb der empfohlenen Grenze, sollten weitere Tests durchgeführt werden, um eine mögliche Minimierung der Streuung zu erhalten.

2.3.5 Interpretation der Steigung

Auf den vorangegangenen Seiten wird gezeigt, dass der Formparameter b einer Weibull-Verteilung grafisch aus dem Weibull-Netz, oder rechnerisch aus der Regressionsanalyse ermittelt wird. Anhand seines Wertes ist es möglich, eine Aussage über die Ausfallursache bzw. das Fehlerbild der betrachteten Einheiten zu treffen (siehe Tabelle 2.4). In Weibull-Analysen im Maschinenbau kommen vor allem Formfaktoren vor, deren Werte größer als eins sind. In diesem Fall sind die Ausfälle auf Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen zurückzuführen. In Lebensdaueruntersuchungen sind speziell diese Ausfallursachen von hoher Bedeutung. [2, p. 35]

Tabelle 2.4: Interpretation der Steigung im Weibull-Netz [15, p. 943]

Wert des Formparameters b	Ausfallursache, Fehlerbild	Beispiele
$b < 1$	Frühausfälle	Fertigungsfehler, Montagefehler, Werkstofffehler
$b = 1$	Zufallsausfälle	Bedienungsfehler, Wartungsfehler
$1 < b < 4$	Zeitabhängige Ausfälle (Alterungseffekte)	Verschleiß von Bremsbelägen, Ausfall von Wälzlagern innerhalb des Auslegungszeitraums, Dauerbrüche
$b > 4$	Spätausfälle	Stresskorrosion, Erosion

Mischverteilungen

Bei der praktischen Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen kann es vorkommen, dass sich ab einer bestimmten „Laufzeit“ die Steigung der Weibull-Gerade markant ändert. Der Grund dafür ist, dass sich Lebensdauer-Einflussfaktoren über die Zeit ändern, oder generell unterschiedliche Ausfallmechanismen auftreten können. In diesem Fall liegt eine Mischverteilung vor. Diese Art von Verteilung ist durch eine einzige Weibull-Gerade nur schlecht beschreibbar. Wenn der Ausfallgrund für jedes Bauteil festgestellt werden kann, wird empfohlen, eine entsprechende Trennung der Daten unterschiedlicher Ausfallursachen durchzuführen. Anschließend können mit diesen separaten Daten-gruppen getrennte Weibull-Analysen vorgenommen werden. [2, p. 211], [15, p. 943]

2.3.6 Nachweis einer geforderten B_q -Lebensdauer

Ein wesentlicher Vorteil von statistischen Lebensdaueruntersuchungen ist, dass quantitative Aussagen über die erreichte Qualität der getesteten Einheiten möglich sind. In der Spezifikation von Produkten wird eine Zuverlässigkeit bei einer gewissen Laufzeit gefordert, um Wartungs- und Instandhaltungskosten im Vorfeld abschätzen zu können. Mit dem Weibull-Diagramm wird diese Art an Qualitätsanforderungen nachgewiesen. „Unter der B_q -Lebensdauer versteht man jene Lebensdauer, bis zu der q Prozent der Einheiten einer Menge ausgefallen sind.“ [2, p. 386] Zusätzlich zur geforderten Zuverlässigkeit muss Aussagewahrscheinlichkeit P_A angegeben werden. Üblich ist ein Wert von $P_A = 90\%$. [8, p. 169]

Betrachtet wird einmal mehr das Ausfallverhalten im Wälzlager-Beispiel. Es wird überprüft, ob durch die $n = 20$ getesteten Lager eine B_5 -Lebensdauer, bei einer Prüfzeit von $t = 150.000$ Umdrehungen, erreicht wird. Bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von $P_A = 90\%$ ist im Weibull-Netz der 80%-Vertrauensbereich um die Weibull-Gerade darzustellen. Weiters kann der Punkt $F(t = 150.000) = 5\%$ in das Diagramm eingezeichnet werden. Aus Abbildung 2.13 ist ersichtlich, dass dieser Punkt über der oberen Vertrauensgrenze liegt. Dies bedeutet, dass die geforderte B_q -Lebensdauer nachgewiesen ist. Gegenteiliges wäre der Fall, wenn sich der Punkt unterhalb der oberen Vertrauensgrenze befinden würde.

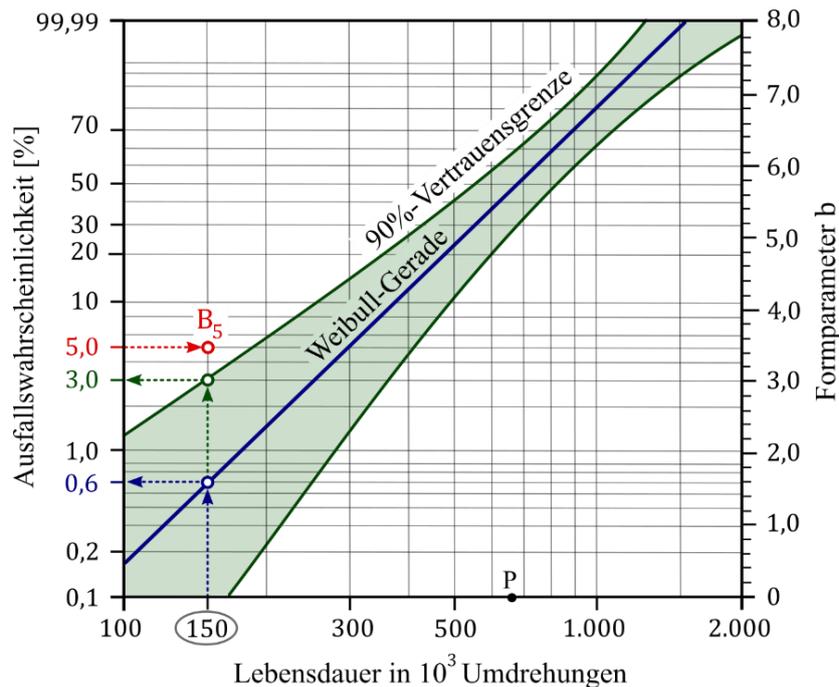


Abbildung 2.13: Nachweis einer geforderten B_5 -Lebensdauer im Wälzlager-Beispiel, bei einer Laufzeit von 150.000 Umdrehungen und 90%-Ausfallwahrscheinlichkeit

Mit Gleichung (2.2) kann zur jeder Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ die entsprechende Zuverlässigkeit $R(t)$ berechnet werden. Mit dieser Funktion kann der oft qualitativ verwendete Begriff der „Zuverlässigkeit“ objektiv und quantitativ beurteilt werden.

Zusammenfassend ist Abbildung 2.13 wie folgt zu interpretieren: Durch die $n = 20$ untersuchten Wälzlager wird eine Zuverlässigkeit von $R(t = 150.000) = 99,4\%$ erreicht. Da es sich hierbei aber um eine Stichprobe handelt, muss der Vertrauensbereich der Weibull-Gerade betrachtet werden, um Aussagen über die Grundgesamtheit machen zu können. Für einen 80%-Vertrauensbereich liegen 10 % der Ausfälle über der oberen Vertrauensgrenze. Mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 90 % kann behauptet werden, dass 97 % aller Wälzlager zu einem späteren Zeitpunkt ausfallen.

2.4 Weitere Zuverlässigkeitsmethoden

In der Literatur zur Zuverlässigkeitstheorie findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, die alle das Ziel verfolgen, über eine spezielle Vorgehensweise Entwicklungszeit und –kosten zu sparen. Eine detaillierte Erklärung aller wichtigen Methoden würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Aus diesem Grund wird nur die Theorie hinter den Methoden erklärt, die auch im praktischen Teil der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommen. Zu Beginn werden sogenannte Raffungstests erläutert. Es wird die Vorgehensweise aufgezeigt, die eingesetzt wird, wenn zwei Weibull-Verteilungen miteinander verglichen werden sollen. Der Abschnitt über zensierte Daten erklärt, wie in statistischen Lebensdaueruntersuchungen mit Bauteilen umgegangen wird, die nicht bis zum Ausfall getestet werden. Weiters wird eine Methode – der sogenannte Success-Run – erläutert, mit der eine Aussage über die Zuverlässigkeit möglich ist, auch wenn es im Zuge einer Lebensdaueruntersuchung zu gar keinem Ausfall kommt. Mit der Erklärung des Zusammenhangs zwischen Weibull- und Wöhler-Linie wird dieser Abschnitt abgeschlossen.

2.4.1 Raffungstests

Lebensdaueruntersuchungen nehmen oft viel Zeit in Anspruch. Speziell dann, wenn die Produkte unter den spezifizierten Belastungen getestet werden. Um Lebensdaueruntersuchungen zu beschleunigen, und schnellere Aussagen über die Zuverlässigkeit zu erhalten, werden Raffungstests durchgeführt. Bei diesen Tests werden, im Vergleich zur realen Belastungssituation im Feld, die Probanden einer erhöhten Belastung ausgesetzt. Diese Verschärfung der Prüfbedingungen ist nur zulässig, wenn sich der ursprüngliche Ausfallmechanismus nicht ändert. Wie in Abbildung 2.14 dargestellt, verläuft die Weibull-Gerade eines erfolgreichen Raffungstests zur Weibull-Gerade der normalen Beanspruchung parallel (Steigung b bleibt gleich) und liegt im Weibull-Netz weiter links (charakteristische Lebensdauer T ändert sich).

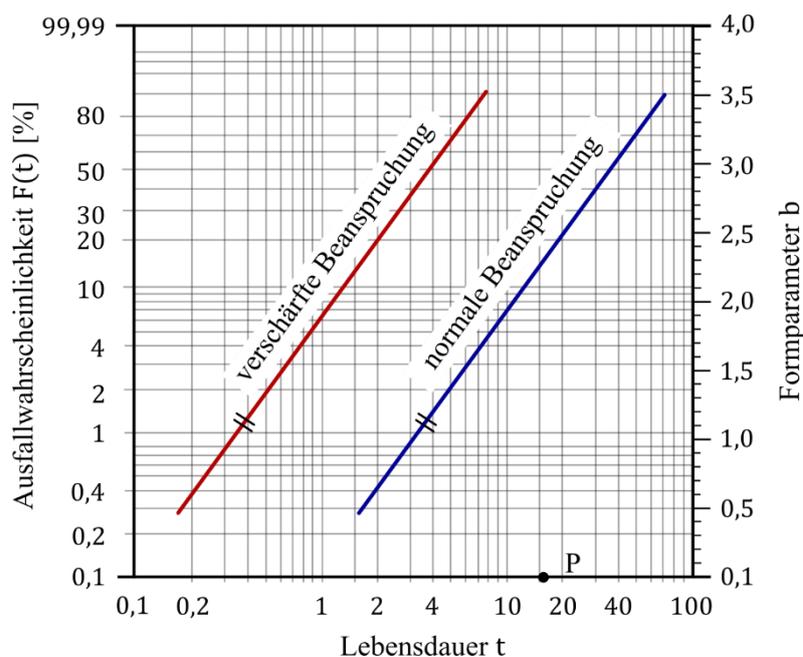


Abbildung 2.14: Qualitative Darstellung der Weibull-Geraden im Feldversuch und im Raffungstest

Sind die Steigungen der Geraden gleich, kann der Raffungsfaktor κ über

$$\kappa = \frac{t_n}{t_v} \quad (2.21)$$

ermittelt werden. Der Index n in der Lebensdauer bezieht sich auf die normale, der Index v auf die verschärfte Beanspruchung. Der Raffungsfaktor gibt die Relation zwischen Bauteilverhalten im Versuch und im Feld an und ist vom Niveau der Ausfallhäufigkeit unabhängig. Er wird für spätere Untersuchungen, die mit gleicher verschärfter Belastung gefahren werden, verwendet, um von den Versuchsergebnissen auf die reale Feldverteilung zu schließen. [3, p. 30]

2.4.2 Vergleich von zwei Weibull-Verteilungen

In Zuverlässigkeitsstudien, vor allem in der Produktentwicklung, ist man oft mit der Fragestellung konfrontiert, ob ein System zuverlässiger ist als das andere, bzw. ob eine bestimmte Änderung am Produkt eine Verlängerung der Lebensdauer bewirkt. Dafür ist es notwendig, die Ausfallverteilungen von zumindest zwei Lebensdaueruntersuchungen miteinander zu vergleichen.

Es wird vorab die Nullhypothese H_0 aufgestellt, die davon ausgeht, dass die betrachteten Datenreihen einer mittleren, gemeinsamen Verteilung angehören. Obwohl die eigentliche Aufgabenstellung normalerweise die Suche nach einem Unterschied ist, muss man H_0 aufstellen, um diese in späterer Folge wieder ablehnen zu können. Das Ergebnis dieses statistischen Vergleiches von zwei Verteilungen ist also, ob die aufgestellte Nullhypothese verworfen werden kann, oder nicht. Dazu wird in [8, pp. 165-166] für den statistischen Vergleich von zwei Weibull-Verteilungen folgende Vorgehensweise in drei Schritten empfohlen:

Schritt 1

Die Formparameter b_1 und b_2 sowie die charakteristischen Lebensdauern T_1 und T_2 sind aus den durchgeführten Lebensdaueranalysen bekannt. Aus ihnen werden die mittleren Parameter b_m und T_m über

$$T_m = e^{\frac{\ln(T_1) + \ln(T_2)}{2}} \quad (2.22)$$

$$b_m = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (2.23)$$

bestimmt. Diese beiden mittleren Parameter definieren eine neue Weibull-Gerade, die als Gesamtgerade definiert wird.

Schritt 2

Es wird ein Vertrauensniveau für die sich ergebende mittlere Verteilung festgelegt, üblicherweise $P_A = 90\%$. Anschließend können die Vertrauensgrenzen für die Parameter der Gesamtgerade, mit den Gleichungen (2.19) und (2.20), bestimmt werden. Trägt man in einem Diagramm T als Abszisse und b als Ordinate auf, ergibt sich durch die berechneten Vertrauensgrenzen ein Rechteck, das den Vertrauensbereich der Parameter der Gesamtgerade darstellt.

Schritt 3

Nun werden die zwei Wertepaare b_1, T_1 und b_2, T_2 in selbiges Diagramm eingetragen. Befindet sich einer oder beide Punkte der einzelnen Verteilungen außerhalb des Rechtecks, wird die Nullhypothese H_0 abgelehnt. Das bedeutet, dass sich die beiden ursprünglichen Verteilungen signifikant unterscheiden. Liegen hingegen die Punkte innerhalb des aufgespannten Rechtecks, kann H_0 nicht verworfen werden. In diesem Fall kann kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden, da beide Verteilungen einer mittleren Verteilung unterliegen. Es lässt sich damit zeigen, dass die Verteilungen einer natürlichen, zufälligen Streuung unterliegen und aus derselben Grundgesamtheit stammen.

2.4.3 Zensierte Tests

Die statistisch genaueste Aussage über die Zuverlässigkeit von Produkten kann gemacht werden, wenn alle Bauteile einer Stichprobe bis zum Ausfall getestet werden oder Lebensdauerdaten aus dem Feld vorliegen. Dies kann sehr viel Zeit und Ressourcen beanspruchen. Um den Testaufwand zu verkürzen, ist es sinnvoll, unvollständige Tests durchzuführen. Bei dieser Art von Lebensdaueruntersuchungen werden Probanden bis zu einer gewissen Zeit getestet, oder bis eine gewisse Anzahl an Probanden ausgefallen sind. Die Ergebnisse aus solchen Tests sind nicht so aussagekräftig wie die eines vollständigen Tests, dafür kann der Prüfaufwand wesentlich verringert werden. Man spricht

hier auch von zensierten Tests oder zensierten Daten. Probanden, die ohne Versagen aus dem Test entnommen werden, heißen Durchläufer. [2, p. 61] Es existieren unterschiedliche Typen von Zensierungen. Eine Übersicht der möglichen Fälle bietet Tabelle 2.5.

Tabelle 2.5: Überblick über wichtige Typen von Daten-Zensierungen [8, pp. 162-163]

	Rechtszensiert Typ II	Rechtszensiert Typ I zufällig	Intervallzensiert
Beschreibung	Es gibt Probanden, die ausgefallen sind und Durchläufer, deren Laufzeiten größer als der späteste Ausfall sind	Es gibt Ausfälle und Durchläufer mit völlig unterschiedlichen Laufzeiten, die alle bekannt sind.	Der Ausfallzeitpunkt kann auf ein bestimmtes Prüfintervall eingeschränkt werden. Exakter Zeitpunkt unbekannt.
Veranschaulichung			
Methode	Standard-Weibull-Analyse $n = n_A + n_D$	Nicht schadhafte Teile $n = n_A + n_D$	Mit Durchläufer wie Nicht schadhafte Teile, Laufzeiten der zensierten Ausfälle über mittlere Laufzeiten zwischen Prüfintervallen $n = n_A$

Auffällig ist, dass im Fall von rechtszensierten Daten des Typs II, die Auswertung wie bei einem vollständigem Test erfolgen kann, ohne dass die in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Methode geändert werden muss. Die Summenhäufigkeiten werden nach Gleichung (2.18) mit der gesamten Anzahl der getesteten Probanden n berechnet (also Ausfälle inklusive Durchläufer). Dies ist nur möglich, wenn die Art der Verteilung gesichert ist und sich der Ausfallmechanismus mit höheren Laufzeiten nicht ändert. [2, p. 110]

Für die Erklärung zur Methode „Nicht schadhafte Teile“ sei auf [2] verwiesen.

2.4.4 Success-Run

Grundvoraussetzung einer Weibull-Auswertung ist, dass im Lebensdauerversuch Ausfälle aufgetreten sind. Ist dies nicht der Fall (alle Probanden überleben den Test), kann keine Weibull-Gerade ermittelt werden. Dennoch gibt es eine Möglichkeit, eine Aussage über die erreichte Zuverlässigkeit zu treffen. Es wird angenommen, dass n idente Prüflinge zum Zeitpunkt t alle dieselbe Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit) $R(t)$ aufweisen. Die Wahrscheinlichkeit P_A , bis zum Zeitpunkt t mindestens einen Ausfall zu beobachten, ergibt sich nach dem Produktgesetz der Wahrscheinlichkeiten zu $P_A = 1 - R(t)^n$. [2, pp. 63-64]

Für den Nachweis einer Mindestzuverlässigkeit ist es sinnvoll, Probanden länger auf ihre Lebensdauer zu testen als vorgeschrieben wird. In diesem Fall ist die Prüfzeit t_p höher als die geforderte Lebensdauer t_s . Deren Verhältnis wird als Lebensdauerverhältnis definiert und ergibt sich zu $L_v = t_p/t_s$. Es lässt sich zeigen, dass der in Abschnitt 2.4.1 beschriebene Raffungsfaktor κ eine um ihn proportionale Erhöhung des Lebensdauerverhältnisses bewirkt. Durch Umstellen der oberen Gleichung und durch Einsetzen des Lebensdauerverhältnisses ergibt sich Gleichung

$$R_{min}(P_A, n, L_v, b) = (1 - P_A)^{\frac{1}{nL_v^b}}. \quad (2.24)$$

Es ist zu erkennen, dass sich die Mindestzuverlässigkeit aus vier Parametern berechnet. Allerdings sind nicht immer alle Parameter bekannt und es müssen gewisse Annahmen getroffen werden, um auf die Mindestzuverlässigkeit schließen zu können. Gleiches gilt, wenn die Gleichung auf einen beliebigen Parameter umgestellt wird. Eine Übersicht der vorkommenden Parameter und ihrer üblich verwendeten Werte bietet Tabelle 2.6.

Tabelle 2.6: Übersicht der in der Gleichung für den Success-Run vorkommenden Parameter

	Parameter	Üblicher/Empfohlener Wert	Erhöhung führt zur ... von R_{min}
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit	$P_A = 90 \%$	Verringerung
n	Stichprobenumfang	$10 \leq n \leq 50$	Erhöhung
L_v	Lebensdauerverhältnis	$L_v \geq 1$	Erhöhung
b	Formparameter der Weibull-Verteilung	$b = 2$	Erhöhung

Formell ist eine Berechnung der Mindestzuverlässigkeit auch für ein Lebensdauerverhältnis möglich, dessen Wert kleiner als eins ist. Jedoch haben in diesem Fall die Probanden die geforderte Lebensdauer nicht erreicht. Daher handelt es sich nicht um einen Success-Run. Im Zuge eines Raffungstests dürfen Bauteile hingegen vor dem Erreichen der erforderlichen Lebensdauer ausfallen. Handelt es sich bei der Untersuchung um einen Raffungstest, wird das Lebensdauerverhältnis mit den Raffungsfaktor κ (siehe Abschnitt 2.4.1) multipliziert, bevor es in Gleichung (2.24) eingesetzt wird. Weiters

wird in der Regel der Formparameter mit $b = 2$ nur dann angenommen, wenn die hinter den Ausfällen stehende Weibull-Verteilung unbekannt ist. [8, p. 172]

Treten im Zuge eines Zuverlässigkeitsnachweises vereinzelte Ausfälle auf, ist Gleichung (2.24) zur Berechnung der Mindestzuverlässigkeit nicht mehr gültig. In diesem Fall lässt sich aus dem Binomialsatz eine Gleichung ableiten, in der die Anzahl der Ausfälle berücksichtigt ist. Ein analytisches Lösen dieser Beziehung ist nicht möglich und es muss mit dem sogenannten Larson-Nomogramm gearbeitet werden. An dieser Stelle sei auf [16] verwiesen.

Wie schon in Abschnitt 2.3.6 erwähnt, wird in der Spezifikation eines Produktes eine geforderte Zuverlässigkeit bei einer bestimmten Laufzeit definiert. Mithilfe der Success-Run-Gleichung kann durch einfaches Umstellen der Gleichung (2.24) der benötigte Stichprobenumfang mit erforderlicher Prüfdauer berechnet werden. Diese Methode ist häufig die Grundlage in der statistischen Testplanung für Zuverlässigkeitsnachweise.

2.4.5 Wöhler-Diagramm

Die Lebensdauer von Bauteilen hängt stark von der Belastung ab, mit der sie beansprucht werden. Es gibt Unterschiede im Ausfallverhalten gleicher Proben, wenn der zeitliche Verlauf der Beanspruchung variiert wird. Solche dynamischen Lasten, die sich ab einer gewissen Zeitperiode mehr oder minder regelmäßig wiederholen, werden als schwingende Beanspruchung bezeichnet. Es ist möglich, dass ein schwingbeanspruchtes Bauteil bereits nach einer gewissen Anzahl an Lastwechsel bricht, obwohl die statische Belastungsgrenze größer ist, als die im Test auftretende maximale Belastung. In der praktischen Untersuchung von Lebensdauerverhalten hat es sich bewährt, Zählverfahren einzuführen, wenn Proben im Test einer schwingenden Beanspruchung ausgesetzt sind. Einen Zusammenhang zwischen der erreichten Schwingspielzahl und der Höhe der Belastung beschreibt die empirisch ermittelte Wöhler-Linie im Wöhler-Diagramm. [17, p. 108]

Wöhler-Linie

Die Wöhler-Linie ist das Ergebnis aus vielen Schwingversuchen, die an identen Proben durchgeführt werden. Ihr Verlauf im Wöhler-Diagramm ist von mehreren Faktoren abhängig: Probengeometrie, Belastungssituation, Schadensmechanismus, Werkstoff, Umgebungseinflüsse usw. Während der gesamten Schwingversuchsreihe werden diese Einflussfaktoren konstant gehalten. Lediglich die Belastung σ wird von Versuch zu Versuch variiert. Die vom Bauteil erreichte Schwingspielzahl N , bei der das Versagen eintritt, wird notiert. Die Wertepaare (σ_i, N_i) werden in ein Diagramm – dem Wöhler-Diagramm – aufgetragen. Mit dem Verbinden dieser Punkte durch eine geschlossene Kurve wird die Wöhler-Linie gebildet. Eine schematische Darstellung bietet Abbildung 2.15. Die Abszisse und Ordinate des Wöhler-Diagramms sind logarithmisch skaliert.

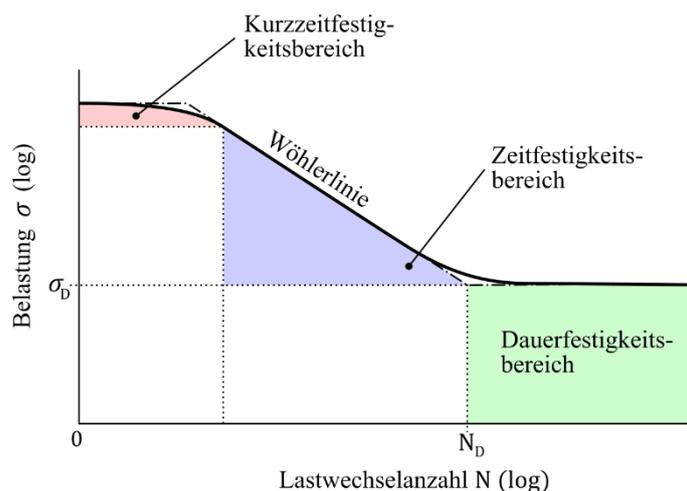


Abbildung 2.15: Qualitative Darstellung der Wöhler-Linie mit den drei Festigkeitsbereichen

Aus dem Wöhler-Diagramm ist zu erkennen, dass die Wöhler-Linie in ihrer Steigung zwei charakteristische Änderungen aufweist. So werden drei Bereiche definiert: Der Bereich der Kurzzzeitfestigkeit ist gekennzeichnet durch eine relativ kleine Lastwechselanzahl, bei der die ertragbare Schwingbeanspruchung annähernd die der statischen Lastgrenzen ist. Zum Beispiel liegt für zugbeanspruchte Stahl-Bauteile der Zeitfestigkeitsbereich über der Streckgrenze. Typisch für den Zeitfestigkeitsbereich ist, dass die ertragbaren Belastungen mit steigender Lastwechselanzahl immer kleiner werden. Es existiert ein Grenzwert der Belastung σ_D , bis zu dessen Höhe das Bauteil beliebig oft schwingend belastet werden kann, ohne dass es versagt. Abbildung 2.15 zeigt, dass diese Schwelle ab einer gewissen Anzahl an Schwingspiele N_D erreicht wird. Das Gebiet, das durch σ_D und N_D begrenzt wird, heißt Dauerfestigkeitsbereich. Ein Bauteil, das mit einer Belastung beansprucht wird, die unter der Dauerfestigkeitsschwelle σ_D liegt, ist dauerhaft. [2, p. 253]

Es soll erwähnt werden, dass es im Zeitfestigkeitsbereich keinen linearen Zusammenhang zwischen Belastung und ertragbare Lastwechsel gibt. Durch die logarithmische Skalierung der Ordinate und Abszisse ergibt sich in diesem Bereich die Wöhler-Linie als Gerade. Eine mathematische Beschreibung erfolgt über die Gleichung

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{-k} . \quad (2.25)$$

Der Wöhler-Exponent k ist ein Maß für die Steigung der Wöhler-Linie im Zeitfestigkeitsbereich des Wöhler-Diagramms. [2, p. 254]

Ableitung aus Weibull-Auswertung

Wie bereits erwähnt, wird das Wöhler-Diagramm aus empirischen Versuchen ermittelt. In den vorangegangenen Abschnitten wird mehrmals verdeutlicht, dass Testergebnisse einer gewissen Streuung unterliegen. Dies lässt sich auch auf die Erstellung des Wöhler-Diagramms umlegen. So werden zwei baugleiche Proben, die mit der gleichen Belastung schwingend beansprucht werden, äußerst selten die exakt gleiche Schwingungszahl erreichen. Eine Beurteilung der dahinterstehenden Verteilung kann mit der Verknüpfung von Weibull- und Wöhler-Diagramm erfolgen.

Für eine Ableitung des Wöhler-Diagramms aus einer Weibull-Auswertung müssen zumindest zwei Lebensdaueruntersuchungen mit unterschiedlichen Belastungsniveaus durchgeführt werden. Durch die Ausfallpunkte gleicher Belastung werden in einem gemeinsamen Weibull-Netz die Weibull-Geraden gelegt. Es lassen sich für jeden Belastungsfall die Punkte für eine bestimmte Ausfallhäufigkeit in das Wöhler-Diagramm projizieren. Der Ordinatenwert für die Punkte im Wöhler-Diagramm ist das entsprechende Belastungsniveau aus der Weibull-Auswertung. Wird dies für jede Weibull-Gerade – also für jeden Belastungsfall – durchgeführt, kann durch das Verbinden der Punkte gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit eine Wöhler-Linie gezogen werden. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist, dass die Abszissen beider Diagramme gleich skaliert sind. [8, pp. 180-181] Eine Veranschaulichung bietet Abbildung 2.16.

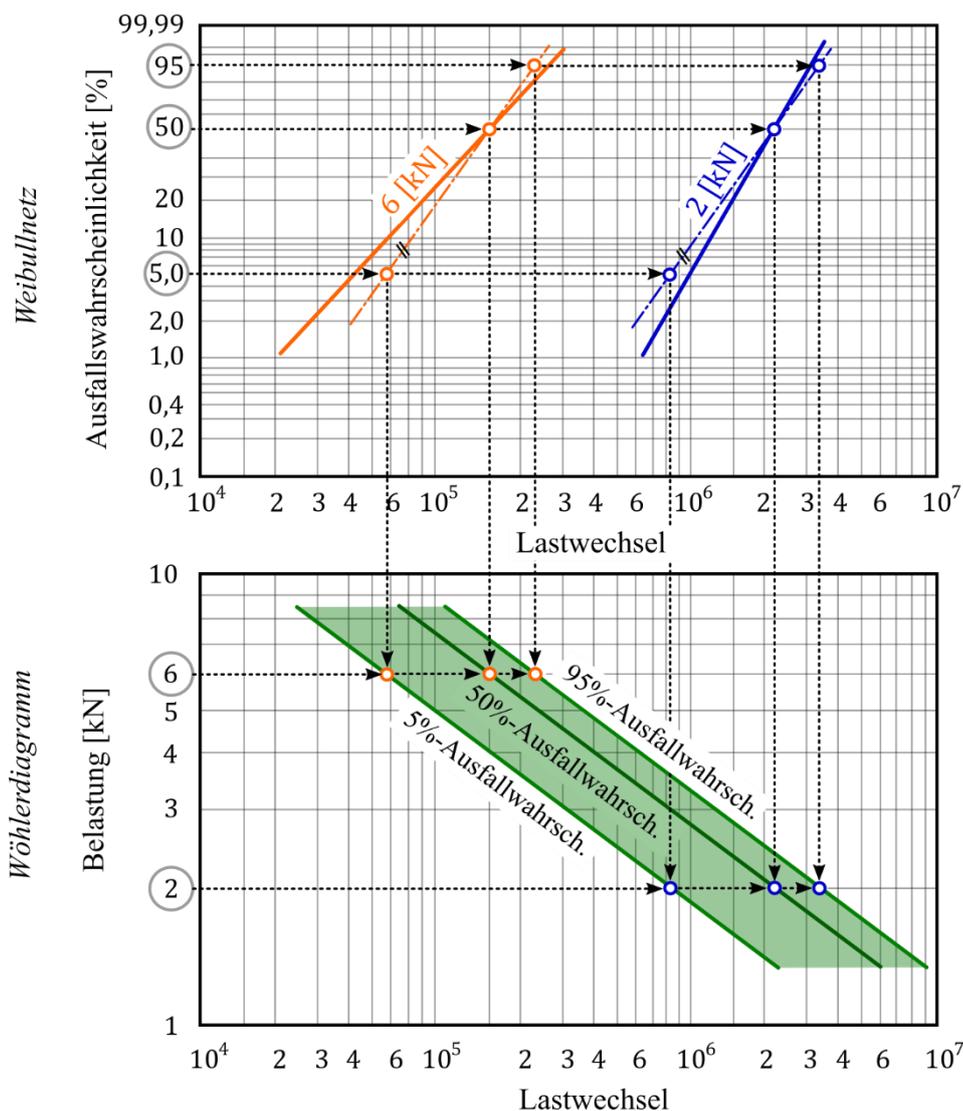


Abbildung 2.16: Übertragung von Punkten aus dem Weibull-Netz in das Wöhler-Diagramm

Durch diese Vorgehensweise kann im Wöhler-Diagramm nur der Zeitfestigkeitsbereich abgebildet werden, da für dauerfeste Bauteile keine Weibull-Gerade erstellt werden kann. Eine übliche Darstellung sind die Wöhler-Linien, welche die 5%-, 50%- und 95%-Ausfallwahrscheinlichkeit repräsentieren. Es kann vorkommen, dass sich die Steigungen der Weibull-Geraden im Weibull-Netz voneinander etwas unterscheiden, siehe Abschnitt 2.3.3. Aus diesem Grund werden für die Ermittlung der 5%- und 95%-Linie im Wöhler-Diagramm neue Weibull-Geraden erstellt. Diese weisen eine, über alle Belastungsfälle, gemittelte Steigung auf und verlaufen durch den 50%-Punkt der ursprünglichen Weibull-Geraden. [8, p. 181]

Durch die Kombination von Weibull- und Wöhler-Diagramm ist es möglich, anhand eines geringen Testaufwands schnell eine Aussage über das Ausfallverhalten bei unterschiedlichen Belastungen zu treffen. Des Weiteren können mit Hilfe des Wöhler-Diagramms beliebige Raffungsfaktoren zur Testzeitverkürzung einfach und schnell bestimmt werden.

3 Analyse

In diesem Kapitel wird das in Abschnitt 1.2 beschriebene Problem und Fehlverhalten der Handschalter in Lebensdauertests detailliert analysiert. Es werden zuerst die Bedienelemente untersucht, bei denen ein Schaden häufig beobachtet wird, aber auch jene, bei denen nur selten ein Defekt auftritt. Eine Reihe von Messungen gibt Einblick in die Kraftflussaufteilung im Inneren der Bedienelemente, wenn diese über eine externe Last betätigt werden. Weiters erfolgt durch eine optische Mikroskopuntersuchung die Identifizierung des eigentlichen Schadens. Ein Abschnitt widmet sich der Analyse der Testgeräte, die für Lebensdaueruntersuchungen der Bedienelemente zum Einsatz kommen. Das Ergebnis dieses Kapitels enthält die Auflistung aller Parameter, die das Lebensdauerverhalten der Bedienelemente beeinflussen könnten.

3.1 Bedienelemente

LOGICDATA entwickelt und produziert eine ganze Produktpalette an Bedienelementen. Der Aufbau, das Design, ihre Montagesituation und enthaltenen Komfortfunktionen sind unterschiedlich ausgeführt. Obwohl eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte vorliegt, werden für die Lebensdaueranalysen lediglich zwei verschiedene Bedienelemente herangezogen, um den Untersuchungsaufwand zu verringern. Diese sind der Einfachhandschalter „Touch-Basic“ und der Komforthandschalter „Touch-Inlay“. Sie werden in den folgenden Abschnitten in ihrem Lebensdauerverhalten, mechanischem Aufbau und ihrer Belastungssituation miteinander verglichen. Im Sprachgebrauch wird ein Bedienelement alternativ als Handschalter bezeichnet.

3.1.1 Touch-Basic

Der Touch-Basic verfügt über keine Komfortfunktionen wie Displayanzeige oder Speicherfunktion, sondern bietet dem Benutzer lediglich die Möglichkeit zwischen einer Auf- und Abfahrt des Antriebs zu wählen. Seine interne Elektronik ist auf ein Minimum reduziert. Der mechanische Aufbau ist kompakt ausgeführt. Die Montage erfolgt entweder an der Tischunterseite oder direkt in der Tischplatte selbst. Letztere Variante ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Bezeichnung dieses Handschalters wird mit „HS-TB“ abgekürzt.



Abbildung 3.1: Touch-Basic-Bedienelement, dargestellt in zwei Ansichten

Lebensdauerverhalten

Es liegen Daten aus Voruntersuchungen vor, die zeigen, dass die ertragbaren Betätigungszyklen des HS-TB um ein Vielfaches höher liegen, als die spezifizierte Mindestlebensdauer. Konkret können bei den meisten Handschaltern über drei Millionen Betätigungszyklen nachgewiesen werden, ohne dass Ausfälle auftreten. Beim HS-TB handelt es sich demnach um ein Bedienelement, das die Qualitätsanforderungen aus der Spezifikation (siehe Abschnitt 1.2) mit Leichtigkeit erfüllt.

3.1.2 Touch-Inlay

Der Touch-Inlay ist ein Komforthandschalter mit Display und einer berührungssensiblen Bedienfläche. Der Benutzer kann per Tastendruck entscheiden, ob sich der Antrieb nach oben oder unten bewegen, oder ob die aktuelle Tischposition gespeichert werden soll. Letzteres geschieht über die Memory-Tasten auf der linken Seite der Paneloberfläche (siehe Abbildung 3.2). Betätigt wird der Handschalter über die sogenannte „Touch&Click-Funktion“. Ein kapazitiver Sensor erkennt die vom Benutzer berührte Stelle am Panel. Für die Bestätigung der Betätigung muss das Panel an der entsprechenden Position soweit gedrückt werden, bis ein im Handschalter integrierter Mikroschalter auslöst. Zusätzlich erhält der Benutzer durch das Schalten des Mikroschalters eine haptische und auditive Information über den Auslösezeitpunkt des Handschalters. „HS-IL“ ist die Kurzschreibweise für ein Touch-Inlay-Bedienelement.



Abbildung 3.2: Touch-Inlay-Bedienelement, dargestellt in zwei Ansichten

Lebensdauerverhalten

Auch für Touch-Inlay-Handschalter sind Voruntersuchungen durchgeführt worden. Im Vergleich zum HS-TB sind in der erreichten Lebensdauer wesentliche Unterschiede feststellbar. Wie schon erwähnt, schafft der HS-TB Betätigungen in Millionenhöhe, während die HS-IL zum Teil schon bei einer Anzahl von weniger als 50.000 Zyklen versagen. Defekte treten so häufig auf, dass die geforderte Zuverlässigkeit nicht erreicht wird.

3.1.3 Integrierte Mikroschalter

Sind die Kontakte eines elektrischen Schalters um weniger als drei Millimeter voneinander entfernt, wird er als Mikroschalter bezeichnet. Es handelt sich um einen miniaturisierten Schalter, der zweipolig als Öffner oder Schließer oder dreidreipolig als Wechselschalter ausgeführt sein kann. [18]

Beim HS-IL und HS-TB kommen jeweils zwei zweipolige Schließer zum Einsatz. Die verbauten Mikroschalter sind für alle unterschiedlichen Handschalter, die LOGICDATA produziert, baugleich und werden vom gleichen Hersteller bezogen. Sie bestehen aus sechs separaten Komponenten. Eine Übersicht bietet Abbildung 3.3 mit der dazugehörigen Materialliste in Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Materialliste des Mikroschalters entsprechend Abbildung 3.3

Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Material
1	Anschluss	2	Messing (Kupfer-Zink)
2	Sockel	1	Nylon
3	Gehäuse	1	Nylon
4	Taster	1	Nylon
5	Blattfeder	1	Beryllium-Kupfer
6	Kontakt	1	Silber

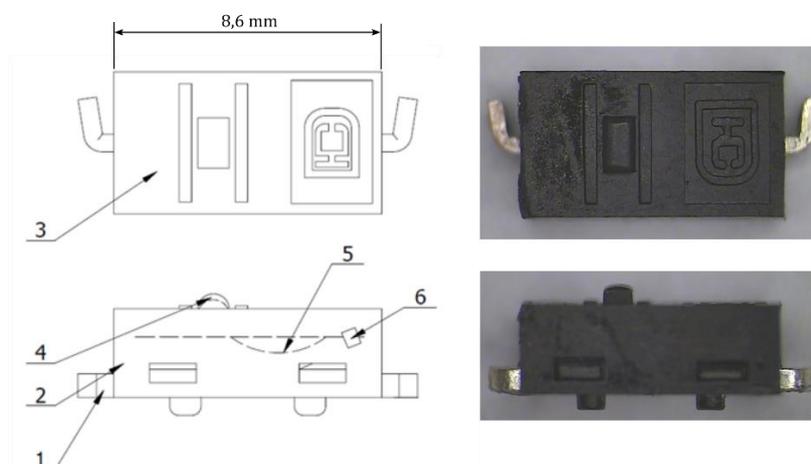


Abbildung 3.3: Komponenten der in den Bedienelementen verbauten Mikroschalter

Im unbelasteten Zustand ist der Mikroschalter geöffnet. Das bedeutet, dass es zwischen den beiden Anschlüssen (1) keine leitende Verbindung gibt. Wird der Taster (4) gedrückt, berührt dieser die Blattfeder (5). Das führt dazu, dass die Blattfeder ihre Ausgangslage verlässt und sich der Kontakt (6), der auf der Feder fest montiert ist, nach unten bewegt. Der Schaltvorgang wird durch das Aufeinandertreffen von Kontakt und Anschluss abgeschlossen, da dann über die Blattfeder eine leitende Verbindung zwischen den Anschlüssen existiert. Durch das mechanische Aufeinandertreffen dieser beiden Komponenten entsteht ein charakteristisches „Klickgeräusch“, das dem Benutzer Kenntnis über den Schaltzeitpunkt gibt. Die Blechstärke der Blattfeder beträgt $0,06\text{ mm}$.

3.1.4 Vergleich des mechanischen Aufbaus

Die Bedienelemente HS-TB und HS-IL unterscheiden sich nicht nur in ihrem Lebensdauerverhalten, sondern auch im mechanischen Aufbau. In Tabelle 3.2 sind die wichtigsten Unterschiede aufgelistet.

Tabelle 3.2: Direkter Vergleich des mechanischen Aufbaus zwischen HS-TB und HS-IL

	HS-TB	HS-IL
Abmaße	57,5 x 25 [mm]	95 x 42 [mm]
Kabeleinführung	In Symmetrieebene von hinten	Von links unten
Mikroschalteranordnung	2 Stück am fixierten Gehäuse	2 Stück am bewegten Panel
Mikroschalter-Betätigungsgeometrie	Kreis	Kreuz
Panelrückstellung	2 Stück Druckschraubfedern und Federwirkung des Panels selbst	4 Stück Druckschraubfedern
Drehhebel (Richtwert)	18 [mm]	70 [mm]

Die Abmaße sind jene Längen, die nach der Handschaltermontage am Tisch für den Benutzer sichtbar sind. Als Panel wird das bei der Betätigung des Bedienelementes bewegte Bauteil verstanden. Beim HS-IL befindet sich die gesamte Elektronik, inklusive Mikroschalter, auf dieser Komponente. Das Betätigungselement, das über die Mikroschalter-Betätigungsgeometrie den direkten mechanischen Kontakt zum Mikroschalter herstellt, befindet sich am stehenden Gehäuse. Beim HS-TB ist es umgekehrt. Da sich die Betätigungspositionen beider Handschalter außermittig, jeweils auf der linken und rechten Seite befinden (siehe Abbildung 3.5), wird das Panel beim Drücken in eine leichte Drehbewegung versetzt. Der Abstand zwischen der sich ergebenden Drehachse und dem Druckpunkt wird als Drehhebel bezeichnet. In Abbildung 3.4 sind beide Handschalter im Schnitt dargestellt und wichtige Komponenten gekennzeichnet.

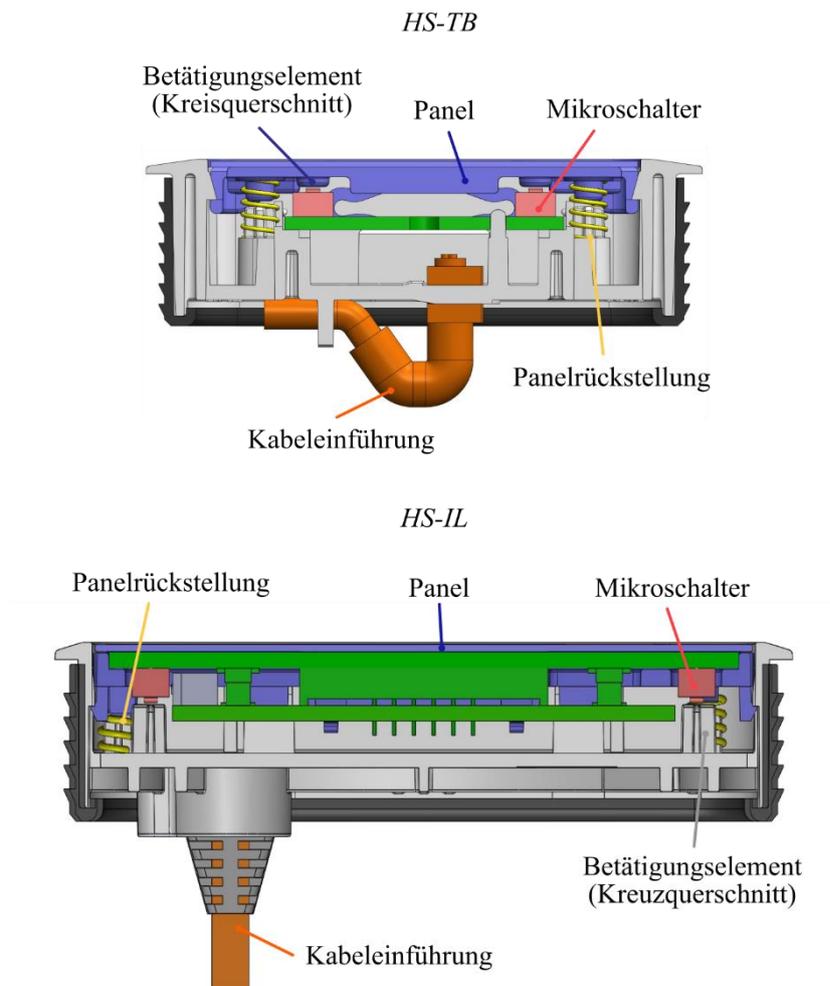


Abbildung 3.4: Vergleich von HS-TB und HS-IL in Schnittdarstellung gleichen Maßstabes

3.1.5 Kraftanalyse

Um einen Eindruck von der Belastung der Bedienelemente und die damit verbundene Aufteilung des Kraftflusses im Handschalter-Inneren zu gewinnen, wird eine Messreihe durchgeführt. Es werden Auslöse-, Block- und Betätigungskräfte der Bedienelemente über einen Kraftsensor erfasst. Für die Untersuchungen sind Prüfaufbauten erforderlich, mit denen die Handschalter entsprechend belastet werden können. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, muss die Lastsituation für jede einzelne Messung ident sein. Die Krafteinleitung ist so gewählt, dass sie normal auf das Panel gerichtet ist. Die Betätigungspositionen beider Bedienelemente werden für alle Messungen konstant gehalten. Da im HS-TB und im HS-IL zwei Mikroschalter verbaut sind, reicht es aus, die Kraftanalysen an zwei Betätigungspositionen durchzuführen (siehe Abbildung 3.5). Die Messmitteltabelle mit allen Komponenten, die in den Prüfaufbauten für die Kraftanalyse verwendet werden, befindet sich im Anhang.



Abbildung 3.5: Betätigungspositionen der externen Last für die Kraftanalyse des HS-TB und HS-IL

Auslösekraft

Unter der Auslösekraft des Handschalters wird jene Kraft verstanden, die beim Drücken des Handschalters mindestens aufgewendet werden muss, damit der Mikroschalter auslöst bzw. es zu einer Betätigungserkennung durch die interne Elektronik kommt. Für die Ermittlung dieser Kraft wird ein Prüfaufbau, wie in Abbildung 3.6 schematisch dargestellt, verwendet.

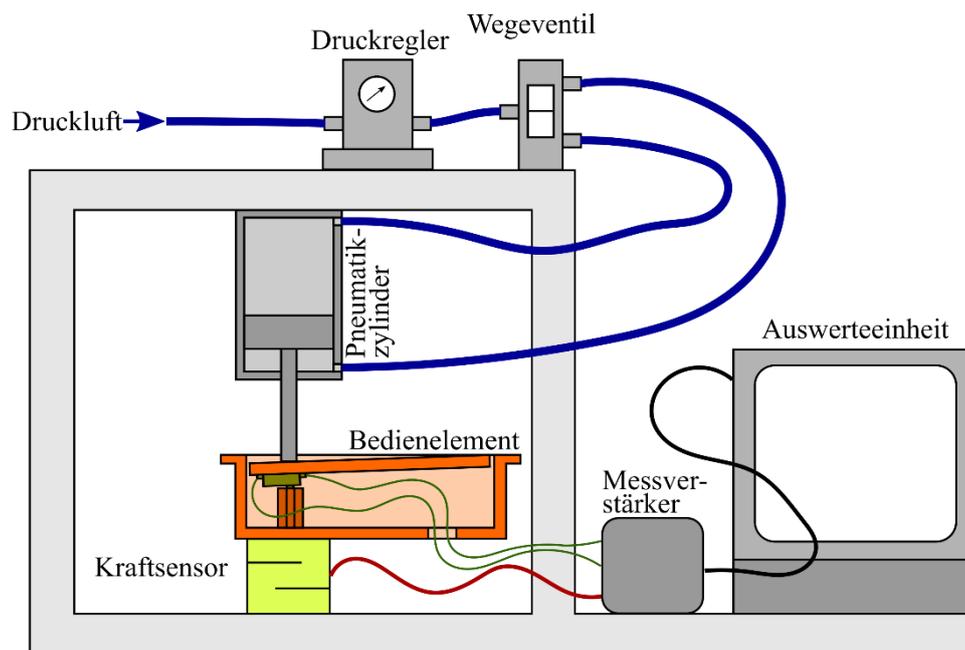


Abbildung 3.6: Messaufbau zur Ermittlung der Auslösekräfte

Als Aktuator kommt ein doppelt-wirkender Leichtlauf-Pneumatikzylinder zum Einsatz, der eine konstante Kraft auf das Panel des Handschalters aufbringt. Ein elektronisch einstellbares Druckregelventil ermöglicht das stufenlose Variieren der Nennlast. Der belastete Handschalter wird über einen Kraftsensor abgestützt, der die Krafteinleitung in ausreichend hoher Genauigkeit misst. Weiters wird ein elektrisches Potential an die Anschlüsse des im Handschalter verbauten Mikroschalters angelegt. In dem Augenblick, in dem der Mikroschalter seine Kontaktstellen schließt, ist ein Spannungssignal messbar. Durch eine kontinuierliche Erhöhung des Drucks im Pneumatikzylinder kann

so der Auslösezeitpunkt festgestellt werden. Die gemessene Kraft am Kraftsensor entspricht zu diesem Zeitpunkt der Auslösekraft des Bedienelementes. In dieser Art und Weise werden an je fünf HS-TB und HS-IL beide Betätigungspositionen fünf Mal in Folge vom Pneumatikzylinder belastet. Dies ergibt in Summe 100 Auslösekräfte, die für die Auswertung zur Verfügung stehen.

Blockkraft

Die Kraft, die notwendig ist, um einen vollständigen mechanischen Kontakt zwischen Betätigungselement und Mikroschaltergehäuse herzustellen, heißt Blockkraft. Bei einem fehlerfreien Handschalter ist sie stets größer als die Auslösekraft, da zuerst der Taster des Mikroschalters nach unten gedrückt und erst danach der mechanische Kontakt zwischen Betätigungselemente und Mikroschaltergehäuse hergestellt wird. Die Blockkraft wird mit Hilfe einer optischen Methode ermittelt. Das Bedienelementgehäuse wird an der Vorder- und Hinterseite angebohrt, dass Mikroschalter und Betätigungselement von außen sichtbar sind. Mit einer Gegenlichtanlage besteht im unbelasteten Zustand zwischen diesen Komponenten ein Lichtspalt. Die Krafteinleitung erfolgt in gleicher Weise wie bei der Auslösekraftermittlung (vergleiche Abbildung 3.7). Bei steigender Belastung durch den Pneumatikzylinder wird dieser Lichtspalt immer kleiner, bis er schließlich gänzlich verschwindet. Der Wert jener Kraft am Kraftsensor, bei dem gerade kein Lichtspalt mehr erkennbar ist, entspricht der Blockkraft des Bedienelementes.

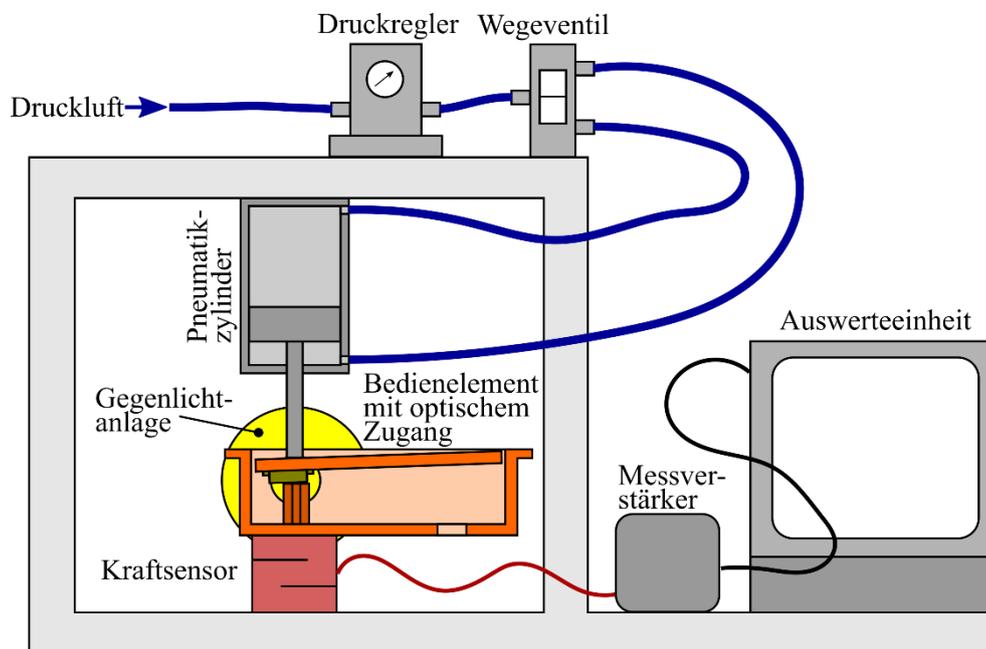


Abbildung 3.7: Messaufbau zur Ermittlung der Blockkräfte

Für die statistische Ermittlung der Blockkraft werden jeweils zehn HS-TB und HS-IL Handschalter herangezogen. Da auch hier die linken und rechten Betätigungspositionen der Bedienelemente untersucht werden, ergeben sich für jeden Handschaltertyp 20 Messwerte (siehe Anhang).

Betätigungskraft

Unter der Betätigungskraft wird jene Kraft verstanden, mit der das Bedienelement durch den Anwender tatsächlich belastet wird. Für die Analyse dieser Lastsituation sind Tests mit menschlichen Probanden notwendig. Wie in Abbildung 3.8 ersichtlich, drückt anstelle eines Aktuators eine Person den Handschalter mit dem Zeigefinger nach subjektivem Empfinden.

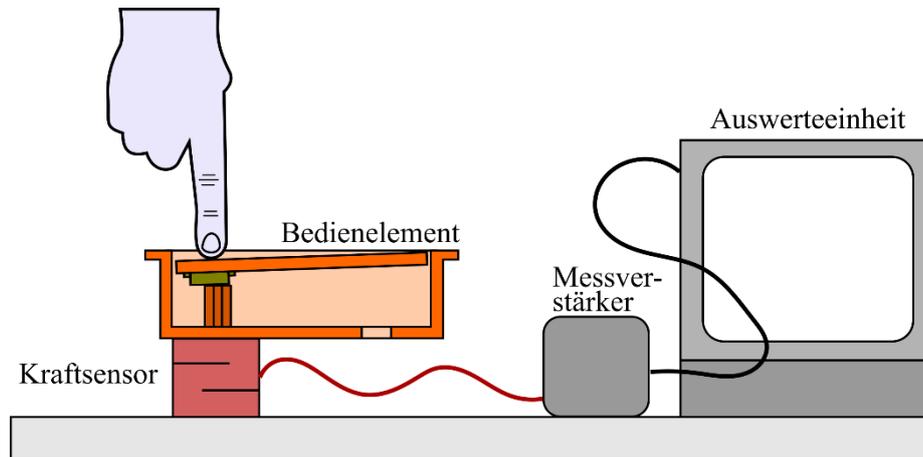


Abbildung 3.8: Messaufbau zur Ermittlung der Betätigungskräfte

Um eine Aussage über den Streubereich der Betätigungskräfte treffen zu können, werden sieben Testpersonen für die Untersuchung herangezogen. Jede einzelne Person aktiviert je fünf HS-TB und HS-IL auf beiden Betätigungspositionen fünf Mal in Folge. Der sich über die Zeit ergebende Kraftverlauf wird mit dem Kraftsensor erfasst. Die Auswerteeinheit speichert den höchst-vorkommenden Kraftwert aus dem Kraftverlauf eines jeden Betätigungszyklus. Bei den Betätigungskräften handelt es sich also um die von den Testpersonen aufgebrauchten Maximalkräfte.

Messergebnisse als Boxplots

Die Verteilungen der unterschiedlichen Messwerte für Auslöse-, Block- und Betätigungskraft sind in Abbildung 3.9 nebeneinander als Boxplot dargestellt. Die drei linken Boxplots beziehen sich auf den HS-TB, die rechten auf den HS-IL.

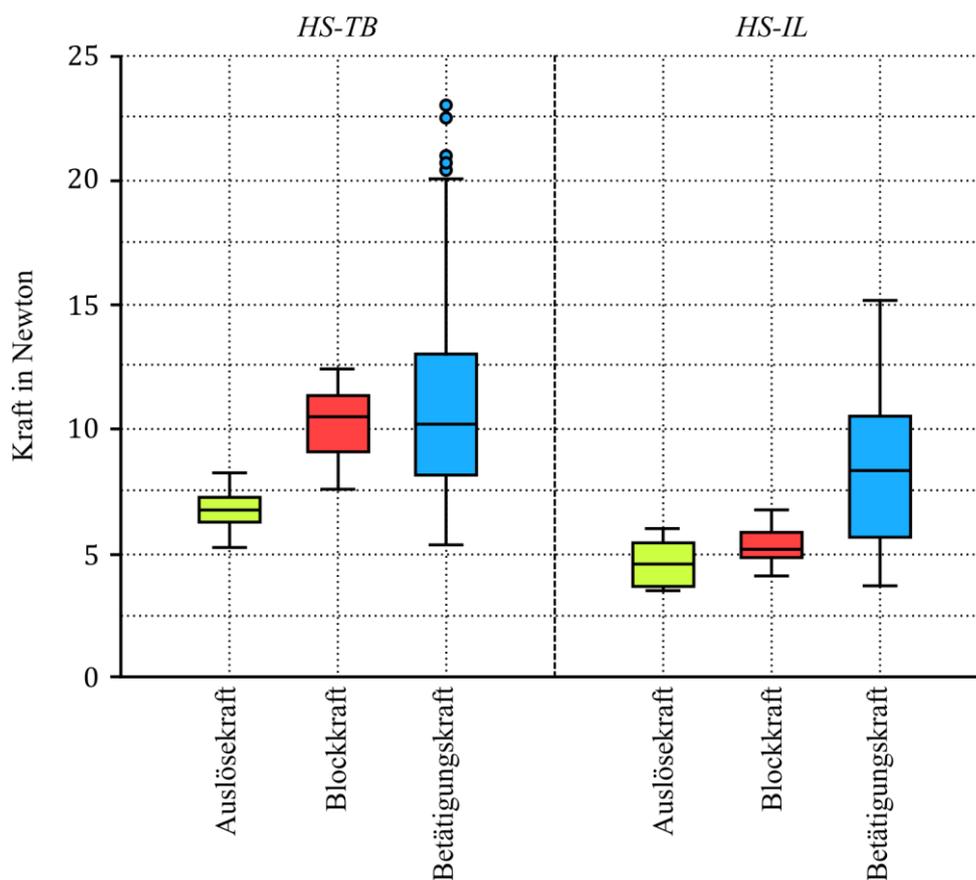


Abbildung 3.9: Vergleich der Messwerte zwischen Auslöse-, Block- und Betätigungskräfte der HS-TB und HS-IL Bedienelemente dargestellt als Boxplots

Beim Vergleich der Mediane der jeweiligen Kräfte beider Handschalter fällt auf, dass sie für den HS-TB stets höher liegen, als für den HS-IL. Obwohl in beiden Bedienelementen die gleichen Mikroschalter verbaut sind, gibt es Unterschiede in der Auslöse- und Blockkraft. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Betätigungsmechanismus des HS-TB steifer ausgeführt ist als beim HS-IL. Gründe dafür sind vor allem der kleine Drehhebel (vergleiche Tabelle 3.2) und das nachgiebige Panel. Die große Streuung der Messwerte der Betätigungskräfte ergibt sich durch das subjektive und individuelle Belasten der Handschalter durch die unterschiedlichen Testpersonen. Anhand des Diagramms aus Abbildung 3.9 können die jeweiligen Medianwerte an der Ordinate abgelesen werden. Übersichtlich sind sie in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Medianwerte zu den Verteilungen der jeweiligen Kräfte und Bedienelemente

Median	HS-TB	HS-IL
Auslösekraft	6,7 [N]	4,6 [N]
Blockkraft	10,5 [N]	5,2 [N]
Betätigungskraft	10,2 [N]	8,3 [N]

Bei Betrachtung der Median-Werte kann zum einen behauptet werden, dass für das Auslösen des HS-TB im Mittel mehr Kraft aufgewendet werden muss als beim HS-IL. Zum anderen ist ersichtlich, dass bei gleicher Betätigungskraft im HS-IL mehr Kraft am Mikroschaltergehäuse abgestützt wird als im HS-TB. Dies lässt sich aus der Differenz zwischen Betätigungs- und Blockkraft quantifizieren. Werden die Handschalter zum Beispiel mit 15 N belastet, kommt es bei beiden Bedienelementen zum vollständigen Kontakt zwischen Mikroschalter und Betätigungselement, weil die jeweiligen Blockkräfte geringer sind als die Belastung. Bei Vernachlässigung der elastischen Verformungen wird dann das Mikroschaltergehäuse beim HS-TB mit $4,5\text{ N}$, und beim HS-IL mit $9,8\text{ N}$ beaufschlagt. Bei einer Betätigungskraft von 10 N lösen zwar beide Handschalter aus, jedoch berührt nur beim HS-IL das Betätigungselement auch das Mikroschaltergehäuse. Die Blockkraft des HS-TB liegt im Schnitt höher als 10 N , daher kommt es bei dieser Belastung zu keinem mechanischen Kontakt. Trotz der unterschiedlichen Steifigkeiten im Betätigungsmechanismus der beiden Handschalter werden diese vom realen Benutzer ähnlich belastet. Dies ist an der geringen Abweichung der Median-Werte der Betätigungskräfte beider Handschalter von nur 15% erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass die Mikroschalter, die im HS-IL verbaut sind, im Feld einer höheren Belastung ausgesetzt sind als jene im HS-TB.

3.2 Schadensbild

Ein schadhaftes Bedienelement kennzeichnet sich durch den Verlust seiner Funktionsfähigkeit. Wie bereits in Abschnitt 1.2 erklärt, kommt es im Zuge von Lebensdaueruntersuchungen gewisser Bedienelemente häufig zum Ausfall. In der ersten Analyse zeigt sich der Defekt so, dass trotz Betätigung des Handschalters eine Bewegung des Antriebssystems nicht mehr möglich ist. Auditiv äußert sich der Fehler durch ein fehlendes „Klickgeräusch“ wenn das Bedienelement gedrückt wird. Nach der Demontage des Handschalters kann der Schaden auch optisch detektiert werden. Es ist notwendig auch das Gehäuse des Mikroschalters (irreversibel) zu öffnen. Nur so ist ein Zugang zu den integrierten Komponenten möglich. Beim eigentlichen Defekt handelt es sich um einen Riss in der Blattfeder des Mikroschalters.

Bei zyklisch beanspruchten Bauteilen kommt es bei zu hoher Belastung oder bei falscher Auslegung oft zur Entstehung eines Mikrorisses. Grund dafür sind bei Wechselbelastung entstehende Mechanismen innerhalb des Gefüges, die einen Anriss verursachen. Mit jedem weiteren Belastungszyklus kommt es zu einer sukzessiven Vergrößerung dieses Risses. Wird das Bauteil ausreichend oft beansprucht, kann sich der Riss soweit ausbilden, dass die vom Riss abgegrenzte Restfläche die äußere Belastung nicht mehr standhält und es somit zum Bruch des Bauteils kommt. [19, pp. 146-149]

Die Ausfallursache der Bedienelemente ist der Ermüdungsbruch der Blattfeder des Mikroschalters, der durch einen Riss aufgrund der zyklischen Beanspruchung entsteht. Als Konsequenz daraus

kommt es zum dauerhaften Kurzschluss der Kontakte des Mikroschalters. Eine erneute Betätigung des Handschalters ist wirkungslos. Alle Handschalter, bei denen es im Zuge einer Lebensdaueruntersuchung zum Ausfall kommt, weisen diesen charakteristischen Defekt auf. Abbildung 3.10 zeigt die Mikroskop-Aufnahmen eines defekten und eines fehlerfreien Mikroschalters. In den linken Detailansichten ist der Ermüdungsbruch der Blattfeder zu erkennen.

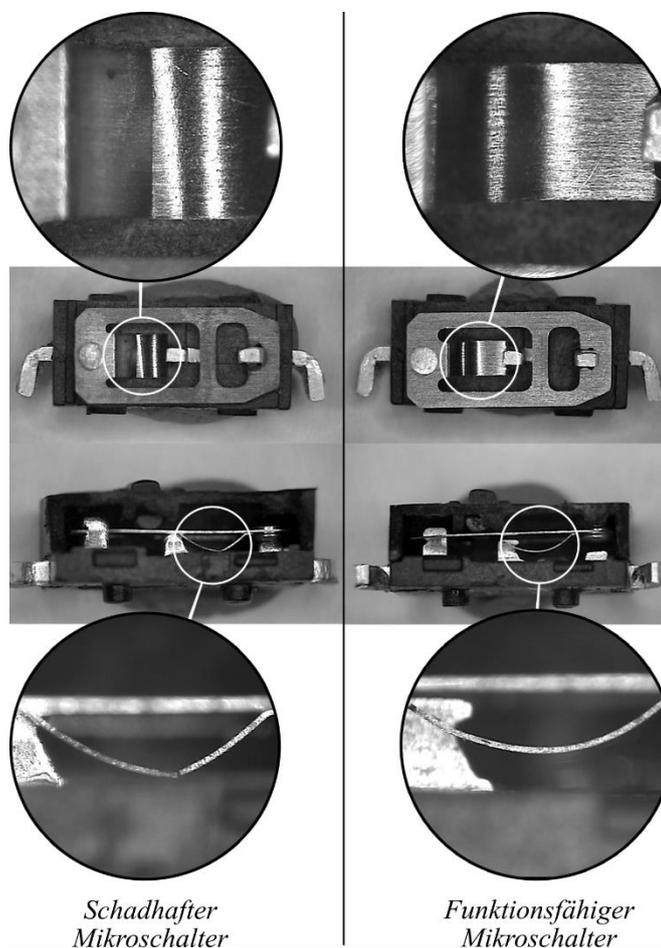


Abbildung 3.10: Vergleich eines schadhaften und eines funktionsfähigen Mikroschalters

3.3 Testgeräte

Für Lebensdaueranalysen von Bedienelementen kommen Testgeräte zum Einsatz, die die Handschalter automatisch und in regelmäßigen Zeitabständen belasten. Dieser Betätigungszyklus wird vom Testgerät solange wiederholt, bis es zum Versagen des Produktes kommt. Voraussetzung dafür ist, dass das Testgerät in der Lage ist, den Ausfall des Handschalters autark zu erkennen. Kommt es trotz langen Testzeiten zu keinem Funktionsverlust, kann es sinnvoll sein, den Test manuell zu beenden (siehe Abschnitt 2.4.3). In beiden Fällen wird die Anzahl der Betätigungen mitgezählt und für spätere Auswertungen notiert bzw. gespeichert.

Kraftverlauf

Durch die Kurbeltriebkinematik des Testgerätes treten bei der Betätigung des Handschalters dynamische Lasten auf. Zur Quantifizierung der entstehenden Kraftspitzen wird im Zuge der Testgerätereanalyse der tatsächliche Kraftverlauf messtechnisch erfasst. Dazu wird unter dem Bedienelement ein Kraftsensor platziert und die reale Belastung, in ausreichend hoher zeitlicher Auflösung, gemessen. Die Auswertung der Messungen zeigt, dass sich für die unterschiedlichen Bedienelemente HS-TB und HS-IL ähnliche Kraftverläufe ergeben. In Abbildung 3.12 ist das Messergebnis für einen Betätigungszyklus eines HS-IL dargestellt, wenn er mit 1 kg Nennlast beaufschlagt wird.

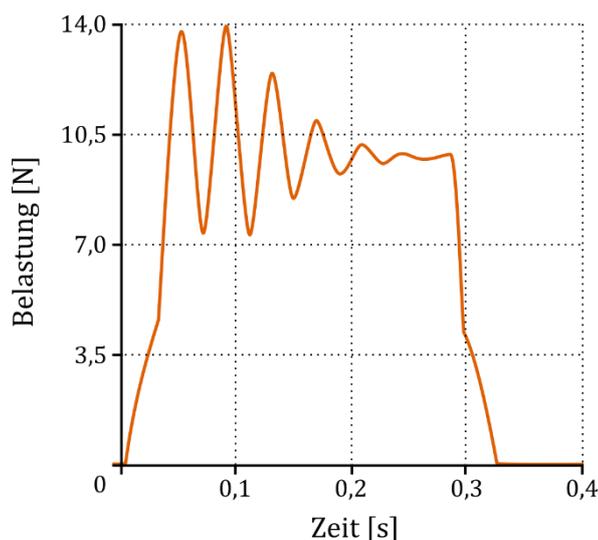


Abbildung 3.12: Realer Kraftverlauf am HS-IL durch das Kurbeltriebtestgerät mit einer Nennlast von 1 kg und einer Testfrequenz von 1 Hz

Ab dem ersten Kontakt zwischen Panel und Silikonpuffer steigt der Kraftverlauf sofort an. Auf einem Belastungsniveau von 4,3 N ist eine leichte, sprunghafte Erhöhung der Steigung zu erkennen. Hierbei handelt es sich um den Zeitpunkt, bei dem der HS-IL „auf Block“ fährt. Dies lässt sich durch die Blockkraft-Analyse aus Abschnitt 3.1.5 bestätigen. In weiterer Folge steigt die Belastung auf eine Höhe von 14 N kontinuierlich an. Danach folgt der Kraftverlauf dem Verhalten einer gedämpften Schwingung und stellt sich nach entsprechender Zeit auf ein statisches Niveau von 9,8 N ein. Diese abnehmenden Kraftamplituden sind dem schlagartigen Erstkontakt und der hohen Nachgiebigkeit des Silikonpuffers zuzuschreiben. Bedingt durch den Kurbeltrieb kommt es schließlich wieder zum Heben des Stößels und der damit verbundenen Abnahme der Belastung.

Durch die mit dem Kurbeltrieb zwangsläufig entstehenden dynamischen Kräfte ergibt sich mit nur einem Betätigungszyklus ein ganzes Lastkollektiv. Die höchst-auftretende Lastspitze bei einer Nennlast von 1 kg und einer Betätigungsfrequenz von 1 Hz liegt bei 14 N (siehe Abbildung 3.12).

3.3.2 Pneumatiktestgerät

Beim Aktuator im Pneumatiktestgerät handelt es sich um einen Druckluftzylinder, der über ein elektronisches Wegeventil angesteuert wird. Die zeitliche Regelung übernimmt eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die Kolbenstange des einfachwirkenden Zylinders drückt direkt auf das Panel des Handschalters. Einfachwirkend bedeutet, dass der Zylinder nur in eine Richtung mit Druckluft beaufschlagt wird. Die Rückstellung erfolgt durch die Federrückstellung des Handschalters selbst. Die Steifigkeit der Bedienelemente reicht aus, um den gesamten Kolben im unbelasteten Zustand wieder nach oben zu heben. Die durch dieses Betätigungsprinzip entstehenden Bewegungen sind so klein, dass die dynamischen Lasten vernachlässigbar sind.

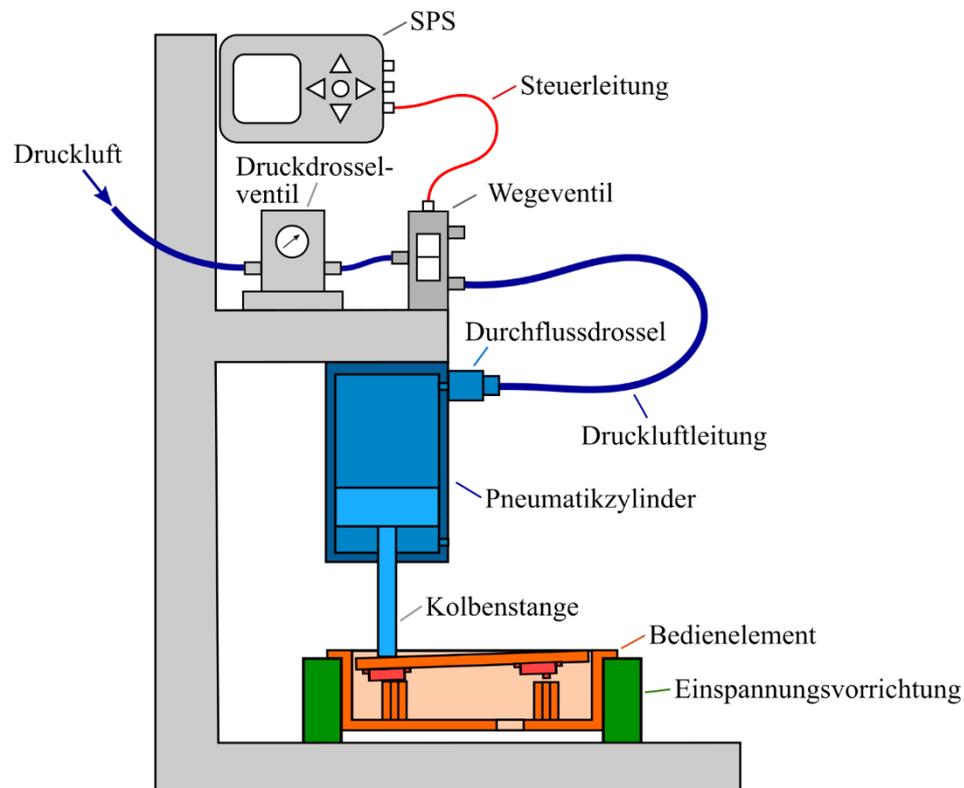


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung des Pneumatiktestgerätes

Kraftverlauf

Mit der Vielzahl an Einstellmöglichkeiten ist es möglich, den Kraftverlauf flexibel zu gestalten. Es können die Nennlast über ein Druckdrosselventil, die Betätigungsdauer über das SPS-Modul und der Verlauf des Kraftanstiegs über eine Durchflussdrossel variiert werden. Eine Änderung der Betätigungsfrequenz hat keinen Einfluss auf den Kraftverlauf. Die vom Pneumatiktestgerät erzeugte Kraft kann messtechnisch erfasst werden. Dazu wird der Handschalter über eine Kraftmessdose abgestützt. Bei Belastung des Bedienelementes durch den Kolben des Pneumatikzylinders, kann dann der reale Kraftverlauf ermittelt werden. Abbildung 3.14 zeigt den für dieses Testgerät charakteristischen Kraftverlauf.

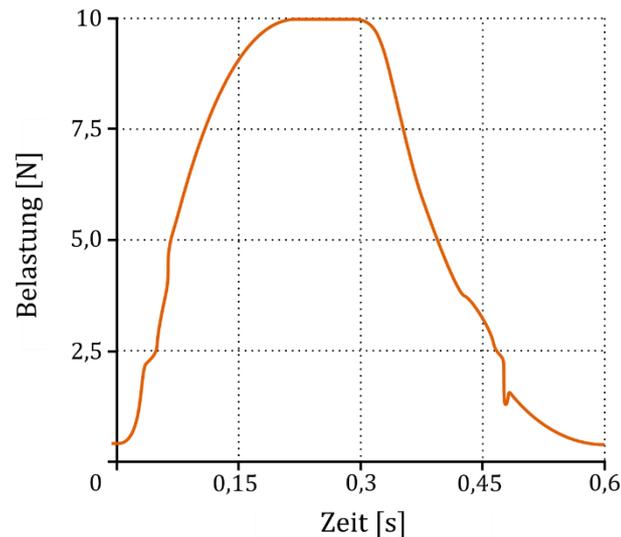


Abbildung 3.14: Realer Kraftverlauf am HS-IL durch das Pneumatiktestgerät mit einer Nennlast von 10 N und einer Testfrequenz von 1 Hz

Es ergibt sich ein rechteck-ähnlicher Verlauf der Betätigungskraft. Es kann kein Schwingverhalten beobachtet werden. Nach einem degressiven Anstieg auf Nennlastniveau wird dieser Wert entsprechend der Belastungsdauer konstant gehalten. Der Betätigungszyklus wird durch das Umschalten des Wegeventils beendet. Die Kraft nimmt wieder ab. Allerdings fällt auf, dass sie nicht auf null zurückgeht. Grund dafür ist, dass im Pneumatikzylinder nur eine Entlüftung der Kammern stattfindet und sich dadurch der Kolben nicht nach oben bewegt. Bei allen Messungen wird bei der Nicht-Betätigung ein Restkraftanteil von 1 N festgestellt. Dies entspricht der Gewichtskraft des Kolbens inklusive Kolbenstange und Silikonpuffer. Der Mikroschalter im Inneren des Bedienelementes wird bei solch einer geringen Betätigungskraft nicht belastet.

3.3.3 Betätigungszyklus

Der gesamte Zeitraum eines Betätigungszyklus heißt Periodendauer. Diese Abfolge wird durch die Testgeräte kontinuierlich wiederholt. Die Betätigungszeit bezieht sich auf die Spanne vom Auslösen des Mikroschalters bis zum erneuten Öffnen seines Schließkontaktes. Die Haltezeit ist jene Zeitspanne, in der sich der Kraftverlauf konstant auf Nennlast-Niveau befindet. In Abbildung 3.15 sind diese charakteristischen Zeitabschnitte gekennzeichnet. Die Darstellung erfolgt anhand des Kraftverlaufs des Pneumatiktestgerätes.

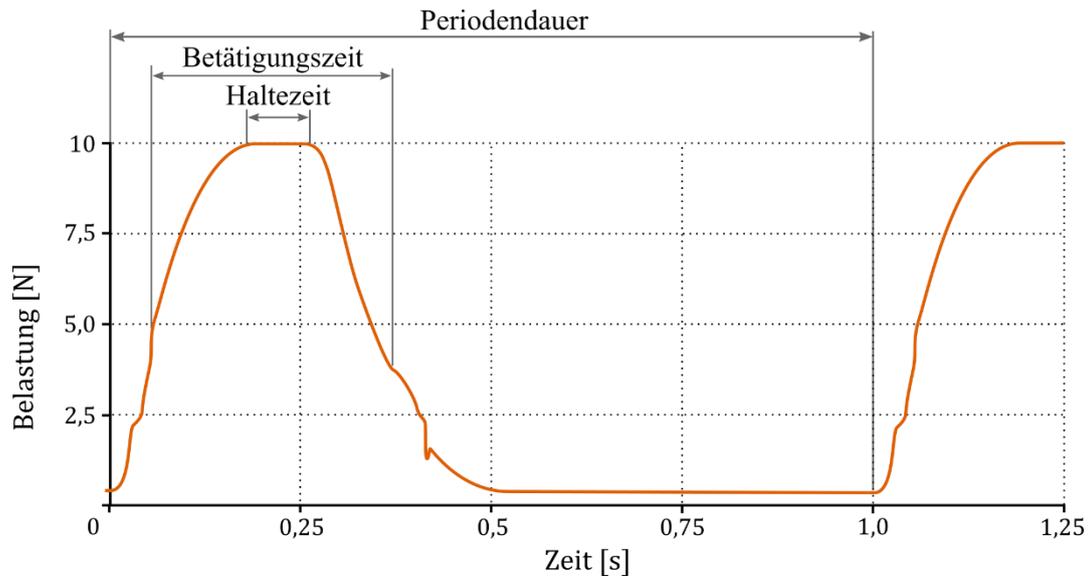


Abbildung 3.15: Charakteristische Zeitabschnitte eines Betätigungszyklus, dargestellt am Kraftverlauf des Pneumatiktestgeräts

3.4 Einflussparameter

In Abschnitt 3.2 wird gezeigt, dass der Ausfallgrund von Bedienelementen in Lebensdaueruntersuchungen der Ermüdungsbruch der Blattfeder des Mikroschalters ist. Alle auf den vorherigen Seiten analysierten Parameter, die einen möglichen Einfluss auf das Schadensbild nehmen, werden in einem Ursachen-Wirkungs-Diagramm zusammengefasst. Wird das Diagramm nach der fehlerorientierten Methode von Kaoru Ishikawa erstellt, nimmt es eine Form an, die der eines Fischskeletts ähnlich ist. Aus diesem Grund nennt sich diese Darstellungsform „Fischgrätendiagramm“. Basis ist ein horizontaler Pfeil, dessen Spitze auf das zu analysierende Problem zeigt. Auf ihn treffen schräge Pfeile, die die Haupteinflussgrößen auf das Problem kennzeichnen. Die als kleinere Pfeile abgebildeten Nebeneinflüsse treffen wiederum auf die Haupteinflüsse usw. [20, p. 12]

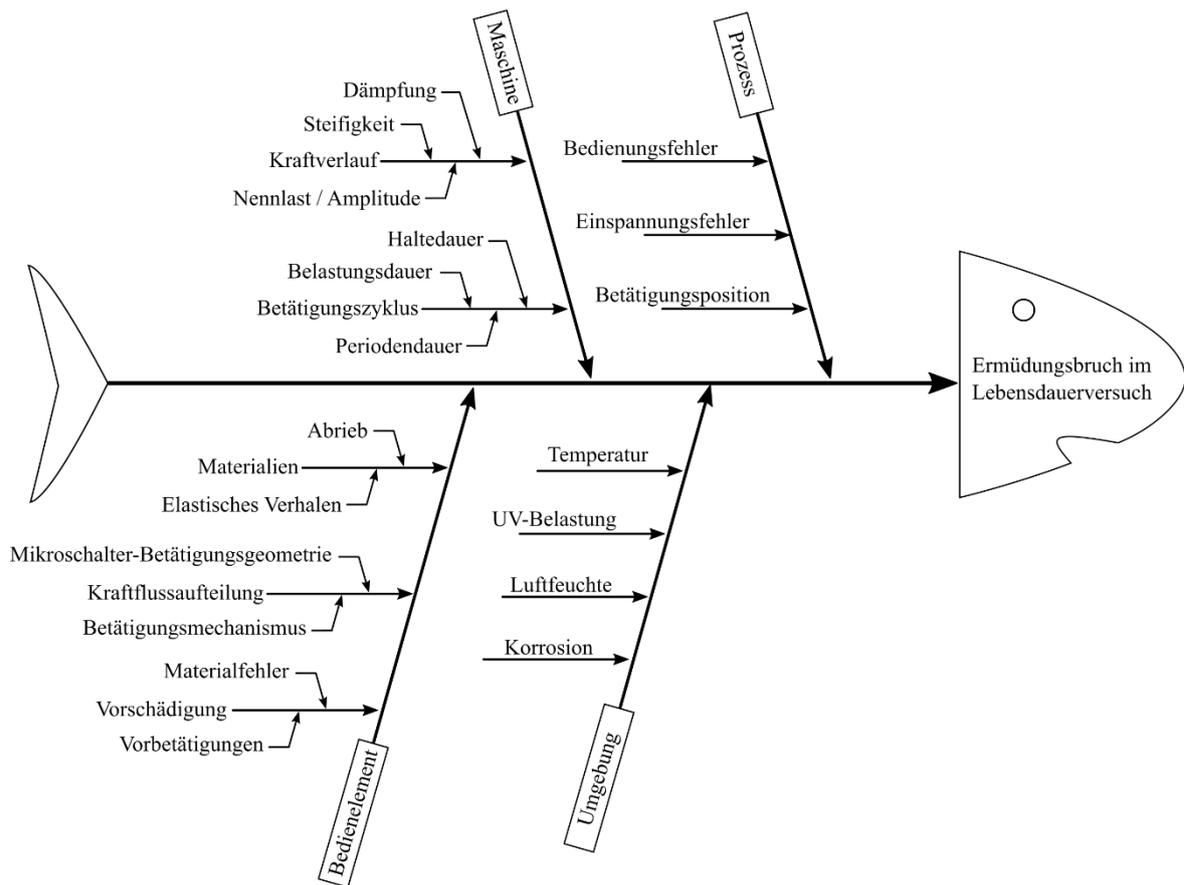


Abbildung 3.16: Darstellung der Haupt- und Nebeneinflüsse auf den Ermüdungsbruch im Fischgrätendiagramm

Das Fischgrätendiagramm in Abbildung 3.16 zählt alle Parameter auf, die den Ermüdungsbruch der Mikroschalterfeder im Lebensdauerexperiment beeinflussen könnten. Nicht gelistet sind menschlich bedingte Fehler, wie Fehldiagnosen oder Ablesefehler am Testgerät, da diese lediglich zu fehlerhaften Werten führen, die die Lebensdauer selbst aber nicht beeinflussen. Inwiefern eine Variation einzelner Einflüsse eine Änderung des Ausfallverhaltens bewirkt, wird mit entsprechenden Versuchsreihen und statistischen Auswertungen verifiziert.

4 Versuchsreihen

Dieses Kapitel widmet sich der praktischen Durchführung von Lebensdauertests. Ziel ist es, ausreichend viele Daten zu generieren, um statistische Auswertungen vollziehen zu können. Um den Testaufwand überschaubar zu gestalten, ist eine spezielle Vorgehensweise notwendig. Mit entsprechender Begründung werden Lebensdauer-Einflussfaktoren von der Versuchsvariation ausgeschlossen, um eine beschränkte Auswahl an Variations-Parametern zu erhalten. Im Abschnitt, der sich mit der Versuchsdurchführung beschäftigt, sind die Einstellungen an den Testgeräten erklärt. Das Ergebnis aller Versuchsreihen sind Ausfalllaufzeiten. Ein Anteil dieser Lebensdauerdaten ist mit Fehlern behaftet. Der letzte Abschnitt in diesem Kapitel beschreibt, wie solche Fehler nachgewiesen werden und wie mit ihnen umgegangen wird.

4.1 Vorgehensweise

Eine Versuchsreihe beschreibt in dieser Arbeit eine bestimmte Anzahl an Mikroschaltern, die alle unter der gleichen Parameterkonfiguration auf ihre Lebensdauer getestet werden. Zum Beispiel läuft die erste Versuchsreihe mit einer Nennlast von $10 N$, die zweite mit $20 N$ usw. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsreihen werden separat betrachtet. Es ist von großer Bedeutung, die Testbedingungen während des Versuchs konstant zu halten, damit mögliche Einflüsse ausgeschlossen und die Ergebnisse nicht verfälscht werden. Die Summe an getesteten Mikroschaltern muss in unterschiedlichen Versuchsreihen nicht zwangsläufig gleich sein. Sie ist abhängig von der Anzahl an Fehlern bzw. Ausreißen, die während des Tests auftreten und vom Bestimmtheitsmaß der Weibull-Auswertung (siehe Abschnitt 2.3.4). Ziel ist es, mit den erzielten Ergebnissen aussagekräftige Analysen durchzuführen zu können.

Um den Einfluss aller Parameter nachweisen, wäre ein enormer Prüfaufwand notwendig. Aus diesem Grund wird vor Beginn der Versuchsdurchführung die Parameterauswahl reduziert. Welche Parameter von den Untersuchungen ausgeschlossen und welche variiert werden, ist in den nachfolgenden zwei Abschnitten erklärt. Als Basis dient das Fischgrätendiagramm in Abbildung 3.16, in dem mögliche Einflüsse auf die Lebensdauer der Handschalter aufgelistet sind.

4.2 Parameterauswahl

Von der Parametervariation werden sämtliche umgebungs- und prozessbedingte Nebeneinflüsse ausgeschlossen. Auch wenn unter großer Wahrscheinlichkeit die Änderung der Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Lebensdauer der Handschalter nimmt, ist es für das Verständnis der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Problematik von geringer Bedeutung, diesen Einfluss quantitativ nachzuweisen. Gleiche Überlegungen gelten für die restlichen Parameter (Luftfeuchte, Korrosion, UV-Belastung und Betätigungsposition) der betroffenen Haupteinflüsse. Weiters sind aus selbigem Grund Versuchsreihen mit unterschiedlicher Vorschädigungen der Bedienelemente (Materialfehler und Vorbetätigungen) nicht relevant.

Im Schwingversuch ist die erreichte Lebensdauer der Probe von der Belastungssituation, Bauteilgröße, Temperatur usw. abhängig, nicht aber von der Schwingfrequenz [21, p. 59]. Da es sich bei den Lebensdauertests der Handschalter um einen Biegeschwingversuch der Mikroschalterfeder handelt, kann diese Information genutzt werden, um die zu variierenden Parameter weiter einzuschränken. Aufgrund obiger Information aus der angeführten Literaturquelle kann auf Versuchsreihen unterschiedlicher Belastungsfrequenz verzichtet werden. Im Zuge aller Versuchsreihen bleibt der vom Testgerät auf das Bedienelement ausgeübte Betätigungszyklus konstant.

4.3 Parametervariation

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt wird, gibt es markante Unterschiede im Lebensdauerverhalten von Handschaltern, die nicht baugleich sind. Naheliegend ist also die Variation der Bedienelemente selbst.

Aufgrund der Tatsache, dass für Lebensdaueruntersuchungen der Mikroschalter zwei Testgeräte zur Verfügung stehen, ist es sinnvoll, unterschiedliche Versuchsreihen auf den Prüfmaschinen parallel durchzuführen. So wird durch das simultane Testen Zeit eingespart und der Prüfaufwand verringert. Aus der Analyse in Abschnitt 3.3 geht hervor, dass sich die Kraftverläufe, die von den jeweiligen Testgeräten auf die Bedienelemente ausgeübt werden, stark unterscheiden. Da die Belastung direkten Einfluss auf die Lebensdauer hat (siehe Abschnitt 2.4.5), muss eine strikte Trennung der Versuchsreihen nach dem eingesetzten Prüfgerät erfolgen.

Die über den Mikroschalter abgeleitete Kraft wird über die am Testgerät eingestellte Nennlast in kg bzw. N variiert. Eine erhöhte Nennlast führt zu einer höheren Belastung des Mikroschalters und nimmt daher Einfluss auf die Lebensdauer der Bedienelemente. Versuchsreihen mit unterschiedlicher Nennlast zeigen die konkreten Differenzen der im Test erreichten Ausfallwahrscheinlichkeiten auf.

Die Variation der Betätigungsgeometrie verursacht eine Änderung der Kräfteinleitung auf das Mikroschaltergehäuse. Der Querschnitt des Betätigungselementes ist entweder ein Kreis oder Kreuz. Dies ist abhängig vom getesteten Handschalter (siehe Abschnitt 3.1.4). Es wird eine weitere Variation dieses Parameters vorgenommen, mit dem Ziel die Biegespannung der Mikroschalterfeder zu verringern, um so längere Laufzeiten zu erreichen. Die Modifikation äußert sich in Form eines konstruktiv geänderten Betätigungselementes, die in HS-IL Handschaltern verbaut werden. Anstatt des serienmäßigen Kreuzquerschnitts ist ein quaderförmiges Betätigungselement verbaut, das zugleich eine Hinterstellung von $0,2\text{ mm}$ aufweist. In Abbildung 4.1 sind die unterschiedlichen Mikroschalter-Betätigungsgeometrien im Vergleich dargestellt.

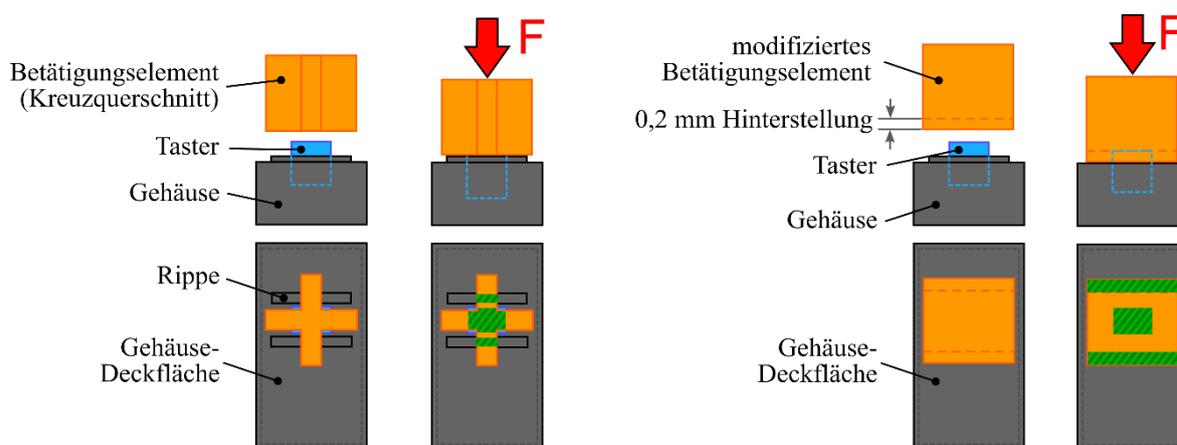


Abbildung 4.1: Konventionelles (links) und modifiziertes (rechts) Betätigungselement von HS-IL Bedienelementen in schematischer Darstellung

4.4 Durchführung der Versuchsreihen

Insgesamt werden sieben Versuchsreihen durchgeführt, wobei sich eine jede Versuchsreihe in zumindest einem Variationsparameter unterscheidet. Eine kompakte Übersicht der unterschiedlichen Testläufe und deren Variationsparametern bietet Tabelle 4.1.

Die Lebensdauertests werden entweder mit HS-TB oder mit HS-IL Bedienelementen durchgeführt, wobei beim HS-IL zwischen zwei Bauformen zu differenzieren ist. Die Unterscheidung erfolgt in der Spalte „Bauform“ mit der Ziffer „1“ (Intisch-Montage) bzw. „2“ (Untertisch-Montage). Es handelt sich hierbei um Handschalter, die sich lediglich in ihrer Montagesituation unterscheiden. Getestet wird entweder mit dem Kurbeltriebtestgerät (abgekürzt mit „K“) oder mit dem Pneumatiktestgerät (abgekürzt mit „P“). Vor Beginn einer jeden Versuchsreihe wird am Testgerät eine bestimmte Betätigungskraft eingestellt. Der physikalische Wert für diese Kraft ist in der Spalte „Nennlast“ angeführt.

Versuchsreihe 7 wird mit HS-IL Bedienelementen durchgeführt, die modifizierte Betätigungselemente, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, aufweisen. In Tabelle 4.1 ist dieser Parameter in der Spalte „MS-Betätigungsgeometrie“ mit „QH“ abgekürzt.

Voraussetzung für vergleichbare Testergebnisse ist, dass alle Einflussfaktoren, die von der Parametervariation ausgeschlossen sind, im Zuge der Lebensdauerversuche konstant gehalten werden. Um einheitliche Umgebungsbedingungen zu schaffen, werden alle Versuchsreihen im selben Raum mit konstanter Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit und ohne Sonneneinstrahlung durchgeführt. Die Einspannung der Handschalter in das Testgerät erfolgt so, dass die Maschine alle Bedienelemente auf der in Abschnitt 3.1.5 beschriebenen Position betätigt. Getestet werden ausschließlich Handschalter, die direkt aus der Produktion stammen und somit nicht vorgeschädigt sind. Um den zeitlichen Testaufwand einzuschränken, wird an den Testgeräten stets derselbe Betätigungszyklus eingestellt. Dieser ist definiert durch eine Betätigungsfrequenz von 1 Hz und einer Belastungsdauer von 400 ms.

Alle Mikroschalter einer Versuchsreihe werden separat betätigt, bis ein Defekt feststellbar ist. Vorausgegangene Untersuchungen zeigen, dass Ausfälle zwischen 20.000 und 115.000 Betätigungen häufig auftreten. Für höhere Laufzeiten ist die Ausfallwahrscheinlichkeit gering. Um dies zu bestätigen, werden in der Regel alle Versuchsreihen bei einer Laufzeit von ca. 250.000 Betätigungen manuell gestoppt. Mikroschalter, die bei einer so hohen Anzahl an Betätigungen noch immer fehlerfrei funktionieren, werden als „Durchläufer“ bezeichnet. Ein längeres Testen ist aufgrund des hohen Prüfaufwandes nicht sinnvoll, da die erzielten (vereinzelt) Ausfälle das Zuverlässigkeitsergebnis nur unwesentlich verändern (siehe Kapitel 5).

4.5 Testergebnisse

Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 4.1 die Ergebnisse aus den Versuchsreihen direkt in deren Zeilen mit aufgelistet. Die Spalte „Ausfälle“ beinhaltet die Summe an Mikroschaltern, bei der es im Lebensdauerversuch zum Defekt (siehe Abschnitt 3.2) kommt. „Durchläufer“ sind Mikroschalter, die den Versuch bis zum Testende fehlerfrei überstehen und aus dem Test genommen werden. Als „Ausreißer“ wird ein ausgefallener Mikroschalter bezeichnet, dessen Lebensdauerwert zu den restlichen Ausfällen signifikant unterschiedlich ist. Der statistische Nachweis für Ausreißer und wie mit ihnen umgegangen wird, ist in Abschnitt 4.6 erklärt. Nicht immer verlaufen Versuchsreihen fehlerfrei ab, denn es treten zum Teil Phänomene auf, die die Laufzeiten der Mikroschalter verfälschen. Kann eine fehlerhafte Laufzeit innerhalb des Versuchs nachgewiesen werden, ist sie von den gültigen Ausfalldaten auszuschließen. Die Anzahl an ungültigen Lebensdauerwerten in der Versuchsreihe befindet sich in der Spalte „Fehler“.

Die exakten Ausfalllaufzeiten der defekten Mikroschalter aller Versuchsreihen sind im Anhang aufgelistet. Gleiches gilt für die Laufzeiten der Durchläufer, Ausreißer und Fehler.

Tabelle 4.1: Versuchsreihen mit unterschiedlichen Parametern und ihre Ergebnisse

Versuchsreihe	Parametervariation					Ergebnisse				
	Bedienelement	Bauform	Testgerät	Nennlast	MS-Betätigungs- geometrie	Gesteuerte Mikro- schalter	Ausfälle	Durchläufer	Ausreißer	Fehler
1	HS-TB	-	K	1 [kg]	Kreis	10	0	8	2	0
2	HS-IL	1	K	1 [kg]	Kreuz	27	20	2	0	5
3	HS-IL	2	P	10 [N]	Kreuz	30	10	18	0	2
4	HS-IL	2	K	1 [kg]	Kreuz	20	11	8	0	1
5	HS-IL	1	P	14 [N]	Kreuz	10	10	0	0	0
6	HS-IL	2	P	25 [N]	Kreuz	20	17	1	1	1
7	HS-IL	1	K	1 [kg]	QH	10	0	10	0	0

4.6 Ausreißertest

Wie bereits erwähnt, treten in den Versuchsreihen vereinzelt Ausfälle auf, deren Laufzeiten zu den restlich generierten Ausfalldaten erheblich abweichen. Das Auftreten solcher Ausreißer statistische Auswertungen und Berechnungen beeinflussen und die Ergebnisse teils stark verfälschen. Es ist demnach von großem Interesse, diese Extremwerte aus den Stichproben auszuschließen. Hierzu muss kontrolliert werden, ob ein solcher Ausreißer ein verfälschter Wert ist, oder ob es sich um einen extremen, aber gültigen Wert aus der Stichprobe handelt. Dies geschieht mit Ausreißertests, die meist auf der Annahme normalverteilter Daten beruhen. [22, p. 22]

Da es sich bei den Ausfalldaten der durchgeführten Versuchsreihe um Lebensdauerwerte handelt, die in Form einer Weibull-Funktion beschrieben werden, muss die Ausreißerdetektion mit einem nichtparametrischen Verfahren durchgeführt werden. Grund hierfür ist, dass die Weibull-Funktion keine normalverteilte Häufigkeitsverteilung darstellt (siehe Abschnitt 2.2.3). Der Ausreißertest nach Walsh setzt keine bestimmte Verteilung voraus und beruht nicht auf den Annahmen einer Normalverteilung. Diese Methode ist für eine Ausreißerbestimmung von Weibull-verteilten Lebensdauerwerten legitim und kommt an dieser Stelle zum Einsatz. Der Ablauf hierzu erfolgt in vier Schritten nach der in [22, p. 26] beschriebenen Vorgehensweise.

Schritt 1

Zu Beginn ist die Sortierung des Datensatzes in aufsteigender Reihenfolge x_1, x_2, \dots, x_n notwendig. Die Ausreißer sollen über alle generierten Ausfalldaten bestimmt werden. Das bedeutet, dass die Ausfälle der Versuchsreihen 1 bis 7 gemeinsam betrachtet werden, sodass sich ein einzelner Datensatz ergibt. Insgesamt sind das $n = 71$ aufsteigend sortierte Ausfalllaufzeiten. Deren exakten Werte sind dem Anhang zu entnehmen.

Schritt 2

Es muss vorab eine Anzahl $r \geq 1$ an möglichen Ausreißern definiert werden. Günstig ist eine rechnerunterstützte Berechnung, mit der diese Variable unkompliziert geändert werden kann und die Ergebnisse schnell ersichtlich sind. Für diese Arbeit wird $r = 3$ festgelegt.

Schritt 3

Zur besseren Übersicht ist es sinnvoll, die Hilfsvariable c über

$$c = \lceil \sqrt{2n} \rceil \quad (4.1)$$

zu berechnen, wobei $\lceil m \rceil$ die nächstgrößere Ganze Zahl von m ist (zum Beispiel ist $\lceil 5,13 \rceil = 6$). Mit ihr wird das Zwischenergebnis

$$a = \frac{1 + \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{c - \frac{1}{\alpha}}{c - 1}}}{c - \frac{1}{\alpha} - 1} \quad (4.2)$$

berechnet. α ist das Signifikanzniveau bzw. die Irrtumswahrscheinlichkeit des Ausreißertests. Die Literatur empfiehlt für einen Datensatz von $n < 220$ ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1$. Da die Anzahl der Ausfälle unterhalb dieser Schwelle liegt, ist diese Irrtumswahrscheinlichkeit zu verwenden.

Mit den Werten der entsprechenden Variablen ergibt sich die Hilfsvariable zu $c = 12$ und das Zwischenergebnis zu $a = 2,35$.

Schritt 4

Anhand von zwei Ungleichungen wird mit den berechneten Werten und speziellen Laufzeiten aus dem zusammengeführten Datensatz entschieden, ob Ausreißer vorhanden sind oder nicht. Es gilt:

Die r kleinsten Beobachtungen sind Ausreißer (beim Signifikanzniveau α), wenn

$$x_r - (1 + a) \cdot x_{r+1} + a \cdot x_k < 0 \quad (4.3)$$

gültig ist. Gleichzeitig sind die r größten Beobachtungen Ausreißer, wenn die Ungleichung

$$x_{n+1-r} - (1 + a) \cdot x_{n-r} + a \cdot x_{n+1-k} > 0 \quad (4.4)$$

erfüllt ist. Setzt man obere Werte in diese Gleichungen ein, ergibt (4.3) eine wahre, und (4.4) eine falsche Aussage. Dies bedeutet, dass an der unteren Grenze des Datensatzes keine Ausreißer vorhanden sind. Hingegen gibt es drei Laufzeiten, die signifikant größer sind als alle anderen Werte im Datensatz und somit als Ausreißer deklariert werden. Zwei von ihnen stammen aus den Ausfällen der Versuchsreihe 1, einer aus der Versuchsreihe 6. Diese drei Extremwerte sind aus den gültigen Ergebnissen und für statistische Auswertungen auszuschließen.

5 Interpretation der Testergebnisse

Jene Laufzeiten, bei denen es in den Versuchsreihen 1 bis 7 zum Ausfall der Bedienelemente kommt, sind das Grundgerüst für statistische Auswertungen innerhalb dieser Arbeit. Mit Hilfe der Weibull-Verteilung lassen sich die Ergebnisse vergleichen. Da in den Lebensdaueruntersuchungen nicht nur Ausfälle auftreten, sondern auch Durchläufer aus den Tests genommen werden, sind Aussagen über die Festigkeitsbereiche der Mikroschalterfeder möglich. Mit der Anwendung der Success-Run-Methode wird die in Versuchsreihe 7 erreichte Mindestzuverlässigkeit nachgewiesen. Das Kapitel endet mit der Beschreibung des Ausfall- bzw. Überlebensgrunds der Bedienelemente.

5.1 Statistische Vergleiche

Um signifikante Unterschiede zwischen Ausfallverteilungen nachzuweisen, sind statistische Vergleiche notwendig. Dies erfolgt nach der Vorgehensweise aus Abschnitt 2.4.2 in drei Schritten. Der erste Abschnitt widmet sich dem Vergleich der Testgeräte. Außerdem wird untersucht, inwiefern die am Testgerät eingestellte Nennlast auf das Ausfallverhalten der Bedienelemente beeinflusst. Die statistische Gegenüberstellung zweier Weibull-Verteilungen, die aus Tests mit unterschiedlichen Kraftverläufen erzielt werden, rundet diesen Abschnitt ab.

5.1.1 Vergleich der Testgeräte

Da die Lebensdaueruntersuchungen der Bedienelemente auf zwei unterschiedlichen Testgeräten stattfinden, wird analysiert, ob es an beiden Geräten zu gleichen Ausfallverteilungen kommt. Diese Fragestellung wird mit den Ausfalldaten aus Testlauf 3 und 4 beantwortet. Die Laufzeiten der jeweiligen Ausfallpunkte in Abbildung 5.1 entsprechen jener Betätigungsanzahl, bei der es im Zuge des Lebensdauertests zum Ausfall gekommen ist (die exakten Werte sind im Anhang enthalten). Die dazugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten ergeben sich nach Gleichung (2.18), wobei für n die Summe aus Ausfälle und Durchläufer einzusetzen ist (siehe Abschnitt 2.4.3).

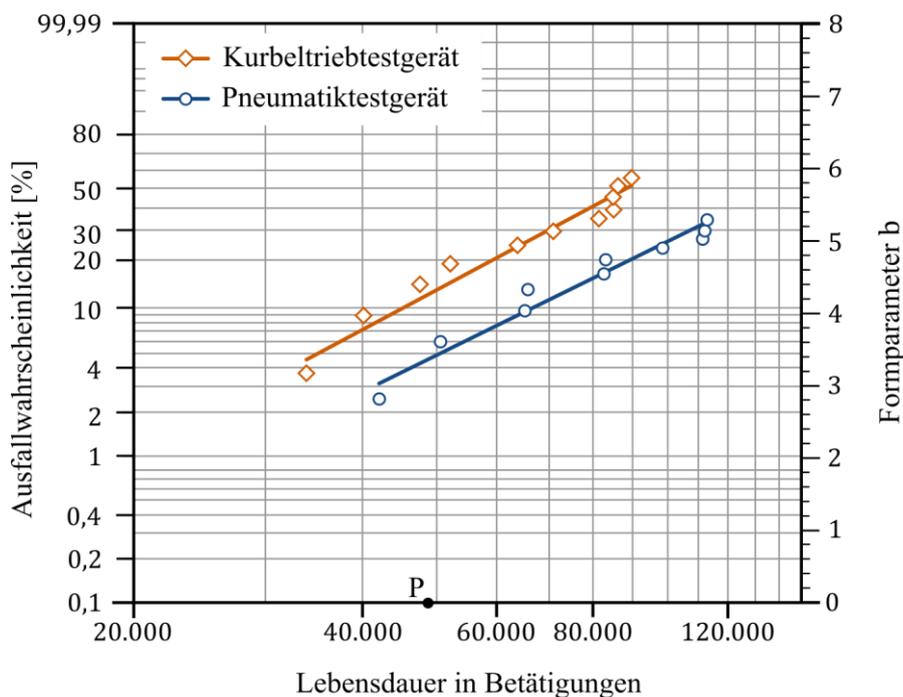


Abbildung 5.1: Ausfallverteilung am Kurbeltrieb- und Pneumatiktestgerät bei gleicher Nennlast, dargestellt in einem Weibull-Netz

Mit Regressionsanalysen werden die Weibull-Geraden aus den Ausfallpunkten für beide Testgeräte bestimmt. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionen mit Werten größer als 0,95 lassen einen gesicherten statistischen Vergleich zu (siehe Abschnitt 2.3.4). Die Berechnung der charakteristischen Lebensdauern sowie der Formparameter der Gesamtgeraden erfolgt nach Gleichung (2.22) bzw. (2.23). In Tabelle 5.1 sind die resultierenden Zahlenwerte aufgelistet.

Tabelle 5.1: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.1

Weibull-Verteilung	Char. Lebensdauer T in Betätigungen	Formparameter b	Parameterbestimmung	Bestimmtheitsmaß R^2
Pneumatiktestgerät	162.908	2,508	Regression (ΔY)	0,9597
Kurbeltriebtestgerät	102.782	2,693	Regression (ΔY)	0,9619
Gesamtgerade	129.398	2,601	Gl. (2.22) bzw. (2.23)	–

Für den statistischen Vergleich wird eine Aussagewahrscheinlichkeit von $P_A = 90\%$ gewählt. Diese Vorgabe ist notwendig, damit mit den Gleichungen (2.19) und (2.20) eine Bestimmung der Vertrauensgrenzen der mittleren Weibull-Parameter möglich ist. Die Minimal- und Maximalwerte für die charakteristische Lebensdauer sowie für den Formparameter finden sich in Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung

Parameter	Minimal	Maximal
T	114.201	150.935
b	2,07	3,27

Abbildung 5.2 zeigt ein Diagramm, in dem die Abszisse die charakteristische Lebensdauer T und die Ordinate den Formparameter b repräsentieren. Die Vertrauensgrenzen werden entsprechend eingetragen. Das sich ergebende geschlossene Rechteck stellt den Vertrauensbereich der mittleren Parameter (Gesamtgerade) dar. Die Wertepaare (Form- und Lageparameter) für das Pneumatik- und das Kurbeltriebtestgerät sind in diesem Diagramm als Punkte zu erkennen. Sie liegen außerhalb des Vertrauensbereichs.

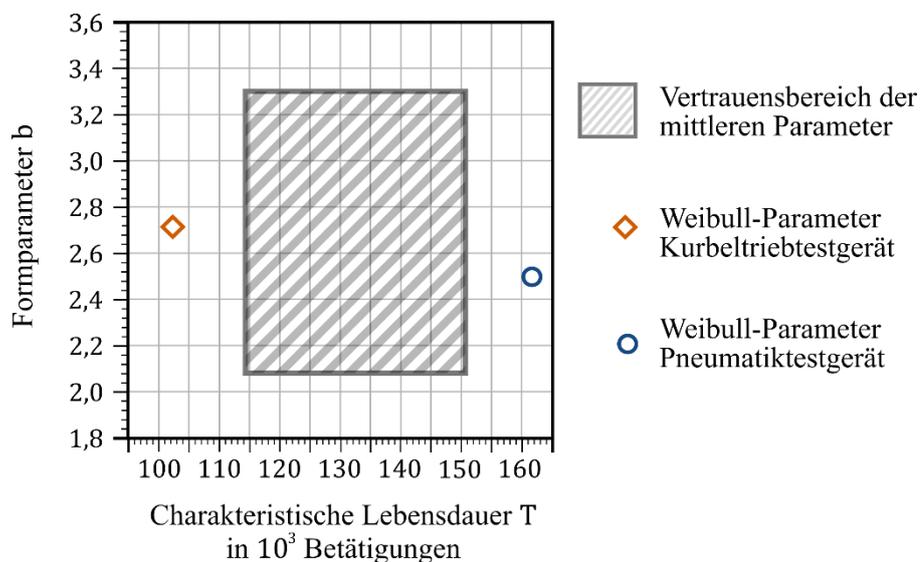


Abbildung 5.2: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Parameter für den statistischen Vergleich der Testgeräte

Die Formparameter der einzelnen Verteilungen unterscheiden sich wenig und liegen somit innerhalb der oberen und unteren Vertrauensgrenze für den Formparameter der mittleren Verteilung. Durch die große Differenz der charakteristischen Lebensdauern liegen die Punkte in Abbildung 5.2 jedoch außerhalb des Vertrauensbereichs. Die Nullhypothese, die davon ausgeht, dass beide Datenreihen einer mittleren Verteilung angehören, wird abgelehnt (siehe Abschnitt 2.4.2).

Ergebnis

Die Formparameter der Ausfallverteilungen für beide Testgeräte liegen im Werte-Intervall zwischen 1 und 4. Nach Tabelle 2.4 lässt sich damit die Ausfallursache in Alterungseffekte kategorisieren. Dies kann über das Fehlerbild der Handschalter (siehe Abschnitt 3.2) bestätigt werden, da ein Ermüdungsbruch ein zeitbedingter Ausfall ist.

Mit dem statistischen Vergleich wird nachgewiesen, dass bei gleicher Nennlast am Kurbeltriebtestgerät Handschalter-Ausfälle früher zu erwarten sind, als am Pneumatiktestgerät. Da an beiden Testgeräten derselbe Ausfallgrund nachgewiesen wird (Parameter liegen innerhalb der Vertrauensgrenzen), kommt es bei Lebensdaueruntersuchungen am Kurbeltriebtestgerät zu einer Teststraffung.

Raffungsfaktor

Die Formparameter der beiden Weibull-Verteilungen sind unterschiedlich. Aus diesem Grund ist in der Darstellung im Weibull-Netz ein (leichtes) Auseinanderklaffen der Weibull-Geraden erkennbar. Wären beide Geraden parallel, könnten für die Berechnung des Raffungsfaktors κ die Laufzeiten einer beliebigen Ausfallwahrscheinlichkeit ins Verhältnis gesetzt werden (siehe Gleichung (2.21)). Weil diese Voraussetzung nicht gegeben ist, wird für die Bestimmung von κ die kleinst-vorkommende Ausfallwahrscheinlichkeit (5 %) gewählt. In diesem Fall ergibt sich für den Raffungsfaktor ein Minimum. Bei Verringerung von κ wird die Mindestzuverlässigkeit R_{min} kleiner (siehe Gleichung (5.1)). Daher erhält man auch für R_{min} ein Minimum und das Risiko eine zu hohe Mindestzuverlässigkeit nachzuweisen, wird verringert. Für die Berechnung werden über die Weibull-Verteilungen, welche durch die Parametern aus Tabelle 5.1 definiert sind, die Laufzeiten für eine 5%-Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt. In Tabelle 5.3 sind beide Werte angeführt. Über das Verhältnis dieser Laufzeiten ergibt sich der Raffungsfaktor zu $\kappa = 1,461$.

Tabelle 5.3: Laufzeiten für eine 5%-Ausfallwahrscheinlichkeit in Betätigungen, berechnet aus den Weibull-Verteilungen der Testläufe 3 und 4

Testgerät	Pneumatik	Kurbeltrieb
Wert	49.846	34.111

5.1.2 Vergleich unterschiedlicher Nennlast

In diesem Abschnitt werden die Ausfalldaten aus den Testläufen 3 und 6 ausgewertet. Es handelt sich hierbei um zwei Lebensdaueranalysen von Handschalter gleicher Bauform, wobei die eine Stichprobe mit 10 N, die andere mit 25 N Nennlast getestet wird. Die sich ergebenden Ausfalllaufzeiten (exakte Werte sind im Anhang aufgelistet) mit den dazugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten (nach Gleichung (2.18)) werden in ein Weibull-Netz eingetragen. Über Regressionsanalysen finden sich zwei repräsentative Weibull-Verteilungen. In Abbildung 5.3 sind die Ausfallpunkte und die Weibull-Geraden dargestellt.

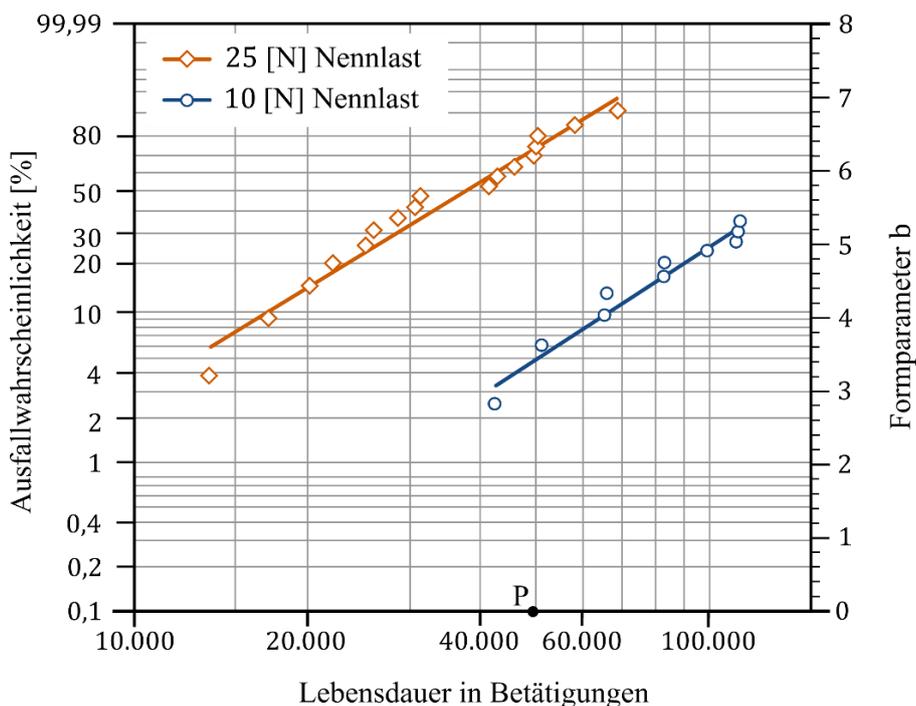


Abbildung 5.3: Weibull-Verteilungen bei einer Nennlast von 10 und 25 N

Die berechneten Parameterwerte sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionsanalysen, über die die Weibull-Parameter ermittelt werden, sind größer als 0,95 und lassen somit statistische Vergleiche zu. Die Berechnung der mittleren Weibull-Verteilung (Gesamtgerade) erfolgt über die Gleichungen (2.22) bzw. (2.23).

Tabelle 5.4: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.3

Weibull-Verteilung	Char. Lebensdauer T in Betätigungen	Formparameter b	Parameterbestimmung	Bestimmtheitsmaß R^2
10 [N] Nennlast	162.908	2,508	Regression (ΔY)	0,9597
25 [N] Nennlast	43.502	2,384	Regression (ΔY)	0,9686
Gesamtgerade	84.184	2,446	Gl. (2.22) und (2.23)	—

Analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 5.1.1 wird das Diagramm aus Abbildung 5.4 erstellt. Dafür werden die Grenzwerte der mittleren Weibull-Verteilung aus Tabelle 5.5 benötigt. Es ist zu erkennen, dass die Punkte der Ausgangsverteilungen außerhalb des Vertrauensbereichs liegen. Grund hierfür ist der hohe Unterschied in den Werten der charakteristischen Lebensdauern. Es kommt zur Verwerfung der Nullhypothese. Die beiden Formparameter liegen hingegen innerhalb der Vertrauensgrenzen. Es kann somit von der gleichen Ausfallursache in beiden Stichproben ausgegangen werden.

Tabelle 5.5: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung

Parameter	Minimal	Maximal
T	74.778	97.067
b	1,99	3,00

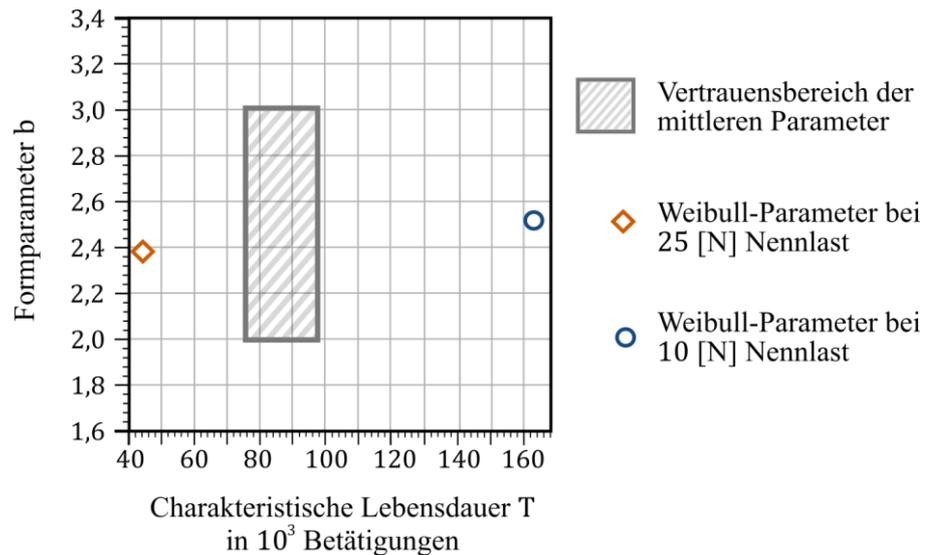


Abbildung 5.4: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Parameter für den statistischen Vergleich unterschiedlicher Nennlasts

Ergebnis

Bei einer Nennlaststeigerung von 10 auf 25 N kommt es am Pneumatiktestgerät zu signifikant unterschiedlichen Ausfallverteilungen. Da die charakteristische Lebensdauer bei einer Erhöhung der Betätigungskraft wesentlich verringert wird, und gleichzeitig sich der Ausfallgrund nicht ändert, bewirkt eine Nennlaststeigerung eine Teststraffung. Je höher die Nennlast am Testgerät eingestellt wird, umso schneller kommt es zum Versagen der Handschalter.

5.1.3 Vergleich unterschiedlicher Kraftverläufe

Wie die Analyse des Kurbeltriebtestgerätes im Abschnitt 3.3.1 zeigt, treten bei der Betätigung der Bedienelemente dynamische Kräfte auf. Die maximale Amplitude bei einer Nennlast von 1 kg und einer Betätigungsfrequenz von 1 Hz beträgt 14 N. Die Ausfalldaten von Versuchsreihe 2 ergeben sich mit diesen Einstellungen am Kurbeltriebtestgerät. Die Handschalter in Versuchsreihe 5 werden am Pneumatiktestgerät mit einer Nennlast von 14 N beaufschlagt. Für den statistischen Vergleich wird der Kraftverlauf, der vom Kurbeltriebtestgerät auf den Handschalter aufgebracht wird, als „Schwingkraft“ und der vom Pneumatiktestgerät als „Konstantkraft“ bezeichnet.

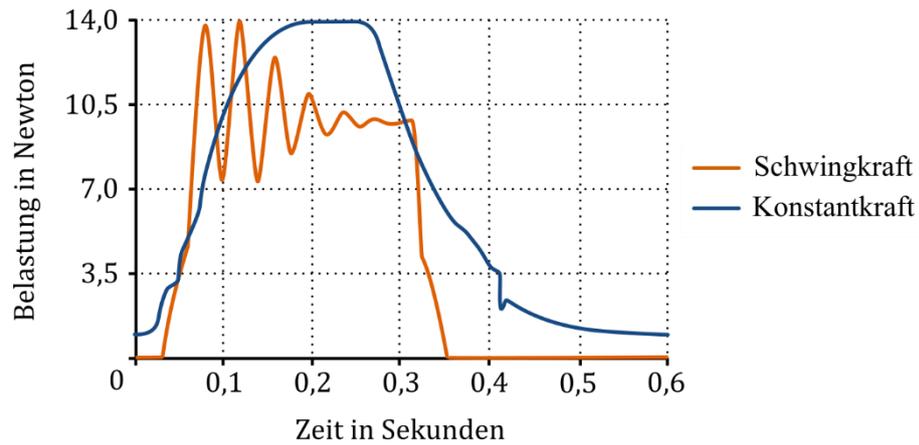


Abbildung 5.5: Darstellung der zu vergleichenden Kraftverläufe

Die maximale Amplitude des Kurbeltriebtestgerätes ist gleich groß wie die am Pneumatiktestgerät eingestellte Nennlast. Den Unterschied der Kraftverläufe zeigt Abbildung 5.5. Versuchsreihe 2 und 5 unterscheiden sich nur im Verlauf der Betätigungskraft, nicht aber in ihrer höchst-vorkommenden Kraftspitze.

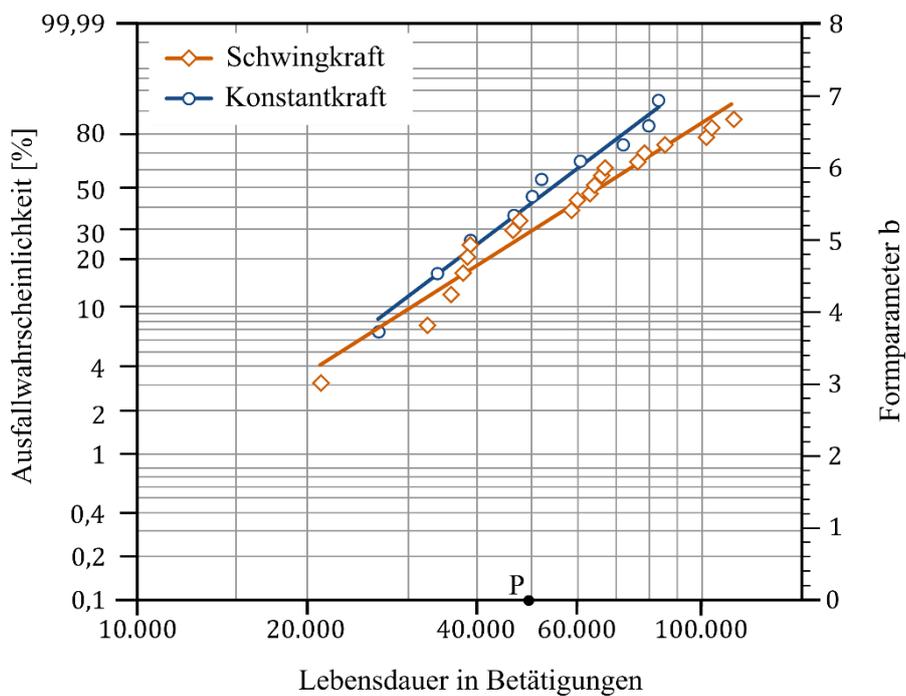


Abbildung 5.6: Weibull-Geraden zweier Stichproben, die mit gleicher maximalen Amplitude, aber unterschiedlichem Kraftverlauf getestet werden

Die in Abbildung 5.6 dargestellten Weibull-Verteilungen werden aus den Ausfalllaufzeiten und den dazugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten über eine Regressionsanalyse bestimmt (siehe Anhang bzw. Gleichung (2.18)). Ihre Parameterwerte und die jeweiligen Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 5.6 angeführt.

Tabelle 5.6: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.6

Weibull-Verteilung	Char. Lebensdauer T in Betätigungen	Formparameter b	Parameterbestimmung	Bestimmtheitsmaß R^2
Schwingkraft	75.787	2,457	Regression (ΔY)	0,9577
Konstantkraft	61.987	2,859	Regression (ΔY)	0,9818
Gesamtgerade	68.541	2,658	Gl. (2.22) und (2.23)	–

Über die Gleichungen (2.22) und (2.23) berechnen sich die Parameter der Gesamtgeraden, welche die gemittelte Ausfallverteilung repräsentiert. Ihre Werte listet Tabelle 5.7 auf.

Tabelle 5.7: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung

Parameter	Minimal	Maximal
T	61.776	77.567
b	2,19	3,23

In Abbildung 5.7 ist der Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Parameter zu erkennen. Für die Erstellung dieses Diagramms sei auf Abschnitt 5.1.1 verwiesen. Da sich die Wertepaare der einzelnen Verteilungen – auch wenn nur äußerst knapp – innerhalb des Vertrauensbereichs befinden, wird die Nullhypothese nicht verworfen.

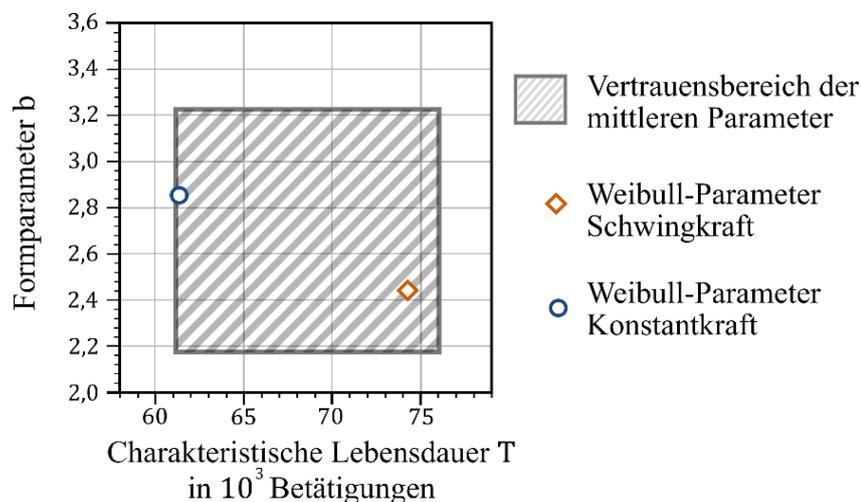


Abbildung 5.7: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Parameter für den statistischen Vergleich unterschiedlicher Kraftverläufe

Ergebnis

Ist die am Pneumatiktestgerät eingestellte Nennlast gleich groß wie die am Kurbeltriebtestgerät vorkommende maximale Kraftspitze, kann kein signifikanter Unterschied in den Ausfallverteilungen nachgewiesen werden. Die Abweichungen der Weibull-Parameter unterliegen der zufällig-bedingten Streuung der Ausfalldaten. Das durch das Kraftschwingverhalten entstehende Lastkollektiv nimmt

keinen Einfluss auf die Lebensdauer der Bedienelemente. Wesentlich ist die höchst-vorkommende Kraft im Betätigungszyklus.

5.2 Aussage über Festigkeitsbereiche

Das Wöhler-Diagramm gibt Aufschlüsse über den Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich eines Bauteils. Mit den Ergebnissen aus den Versuchsreihen 1 bis 7 werden Aussagen über diese laufzeit-abhängigen Festigkeitsbereiche der Mikroschalterfeder getroffen. Anhand der Ausfälle bei unterschiedlichen Lastniveaus erfolgt eine mathematische und grafische Beschreibung des Zeitfestigkeitsbereichs. Da im Zuge der Lebensdaueruntersuchungen auch eine Reihe von Durchläufern beobachtet wird, ist zusätzlich die Darstellung des Dauerfestigkeitsbereichs möglich. Das Ergebnis der folgenden zwei Abschnitte ist das Wöhler-Diagramm der Mikroschalterfeder. Abschließend erfolgt eine Plausibilitätskontrolle durch die Verifizierung mit dem Resultat aus Versuchsreihe 4.

5.2.1 Zeitfestigkeitsbereich

In Abschnitt 5.1.2 ist nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Nennlast zu einem schnelleren Ausfall der Bedienelemente führt. Genau dieses Verhalten beschreibt die Wöhler-Linie im Zeitfestigkeitsbereich. Liegen vergleichbare Ausfalldaten unterschiedlicher Belastungsniveaus vor, kann über deren Weibull-Auswertungen der Zeitfestigkeitsbereich des Wöhler-Diagramms abgeleitet werden (siehe Abschnitt 2.4.5).

Für die Ermittlung des Wöhler-Diagramms werden die Ausfalldaten der Versuchsreihen 3 und 6 herangezogen und entsprechend ihrer Belastungsniveaus separat betrachtet. Einsicht auf die berechneten Parameterwerte der sich ergebenden Weibull-Verteilungen gibt Tabelle 5.4. Damit in späterer Folge im Wöhler-Diagramm die Wöhler-Linien unterschiedlicher Ausfallwahrscheinlichkeit einen parallelen Verlauf aufweisen, ist es notwendig, einen mittleren Formparameter zu berechnen. Mit den Werten für die Formparameter b aus Tabelle 5.4 ergibt sich die gesuchte Steigung b_m aus ihrem arithmetischen Mittelwert. Dieser Parameter definiert mit den jeweiligen charakteristischen Lebensdauern (T_{10N} bzw. T_{25N}) zwei Weibull-Verteilungen. Mit Gleichung (2.12) werden die Laufzeiten für eine 10%-, 50% und 90%-Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet. Eine Auflistung der berechneten Werte gibt Tabelle 5.8.

Tabelle 5.8: Charakteristische Werte der über die Belastungsfälle gemittelten Weibull-Verteilungen

Belastung	b_m	T	$t_{10\%}$	$t_{50\%}$	$t_{90\%}$
10 [N]	2,446	162.908	64.921	140.230	229.100
25 [N]		43.502	17.336	37.447	61.178

Die sechs charakteristischen Lebensdauern werden in ein Wöhler-Diagramm eingetragen. Durch die Verbindung der Punkte gleicher Ausfallwahrscheinlichkeit ergeben sich drei Wöhler-Linien, welche durch die logarithmische Skalierung der Ordinate und der Abszisse als Geraden erscheinen. Für die Lebensdaueruntersuchungen mit den unterschiedlichen Belastungsniveaus ergibt sich ein Diagramm, wie es in Abbildung 5.8 dargestellt ist.

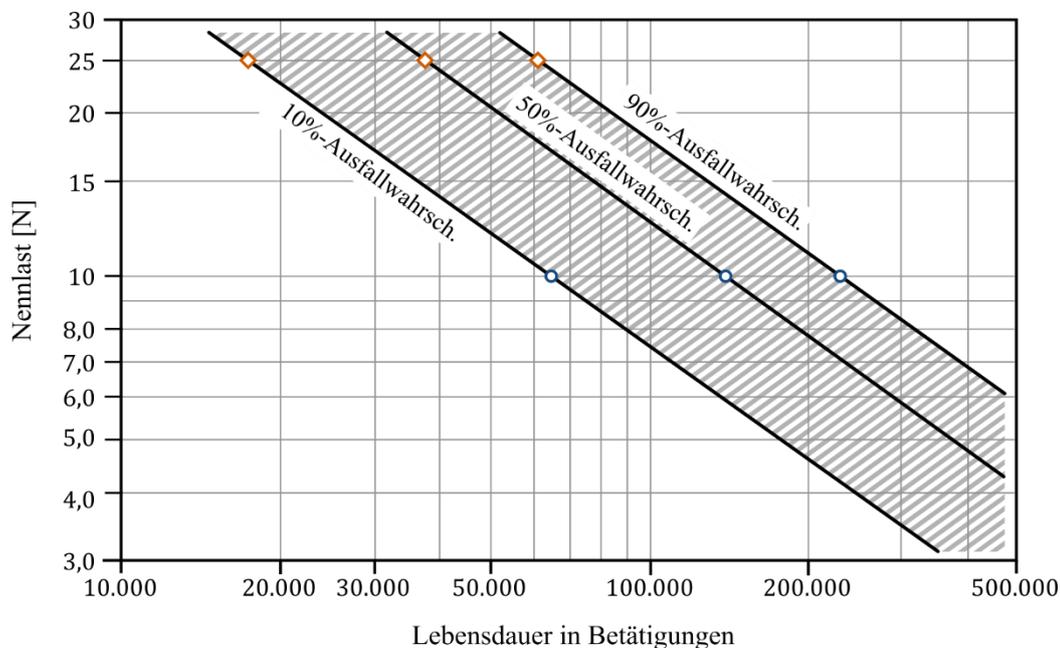


Abbildung 5.8: Zeitfestigkeitsbereich im abgeleiteten Wöhler-Diagramm

Anhand des Wöhler-Diagramms ist es möglich, quantitative Aussagen über die zu erwarteten Lebensdauer der HS-IL Handschalter bei einer vorgegebenen Belastung zu treffen. An der Ordinate wird dazu auf einem beliebigen Belastungsniveau eine horizontale Linie gelegt. Die sich ergebenden Schnittpunkte mit den Wöhler-Linien werden auf die Abszisse projiziert und die entsprechenden Lebensdauerwerte abgelesen. Würde man zum Beispiel einen zusätzlichen Testlauf mit einer Belastung von 20 N durchführen, kann im Vorfeld damit gerechnet werden, dass 10 % der Handschalter bei 24.000, 50 % bei 52.000 und 90 % bei 84.000 Betätigungszyklen ausfallen. Anhand eines relativ geringen Testaufwands kann somit auf das Ausfallverhalten bei unterschiedlichen Betätigungskräften geschlossen werden.

Wöhler-Exponent

Der Wöhler-Exponent k gibt an, wie stark die Wöhler-Linie im Zeitfestigkeitsbereich abfällt. Für die explizite Berechnung ist eine Umstellung von Gleichung (2.25) notwendig. Da eine Wöhler-Linie über zwei Punkte eindeutig definiert ist, können die Werte für die Laufzeit und Nennlast für σ und N entsprechend eingesetzt werden. Der Wöhler-Exponent ist nach diesem Berechnungsschema für alle Wöhler-Linien unterschiedlicher Ausfallwahrscheinlichkeit konstant und beträgt $k = 1,441$.

5.2.2 Dauerfestigkeitsbereich

Aus Abbildung 5.8 geht hervor, dass es auch bei Belastungen unter $5 N$ nach einer gewissen Anzahl an Betätigungen zum Bruch der Mikroschalterfeder kommt. Bei einer Belastung von $10 N$ sollten bei einer Laufzeit von 228.000 Betätigungen 90 % der HS-IL Bedienelemente ausfallen. Dieser Wert ergibt sich durch die (nicht immer sinnvolle) Extrapolation der Weibull-Geraden. In der Auswertung von Versuchsreihe 3, der mit selbiger Nennlast durchgeführt wird, lassen die Ausfalldaten allerdings auf ein differentes Verhalten schließen. Von 28 getesteten Mikroschaltern gibt es 18 Durchläufer, die alle mehr als 228.000 Zyklen aufweisen. Bei dieser Laufzeit gibt es also nicht 90 %, sondern lediglich 64,3 % Ausfälle.

Bei der Untersuchung sämtlicher Ausfälle, die im Zuge von Lebensdaueruntersuchungen entstehen, liegt der späteste (gültige) bei 113.298 Betätigungszyklen. Es kann mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % behauptet werden, dass die Mikroschalter ab 115.000 Betätigungen nicht mehr ausfallen und somit dauerhaft sind (siehe Abschnitt 4.6). Mit der Festlegung von $N_D = 115.000$ Zyklen ist durch Umstellung von Gleichung (2.25) die Berechnung des Dauerfestigkeits-Grenzwertes σ_D möglich. Dafür werden der im vorherigen Abschnitt berechnete Wöhler-Exponent k und die in Tabelle 5.8 angeführten Betätigungszyklen N bei entsprechender Belastung σ in die umgeformte Gleichung eingesetzt. Es ergibt sich für jede Wöhler-Linie jeweils ein Belastungsgrenzwert (siehe Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Dauerfestigkeits-Grenzwerte σ_D für jede Wöhler-Linie aus Abbildung 5.8

Wöhler-Linie	10%-Ausfall-wahrscheinlichkeit	50%-Ausfall-wahrscheinlichkeit	90%-Ausfall-wahrscheinlichkeit
$\sigma_D [N]$	6,72	11,48	16,13

Ab diesen Grenzwerten verlaufen die Wöhler-Linien horizontal. Wie in Abbildung 5.9 ersichtlich ist, kann auf diese Art und Weise der Dauerfestigkeitsbereich im Wöhler-Diagramm zusätzlich zum Zeitfestigkeitsbereich dargestellt werden.

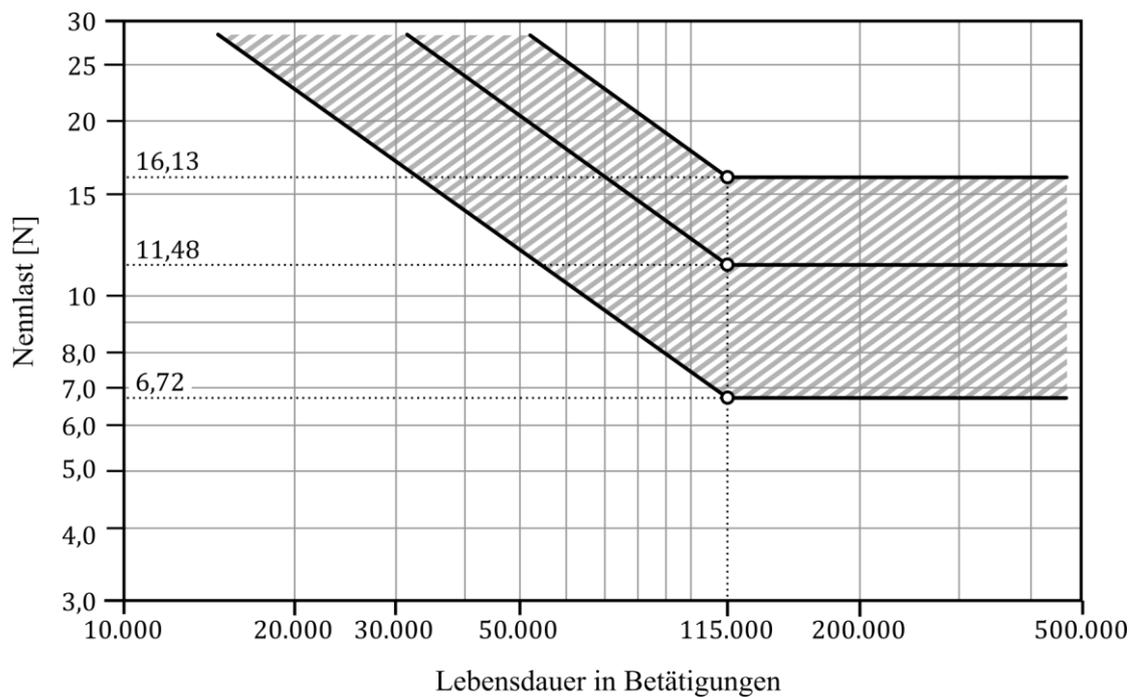


Abbildung 5.9: Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich des Wöhler-Diagramms

5.2.3 Verifizierung des Wöhler-Diagramms

Mit den Ausfalldaten aus Versuchsreihe 4 wird kontrolliert, inwiefern das Wöhler-Diagramm mit den Ergebnissen aus anderen Lebensdaueruntersuchungen übereinstimmt. Wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, ist das Wöhler-Diagramm aus Abbildung 5.9 aus den Weibull-Auswertungen der Versuchsreihen 3 und 6 abgeleitet. Versuchsreihe 4 unterscheidet sich zu diesen nur im verwendeten Testgerät (Kurbeltriebtestgerät). Im Abschnitt 5.1.3 erfolgt der statistische Nachweis, dass bei einer Nennlast von 14 N die Handschalter-Ausfälle am Pneumatiktestgerät der gleichen Verteilung unterliegen, wie der am Kurbeltriebtestgerät. Demnach sind die Ergebnisse, die unter diesen Bedingungen an den unterschiedlichen Testgeräten erreicht werden, vergleichbar. Aus diesem Grund ist eine Verifizierung des Wöhler-Diagramms mit der Weibull-Auswertung der Versuchsreihe 4 zulässig.

Mit den durch eine Regressionsanalyse erhaltenen Weibull-Parametern (siehe Tabelle 5.6) werden über Gleichung (2.12) die ertragbaren Betätigungszyklen für Ausfallwahrscheinlichkeiten von 10 %, 50 % und 90 % berechnet. Anhand der Zeitfestigkeitsgleichung (2.25) kann mit einer Belastung von 14 N und den in Abschnitt 5.2.2 angeführten Dauerfestigkeitswerten, sowie mit dem Wöhler-Exponenten k , die Laufzeiten für gleiche Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet werden. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Werte bietet Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10: Vergleich der Werte für die berechneten Ausfalllaufzeiten unterschiedlicher Ausfallwahrscheinlichkeiten in Betätigungen

	10%-Ausfallwahrscheinlichkeit	50%-Ausfallwahrscheinlichkeit	90%-Ausfallwahrscheinlichkeit
Weibull	44.564	89.701	140.100
Wöhler	39.977	86.352	141.077
Abweichung [%]	11,5	3,9	0,7

Je höher die Ausfallwahrscheinlichkeit, umso besser stimmen die Werte aus dem Wöhler-Diagramm und der Weibull-Verteilung überein. Die Abweichungen der Laufzeiten können durch die zufällige Streuung der Ausfalldaten erklärt werden. Der Formparameter aus der Weibull-Auswertung ($b = 2,693$) der Versuchsreihe 4 ist größer als die Steigung jener Weibull-Geraden ($b_m = 2,446$), mit denen das Wöhler-Diagramm erstellt wird. Dies begründet die stetige Abnahme der Differenz bei größer werdenden Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Die in Tabelle 5.10 angeführten Werte für die 90%-Ausfallwahrscheinlichkeit können durch Testlauf 4 nicht bestätigt werden. Da es von insgesamt 19 gültig getesteten Mikroschaltern acht Durchläufer gibt, die allesamt mehr als 250.000 Betätigungen ertragen (siehe Anhang), sind in diesem konkreten Fall bei 141.000 Zyklen nicht 90 %, sondern nur 57,9 % der Mikroschalter ausgefallen. Bei dieser Anzahl an Betätigungen ist der Bereich der Dauerfestigkeit bereits erreicht und es sind keine Ausfälle zu erwarten. Die Laufzeit bei 90 % Ausfallwahrscheinlichkeit ist ein durch die Extrapolation der Weibull-Gerade berechneter Wert. Wird die Vorgehensweise in der Berechnung der Dauerfestigkeitswerte in Abschnitt 5.2.2 umgedreht, kann bei Vorgabe des Belastungsniveaus die Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden, bei der die Handschalter in den dauerhaftesten Zustand übergehen. Bei einer Belastung von 14 N fallen nach dem in Abschnitt 5.2.2 ermittelten Wöhler-Diagramm 76 % der getesteten Bedienelemente aus, bevor der Dauerfestigkeitsbereich erreicht wird. Dies deckt sich nicht mit den 57,9 % aus der Weibull-Auswertung, bei dem der letzte Ausfall beobachtet wird. Grund dafür ist, dass der Stichprobenumfang von 19 getesteten Mikroschaltern in Versuchsreihe 4 nicht ausreicht, um den gesamte Laufzeitstreubereich abzudecken. Der späteste Ausfall liegt bei 89.640 Betätigungen (siehe Anhang). Würde eine Reihe an zusätzlichen Tests durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass Ausfälle bei Laufzeiten größer 90.000 Belastungszyklen auftreten. Eine grafische Veranschaulichung der Verifikation des Wöhler-Diagramms gibt Abbildung 5.10.

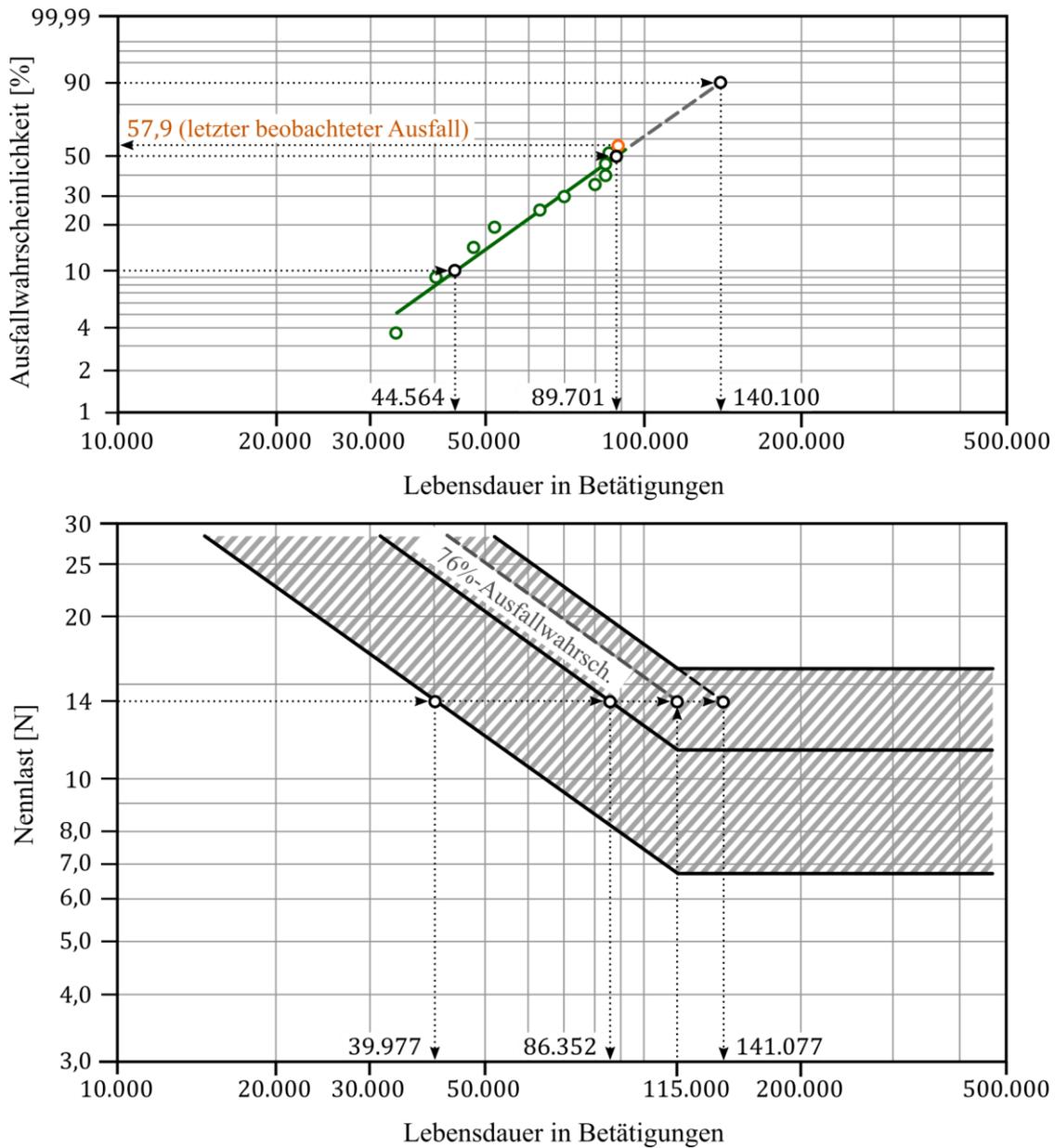


Abbildung 5.10: Darstellung der Verifikation des Wöhler-Diagramms durch die aus den Ausfalldaten von Versuchsreihe 4 generierte Weibull-Gerade

5.3 Success-Run

Bei Betrachtung des Testergebnisses aus Testlauf 7 fällt auf, dass es während der Lebensdaueruntersuchung zu keinem einzigen Ausfall kommt. Eine Weibull-Verteilung kann daher nicht ermittelt werden. Dennoch besteht die Möglichkeit, die erreichte Zuverlässigkeit zu quantifizieren. Dazu erfolgt die Berechnung nach der in Abschnitt 2.4.4 beschriebenen Success-Run-Methode.

Da alle Durchläufer unterschiedliche Laufzeiten t_p aufweisen, kann nicht die allgemein-gültige Gleichung (2.24) für die Mindestzuverlässigkeit R_{min} verwendet werden. In diesem Fall ist es zwingend notwendig, eine Summe über die erreichten Laufzeiten zu bilden. In Abschnitt 5.1.1 ist statistisch

bewiesen, dass die am Kurbeltestgerät auftretenden dynamischen Kräfte eine Testraffung verursachen. Der berechnete Raffungsfaktor κ erhöht die Mindestzuverlässigkeit, indem die jeweiligen Lebensdauerverhältnisse um seinen Wert proportional erhöht werden. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte ergibt sich die zu verwendende Success-Run-Gleichung zu

$$R_{min} = (1 - P_A)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\kappa \frac{t_{pi}}{t_g} \right)^b}} \quad (5.1)$$

Beim Parameter b handelt es sich um den Formparameter jener Weibull-Verteilung, der das Ausfallverhalten der Bedienelemente beschreibt. Bei allen Handschaltern, bei welchen es im Zuge von Lebensdaueruntersuchungen zum Defekt kommt, ist die Ausfallursache der Ermüdungsbruch der Mikroschalterfeder. Weil die Ausfalldaten einer zufälligen Streuung unterliegen, weisen die Stichproben der durchgeführten Versuchsreihen unterschiedliche Formparameter auf. Da eine Erhöhung von b zu einer Steigerung der Mindestzuverlässigkeit führt, wird für die Berechnung der kleinste vorkommende Formparameter (aus Versuchsreihe 6, siehe Tabelle 5.4) herangezogen. Es ergibt sich dadurch das geringste Risiko, eine zu hohe Mindestzuverlässigkeit zu erhalten. In Tabelle 5.11 sind alle für die Berechnung von R_{min} verwendeten Werte aufgelistet.

Tabelle 5.11: Werte zur Berechnung der in Testlauf 7 erreichten Mindestzuverlässigkeit nach Gleichung (5.1)

	Parameter	Wert
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit	90%
n	Stichprobenumfang	10
κ	Raffungsfaktor	1,461
t_{pi}	Laufzeit der Probe i	Siehe Anhang
t_g	Geforderte Lebensdauer	60.000
b	Weibull-Formparameter	2,384

Ergebnis

Bei allen getesteten Bedienelementen in Versuchsreihe 7 handelt es sich um Durchläufer, die bei Laufzeiten aus dem Test genommen werden, die höher als die geforderte Lebensdauer sind. Durch Vorkenntnisse aus vorausgegangenen Untersuchungen wird unter der Verwendung von Gleichung (5.1) eine Mindestzuverlässigkeit von $R_{min} = 99,9949 \%$ nachgewiesen. Aus einer Menge von einer Million Handschalter dieser Bauform ist in 90 % der Fälle zu erwarten, dass nach 60.000 Betätigungen 51 Stück ausgefallen sind. Die Vorgabe einer Zuverlässigkeit von 500 ppm aus der Spezifikation (siehe Abschnitt 1.2) ist dadurch erfüllt.

5.4 Ausfall- und Überlebensgrund

Am HS-IL führen Betätigungskräfte von mehr als 5,2 N zum mechanischen Kontakt zwischen Betätigungselement und Mikroschalter im Inneren der Bedienelemente (vergleiche Tabelle 3.3). Weil die aufgebrachte Nennlast von den Testgeräten größer ist als die Blockkraft, kommt es zur Belastung des Mikroschaltergehäuses durch das Betätigungselement. Die Krafteinleitung erfolgt an den beiden Häuserippen an der Oberfläche des Gehäuses (siehe Abbildung 5.11). Die Fläche, an der sich die Rippe und der Kreuzquerschnitt des Betätigungselementes überlappen, beträgt $0,34 \text{ mm}^2$. Durch die (fast punktuelle) Krafteinleitung über diese Kontaktstellen kommt es zur Durchbiegung der Deckfläche des Mikroschaltergehäuses. Das nachgiebige Verhalten des dünnwandigen Nylon-Materials begünstigt diesen Umstand. Die Mikroschalterfeder erfährt eine erhöhte Belastung, weil sich aufgrund der Durchbiegung des Gehäuses der Taster weiter nach unten bewegt. Unter der Annahme eines linear-elastischen Verhaltens bei kleinen Verformungen ist die Durchbiegung proportional der Belastung. Damit kann das schnellere Ausfallverhalten der HS-IL Bedienelementen bei erhöhter Nennlast (Versuchsreihe 6) erklärt werden.

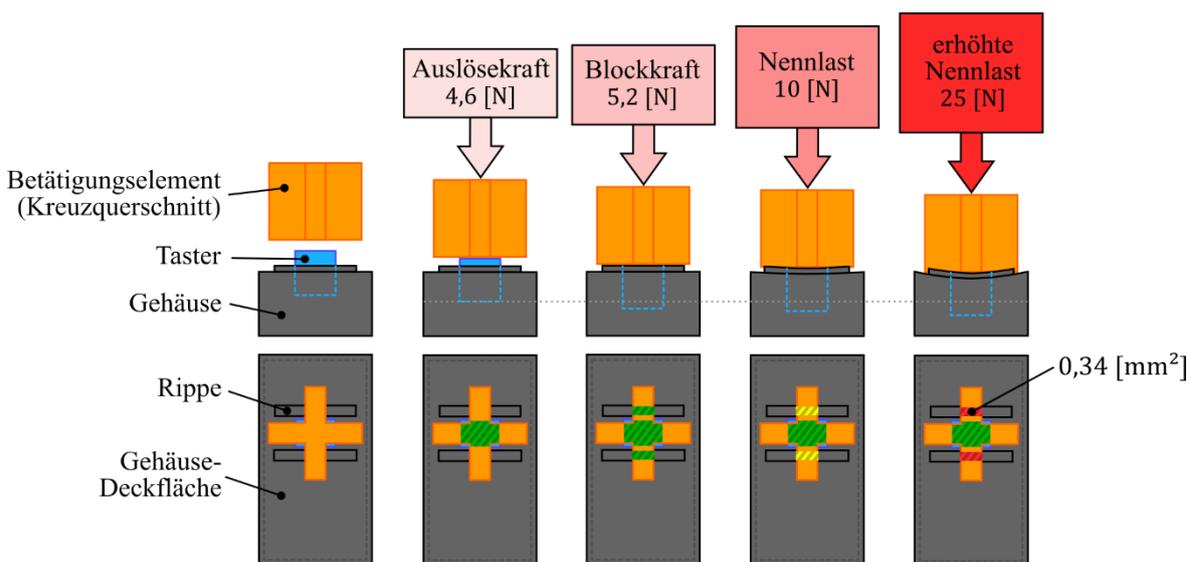


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-IL bei unterschiedlichen Kraftniveaus

Bei Aufbringung einer Nennlast von 10 N ist bei HS-TB-Bedienelementen der vollständige Kontakt zwischen Betätigungselement und Mikroschaltergehäuse in der Regel nicht hergestellt, weil die Blockkraft im Mittel bei 10,2 N liegt (siehe Tabelle 3.3). Der Mikroschalter-Betätigungsquerschnitt ist bei Handschaltern dieser Bauform als Kreis ausgeführt. Die Krafteinleitung auf die Rippen an der Mikroschalterdeckfläche erfolgt über eine Fläche von $1,36 \text{ mm}^2$ und ist im Vergleich zum HS-IL um das Vierfache größer. Dadurch ergibt sich eine kleinere Flächenpressung und somit auch eine geringere Durchbiegung des Mikroschaltergehäuses. Diese Aspekte führen dazu, dass die Mik-

roschalterfeder innerhalb ihres Dauerfestigkeitsbereiches belastet wird und es somit nicht zu Ausfällen von HS-TB-Bedienelementen kommt. Die Belastungssituation bei unterschiedlichen Kräften zeigt Abbildung 5.12.

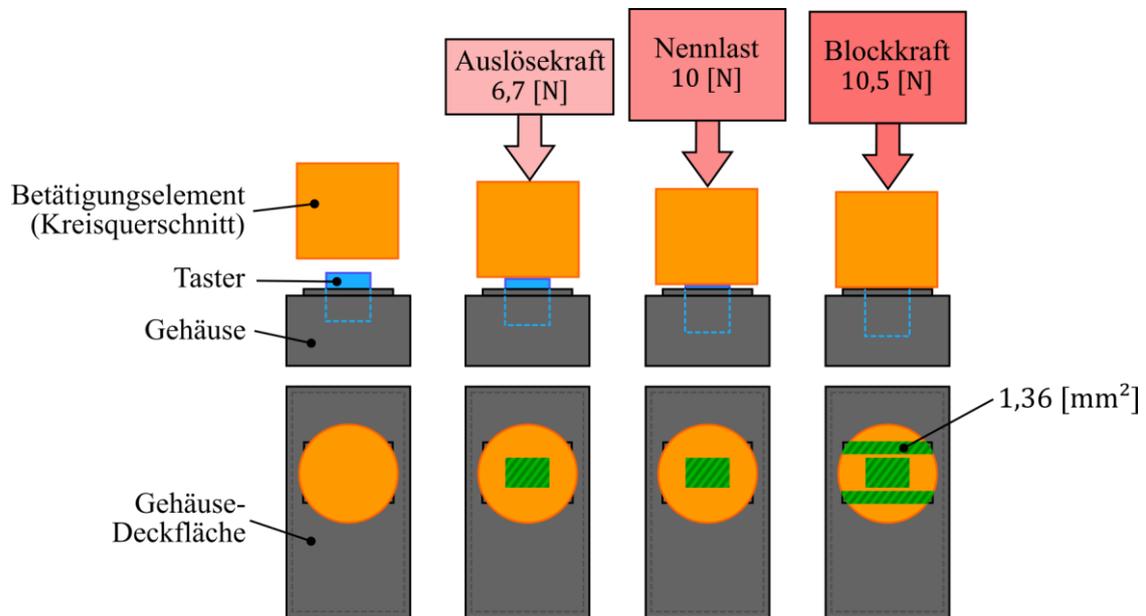


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-TB bei unterschiedlichen Kraftniveaus

In Versuchsreihe 7 kommt es zu keinem Ausfall, obwohl der Lebensdauertest mit HS-IL-Bedienelementen durchgeführt wird. Die grundsätzliche Belastung des Mikroschalters ist dieselbe wie in allen anderen Versuchsreihen, die mit dem Kurbeltriebtestgerät durchgeführt werden. Durch das modifizierte Betätigungselement kommt es allerdings zu einer wesentlich geringeren Durchbiegung der Deckfläche des Mikroschaltergehäuses. Wie in Abbildung 5.13 dargestellt ist, erfolgt der Kontakt zwischen Betätigungselement und Mikroschalter nicht über die Rippen, sondern an der Deckfläche des Gehäuses. Die rechteckige Berührfläche von insgesamt $2,7 \text{ mm}^2$ führt zu einer geringen Flächenpressung. Punktuelle Belastungen werden vermieden und so die Durchbiegung minimiert. Die Stützwirkung der Seitenwände des Gehäuses begünstigt die Lastsituation am Mikroschalter. Zusätzlich bewirkt die Hinterstellung des Betätigungselementes von $0,2 \text{ mm}$ eine Verminderung der Blattfederbelastung, weil die Bewegung des Tasters nach unten begrenzt wird. Durch diese Umstände sind Betätigungen des HS-IL im Dauerfestigkeitsbereich möglich und es kommt zu einer deutlichen Steigerung der in Lebensdauertests erreichten Zuverlässigkeit.

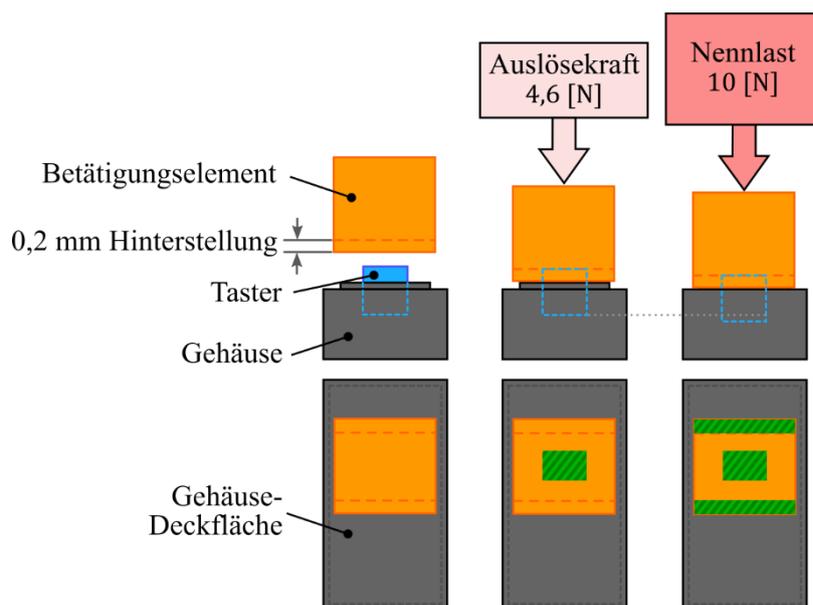


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-IL mit modifiziertem Betätigungselement bei unterschiedlichen Kraftniveaus

6 Zusammenfassung

In Zuverlässigkeitsuntersuchungen von bestimmten Bedienelementen (Produkte, die von LOGICDATA entwickelt werden) kam es zu Qualitätsproblemen. Die spezifizierte Zuverlässigkeit wurde nicht erreicht. Andere Bedienelemente hingegen, die sich vom Aufbau und der Funktion nicht wesentlich von den fehlerhaften unterscheiden, erfüllten die Vorgaben.

Im Zuge der Literaturrecherche wurden die theoretischen Grundlagen zur Zuverlässigkeitstechnik und Statistik aufgearbeitet. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Weibull-Funktion, die besonders in Lebensdaueranalysen häufig eingesetzt wird.

Das Schadensbild wurde durch eine mechanische Analyse defekter Bedienelemente festgestellt. Als Grund für den Ausfall im Lebensdauer-versuch konnte der Ermüdungsbruch der Mikroschalterfeder, der durch die zyklische Belastung des Bedienelements entsteht, detektiert werden. Der Mikroschalter ist ein Bauteil, der in der Elektronik aller Bedienelemente verbaut ist.

Eine Untersuchung der Kraftsituation am belasteten Bedienelement gab Einblicke in die interne Kraftflussaufteilung. Die wesentlichste Erkenntnis daraus ist, dass im Regelfall am defektanfälligen Bedienelement mehr Kraft über den Mikroschalter abgeleitet wird, als bei jenem, das die Tests unbeschadet übersteht.

Die Durchführung der Lebensdaueruntersuchungen erfolgte mit zwei unterschiedlichen Testgeräten. Diese belasten die Bedienelemente autonom und in regelmäßigen Zeitabständen, bis ein Schaden entstand. Im Zuge einer weiteren Analyse wurden die von den Testgeräten aufgebrachten Kraftverläufe messtechnisch erfasst. Auswertungen zeigten, dass trotz gleich eingestellter Nennlast an einem Testgerät eine signifikant höhere Maximalkraft entsteht, als beim anderen. Dies ist auf die unterschiedlichen Testprinzipien zurückzuführen. Die Ergebnisse aller Analysen wurden in Form eines Ursachen-Wirkung Diagramms zusammengefasst. Es listet jene Parameter auf, die einen möglichen Einfluss auf den Ermüdungsbruch der Mikroschalter haben.

Um für statistische Auswertungen ausreichend viele Ausfalldaten zu generieren, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in der Nennlast, mit der getestet wurde. Die Bedienelemente wurden solange zyklisch betätigt, bis ihre Funktionsfähigkeit, entsprechend dem analysierten Schadensbild, nicht mehr gegeben war.

Mit statistischen Vergleichsmethoden konnte ein signifikanter Unterschied der Ausfalldaten, die mit den Testgeräten erzeugt wurden, nachgewiesen werden. Obwohl an beiden Geräten die gleiche Nennlast eingestellt wurde, fielen an einem Testgerät die Bedienelemente schneller aus als am anderen. Es ließ

sich ein Raffungsfaktor bestimmen, mit dem es möglich ist, die unterschiedlichen Ausfalldaten der jeweiligen Testgeräte rechnerisch in Beziehung zu bringen. Weiters erfolgte der statistische Beweis dafür, dass aus dem aufgebrachten Kraftverlauf der Maximalwert relevant ist und nicht etwa eine Schadensakkumulation durch ein Kraftschwingverhalten. Eine Steigerung der Nennlast führte zu einer wesentlichen Änderung der Ausfallwahrscheinlichkeit und somit wiederum zu einer Testraffung.

Aus den Ergebnissen der Versuche mit unterschiedlicher Nennlast wurde ein Diagramm abgeleitet, das Aufschlüsse über die zu erwartende Lebensdauer bei beliebiger Belastung gibt. Zusätzlich konnte anhand von unvollständigen Ausfalldaten die Dauerfestigkeitsschwelle der Mikroschalterfeder ermittelt werden. Das sich ergebende Wöhler-Diagramm zeigt, dass Unterschiede von nur wenigen Newton in der Nennlast darüber entscheiden, ob der Mikroschalter im Zeitfestigkeits- oder im Dauerfestigkeitsbereich belastet wird.

Mit den Erkenntnissen aus den statistischen Vergleichen wurde der Ausfallgrund der betroffenen Bedienelemente gefunden. Durch die ungünstig gewählte Krafteinleitungsposition an der Mikroschaltergehäusedeckfläche kam es zu deren elastischen Durchbiegung, was in weiterer Folge dazu führte, dass die Mikroschalterfeder höhere Biegespannungen erfährt. Mit diesem erhöhten Belastungsniveau wurde die Dauerfestigkeitsschwelle überschritten und es kam zum Ermüdungsbruch innerhalb des Zeitfestigkeitsbereichs. Jene Bedienelemente, die in Lebensdauererests die Zuverlässigkeitsvorgaben erfüllten, wiesen eine differente Kraftsituation auf. Durch diese günstige Krafteinleitung auf den Mikroschalter wurden die Mikroschalterfedern stets im Dauerfestigkeitsbereich beansprucht und Defekte bleiben die Ausnahme.

An den fehleranfälligen Bedienelementen wurde als Konsequenz eine Änderung des mechanischen Aufbaus vorgenommen, die für eine vorteilhafte Krafteinleitung sorgt. Durch eine weitere Versuchsreihe mit diesen modifizierten Bedienelementen konnte die erreichte Lebensdauer so weit gesteigert werden, dass der vorgeschriebene Zuverlässigkeitswert aus der Spezifikation deutlich überschritten wird.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit kann zukünftig die konstruktive Auslegung der Bedienelemente bezüglich ihrer Zuverlässigkeit verbessert werden. Das generierte Wissen über die interne Kraftflussaufteilung ist die Basis für das Verständnis der Ausfallmechanismen im Lebensdauererest. Des Weiteren ist es möglich, Lebensdauererests der Bedienelemente zu beschleunigen, indem die Produkte mit einer höheren Nennlast getestet werden, als die Spezifikation vorgibt. Mit dem Raffungsfaktor, der im Zuge dieser Arbeit gefunden wurde, lassen sich die Ergebnisse darstellen, als wären sie unter vorgegebenen Bedingungen erzielt worden. Diese Methode bringt ein Einsparungspotential an Entwicklungskosten und –zeit.

Literaturverzeichnis

- [1] DGQ, *Begriffe und Formelzeichen im Bereich der Qualitätssicherung*, 3rd ed. Frankfurt/M: Dt. Ges. für Qualität, 1980.
- [2] VDA, Ed., *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten*. Zuverlässigkeits-Methoden und -Hilfsmittel. Berlin, 2000.
- [3] A. Krolo, *Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen*. Stuttgart: IMA, 2004.
- [4] B. Bertsche, *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin u.a.: Springer, 2009.
- [5] H. Lohninger, *Grundlagen der Statistik: Grundgesamtheit und Stichprobe*. [Online] Available: http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/cc_population.html. Accessed on: Apr. 07 2017.
- [6] J. Lehn and H. Wegmann, *Einführung in die Statistik*, 5th ed. Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [7] Der Rechnungshof, *Bericht des Rechnungshofes: über die durchschnittlichen Einkommen der gesamten Bevölkerung*, 2016.
- [8] C. Ronniger, *Taschenbuch der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden: Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis*, 1st ed. München: [CRGRAPH], 2013.
- [9] H. Wickham, *40 years of boxplots*, 2011.
- [10] G. Härtler, *Statistik für Ausfalldaten: Modelle und Methoden für Zuverlässigkeitsuntersuchungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.
- [11] R. Mock, *Methoden zur Datenhandhabung in Zuverlässigkeitsanalysen: Eine praxisorientierte Auswahl und Anwendung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse technischer Komponenten in der Verfahrenstechnik*. Zürich: vdf Hochschulverl. an der ETH, 1995.
- [12] B. Bertsche and G. Lechner, *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*, 3rd ed. Berlin u.a.: Springer, 2004.
- [13] J. F. Lawless, *Statistical models and methods for lifetime data*, 2nd ed. Hoboken N.J. u.a.: Wiley, 2003.
- [14] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 8th ed. München: Hanser, 2013.

-
- [15] C. A. Ronniger, Ed., *Zuverlässigkeitsanalyse mit Weibull in Entwicklung und Serie*: Springer Automotive Media, 1999.
- [16] P. D. T. O'Connor, *Zuverlässigkeitstechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim u.a.: VCH-Verl.-Ges, 1990.
- [17] H. Hilbrans, *Werkstoffkunde*, 10th ed. Berlin u.a.: Springer, 2008.
- [18] ITWissen, *Definition Mikroschalter*. [Online] Available: <http://www.itwissen.info/Mikroschalter-micro-witch.html>. Accessed on: Apr. 24 2017.
- [19] E. Hornbogen, *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, 8th ed. Berlin: Springer, 2006.
- [20] J. Kern, *Ishikawa Diagramme - Ursache-Wirkungs-Diagramme*. München: GRIN Verlag GmbH, 2009.
- [21] D. Radaj and M. Vormwald, *Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [22] M. Hüftle, *Statistische Schätz- und Testverfahren*.

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.1: Antriebssystem eines höhenverstellbaren Bürotisches: (1) Benutzer, (2) Bedienelement, (3) Steuerungseinheit, (4) Antriebssystem, (5) Bürotisch</i>	2
<i>Abbildung 2.1: Dichtefunktion der Normalverteilung für unterschiedliche Standardabweichungen σ bei konstantem Lageparameter $t_m = 2$</i>	9
<i>Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung des Boxplots einer beispielhaften Verteilung</i>	10
<i>Abbildung 2.3: Dichtefunktion $f(t)$ der Lognormalverteilung für unterschiedliche Standardabweichungen σ bei konstantem t_m</i>	11
<i>Abbildung 2.4: Dichtefunktionen $f(t)$ und Verteilungsfunktionen $F(t)$ für unterschiedliche Formparameter b einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung mit Lageparameter $T = 1$</i>	13
<i>Abbildung 2.5: Darstellung der Weibull-Verteilung als Gerade im Weibull-Netz mit der grafischen Ermittlung ihrer Parameter $b = 1,5$ und $T = 10$</i>	14
<i>Abbildung 2.6: Histogramm der Ausfallhäufigkeiten mit empirischer Dichtefunktion $f^*(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch (Klassenbreite $\Gamma = 200.000$ Umdrehungen)</i>	17
<i>Abbildung 2.7: Mögliches Histogramm der Ausfallhäufigkeiten mit Dichtefunktion $f(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch, wenn Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$</i>	17
<i>Abbildung 2.8: Histogramm der Summenhäufigkeiten mit empirischer Verteilungsfunktion $F(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch</i>	18
<i>Abbildung 2.9: Mögliches Histogramm der Summenhäufigkeiten mit Verteilungsfunktion $F(t)$ für den Wälzlager-Lebensdauerversuch, wenn Anzahl der Ausfälle $n \rightarrow \infty$</i>	19
<i>Abbildung 2.10: Dichtefunktionen der Ranggrößen-Ausfallwahrscheinlichkeiten mit den abgeleiteten Medianwerten und der Weibull-Gerade [2, p. 82]</i>	20
<i>Abbildung 2.11: 90 %-Vertrauensbereich der Dichtefunktionen der Ranggrößen-Ausfallwahrscheinlichkeiten [2, p. 83]</i>	21
<i>Abbildung 2.12: Die aus dem Wälzlager-Lebensdauerversuch abgeleitete Weibull-Gerade mit dem 90%-Vertrauensbereich, dargestellt im Weibull-Netz</i>	22
<i>Abbildung 2.13: Nachweis einer geforderten B5-Lebensdauer im Wälzlager-Beispiel, bei einer Laufzeit von 150.000 Umdrehungen und 90%-Aussagewahrscheinlichkeit</i>	26
<i>Abbildung 2.14: Qualitative Darstellung der Weibull-Geraden im Feldversuch und im Raffungstest</i>	28

<i>Abbildung 2.15: Qualitative Darstellung der Wöhler-Linie mit den drei Festigkeitsbereichen</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 2.16: Übertragung von Punkten aus dem Weibull-Netz in das Wöhler-Diagramm</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 3.1: Touch-Basic-Bedienelement, dargestellt in zwei Ansichten</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 3.2: Touch-Inlay-Bedienelement, dargestellt in zwei Ansichten.....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 3.3: Komponenten der in den Bedienelementen verbauten Mikroschalter</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 3.4: Vergleich von HS-TB und HS-IL in Schnittdarstellung gleichen Maßstabes</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 3.5: Betätigungspositionen der externen Last für die Kraftanalyse des HS-TB und HS-IL</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 3.6: Messaufbau zur Ermittlung der Auslösekräfte</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 3.7: Messaufbau zur Ermittlung der Blockkräfte.....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 3.8: Messaufbau zur Ermittlung der Betätigungskräfte.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 3.9: Vergleich der Messwerte zwischen Auslöse-, Block- und Betätigungskräfte der HS-TB und HS-IL Bedienelemente dargestellt als Boxplots</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 3.10: Vergleich eines schadhafte und eines funktionsfähigen Mikroschalters</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des Kurbeltriebtestgeräts.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 3.12: Realer Kraftverlauf am HS-IL durch das Kurbeltriebtestgerät mit einer Nennlast von 1 kg und einer Testfrequenz von 1 Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 3.13: Schematische Darstellung des Pneumatiktestgerätes.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 3.14: Realer Kraftverlauf am HS-IL durch das Pneumatiktestgerät mit einer Nennlast von 10 N und einer Testfrequenz von 1 Hz</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 3.15: Charakteristische Zeitabschnitte eines Betätigungszyklus, dargestellt am Kraftverlauf des Pneumatiktestgeräts.....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 3.16: Darstellung der Haupt- und Nebeneinflüsse auf den Ermüdungsbruch im Fischgrätendiagramm</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 4.1: Konventionelles (links) und modifiziertes (rechts) Betätigungselement von HS-IL Bedienelementen in schematischer Darstellung.....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 5.1: Ausfallverteilung am Kurbeltrieb- und Pneumatiktestgerät bei gleicher Nennlast, dargestellt in einem Weibull-Netz</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 5.2: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Parameter für den statistischen Vergleich der Testgeräte</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 5.3: Weibull-Verteilungen bei einer Nennlast von 10 und 25 N</i>	<i>64</i>

<i>Abbildung 5.4: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Paramater für den statistischen Vergleich unterschiedlicher Nennlasts</i>	65
<i>Abbildung 5.5: Darstellung der zu vergleichenden Kraftverläufe</i>	66
<i>Abbildung 5.6: Weibull-Geraden zweier Stichproben, die mit gleicher maximalen Amplitude, aber unterschiedlichem Kraftverlauf getestet werden</i>	66
<i>Abbildung 5.7: Vertrauensbereich der mittleren Weibull-Paramater für den statistischen Vergleich unterschiedlicher Kraftverläufe</i>	67
<i>Abbildung 5.8: Zeitfestigkeitsbereich im abgeleiteten Wöhler-Diagramm</i>	69
<i>Abbildung 5.9: Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich des Wöhler-Diagramms</i>	71
<i>Abbildung 5.10: Darstellung der Verifikation des Wöhler-Diagramms durch die aus den Ausfalldaten von Versuchsreihe 4 generierte Weibull-Gerade</i>	73
<i>Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-IL bei unterschiedlichen Kraftniveaus</i>	75
<i>Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-TB bei unterschiedlichen Kraftniveaus</i>	76
<i>Abbildung 5.13: Schematische Darstellung der Belastungssituation des Mikroschaltergehäuses in einem HS-IL mit modifiziertem Betätigungselement bei unterschiedlichen Kraftniveaus</i>	77

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2.1: Häufig verwendete Quantile</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 2.2: Streuung der Ausfallzeitpunkte in Umdrehungen bei einer beispielhaften Lebensdaueruntersuchung von 20 baugleichen Wälzlagern</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 2.3: Konstante K in Abhängigkeit vom Vertrauensbereich</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 2.4: Interpretation der Steigung im Weibull-Netz [15, p. 943].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 2.5: Überblick über wichtige Typen von Daten-Zensierungen [8, pp. 162-163]</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 2.6: Übersicht über die in der Gleichung für den Success-Run vorkommenden Parameter</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 3.1: Materialliste des Mikroschalters entsprechend Abbildung 3.3</i>	<i>38</i>
<i>Tabelle 3.2: Direkter Vergleich des mechanischen Aufbaus zwischen HS-TB und HS-IL.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 3.3: Medianwerte in Newton zu den Verteilungen der jeweiligen Kräfte und Bedienelemente</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 4.1: Versuchsreihen mit unterschiedlichen Parametern und ihre Ergebnisse</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 5.1: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.1</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 5.2: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 5.3: Laufzeiten für eine 5%-Ausfallwahrscheinlichkeit in Betätigungen, berechnet aus den Weibull-Verteilungen der Testläufe 3 und 4.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 5.4: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.3.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 5.5: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 5.6: Parameterwerte für die Weibull-Verteilungen aus Abbildung 5.6.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 5.7: Grenzwerte für den Vertrauensbereich der Parameter der mittleren Weibull-Verteilung</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 5.8: Charakteristische Werte der über die Belastungsfälle gemittelten Weibull-Verteilungen</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 5.9: Dauerfestigkeits-Grenzwerte σ_D in Newton für jede Wöhler-Linie aus Abbildung 5.8 ...</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 5.10: Vergleich der Werte für die berechneten Ausfalllaufzeiten unterschiedlicher Ausfallwahrscheinlichkeiten in Betätigungen</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 5.11: Werte zur Berechnung der in Testlauf 7 erreichten Mindestzuverlässigkeit nach Gleichung (5.1)</i>	<i>74</i>

Anhang

Messmitteltabelle

Mit dem angeführten Kraftsensor und Messverstärker wurden sämtliche Kraftmessungen durchgeführt (Bedienelement-Kraftanalyse und die Erfassung der Kraftverläufe der Testgeräte).

Bezeichnung	Hersteller	Typ	Einsatz	Messbereich	Messfehler
SML-50	Interface	Druckkraft-aufnehmer	Messung Stützkraft	50 [lbf]	$\pm 0,05$ [% FS]
DEWE-43	DEWESoft	Mess-verstärker	A/D-Wandler	-	-

Messwerte Kraftanalyse

An dieser Stelle sind die Messwerte für die Boxplots aus Abbildung 3.9 zusammengefasst. Es handelt sich hierbei um Kraftwerte in Newton. Zur besseren Übersicht besitzen diese Werte einen Index i . Die Betätigungskraft ist mit dem Formelzeichen F_B abgekürzt.

Blockkraftwerte:

HS-TB				HS-IL			
i	Blockkraft	i	Blockkraft	i	Blockkraft	i	Blockkraft
1	7,55	11	10,17	1	4,05	11	5,30
2	7,82	12	10,73	2	4,12	12	5,66
3	7,59	13	10,78	3	4,32	13	5,80
4	8,25	14	10,92	4	4,40	14	5,32
5	8,70	15	11,31	5	4,72	15	5,51
6	9,11	16	11,47	6	4,74	16	5,66
7	9,54	17	11,90	7	4,80	17	5,91
8	9,58	18	12,03	8	4,83	18	6,03
9	10,94	19	12,21	9	4,94	19	6,27
10	10,10	20	12,40	10	5,10	20	6,70

Auslösekraftwerte:

HS-TB				HS-IL	
<i>i</i>	Auslösekraft	<i>i</i>	Auslösekraft	<i>i</i>	Auslösekraft
1	3,00	21	5,15	1	3,34
2	3,74	22	5,21	2	3,38
3	3,75	23	5,24	3	3,39
4	3,75	24	5,27	4	3,39
5	3,76	25	5,27	5	3,4
6	3,80	26	5,29	6	3,40
7	3,80	27	5,32	7	3,42
8	3,80	28	5,34	8	3,42
9	4,07	29	5,35	9	3,88
10	4,07	30	5,35	10	3,88
11	4,09	31	5,37	11	3,89
12	4,13	32	5,41	12	3,89
13	4,73	33	6,04	13	3,90
14	4,76	34	6,04	14	3,91
15	4,77	35	6,10	15	3,93
16	4,82	36	6,21	16	3,94
17	4,82	37	6,88	17	3,96
18	4,83	38	6,94	18	3,96
19	4,91	39	6,94	19	3,97
20	4,96	40	7,01	20	3,97

Betätigungskraftwerte:

HS-TB								HS-IL							
<i>i</i>	F_B														
1	5,32	46	7,35	91	8,14	136	8,97	1	3,74	46	6,50	91	7,17	136	7,89
2	5,37	47	7,37	92	8,15	137	8,99	2	4,04	47	6,54	92	7,17	137	7,91
3	5,48	48	7,38	93	8,18	138	9,01	3	4,10	48	6,56	93	7,18	138	7,91
4	5,50	49	7,39	94	8,19	139	9,01	4	4,27	49	6,57	94	7,18	139	7,92
5	5,76	50	7,39	95	8,19	140	9,03	5	4,51	50	6,57	95	7,20	140	7,93
6	6,11	51	7,40	96	8,20	141	9,07	6	4,74	51	6,57	96	7,20	141	7,96
7	6,12	52	7,41	97	8,20	142	9,08	7	4,75	52	6,58	97	7,21	142	7,97
8	6,21	53	7,42	98	8,20	143	9,08	8	4,89	53	6,58	98	7,23	143	7,99
9	6,22	54	7,43	99	8,23	144	9,10	9	5,02	54	6,58	99	7,27	144	8,02
10	6,24	55	7,44	100	8,23	145	9,20	10	5,05	55	6,59	100	7,27	145	8,03
11	6,36	56	7,44	101	8,23	146	9,22	11	5,07	56	6,59	101	7,28	146	8,08
12	6,62	57	7,45	102	8,26	147	9,23	12	5,09	57	6,63	102	7,30	147	8,09
13	6,62	58	7,50	103	8,26	148	9,33	13	5,25	58	6,65	103	7,30	148	8,10
14	6,70	59	7,51	104	8,27	149	9,34	14	5,43	59	6,65	104	7,31	149	8,10
15	6,71	60	7,53	105	8,28	150	9,35	15	5,43	60	6,67	105	7,33	150	8,12
16	6,72	61	7,58	106	8,28	151	9,36	16	5,51	61	6,67	106	7,36	151	8,12
17	6,75	62	7,61	107	8,28	152	9,36	17	5,56	62	6,68	107	7,36	152	8,15
18	6,81	63	7,63	108	8,32	153	9,45	18	5,64	63	6,68	108	7,38	153	8,18
19	6,83	64	7,65	109	8,33	154	9,46	19	5,66	64	6,68	109	7,39	154	8,19
20	6,91	65	7,68	110	8,34	155	9,47	20	5,67	65	6,73	110	7,44	155	8,23
21	6,91	66	7,68	111	8,34	156	9,49	21	5,70	66	6,76	111	7,45	156	8,25
22	6,92	67	7,69	112	8,35	157	9,49	22	5,70	67	6,77	112	7,45	157	8,26
23	6,92	68	7,70	113	8,39	158	9,50	23	5,72	68	6,80	113	7,47	158	8,27
24	6,92	69	7,70	114	8,40	159	9,57	24	5,75	69	6,83	114	7,50	159	8,29
25	6,93	70	7,73	115	8,43	160	9,59	25	5,83	70	6,84	115	7,50	160	8,37
26	6,93	71	7,76	116	8,43	161	9,63	26	5,92	71	6,91	116	7,51	161	8,38
27	6,98	72	7,76	117	8,46	162	9,64	27	6,04	72	6,91	117	7,53	162	8,39
28	6,98	73	7,79	118	8,47	163	9,66	28	6,05	73	6,92	118	7,58	163	8,40
29	6,99	74	7,81	119	8,48	164	9,70	29	6,06	74	6,93	119	7,58	164	8,40
30	7,04	75	7,82	120	8,56	165	9,75	30	6,06	75	6,93	120	7,61	165	8,40
31	7,06	76	7,83	121	8,56	166	9,75	31	6,07	76	6,95	121	7,64	166	8,41
32	7,12	77	7,86	122	8,58	167	9,89	32	6,09	77	6,95	122	7,66	167	8,42
33	7,13	78	7,88	123	8,60	168	9,94	33	6,09	78	6,96	123	7,68	168	8,42
34	7,14	79	7,89	124	8,60	169	9,99	34	6,24	79	6,96	124	7,69	169	8,43
35	7,15	80	7,90	125	8,61	170	10,05	35	6,28	80	6,97	125	7,71	170	8,43
36	7,16	81	7,91	126	8,62	171	10,07	36	6,33	81	7,02	126	7,71	171	8,50
37	7,17	82	7,91	127	8,62	172	10,08	37	6,34	82	7,02	127	7,75	172	8,52
38	7,17	83	7,96	128	8,65	173	10,10	38	6,37	83	7,04	128	7,75	173	8,54
39	7,21	84	7,97	129	8,65	174	10,11	39	6,39	84	7,09	129	7,76	174	8,56
40	7,22	85	8,05	130	8,66	175	10,11	40	6,40	85	7,10	130	7,79	175	8,56
41	7,23	86	8,06	131	8,69	176	10,12	41	6,40	86	7,10	131	7,81	176	8,59
42	7,27	87	8,09	132	8,80	177	10,12	42	6,44	87	7,13	132	7,82	177	8,59
43	7,27	88	8,10	133	8,83	178	10,13	43	6,45	88	7,14	133	7,83	178	8,61
44	7,31	89	8,11	134	8,83	179	10,21	44	6,47	89	7,14	134	7,83	179	8,72
45	7,32	90	8,12	135	8,90	180	10,22	45	6,49	90	7,14	135	7,87	180	8,73

HS-TB								HS-IL							
<i>i</i>	F_B														
181	10,22	221	11,81	261	12,88	301	15,11	181	8,73	221	9,76	261	11,53	301	15,26
182	10,25	222	11,83	262	12,89	302	15,18	182	8,75	222	9,76	262	11,57	302	15,73
183	10,30	223	11,84	263	12,94	303	15,28	183	8,78	223	9,80	263	11,63	303	17,36
184	10,31	224	11,91	264	12,97	304	15,37	184	8,79	224	9,86	264	11,66	304	23,10
185	10,32	225	11,93	265	12,99	305	15,69	185	8,82	225	9,89	265	11,72		
186	10,33	226	11,97	266	13,00	306	15,92	186	8,86	226	9,90	266	11,73		
187	10,35	227	11,99	267	13,07	307	16,11	187	8,94	227	9,91	267	11,73		
188	10,37	228	12,00	268	13,09	308	16,35	188	8,98	228	9,97	268	11,81		
189	10,38	229	12,02	269	13,11	309	16,58	189	9,04	229	9,98	269	11,85		
190	10,44	230	12,09	270	13,21			190	9,04	230	9,98	270	11,86		
191	10,47	231	12,14	271	13,23			191	9,05	231	9,99	271	11,87		
192	10,50	232	12,14	272	13,25			192	9,08	232	10,02	272	11,91		
193	10,52	233	12,14	273	13,26			193	9,08	233	10,04	273	11,93		
194	10,56	234	12,16	274	13,28			194	9,12	234	10,04	274	11,97		
195	10,57	235	12,18	275	13,29			195	9,12	235	10,08	275	12,09		
196	10,57	236	12,18	276	13,29			196	9,13	236	10,19	276	12,10		
197	10,67	237	12,18	277	13,31			197	9,14	237	10,31	277	12,16		
198	10,69	238	12,25	278	13,40			198	9,17	238	10,31	278	12,18		
199	10,71	239	12,28	279	13,41			199	9,17	239	10,38	279	12,24		
200	10,78	240	12,29	280	13,46			200	9,18	240	10,43	280	12,25		
201	10,84	241	12,31	281	13,46			201	9,25	241	10,49	281	12,27		
202	10,86	242	12,32	282	13,52			202	9,26	242	10,52	282	12,33		
203	10,87	243	12,33	283	13,59			203	9,30	243	10,52	283	12,36		
204	10,90	244	12,35	284	13,62			204	9,31	244	10,65	284	12,42		
205	10,93	245	12,37	285	13,63			205	9,34	245	10,65	285	12,43		
206	11,05	246	12,41	286	13,68			206	9,37	246	10,66	286	12,48		
207	11,11	247	12,44	287	13,77			207	9,39	247	10,66	287	12,52		
208	11,12	248	12,47	288	13,86			208	9,43	248	10,80	288	12,56		
209	11,19	249	12,55	289	13,90			209	9,44	249	10,82	289	12,65		
210	11,40	250	12,58	290	13,96			210	9,45	250	10,89	290	12,77		
211	11,44	251	12,63	291	13,97			211	9,48	251	10,92	291	12,83		
212	11,52	252	12,71	292	14,03			212	9,56	252	11,05	292	12,91		
213	11,54	253	12,72	293	14,04			213	9,57	253	11,11	293	13,04		
214	11,63	254	12,73	294	14,06			214	9,57	254	11,18	294	13,21		
215	11,66	255	12,76	295	14,10			215	9,59	255	11,27	295	13,21		
216	11,67	256	12,78	296	14,12			216	9,62	256	11,32	296	13,35		
217	11,68	257	12,80	297	14,14			217	9,62	257	11,40	297	13,67		
218	11,71	258	12,81	298	14,21			218	9,63	258	11,47	298	13,92		
219	11,80	259	12,84	299	14,32			219	9,65	259	11,48	299	14,81		
220	11,80	260	12,84	300	14,83			220	9,73	260	11,52	300	14,96		

Daten aus Versuchsreihen

Die angeführten Werte in unterstehender Tabelle entsprechen Laufzeiten der untersuchten Bedienelemente und werden daher in „Anzahl der Betätigungen“ angegeben. Bei Ausfällen sind es die exakten Werte, bei denen der Defekt zum ersten Mal beobachtet wird.

Versuchsreihe	Ausfälle	Durchläufer	Ausreißer	Fehler
1	<i>Keine gültigen Ausfälle aufgetreten</i>	2.770.750	739.001	<i>Keine Fehler aufgetreten</i>
		3.663.566	1.236.924	
		3.743.016		
		3.743.271		
		3.745.713		
		3.746.771		
		3.747.647		
2	21.092	336.477	<i>Keine Ausreißer aufgetreten</i>	166.797
	32.567	420.679		168.140
	35.936			168.381
	37.597			169.212
	38.306			175.178
	38.787			
	46.181			
	47.447			
	58.743			
	59.704			
	63.612			
	64.198			
	66.331			
	67.189			
	76.676			
	78.826			
	85.903			
	101.950			
	103.552			
	113.298			
3	42.248	246.050	<i>Keine Ausreißer aufgetreten</i>	150.483
	50.829	246.050		150.696
	65.395	246.050		
	66.040	246.050		
	82.890	246.050		
	83.342	327.923		
	98.684	327.923		
	111.581	327.923		
	112.187	327.923		
	112.935	327.923		

Versuchsreihe	Ausfälle	Durchläufer	Ausreißer	Fehler
3		327.923		
		570.470		
		570.526		
		570.526		
		570.570		
		570.573		
		570.578		
		570.578		
4	33.879	256.305	<i>Keine Ausreißer aufgetreten</i>	237.275
	40.404	256.492		
	47.725	256.538		
	52.243	257.291		
	63.911	258.417		
	71.138	260.060		
	81.527	318.758		
	85.140	319.324		
	85.468			
	86.274			
	89.640			
5	26.512	<i>Keine Durchläufer aufgetreten</i>	<i>Keine Ausreißer aufgetreten</i>	<i>Keine Fehler aufgetreten</i>
	33.907			
	39.055			
	46.871			
	49.955			
	51.895			
	60.994			
	71.924			
	79.970			
	89.771			
6	13.490	221.885	207.184	140.202
	17.017			
	20.097			
	22.060			
	25.214			
	26.033			
	28.712			
	30.773			
	31.358			
	41.111			
	42.596			
	45.631			
	49.223			
	49.638			
	50.200			
	58.262			
68.965				

Versuchsreihe	Ausfälle	Durchläufer	Ausreißer	Fehler
7	<i>Keine Ausfälle aufgetreten</i>	78.390	<i>Keine Fehler aufgetreten</i>	<i>Keine Fehler aufgetreten</i>
		1.455.299		
		1.457.852		
		1.458.334		
		1.461.860		
		1.470.214		
		1.474.176		
		1.474.936		
		1.479.465		
1.484.761				

Ausfalllaufzeiten für Ausreißertest nach Walsh

Bei den Daten, die für den Ausreißertest nach Walsh in Abschnitt 4.6 benötigt werden, handelt es sich um sämtliche gültige Ausfälle der Testreihen 1 bis 7. Zur besseren Übersicht ist die Zählvariable n mitangeführt. Die Laufzeiten sind aufsteigend sortiert und in Betätigungen angegeben.

n	Laufzeit	n	Laufzeit	n	Laufzeit	n	Laufzeit
1	13.490	21	41.111	41	63.911	61	89.640
2	17.017	22	42.248	42	64.198	62	98.684
3	20.097	23	42.596	43	65.395	63	101.950
4	21.092	24	45.631	44	66.040	64	103.552
5	22.060	25	46.181	45	66.331	65	111.581
6	25.214	26	46.871	46	67.189	66	112.187
7	26.033	27	47.447	47	68.965	67	112.935
8	26.512	28	47.725	48	71.138	68	113.298
9	28.712	29	49.223	49	71.924	69	207.184
10	30.773	30	49.638	50	76.676	70	739.001
11	31.358	31	49.955	51	78.826	71	1.236.924
12	32.567	32	50.200	52	79.970		
13	33.879	33	50.829	53	81.527		
14	33.907	34	51.895	54	82.890		
15	35.936	35	52.243	55	83.342		
16	37.597	36	58.262	56	83.833		
17	38.306	37	58.743	57	85.140		
18	38.787	38	59.704	58	85.468		
19	39.055	39	60.994	59	85.903		
20	40.404	40	63.612	60	86.274		