

Gerhard Linß

Qualitätssicherung – Technische Zuverlässigkeit

Lehr- und Arbeitsbuch



HANSER

Linß
Qualitätssicherung –
Technische Zuverlässigkeit

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß

Technische Universität Ilmenau

Fakultät für Maschinenbau

unter Mitarbeit von:

Michael Krüger, M. Sc.

Dipl.-Ing. (FH) Marion Zumpf

Dr.-Ing. Elske Linß

Prof. Dr.-Ing. Stephan Sommer

Dr.-Ing. Axel Sichardt

Gerhard Linß

Qualitätssicherung – Technische Zuverlässigkeit

Lehr- und Arbeitsbuch

HANSER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44052-4

E-Book-ISBN 978-3-446-44658-8

Die Informationen in diesem Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und Bilder wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de

Projektleitung: Lisa Hoffmann-Bäumel
Lektorat: Cordula Hubert
Herstellung: Thomas Gerhardy
Einbandrealisierung: Stephan Rönigk
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell
Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg

Printed in Germany

Vorwort

Das **Qualitätsmanagement** – QM hat in den letzten Jahrzehnten in der modernen arbeitsteiligen und spezialisierten Produktion kontinuierlich weiter an Bedeutung gewonnen.

Ein bedeutendes Teilgebiet des Qualitätsmanagements ist die Technische Zuverlässigkeit von Produkten und Prozessen. Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, Energietechnik, Kommunikationstechnik, Medizintechnik und Militärtechnik treiben die Entwicklung moderner Verfahren der Technischen Zuverlässigkeit immer mehr voran. Die weit verzweigte globale Zulieferindustrie dieser Branchen muss ebenfalls ihrerseits höchste Zuverlässigkeitsstandards erfüllen.

Das vorliegende Buch entstand im Rahmen der Lehrveranstaltungen „Technische Zuverlässigkeit“ an der Technischen Universität Ilmenau.

Ziel dieses Lehrbuches ist es, die Grundlagen der Technischen Zuverlässigkeit in knappen Worten und Übersichten zu beschreiben und die Zusammenhänge zu anderen Wissensgebieten herzustellen.

Die Grundlagen und Werkzeuge für die Technische Zuverlässigkeit werden deshalb in Übersichten so dargestellt, dass dem Leser die praktische Anwendung ermöglicht wird.

Trainingsmodule und die Beschreibung der rechnergestützten Mittel sowie die Nutzung von Software stellen einen besonderen Praxisbezug her.

Damit werden den Lernenden und den Praktikern im Unternehmen wesentliche Trainings- und Hilfsmittel für die tägliche Arbeit bereitgestellt.

Die Arbeiten an diesem Lehrbuch waren nur durch die umfangreiche Unterstützung meiner Fachkollegen, Mitarbeiter und Studenten, deren Leistungen durch die Quellenangaben gewürdigt werden, möglich.

Besonderer Dank gebührt Herrn M. Sc. *Michael Krüger*, Frau Dipl.-Ing. (FH) *Marion Zumpf*, Herrn Prof. Dr.-Ing. *Stephan Sommer* und Frau Dr.-Ing. *Elske Linß*.

Die äußerst konstruktive und umfangreiche Mitarbeit von Herrn M. Sc. *Michael Krüger* möchte ich besonders hervorheben. Die technischen Arbeiten und Korrekturen wurden von Frau Dipl.-Ing. (FH) *Marion Zumpf* und Frau *Wiebke Foorden* sehr gut unterstützt. Frau StR *Marie-Luise Reukauf* danke ich sehr herzlich für die abschließende sehr sorgfältige Korrekturlesung des gesamten Buches.

An dieser Stelle möchte ich, stellvertretend für alle Mitautoren, Frau *Lisa Hoffmann-Bäuml*, Herrn *Thomas Gerhardy* und Frau *Cordula Hubert* vom Carl Hanser Verlag München für die sehr gute Zusammenarbeit herzlich danken.

Gedankt sei auch meinen Studenten der Technischen Universität Ilmenau, die im Rahmen von Lehrveranstaltungen, Projektarbeiten und durch zahlreiche Hinweise halfen, das Buch zu verbessern, sowie meinen Kollegen und Mitarbeitern der Technischen Universität Ilmenau für die konstruktive Arbeitsatmosphäre.

Bei meiner Ehefrau Dipl.-Ing. *Margita Linß* möchte ich mich für die langjährige Unterstützung dieses Buchprojektes sehr herzlich bedanken.

Hinweise zur Verbesserung, Korrektur und Weiterentwicklung des Inhaltes des Lehrbuches sind erwünscht und willkommen.

Suhl, Sommer 2016

Gerhard Linß



Zu diesem Titel können Sie sich unter www.hanser-fachbuch.de/9783446440524 Zusatzmaterial herunterladen.

Entsprechende Hinweise finden sich im Text.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einführung: Technische Zuverlässigkeit	1
1.1 Qualität	1
1.2 Zuverlässigkeit	1
1.3 Anforderungen an Zuverlässigkeitsingenieure	6
1.4 Literatur	8
2 Begriffe, Definitionen und statistische Grundlagen	11
2.1 Technische Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	11
2.2 Ausfall	12
2.3 Überlebens- und Ausfallwahrscheinlichkeit	14
2.4 Ausfallquote und Ausfallrate	15
2.5 Zuverlässigkeitsmanagement	18
2.6 Zuverlässigkeitsprüfungen	19
2.7 Statistische Grundlagen	19
2.7.1 Mengenalgebra	19
2.7.1.1 Definitionen	19
2.7.1.2 Mengenoperationen	20
2.7.1.3 Relationen zwischen Mengen	21
2.7.1.4 Rechengesetze der Mengenalgebra	22
2.7.2 Wahrscheinlichkeit und Rechnen mit Wahrscheinlichkeiten	24
2.7.3 Häufigkeiten, Histogramm und Dichtefunktion	30
2.7.4 Summenhäufigkeit und Verteilungsfunktion	34
2.7.5 Mathematische Beschreibung von Zufallsgrößen	36
2.8 Literatur	42

3	Lebensdauerverteilungen	45
3.1	Exponentialverteilung	46
3.1.1	Theoretische Grundlagen	47
3.1.2	Analytische Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer mittels Prüfplänen	49
3.1.3	Exponentialverteilung – Trainingsmodul	53
3.2	Weibull-Verteilung	61
3.2.1	Theoretische Grundlagen	61
3.2.2	Grafische Bestimmung der Weibull-Parameter durch das Lebensdauernetz	66
3.2.3	Analytische Bestimmung der Weibull-Parameter	69
3.2.3.1	Regressionsanalyse	69
3.2.3.2	Maximum-Likelihood-Verfahren	70
3.2.3.3	Methode nach Gumbel	71
3.2.3.4	WeiBayes (Nutzen von Vorkenntnissen)	71
3.2.4	Weibull-Verteilung – Trainingsmodul	72
3.3	Normalverteilung	85
3.3.1	Theoretische Grundlagen	85
3.3.2	Normalverteilung – Trainingsmodul	88
3.4	Logarithmische Normalverteilung	104
3.4.1	Theoretische Grundlagen	104
3.4.2	Logarithmische Normalverteilung – Trainingsaufgaben	107
3.5	Zusammenfassung Lebensdauerverteilungen	110
3.6	Badewannenkurve	112
3.7	Literatur	114
4	Zuverlässigkeit von Systemen	115
4.1	Ausfall- und Versagensursachen technischer Erzeugnisse	115
4.2	Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen	117
4.3	Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen (Ausfallartenanalyse)	118
4.3.1	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse – FMEA	118
4.3.1.1	Ziele, Voraussetzungen und Arten der FMEA	118
4.3.1.2	Durchführung der FMEA	122
4.3.1.3	Risikobewertung mithilfe der Risikoprioritätszahl	126
4.3.1.4	Ausschnitt aus der FMEA einer Kühlmittelpumpe	129
4.3.2	Fehlerbaumanalyse – FTA	133
4.3.3	Ereignisablaufanalyse – ETA	139
4.4	Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen (Ausfallratenanalyse)	142
4.4.1	Zuverlässigkeitsschaltbilder	142
4.4.1.1	Theoretische Grundlagen	142

4.4.1.2	Trainingsmodul Zuverlässigkeitsschaltbilder	152
4.4.2	Fehlerbaumanalyse	169
4.4.3	Markov-Verfahren	170
4.4.4	Parts Count Method (Bauteilzählmethode)	177
4.4.5	Parts Stress Method (Bauteilbelastungsmethode)	182
4.5	Literatur	190
5	Stichprobenprüfungen	193
5.1	Grundlagen der Stichprobenprüfungen	193
5.1.1	Begriffe und Arten der Stichprobenprüfung	193
5.1.2	Begriffe und Aufgaben der Annahmestichprobenprüfung	194
5.1.3	Arten von Annahmestichprobensystemen	196
5.1.4	Grundlagen für die Anwendung von Annahmestichprobensystemen	198
5.1.4.1	Annahmestichprobenprüfung anhand qualitativer Merkmale	199
5.1.4.2	Annahmestichprobenprüfung anhand quantitativer Merkmale	201
5.1.5	Operationscharakteristik und Durchschlupfkennlinie	202
5.1.5.1	Operationscharakteristik und deren Eigenschaften	202
5.1.5.2	Durchschlupfkennlinien	203
5.2	Stichprobenprüfung anhand qualitativer Merkmale	204
5.2.1	Ablauf einer Einfachstichprobenprüfung anhand qualitativer Merkmale	206
5.2.2	Operationscharakteristik für Stichprobenanweisungen anhand qualitativer Merkmale	209
5.2.3	Stichprobenprüfung bei Exponentialverteilung	212
5.2.4	Stichprobenprüfung bei Weibull-Verteilung	217
5.3	Literatur	222
6	Lebensdauerhochrechnungen	223
6.1	Raffungstest – beschleunigtes Testen	223
6.2	Highly Accelerated Life Test – HALT	226
6.2.1	Kenngößen	227
6.2.2	Durchführung	227
6.2.3	Vor- und Nachteile von HALT	236
6.3	Highly Accelerated Stress Screens – HASS	237
6.4	Literatur	239

7	Praxisanwendungen – Zuverlässigkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme	241
7.1	Technische Verfügbarkeit	241
7.2	Qualitätsleistung von Produktionssystemen	245
7.3	Automatisierte Methoden der Fehlererkennung	248
7.3.1	Redundanzkonzepte	248
7.3.2	Selbsttests zur Fehlererkennung	249
7.3.3	Plausibilitätstests	250
7.4	Absicherungsalgorithmus zur Steigerung der Qualitätsleistung	255
7.5	Literatur	258
8	Anhang	261
8.1	Begriffe der Zuverlässigkeit	261
8.2	Wahrscheinlichkeitssummen geordneter Stichproben	264
8.3	Tabelle der standardisierten Normalverteilung	265
8.4	Quantile der Standardnormalverteilung	269
8.5	Quantile der χ^2 -Verteilung	270
8.6	Quantile der t-Verteilung	272
8.7	Auszug aus der Tabelle der Binomialverteilung für $n = 200$	274
8.8	Auszug aus der Tabelle der Poisson-Verteilung	275
8.9	Kennbuchstaben für den Losumfang nach DIN ISO 3951	276
8.10	Kennbuchstabe für den Losumfang nach DIN ISO 2859	277
8.11	Einfach-Stichprobenpläne für die normale Prüfung nach DIN ISO 2859	278
8.12	Einfach-Stichprobenpläne für die verschärfte Prüfung nach DIN ISO 2859	279
8.13	Einfach-Stichprobenpläne für die reduzierte Prüfung nach DIN ISO 2859	280
8.14	Larson-Nomogramm	281
8.15	Thorndike-Nomogramm	282
8.16	Lebensdauernetz	283
8.17	Lambda-Netz	284
8.18	Wahrscheinlichkeitsnetz	285
8.19	Lognormalverteilungsnetz	286
8.20	Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes $a = 1/b!$ für $0,3 < b < 8,0$	287
8.21	Literatur	287
	Literatur	289
	Index	295

1

Einführung: Technische Zuverlässigkeit

■ 1.1 Qualität

Eine steigende Orientierung am Kundennutzen und eine stetig zunehmende Komplexität von technischen Erzeugnissen rücken die Frage nach der Qualität der Produkte immer mehr in den Fokus unternehmerischen Handelns. Das Wort „Qualität“ hat seinen Ursprung im Lateinischen: „qualitas“ – „Beschaffenheit“. Diese Beschaffenheit wird von den Nutzern als Qualität wahrgenommen und vom Kunden nach deren Nutzenstiftung für ihn bewertet [Lin 11].

Eine hohe Qualität von Produkten und Prozessen ist durch eine hohe technische Zuverlässigkeit gekennzeichnet, führt zu einer Risikominimierung und dadurch zu einer Kostenreduktion durch eine geringere Produkthaftung. Die wesentlichen Erfolgsfaktoren einer Unternehmung sind Qualität, Preis und Liefertreue als konkurrierende Ziele (Bild 1.1).

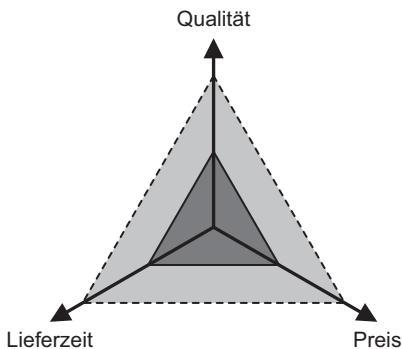



Bild 1.1
Qualität-Preis-Lieferzeit-Dreieck [Mas 07]

■ 1.2 Zuverlässigkeit

Mit dem Begriff „Zuverlässigkeit“ wird ein Teilgebiet der Qualität beschrieben. Man kann sagen, dass die Zuverlässigkeit die Qualität auf Zeit beschreibt. „Wenn ein Produkt seinen Besitzer am ersten Tag begeistert, weil es alle seine Forderungen erfüllt, nennt er das ‚gute

Qualität', wenn das Produkt über die vorgesehene Nutzungsdauer seine Forderungen erfüllt, nennt er das Zuverlässigkeit“ [DGQ 02]. So wie die Qualität das Ergebnis eines beherrschten Gesamtprozesses über Entwicklung und Fertigung bis hin zur Anwendung eines Produktes ist, so ist auch die Zuverlässigkeit das Ergebnis eines fortlaufenden Prozesses [DGQ 02].

 **Zuverlässigkeit** ist ein zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft (Bild 1.2) [IEC 02].

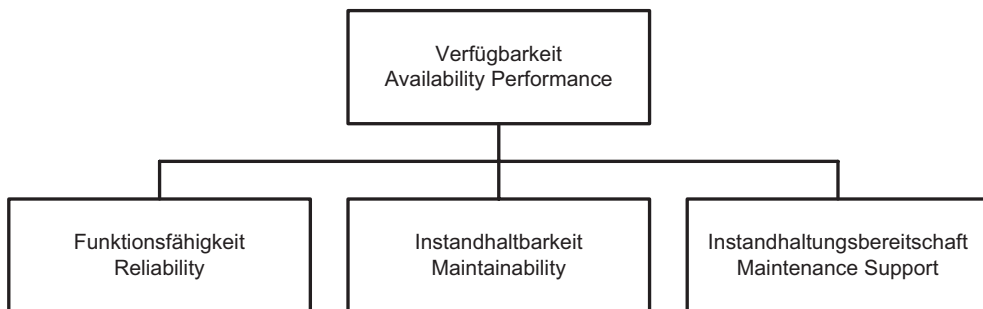


Bild 1.2 Zuverlässigkeit nach IEC 60050-191

Die Funktion eines technischen Gebildes oder Systems ist bestimmt durch dessen Aufbau und den Wechselwirkungen zu seiner Umwelt. Umweltfaktoren können beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Vibration oder Druck sein. Die Zuordnung der Einflussfaktoren auf die technische Zuverlässigkeit kann analog hierzu erfolgen.

Bei der Konstruktion eines Produktes werden Grenzbedingungen für relevante Umweltfaktoren festgelegt. Beispielsweise wird als Betriebstemperatur für einen Laptop der Bereich 5 °C bis 35 °C festgelegt. Wird der Laptop anschließend bei einer Temperatur von 0 °C betrieben und fällt aus (Sekundärausfall), so ist dies keine mangelnde Zuverlässigkeit, da er außerhalb der vom Hersteller angegebenen Betriebsbedingungen betrieben wurde.

Die Zuverlässigkeit ist nach wie vor das wichtigste Kriterium beim Neuwagenkauf, meist noch vor dem Anschaffungspreis und dem Fahrzeugdesign (Tabelle 1.1) [DAT 15].

Tabelle 1.1 Ranking der Bewertungskriterien beim Neuwagenkauf [DAT 15]

	Gesamt	Deutsche Premiummarken	Deutsche Marken	Importmarken
Zuverlässigkeit	1	1	1	1
Anschaffungspreis	2	5	3	2
Aussehen	3	2	2	4
Kraftstoffverbrauch	4	4	5	3

	Gesamt	Deutsche Premiummarken	Deutsche Marken	Importmarken
Serienausstattung	5	3	4	5
Wartungsfreundlichkeit	6	10	7	6
Lieferzeit	7	7	6	7
Ersatzteilversorgung	8	9	8	8
Dauer gewährter Garantie	8	11	9	9
Nähe des Händlers	10	14	10	9
Umweltverträglichkeit	11	17	13	11
Dichte des Kundendienstnetzes	12	13	11	12
Wiederverkaufswert	13	8	12	14
Finanzierungsangebot	14	12	14	15
Paketlösungen	15	15	16	13
Prestigewert	16	6	14	16
Inzahlungnahme des Vorwagens	17	16	17	17

Die Zuverlässigkeit spielt vor allem in der Automobil-, Luftfahrt-, Raumfahrt- und Elektronikindustrie eine zentrale Rolle und greift immer mehr auf andere Industriezweige über. In Marktforschungen wurde herausgefunden, dass Käufer die Zuverlässigkeit eines Produktes als eine der wichtigsten Produkteigenschaften ansehen. Daher versuchen Unternehmen, durch eine überdurchschnittliche, sehr hohe Zuverlässigkeit einen komparativen Konkurrenzvorteil zu erreichen.

Tabelle 1.2 Anforderungen an die Technische Zuverlässigkeit (Lebensdauererwartungen) an einem Beispiel der Automobilbranche [Blä 15]

Betriebsdauer Motor	2300 bis 3500 Stunden
Betriebsdauer Getriebe	75 000 bis 150 000 Stunden
Kupplungsvorgänge	330 000 bis 630 000
Blinkvorgänge	600 000 bis 2 000 000
Fahrtür	38 000 bis 77 000 Betätigungen
Beifahrtür	17 000 bis 33 000 Betätigungen
Fußbremse	200 000 bis 450 000 Betätigungen
Handbremse	8000 bis 18 000 Betätigungen
Anlasser	16 000 bis 30 000 Anlassvorgänge

Dieser Vorteil gegenüber den Mitbewerbern sollte speziell in dem seit Jahren hart umkämpften Automobilmarkt eine gewichtige Rolle spielen. Aber gerade hier häufen sich in letzter Zeit Mängel in der Zuverlässigkeit. So rief erst im März/April 2013 der Volkswagen- (VW-) Konzern in China knapp 400 000 Fahrzeuge wegen Problemen mit dem Doppelkupplungsgetriebe zurück [AMP 13]. Einen Monat später waren ca. 3,4 Millionen Fahrzeuge der japanischen Autobauer Toyota, Honda, Nissan und Mazda mit defekten Airbags betroffen [AMP 13a] und wiederum einen Monat darauf folgte BMW mit dem gleichen

Problem und ließ 220 000 Fahrzeuge in die Werkstätten bringen [AMP 13b]. Toyota war bereits im Herbst 2009 in den Schlagzeilen, als insgesamt über 3,8 Millionen Fahrzeuge mit unter der Fußmatte verklebtem Gaspedal zurückgeholt werden mussten [Wit 09]. In der bis dato größten Rückrufaktion rief der US-Autobauer Ford 2009 wegen eines undichten Tempomat-Schalters insgesamt 16 Millionen Fahrzeuge zurück [AMO 09]. Aber auch der profitabelste Autobauer der Welt, Porsche [AMP 13c], war Anfang 2012 mit 100 000 Porsche Cayenne [AMP 12] betroffen, ein Jahr später waren es die Modelle 911 und Carrera 4, wegen mangelhafter Bremsbeläge bzw. vorzeitigen Verschleißes und Rissbildung an der Abgasanlage [AMP 13d]. Mit 34 Millionen defekten Airbags sorgte der japanische Zulieferer Takata 2015 für die bisher größte Rückrufaktion [FAZ 15], ehe der VW-Konzern im Herbst 2015 mit manipulierten Abgaswerten in die Schlagzeilen kam. Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) rief sehr zügig 2,4 Millionen Fahrzeuge in Deutschland zurück, VW zusätzlich weitere sechs Millionen. Weltweit sind circa elf Millionen Fahrzeuge betroffen [Man 15].

An den gezeigten Beispielen wird deutlich, dass oft kleine Mängel Auslöser für den Ausfall bzw. die Störung komplexer Systeme sind. Daher müssen diese Systeme ganzheitlich betrachtet und Zuverlässigkeitsanalysen nicht nur für die einzelnen Komponenten durchgeführt werden. Die Dringlichkeit der Problematik der hier exemplarisch für die ganze Automobilindustrie angeführten Fälle wird in Bild 1.3 [KBA 02, KBA 13, KBA 15] nochmals verdeutlicht. Das Beispiel VW zeigt aber auch, dass nicht alle Rückrufe aufgrund ingenieurtechnischer Pannen notwendig werden.

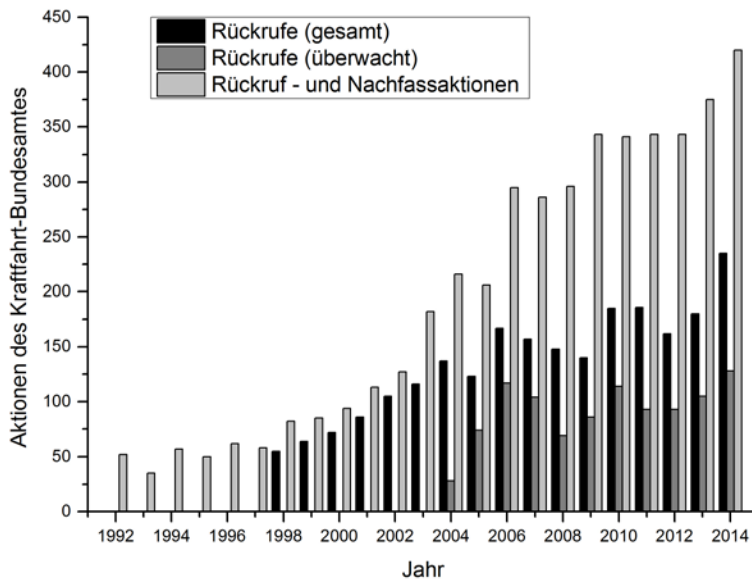


Bild 1.3 Anzahl der Rückrufaktionen vom Kraftfahrt-Bundesamt

Bei Rückrufaktionen wird durch den Zugriff auf das zentrale Fahrzeugregister versucht alle betroffenen Halter zu erreichen, da es sich um einen gravierenden Mangel am Fahrzeug handelt. Falls dieser erste Aufruf nicht erfolgreich ist, so werden in einer Nachfass-

aktion die Halter erneut angeschrieben, da das Ziel der Aktionen die Mangelbefreiung an allen betroffenen Fahrzeugen ist [KBA 13]. Falls auch durch mehrmaliges „Nachfassen“ besonders gefährliche Mängel nicht erfolgreich abgestellt werden können, so bleibt dem KBA die Betriebsuntersuchung als letztes Mittel.

Die vom KBA erhobenen Daten sprechen eine deutliche Sprache. Seit Beginn der Erhebung 1992 bis 1997 war die Anzahl mit gut 50 Rückruf- und Nachfassaktionen pro Jahr recht konstant geblieben, um sich in den Folgejahren bis 2008 zu versechsfachen. Ab 2009 bis 2012 waren die jährlichen knapp 350 Aktionen auf einem konstant hohen Niveau, ehe diese den folgenden zwei Jahren nochmals stark anstiegen. Auch wenn nur die Rückrufe betrachtet werden, ist das Bild ähnlich. Nach 55 Rückrufen 1998 stieg die Zahl bis ins Jahr 2004 stetig auf 137 und in den letzten zehn Betrachtungsjahren mit steigendem Trend auf den höchsten Stand von 235 Rückrufen im Jahr 2014. Das KBA überwachte 128 dieser 235 Rückrufe wegen der besonderen Schwere des Mangels und des Vorliegens einer ernsten Gefahr für Sicherheit und Gesundheit von Personen [KBA 15].

Dieser Anstieg kann vielfältige Gründe haben, beispielsweise in der größer werdenden Modellpalette der Hersteller, aber auch in den stetig komplexer werdenden Fahrzeugen und den kürzeren Innovationszyklen.

Diese Komplexität der Erzeugnisse verschiebt auch den Fokus weg vom Ausfallverhalten einzelner Komponenten hin zum Ausfallverhalten ganzer Systeme. Es gibt grundsätzlich zwei Arten der Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit (Bild 1.4). Zum einen kann dies konstruktiv geschehen, z. B. durch die Einhaltung eines detailliert ausgearbeiteten Lastenheftes, durch Nutzung bewährter Konstruktionsrichtlinien und Berechnungsverfahren und einer frühzeitigen und umfangreichen Erprobung der Konstruktion. Zum anderen kann die Zuverlässigkeit analytisch berechnet oder zumindest prognostiziert werden. Somit können beispielsweise Schwachstellen schon im Konzeptions- und Entwicklungsprozess erkannt werden [Ber 04].

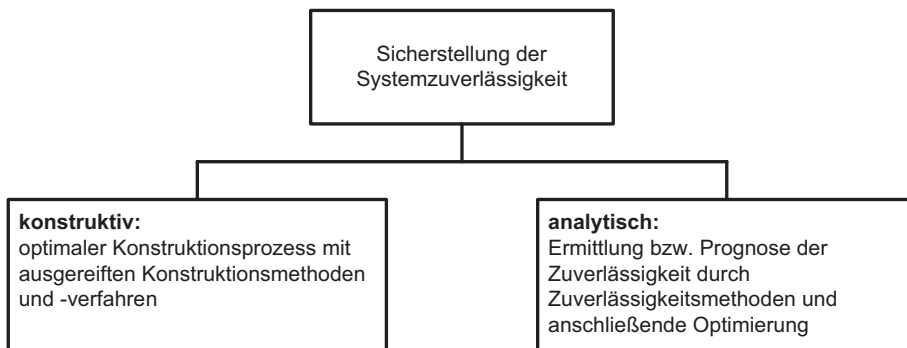


Bild 1.4 Sicherstellung von Systemzuverlässigkeit [Ber 04]

Die frühzeitige Erkennung und Beseitigung von Fehlern ist elementar und wirkt kostenreduzierend. Rückrufaktionen treten aber erst in einem sehr späten Stadium des Produktlebenszyklus auf und verursachen gemäß der Zehnerregel der Fehlerkosten somit noch höhere Kosten, als wenn diese bereits zu einem früheren Zeitpunkt entdeckt worden

wären. Die „Zehnerregel der Fehlerkosten“ besagt, dass die Kosten für die Fehlerbeseitigung je Stufe im Lebenszyklus um den Faktor 10 wachsen (Bild 1.5). Gerade unter diesem Gesichtspunkt muss sich der Fokus weg von der Fehlerentdeckung im Feldversuch hin zur Fehlerverhütung im Entwicklungsprozess verschieben.

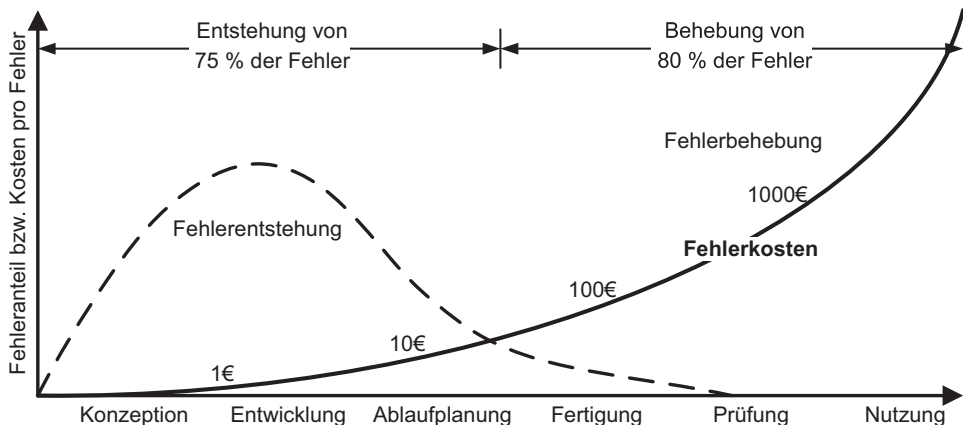


Bild 1.5 Ausgangssituation und Potenziale präventiver Fehlervermeidung [Jan 88]

■ 1.3 Anforderungen an Zuverlässigkeitsingenieure

Die Zuverlässigkeit als ein Verhaltensmerkmal technischer Erzeugnisse, dessen Eigenschaftenmerkmalen stochastische Prozesse zugrunde liegen, können nicht durch die für deterministische Prozesse gültigen konventionellen Methoden und Techniken abgebildet und berechnet werden. Für das Durchdringen der immer komplexer werdenden technischen Systeme ist dies aber von wachsender Bedeutung. Als Voraussetzung für die technische Einflussnahme auf das Verhaltensmerkmal Zuverlässigkeit ist das Erfassen von Kenngrößen notwendig [VDI 85]. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat für diese Kenngrößen auch Richtlinien herausgegeben, u. a. für die „Zuverlässigkeitskenngrößen: Übersicht“ [VDI 86] und „Zuverlässigkeitskenngrößen: Verfügbarkeitskenngrößen“ [VDI 86a]. Bestimmungen zur „Terminologie der Zuverlässigkeit“ sind in der VDI-Richtlinie 4001 Blatt 2 [VDI 06] enthalten.

Durch die Notwendigkeit neuer Methoden und Techniken ergeben sich auch spezielle Anforderungen an die Zuverlässigkeitsingenieure. So beschäftigt sich die VDI-Richtlinie VDI 4002 Blatt 1 mit dem Berufsbild eines Zuverlässigkeitsingenieurs und definiert folgende Anforderungen:

- „ausgeprägtes analytisches Denkvermögen
- Fähigkeit, Kausalketten zu identifizieren und zu modellieren

- Fähigkeit, funktionale Zusammenhänge zu erkennen
- systematische Arbeitsweise
- gute Kenntnisse in Mathematik, insbesondere der Stochastik und Statistik
- gute Kenntnisse in angrenzenden Disziplinen, z.B. Entwicklungsmethodik und Werkstofftechnik
- gute Kenntnisse der Zuverlässigkeitsmethoden und kritische Beurteilung ihrer Stärken und Schwächen
- gute Kenntnisse der einschlägigen Normen, Vorschriften und Regelwerke; Bereitschaft zur Mitarbeit in Fachgremien
- gute Kommunikations- und Teamfähigkeit“ [VDI 11].

Viele dieser Anforderungen werden durch ein ingenieur- oder naturwissenschaftliches Studium bzw. einer Berufsausbildung erfüllt und müssen sogar vorausgesetzt werden, um die speziellen Anforderungen im Bereich der technischen Zuverlässigkeit bewältigen zu können.

In der VDI-Richtlinie 4002 Blatt 2 [VDI 11a] werden die in dem Berufsbild der VDI aufgestellten Anforderungen präzisiert und auf die möglichen Anwendungsbereiche bezogen. Diese sind die Erstellung von Lehrplänen an Bildungseinrichtungen, wie z.B. Universitäten und Fachhochschulen, ebenso wie Weiterbildungskonzepte und Schulungsmaßnahmen für die Personalentwicklung.

In [VDI 11a] werden für die Qualifizierung acht Module genannt, die je nach Schwerpunkt und individuellem Qualifizierungsbedarf ausgewählt werden können. Das sind Grundlagen der Methoden der Zuverlässigkeit, zwei Module für die Methoden der Zuverlässigkeit, für das Zuverlässigkeitsmanagement, für die menschliche Zuverlässigkeit, für die Software-Zuverlässigkeit, für die Zuverlässigkeit mechanischer Strukturen und für die Sicherheitsanalyse und Risikoermittlung. Darüber hinaus geht [VDI 11a] auf die Bologna-Deklaration ein und untergliedert diese Module in Präsenz und Vorbereitungs- bzw. Nachbereitungszeit. Dies erleichtert speziell bei neu zu konzipierenden Studiengängen die Zeitplanung.

Nach diesen einleitenden Bemerkungen werden in Kapitel 2 die Grundlagen für die Methoden und Verfahren für die Analyse der technischen Zuverlässigkeit gelegt. Zuerst werden die wichtigsten Begriffe und Definitionen erläutert. Im zweiten Teil erfolgt die Behandlung der für die weiteren Ausführungen notwendigen statistischen Grundlagen.

Diese werden im Kapitel 3 Anwendung bei der Vorstellung der verschiedenen Lebensdauerverteilungen finden. Darüber hinaus sind auch rechnerische und grafische Verfahren zur Bestimmung der speziellen Verteilungsparameter aufgeführt. Ebenso sind in diesem Kapitel umfangreiche Trainingsmodule für die vorgestellten Lebensdauerverteilungen angegeben, um eine praxisnahe Anwendung zu ermöglichen. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die wohl bekannteste Ausfallratenfunktion, die „Badewannenkurve“.

Das darauffolgende Kapitel 4 befasst sich mit den verschiedenen Verfahren der Analyse der Zuverlässigkeit. Zunächst werden die qualitativen, danach die quantitativen Verfahren vorgestellt.

Kapitel 5 erläutert Stichprobenprüfungen für die Exponential- und die Weibullverteilung und Kapitel 6 zeigt Methoden auf, wie Lebensdauertests beschleunigt und Lebensdauerhochrechnungen durchgeführt werden können.

Im letzten Kapitel 7 werden in einer Praxisanwendung die Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme untersucht und die Ergebnisse vorgestellt.

Begleitend zu den theoretischen Ausführungen sind jedem Kapitel Trainingsmodule oder Aufgaben beigelegt, um die erlernten Verfahren zu festigen.

■ 1.4 Literatur

- [AMO 09] Auto, Motor und Sport: Größter Rückruf aller Zeiten – 16 Mio. betroffen, 2009. <http://www.automotor-und-sport.de/news/ford-us-rueckruf-tempomat-check-an-4-5-millionen-autos-1430769.html>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 12] Automobil Produktion: Porsche ruft 100 000 Cayenne zurück, 2012. <http://www.automobilproduktion.de/2012/02/porsche-ruft-100-000-cayenne-zurueck/>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 13] Automobil Produktion: China drängt Volkswagen zu Rückrufaktion, 2013. <http://www.automobilproduktion.de/2013/03/china-draengt-volkswagen-zu-rueckrufaktion/>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 13a] Automobil Produktion: Toyota und Honda rufen Millionen Autos zurück, 2013. <http://www.automobilproduktion.de/2013/04/toyota-und-honda-rufen-millionen-autos-zurueck/>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 13b] Automobil Produktion: Defekte Airbags: BMW ruft 3er Reihe zurück, 2013. <http://www.automobilproduktion.de/2013/05/defekte-airbags-bmw-ruft-3er-reihe-zurueck/>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 13c] Automobil Produktion: Porsche ist der profitabelste Autobauer weltweit, 2013. <http://www.automobilproduktion.de/2013/04/porsche-ist-der-profitabelste-autobauer-weltweit>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [AMP 13d] Automobil Produktion: Porsche ruft in den USA über 2.000 Sportwagen zurück, 2013. <http://www.automobilproduktion.de/2013/02/porsche-ruft-in-den-usa-ueber-2-000-sportwagen-zurueck>. Abgerufen am: 25.7.2015
- [Ber 04] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2004
- [Blä 15] Bläsing, Jürgen P.: Zuverlässigkeit technischer Systeme 2 – TQU Group. 2015. www.tqu-group.com/downloads/Zuverlaessigkeit.pdf. Abgerufen am: 10.11.2015
- [DAT 15] Deutsche Automobil Treuhand GmbH: DAT-Report 2015. http://www.dat.de/fileadmin/media/download/DAT-Report_2015.pdf. Abgerufen am: 12.11.2015
- [DGQ 02] DGQ – Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V. (Hrsg.): Zuverlässigkeitsmanagement – Einführung in das Management von Zuverlässigkeitsprogrammen. Berlin: Beuth, 2002 (DGQ 17-10)
- [IEC 02] International Electrotechnical Commission (Hrsg.): IEC 60050-191 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 191: Zuverlässigkeit und Dienstgüte. Berlin: Beuth, 2002
- [FAZ 15] Frankfurter Allgemeine Zeitung: Größte Rückrufaktion aller Zeiten, 2015. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/rekord-rueckruf-wegen-takata-airbags-13602117.html>. Abgerufen am: 6.11.2015
- [Jan 88] Jahn, H.: Erzeugnisqualität, die logische Folge von Arbeitsqualität. In: VDI-Z 130 (1988), Nr. 4, S. 4 – 12
- [KBA 02] Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): Pressebericht 2003. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2002

-
- [KBA 13] Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): Jahresbericht 2012. Flensburg: Druckzentrum KBA, 2013
- [KBA 15] Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.): Jahresbericht 2013/2014. Flensburg: Druckzentrum KBA, 2015
- [Lin 11] Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. 3. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag, 2011
- [Man 15] Manager Magazin: VW ruft europaweit 8,5 Millionen Autos zurück, 2015. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-abgasskandal-kba-zwingt-vw-zu-massen-rueckruf-a-1057875.html>. Abgerufen am: 6.11.2015
- [Mas 07] Masing, W. (Begr.), Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. 5. Aufl. München: Hanser, 2007
- [VDI 85] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Allgemeine Hinweise zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit. VDI 4001, Blatt 1. Berlin: Beuth, 1985
- [VDI 86] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Zuverlässigkeitskenngrößen: Übersicht. VDI 4004, Blatt 1. Berlin: Beuth, 1986
- [VDI 86a] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Zuverlässigkeitskenngrößen: Verfügbarkeitskenngrößen. VDI 4004, Blatt 4. Berlin: Beuth, 1986
- [VDI 06] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Terminologie der Zuverlässigkeit. VDI 4001, Blatt 2. Berlin: Beuth, 2006
- [VDI 11] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin: Berufsbild. VDI 4002, Blatt 1. Berlin: Beuth, 2011
- [VDI 11a] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin: Anforderungen an die Qualifizierung. VDI 4002, Blatt 2. Berlin: Beuth, 2011
- [Wit 09] Wittich, H.; Dohr, M.: Gaspedal-Austausch bei 3,8 Millionen Autos. In: Auto, Motor und Sport, 2009. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/toyota-rueckruf-wegen-fussmatten-toyota-tauscht-gaspedal-bei-3-8-millionen-autos-aus-1484975.html>. Abgerufen am: 25.7.2015

2

Begriffe, Definitionen und statistische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die wichtigsten Begriffe für die technische Zuverlässigkeit eingeführt. Daran schließen sich die Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung an.

■ 2.1 Technische Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Die technische Zuverlässigkeit eines Systems ist eine sehr wichtige Teileigenschaft der Qualität eines Produktes oder Erzeugnisses. Um die technische Zuverlässigkeit eines Produktes während des Kundeneinsatzes sicherstellen zu können, ist es erforderlich, während des gesamten Produktlebenszyklus geeignete Zuverlässigkeitsanalysemethoden anzuwenden [Lin 11].



Die **Technische Zuverlässigkeit** ist die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen [Nor 90].

Diese Definition der technischen Zuverlässigkeit kann wie folgt zusammengefasst werden: „Technische Zuverlässigkeit ist die komplexe Eigenschaft eines technischen Gebildes, die vorgesehene Funktion

- für eine bestimmte Betriebsdauer
- bei einem bereits vorhandenen Lebensalter
- bei festgelegten Betriebs- und Umweltbedingungen
- unter bestimmten inneren und äußeren Arbeitsbedingungen
- innerhalb festgelegter Beanspruchungsgrenzen zu erfüllen“ [Kra 00].



Die **Verfügbarkeit** ist die Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitraums in einem Zustand zu sein, der eine geforderte Funktion bei gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind [Nor 10]. Der Begriff Nutzungsgrad wird synonym verwendet.

Die Verfügbarkeit $V(t)$ ist die Summe der Betriebszeiten bezogen auf die Summe von Betriebszeiten und Ausfallzeiten:

$$V(t) = \frac{\sum \text{Betriebszeiten}}{\sum \text{Betriebszeiten} + \sum \text{Ausfallzeiten}} \quad (2.1)$$



Die **Zuverlässigkeitsforderung** ist die Gesamtheit der betrachteten Einzelforderungen an die Beschaffenheit einer Einheit, die das Verhalten der Einheit während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen betreffen, und zwar in der betrachteten Konkretisierungsstufe der Einzelforderungen.

Anmerkung: Die Zuverlässigkeitsforderung ist Teil der Qualitätsforderung (DIN 55350 Teil 11) und durchläuft im Zuge der Zuverlässigkeitsplanung im Allgemeinen mehrere Konkretisierungsstufen. In verschiedenen Konkretisierungsstufen sind Anteile der festgelegten und der vorausgesetzten Einzelforderungen unterschiedlich [Nor 90].



Zuverlässigkeitskenngröße: Funktion der ermittelten Werte, die eine Eigenschaft der Häufigkeitsverteilung eines Zuverlässigkeitsmerkmals charakterisiert [Nor 90].

■ 2.2 Ausfall

Die „Beendigung der Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen“ entspricht einem Ausfall [VDI 06, Nor 10]. Wenn eine zu Beanspruchungsbeginn als fehlerfrei erkannte Betrachtungseinheit mindestens ein Ausfallkriterium erfüllt, spricht man ebenso von einem Ausfall. Als Sekundärausfall (Folgeausfall) wird der Ausfall einer Betrachtungseinheit, der durch den Ausfall einer anderen Betrachtungseinheit verursacht wird, angesehen. Eine Einteilung der verschiedenen Ausfälle kann nach folgenden Aspekten erfolgen:

1. Aspekte des Beeinträchtigungsumfangs [Nor 90]:

- Vollausfall/Gesamtausfall: Ausfall betrifft alle Funktionen einer Einheit gleichzeitig
- Teilausfall: Ausfall betrifft nicht alle Funktionen einer Einheit gleichzeitig

2. Aspekte der Änderungsgeschwindigkeit [Nor 90]:

- Sprungausfall: Ausfall aufgrund einer schnellen Änderung von Merkmalswerten
- Driftausfall: Ausfall aufgrund einer langsamen Änderung von Merkmalswerten

3. Aspekte der Ausfallursache [Nor 90]:

- Entwurfsbedingter Ausfall: Ausfall aufgrund von Entwurfsfehlern
- Fertigungsbedingter Ausfall: Ausfall aufgrund von Fertigungsfehlern
- Abnutzungsausfall: Ausfall aufgrund von Abnutzung
- Intermittierender Ausfall: Ausfall aufgrund von Mechanismen, die zeitweilig zu reversiblen Änderungen von Merkmalswerten führen

4. Aspekte der Ausfallfolgen:

- Kritischer Ausfall: System kann nach Ausfall nicht mehr für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden
- Nicht kritischer Ausfall: System kann trotz Ausfall weiter seinen Nutzen erfüllen

Man spricht also vom Ausfall einer materiellen Einheit, wenn die Beendigung der Funktionsfähigkeit im Rahmen der zugelassenen Beanspruchung eintritt (Primärausfall). Ein Ausfall führt zum Versagen, sobald die Erfüllung der geforderten Funktion verlangt wird. Insbesondere bei Messgeräten gibt es neben einem Funktionsausfall noch ein weiteres Ausfallkriterium, was durch das Verlassen des zulässigen Toleranzbereiches definiert ist. Neben dem schon erwähnten Primär- und Sekundärausfall unterscheidet die DIN 25424-1 noch eine dritte Ausfallart [Nor 81]:

- **Primärer Ausfall:** Ausfall einer Komponente unter zulässigen Bedingungen, z. B. Ausfall durch Materialschwäche
- **Sekundärer Ausfall:** Folgeausfall durch unzulässige Einsatzbedingungen oder Umgebungsbedingungen, z. B. Verschmutzung bei offenen Systemen
- **Kommandierter Ausfall:** Ausfall einer Komponente durch falsche/fehlende Anregung (Ansteuerung) oder durch Ausfall einer Hilfsquelle, die Komponenten selber sind dabei funktionsfähig

Da die notwendige Reparatur zur Beseitigung der Störung ein nicht geplanter Eingriff ist, kommt es hierbei nicht selten zu hohen Produktions- und Nutzungsausfällen sowie zu hohen Kosten [Kra 00].



Die **Lebensdauer** ist die Betriebsdauer einer nicht instand zu setzenden Einheit vom Anwendungsbeginn bis zum Zeitpunkt des Versagens [Nor 90].



Die **Betriebsdauer** ist die Summe der Intervalle der betrachteten Anwendungsdauer, in denen die geforderte Funktion erfüllt wird [Nor 90].



Die **Anwendungsdauer** ist die Zeitspanne des Einsatzes einer Einheit unter den vorgegebenen Anwendungsbedingungen [Nor 90].

Fällt ein Bauteil während seiner Betriebsdauer aus, so kann dies oftmals viele Ursachen haben (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Ausfallmechanismen und Ursachen [DGQ 94]

Ausfallmechanismen	Ausfallursachen	Beispiel
Alterung	Degradation, Strukturveränderung, ungeeigneter Werkstoff, Fremdstrahlung, aggressive Medien, ungeeignete Lagerung	Versprödung von Werkstoffen, Unwirksamwerden von Schmieröl, Geschmacksbeeinträchtigung bei Lebensmitteln
Dauerbruch (Sprödbrech bei dynamischer Beanspruchung)	falsche Dimensionierung, Resonanzen, Überbelastung, Unwucht, Kerbwirkung, Korrosion	Achsbruch, Bruch einer Schwingfeder, Flugzeugabsturz
Gewaltbruch	Überbelastung, Werkstofffehler, Versprödung in der Kälte	Rohrbruch, Zahnbruch bei Schaltgetrieben
Korrosion	ungeeigneter Korrosionsschutz, falsche Werkstoffpaarung, Fehler bei Montagen, Lagerung oder Transport	Durchrosten der Karosserie, Ausfall elektrischer Kontakte
Verschleiß	Schmierstoffmangel, unzureichende Kühlung, Schmutz	Kolbenfresser, Lager läuft heiß
Lösen	unzureichende Konstruktion, falsche Montage	Lösen von Schraub-, Niet-, Steck- oder Lötverbindungen
Zersetzen	falsche Lagerung, aggressive Medien oder unhygienische Verarbeitung von Lebensmitteln	Unbrauchbarwerden von Kunststoffen, Lebensmitteln oder Medikamenten
Entmischung	Trennreaktion durch falsche Lagerung	Austrocknen von Farben
Verformung	Temperaturschwankungen, Werkstofffehler oder Konstruktionsfehler	Verbiegen eines Mastes, Aufwölben eines Rohres, Schrumpfen von Textilien
Brand, Explosion	Isolationsfehler, Funkenflug, menschliches Versagen	Kabelbrand, offenes Feuer trotz Verbots
Biologische Schädigung	ungeeignete Lagerung	Verfaulen von Lebensmitteln

■ 2.3 Überlebens- und Ausfallwahrscheinlichkeit

Ausfälle von Systemen werden durch die Ausfallquote und die Ausfallwahrscheinlichkeit beschrieben. Ein Ausfall einer Einheit mindert den **absoluten Bestand** $B(t)$ um eins. Der **Anfangsbestand** wird mit $B(t_0)$ gekennzeichnet und ist der Bestand zu Beanspruchungsbeginn bzw. zur Mindestlebensdauer t_0 . Bis zu diesem Zeitpunkt fällt keine Einheit aus.

Der **relative Bestand** ist $\hat{R}(t) = \frac{B(t)}{B(t_0)}$, der absolute Bestand bezogen auf den Anfangsbestand $B(t_0)$. Dieses aus Stichproben ermittelte Ergebnis ist der Schätzwert für die **Überlebenswahrscheinlichkeit** $R(t)$.



Die **Überlebenswahrscheinlichkeit** $R(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Lebensdauer eine betrachtete Betriebsdauer ab Anwendungsbeginn mindestens erreicht [Nor 90].

Das Pendant zur Überlebenswahrscheinlichkeit ist die Ausfallwahrscheinlichkeit.



Die **Ausfallwahrscheinlichkeit** $G(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Lebensdauer eine betrachtete Betriebsdauer ab Anwendungsbeginn nicht erreicht [Nor 90].

Die Summe aus Überlebenswahrscheinlichkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt eins:

$$R(t) + G(t) = 1 \quad (2.2)$$

Auch die **Ausfallwahrscheinlichkeit** $G(t)$ kann aus Stichprobenergebnissen geschätzt werden. Dieser Schätzer ist die **Ausfallsumme** $A(t) = B(t_0) - B(t)$ bezogen auf den Anfangsbestand und wird als **relative Ausfallsumme** bezeichnet:

$$\hat{G}(t) = \frac{B(t_0) - B(t)}{B(t_0)} \quad (2.3)$$

■ 2.4 Ausfallquote und Ausfallrate

Durch Anwendung der relativen Ausfallsumme auf das betrachtete Zeitintervall

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (2.4)$$

kann die **Ausfallhäufigkeit** mit

$$\frac{B(t_i) - B(t_{i+1})}{B(t_0)} \quad (2.5)$$

berechnet werden. Durch den Bezug der Ausfallhäufigkeit auf das betrachtete Zeitintervall wird mit

$$\frac{B(t_i) - B(t_{i+1})}{B(t_i)} \quad (2.6)$$

die **temporäre Ausfallhäufigkeit** bestimmt.

Die Ausfallquote wird in der DIN 40041 [Nor 90] auch als temporäre Ausfallhäufigkeitsdichte bezeichnet. Sie ist ein Schätzwert für die Ausfallrate [Nor 90].



Die **temporäre Ausfallhäufigkeitsdichte** ist die temporäre Ausfallhäufigkeit dividiert durch die betrachtete Betriebsdauer [Nor 90].

Diese Definition der **Ausfallquote** lässt sich zur Verdeutlichung als mathematische Beziehung darstellen:

$$\begin{aligned} \text{Ausfallquote} &= \frac{\text{Anfangsbestand} - \text{Endbestand}}{\text{Anfangsbestand} \cdot \text{Nutzungsdauer}} \\ &= \frac{\text{Gesamtausfälle}}{\text{Anfangsbestand} \cdot \text{Nutzungsdauer}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die **Ausfallquote** ist die temporäre Ausfallhäufigkeit bezogen auf das betrachtete Zeitintervall.

Mit den bereits eingeführten Formelzeichen ergibt sich für den **Schätzwert der Ausfallrate**:

$$\hat{\lambda} = \frac{B(t_i) - B(t_{i+1})}{B(t_i) \cdot \Delta t_i} \quad (2.8)$$

In Bild 2.1 ist die Ausfallquote vereinfacht als stetige Funktion dargestellt. Durch die Anwendung der Formel (2.8) kann die Ausfallrate geschätzt werden.

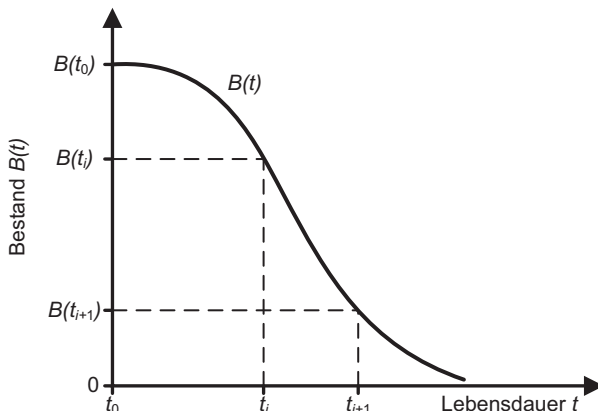


Bild 2.1

Bestand $B(t)$ in Abhängigkeit von der Lebensdauer t [DGQ 94]

Durch den Grenzübergang für Δt_i gegen null ($\Delta t_i \rightarrow 0$) und Stichprobengröße gegen Grundgesamtheit kann hieraus die **Ausfallrate** berechnet werden.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{G(t + \Delta t) - G(t)}{R(t)} = \frac{g(t)}{1 - G(t)} \quad (2.9)$$

Ein Schätzwert für die Ausfallrate bei konstant angenommener Ausfallrate kann durch Division des Verhältnisses der Anzahl der Einheiten, die während eines gegebenen Zeitintervalls ausgefallen sind, zur Anzahl der nicht ausgefallenen Einheiten zum Beginn des Zeitintervalls durch die Dauer des Zeitintervalls ermittelt werden. Als Kehrwert der Ausfallrate ergibt sich die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (**Mean Time Between Failure** – *MTBF*) bei als konstant angenommener Ausfallrate. *MTBF* ist der arithmetische Mittelwert aus tatsächlicher Einsatzzeit und Anzahl n exponentiell verteilter Ausfälle bei reparierbaren Systemen. T_{Ni} ist die Einsatzzeit bzw. Nutzungszeit oder auch Betriebsdauer der jeweiligen Einheit i (ohne Reparaturzeiten).

$$MTBF = \frac{\sum(\text{Einsatzzeiten})}{\text{Anzahl der Ausfälle}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Ni} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

Abzugrenzen hiervon ist die mittlere Dauer bis zum Ausfall (**Mean Time To Failure** – *MTTF*). Diese ist die mittlere Lebensdauer einer nicht instandsetzbaren Einheit.

Für reparierbare Einheiten wird die mittlere Dauer bis zum ersten Ausfall (**Mean Time To First Failure** – *MTTF*) verwendet, um die Dauer bis zum ersten Ausfall anzugeben.

Eine weitere wichtige Größe ist die mittlere technische Ausfallzeit (**Mean Time To Repair** – *MTTR*). Diese ist eine Kenngröße bei konstanter Ausfallrate für die ungeplante Instandsetzung mit der technischen Ausfallzeit T_T und berechnet sich als arithmetischer Mittelwert der Ausfallzeiten n reparierbarer Betrachtungseinheiten [VDI 06, Nor 10, VDI 11]:

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Ti} = \frac{1}{\mu} \quad (2.11)$$

Hinweis: Eine einfache Übersetzung der Abkürzung *MTBF* als durchschnittliche Zeit zwischen Fehlern kann zu der Annahme führen, dass die Ausfallzeit mitgerechnet wird. Dem ist aber nicht so (Bild 2.2).

Eine Übersicht der wichtigsten Begriffe, die in der Qualitätssicherung für die Beschreibung von Systemen eine zentrale Rolle spielen, ist in Anhang 8.1 enthalten.

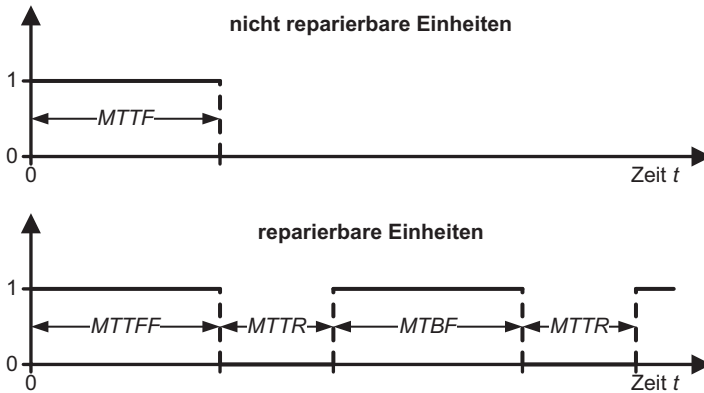


Bild 2.2 Erläuterung von $MTTF$, $MTTF$ und $MTBF$ für nicht reparierbare Einheiten (oben) und reparierbare Einheiten (unten)

■ 2.5 Zuverlässigkeitsmanagement

Das Zuverlässigkeitsmanagement umfasst die Managementtätigkeiten Planung, Organisation, Lenkung und Kontrolle, angewendet auf die Zuverlässigkeitsanforderungen des Unternehmens.

Die Zuverlässigkeit ist eine dem System inhärente Eigenschaft *und* ein Maß für das dem System entgegengebrachte Vertrauen *und* eine im Zeitverlauf veränderliche Größe. Das Management dieser technischen Größe erfordert eine Einbettung in vorhandene Managementsysteme und eine ständige Lenkung und Kontrolle, um eine stetige und erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten. Dazu bedarf es direkt auf die Zuverlässigkeit bezogene Vorgaben und Zielvereinbarungen für die Prozesse und Produkte. Diese müssen auch in die vorhandenen Prozesse integriert sein, um so eventuell konkurrierende Ziele oder sich beeinflussende Prozesse zu erkennen und auftretende Probleme zu beheben [Nor 15].

Eine angemessene Behandlung der Zuverlässigkeit führt u. a. zu folgenden Vorteilen:

- Erreichen der erwarteten Dienstgütegrade,
- Sicherstellung der Produktfunktionalität,
- Erhaltung der Produktions- oder Fertigungskapazität,
- Erhaltung oder Ausweitung der Sicherheit, falls abträgliche Nebeneffekte ermittelt und diese in angemessener Weise behandelt werden,
- Reduzierung der Auswirkungen auf die Umwelt,
- Minimierung der Lebenszykluskosten,
- Verbesserung der Produktqualität,
- Verringerung und Beherrschung der Risiken [Nor 15].

■ 2.6 Zuverlässigkeitsprüfungen

Zuverlässigkeitsprüfungen sollen Nachweise über die Zuverlässigkeit von Produkten liefern. Daher müssen die Prüfbedingungen reproduzierbar und in einem Prüfplan festgelegt sein. Auch müssen der Prüfumfang sowie der Prüfling für das Produkt repräsentativ sein.

Die grundsätzlichen Ziele von Zuverlässigkeitsprüfungen sind:

- Ermitteln von Zuverlässigkeitskenngrößen.
- Erkennen von Schwachstellen des Produktes zur Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen.
- Prüfen, ob die Zuverlässigkeitsvorhersagen, die während der Produktplanungs- und Entwicklungsphase erstellt wurden, bestätigt werden.
- Nachweisen, ob Zuverlässigkeitsforderungen erfüllt werden.
- Ermitteln, ob technologische Prozesse einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit haben.
- Erarbeiten verbesserter Instandhaltungsmaßnahmen.
- Reduzieren von Fehlleistungskosten und Lebenszykluskosten.
- Ermitteln des Einflusses der Betriebsbedingungen auf die Zuverlässigkeit.

Um die Zuverlässigkeit eines Produktes während des Feldeinsatzes sicherstellen zu können, ist es erforderlich, bereits in der Entwicklungsphase Zuverlässigkeitstests durchzuführen – unter Beachtung der genannten Voraussetzungen.

Die statistische Auswertung von Zuverlässigkeitstests erfolgt u. a. mittels Lebensdauerverteilungen, die in Kapitel 3 erläutert werden. Zunächst folgt eine Einführung in die Statistik, welche beim Anwenden der Lebensdauerverteilungen notwendig ist.

■ 2.7 Statistische Grundlagen

2.7.1 Mengenalgebra

Die Mengenalgebra oder Mengenlehre als Teil der booleschen Algebra wurde durch den Mathematikprofessor Georg Cantor (1845 – 1918) begründet.

2.7.1.1 Definitionen

In den naturwissenschaftlichen und auch technischen Disziplinen ist es manchmal notwendig, ähnliche Elemente zu verschiedenen Klassen zusammenzufassen, sogenannte „Mengen“. Eine Menge enthält unterschiedliche Elemente, die eine gemeinsame Eigenschaft aufweisen.

Ein Element ω ist Teil einer Menge Ω , wenn gilt:

$$\omega \in \Omega, \tag{2.12}$$

und ist kein Element ω der Menge Ω , wenn gilt:

$$\omega \notin \Omega \quad (2.13)$$

Eine Menge Ω kann wie folgt

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots\} \quad (2.14)$$

oder durch

$$\Omega = \{\omega \mid \text{Eigenschaft von } \omega\} \quad (2.15)$$

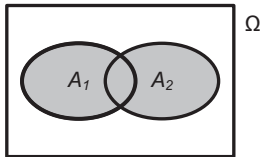
dargestellt werden.

Besitzt eine Menge A Elemente der Menge Ω , so ist A eine Teilmenge von Ω :

$$A \subset \Omega \quad (2.16)$$

2.7.1.2 Mengenoperationen

Vereinigung zweier Mengen



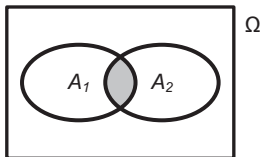
Sind A_1 und A_2 Teilmengen einer Menge Ω , dann heißt die Menge aller Elemente, die in mindestens einer der Mengen A_1 oder A_2 liegt, **Vereinigungsmenge**:

$$A_1 \cup A_2 = \{\omega \in \Omega \mid \omega \in A_1 \text{ oder } \omega \in A_2\} \quad (2.17)$$

Die Vereinigung zweier Mengen wird auch Disjunktion genannt. Statt ODER-Verknüpfung wird auch oft OR bzw. diese Zeichen synonym verwendet:

$$\vee, +; \text{ z.B. } A_1 \cup A_2 = A_1 \vee A_2 = A_1 + A_2$$

Durchschnitt zweier Mengen



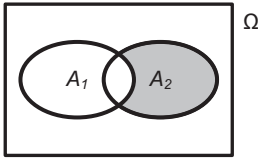
Sind A_1 und A_2 Teilmengen einer Menge Ω , dann heißt die Menge aller Elemente, die in beiden Mengen A_1 und A_2 liegen, **Durchschnittsmenge**:

$$A_1 \cap A_2 = \{\omega \in \Omega \mid \omega \in A_1 \text{ und } \omega \in A_2\} \quad (2.18)$$

Der Durchschnitt zweier Mengen wird auch Konjunktion genannt. Anstatt UND-Verknüpfung wird auch oft AND bzw. diese Zeichen synonym verwendet:

$$\wedge, \cdot, \&; \text{ z.B. } A_1 \cap A_2 = A_1 \wedge A_2 = A_1 \cdot A_2 = A_1 \& A_2$$

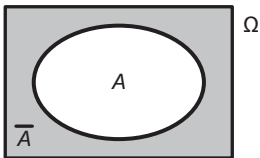
Differenz zweier Mengen



Sind A_1 und A_2 Teilmengen einer Menge Ω , dann heißt die Menge aller Elemente, die in Teilmenge A_1 nicht, aber in Teilmenge A_2 vertreten sind, **relative Komplementmenge** von A_2 zu A_1 .

$$A_2 \setminus A_1 = \{\omega \in \Omega \mid \omega \notin A_1 \text{ und } \omega \in A_2\} \quad (2.19)$$

Komplement einer Menge



Ist A Teilmenge einer Menge Ω , dann heißt die Menge aller Elemente, die **nicht** in A liegen, **Komplementmenge** \bar{A} .

$$\bar{A} = \{\omega \in \Omega \mid \omega \notin A\} \quad (2.20)$$

Die **absolute Komplementmenge** A^c von der Teilmenge A ist als Differenz $\bar{A} = \Omega \setminus A$ einer universellen Menge Ω und A gegeben [Deh 04], [Lin 06].

Das Komplement einer Menge wird auch als Negation bezeichnet. Neben der NICHT-Verknüpfung sind auch die Begriffe Negator, Inverter oder Phasendreher geläufig.

2.7.1.3 Relationen zwischen Mengen

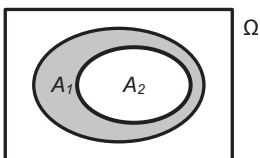
Gleichheitsrelation

Zwei Mengen A_1 und A_2 heißen gleich, wenn jedes Element von A_1 auch Element von A_2 ist, und umgekehrt.

$$A_1 = A_2 \quad (2.21)$$

Trifft dies nicht zu, so heißen die Mengen verschieden, kurz $A_1 \neq A_2$.

Teilmengenrelation



Eine Menge A_2 heißt Teilmenge einer Menge A_1 , wenn jedes Element von A_2 auch Element von A_1 ist.