

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).

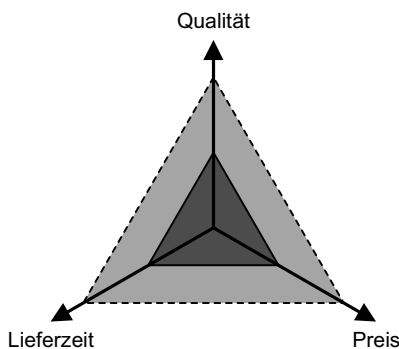



Bild 1.1
Qualität-Preis-Lieferzeit-Dreieck [Mas 07]

■ 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].

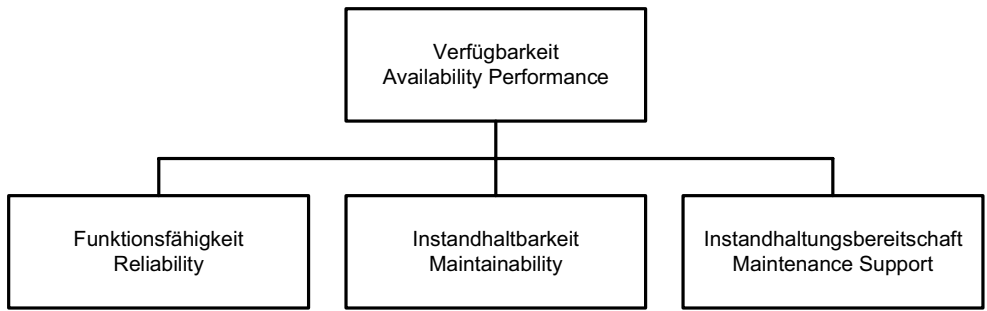


Bild 1.2 Zuverlässigkeit nach IEC 60050-191

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
Fahrertür	38 000 bis 77 000 Betätigungen
Beifahrertür	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 verklemmtem 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.

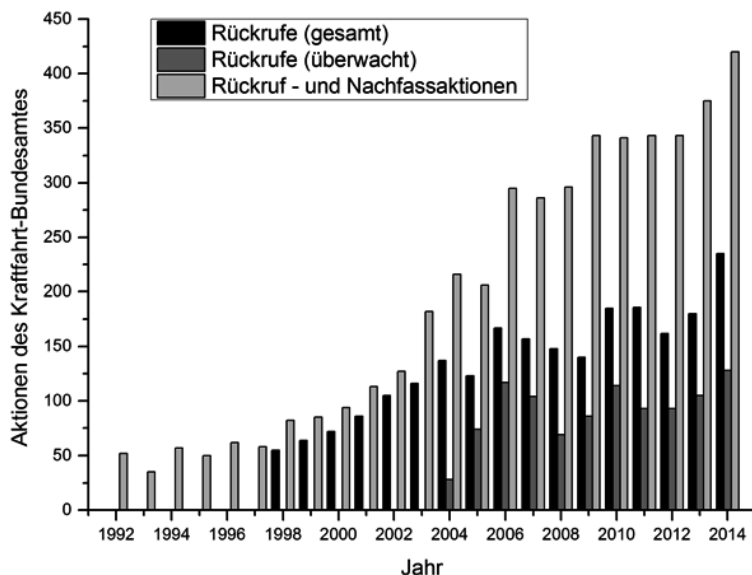


Bild 1.3 Anzahl der Rückrufaktionen vom Kraftfahrt-Bundesamt

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 Betriebsuntersagung 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 ernststen 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].

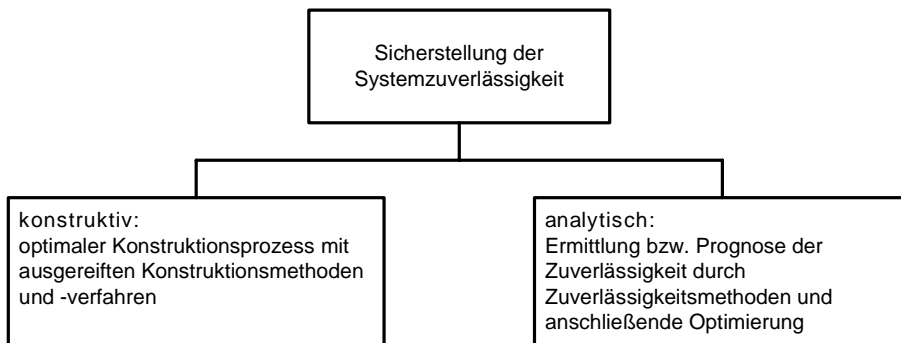


Bild 1.4 Sicherstellung von Systemzuverlässigkeit [Ber 04]

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.

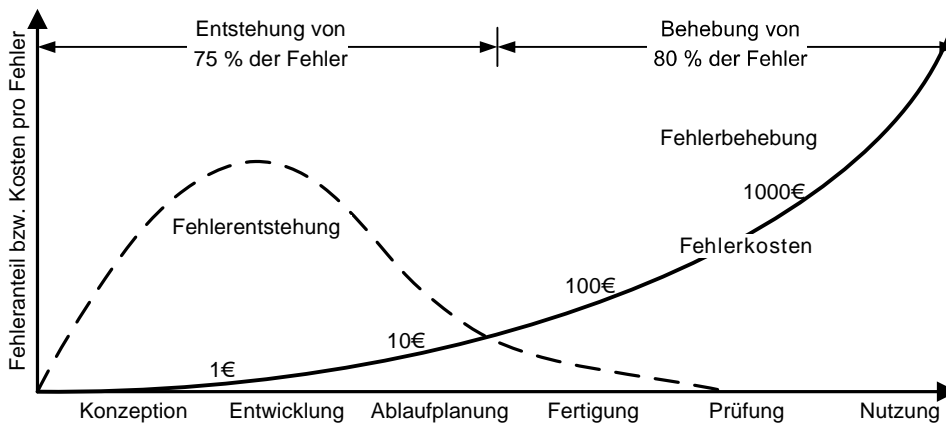


Bild 1.5 Ausgangssituation und Potenziale präventiver Fehlervermeidung [Jan 88]

■ 1.3 Anforderungen an Zuverlässigkeitsingenieure

Die Zuverlässigkeit als ein Verhaltensmerkmal technischer Erzeugnisse, dessen Eigenschaften 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 Lebensdauerervertelungen 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 Lebensdauerervertelungen 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

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 (Sprödbbruch 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

Index

Symbole

100%-Prüfung 203

A

Abnehmerrisiko 202, 209

Absicherungs-Algorithmus 244

– Erweiterter- 256 f.

– Standard- 256

Absolute Häufigkeit *Siehe* Häufigkeit 30

Additionssatz I 27

Additionssatz II 28

Aktoren 249

AMPS 245

Annahmefaktor 202

Annahmekennlinie 202

Annahmestichprobenprüfung 194

Annahmestichprobensysteme 196

Annahmewahrscheinlichkeit 202

Annahmezahl 210

Annehmbare Qualitätsgrenzlage 202 f.

Anwendungsdauer 13

Attributstichprobenprüfung 199

Auftretenswahrscheinlichkeit 126 ff.

Ausfall 12

– Abnutzungs- 13

– Drift- 13

– entwurfsbedingter 13

– fertigungsbedingter 13

– Gesamt- 12

– intermittierender 13

– kommandierter 13

– kritischer 13

– nicht kritischer 13

– primärer 13

– sekundärer 13

– Sprung- 13

– Teil- 12

– Voll- *Siehe* Gesamtausfall 12

Ausfallart 13

Ausfälle 115

Ausfalleffektanalyse 118

Ausfallhäufigkeit 15

– temporäre 16

Ausfallhäufigkeitsdichte

– temporäre 16

Ausfallmechanismus 14

– veränderter 224

Ausfallquote 16

Ausfallrate 17

– Schätzwert der 16

Ausfallratenanalyse 177

Ausfallrate λ 47

Ausfallsteilheit 205, 217

Ausfallsumme 15

– relative 15

Ausfallwahrscheinlichkeit 15, 205, 212, 218

Ausfallzeit

– maschinenbedingt 242

– nichtmaschinenbedingt 242

– organisatorische 242

– technische 242

Aussetzbetrieb 190

Automatisierte Montage- und Prüfsysteme

Siehe AMPS 245

Axiome von Kolmogorov 25

- B**
- Badewannenkurve 112
 - Bauteilbelastungsmethode 177, 182
 - Bedeutung der Fehlerfolgen 128
 - Bedeutung des Fehlers 126
 - Bedingte Wahrscheinlichkeit
 - Siehe* Wahrscheinlichkeit 26
 - Belastung 224
 - Belegungszeit 242
 - Bereitschaftszeit 242
 - Bestand
 - absoluter 14
 - Anfangs- 14
 - relativer 15
 - Betriebsdauer 13
 - Binomialverteilung 200, 209
 - Boolesche Algebra 117, 133, 169
- C**
- Charakteristische Lebensdauer 47, 217
- D**
- Dichtefunktion 200f.
 - DIN ISO 2859 219
 - Disjunkte Mengen *Siehe* Menge 22
 - Disjunktion 20
 - Doppel-, Mehrfach- und Sequenzialstichprobenpläne 197
 - Durchschlupf 203
- E**
- Einfachstichprobenverfahren 197
 - Element 19
 - Elementarereignis 24
 - Entdeckungswahrscheinlichkeit 257
 - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers 126, 128
 - Environmental Stress Screening 238
 - Ereignis 25
 - sicheres 25
 - unmögliches 25
 - zufälliges 25
 - Ereignisablaufanalyse (ETA) 139
 - Bildzeichen für die Ereignisablaufanalyse 141f.
 - Ergebnis 24
 - Erwartungswert 40
 - Exponentialverteilung 46, 212
 - Bestimmung der Verteilungsparameter 49
 - Dichtefunktion 47
 - Trainingsmodul 53
 - Verteilungsfunktion 48
- F**
- Failure In Time (FIT) 178
 - Fehler 115
 - Fehleranalyse 125
 - Fehlerbaumanalyse (FTA) 133, 169
 - Bildzeichen für die Fehlerbaumanalyse 135
 - Fehlererkennung 246
 - Methoden 244
 - Fehler, finale 246
 - Fehlerfrüherkennung 116
 - Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) 118f.
 - Arten der FMEA 120
 - Design-FMEA 120
 - FMEA-Formblatt 122
 - Konstruktions-FMEA 120, 131
 - Prozess-FMEA 120, 132
 - System-FMEA 120
 - System-FMEA Produkt 121
 - System-FMEA Prozess 121, 127f.
 - Fehlersicherheit 244
 - Folgeausfall 12
 - Frühausfälle 217
 - Funktionsanalyse 125
 - Funktionsbeanspruchung 116
 - Funktionsgrenze
 - obere 227
 - untere 227
 - Funktionstemperatur
 - obere 228

G

Gesamtausfallrate 144
 Gesamtausfallwahrscheinlichkeit 144
 Gesamtheit 193
 Gesamtsystemzuverlässigkeit für Reihen-
 und Parallelsysteme 148, 168
 Großer Qualitätsregelkreis 195

H

HALT 223, 226
 HALT-Prüfung nach DIN EN 62506 234
 Handlungsabläufe 206
 HASS 223, 237
 Häufigkeit 30
 – absolute 30
 – relative 24, 30
 – Summen- 34
 Hauptprüfniveau 204
 Herstellerrisiko 202
 Highly Accelerated Life Test *Siehe* HALT
 223
 Highly Accelerated Stress Screens
Siehe HASS 223
 Histogramm 31
 Hypergeometrische Verteilung 199,
 209

I

Inverter *Siehe* Mengenoperationen 21

K

Kalibrierwertregelkarte 250
 Kennbuchstabe 219
 Kombinationsprüfung 232
 Konfidenzintervall 42
 Konstanttemperaturprüfung 228

L

Larson-Nomogramm 213
 Lebensdauer 13
 Lebensdauerhochrechnung 223

Lebensdauerprüfung
 – beschleunigte *Siehe* Lebensdauer-
 hochrechnung 223
 Lebensdauerversuche 217
 Lebensdauerverteilung 45
 Lieferantenrisiko 202, 209
 Logarithmische Normalverteilung 104
 – Dichtefunktion 104
 Los 195, 217
 Losgröße 210
 lower destruct limit *Siehe* Zerstörungs-
 grenze
 lower operational limit *Siehe* Funktions-
 grenze

M

Markov'sche Prozesse 170
 – Markov-Graph 171
 – Markov-Methode 173
 – Markov-Modell 172
 Maximaler Stichprobenumfang 205
 Mean Down Time (MDT) 242
 Mean Time Between Failure (MTBF) 17,
 242
 Mean Time To Failure (MTTF) 17
 Mean Time To First Failure 17
 Mean Time To Repair (MTTR) 17
 Menge 19
 – absolute Komplement- 21
 – disjunkte Mengen 22
 – Durchschnitts- 20
 – Komplement- 21
 – leere Teil- 22
 – relative Komplement- 21
 – Teil- 21f.
 – Vereinigungs- 20
 Mengenalgebra 19
 – Rechengesetze OLE_LINK1 22
 Mengenoperationen 20
 – Differenz zweier Mengen 21
 – Durchschnitt zweier Mengen 20
 – Komplement einer Menge 21
 – Konjunktion 20
 – Vereinigung zweier Mengen 20

Messsignal 249
 Messstation
 – parallele 249
 Military Handbook 217 184
 Mindestlebensdauer 217
 Mischsystem 149
 Mittelwert 40
 Multiplikationssatz I 29
 Multiplikationssatz II 29

N

Negation *Siehe* Komplement 21
 Negator *Siehe* Mengenoperationen 21
 Normal 250
 Normalverteilung 85
 – Dichtefunktion 85
 – Trainingsmodul 88
 – Verteilungsfunktion 86
 Nutzungszeit 242

O

Operationscharakteristik 202, 205, 209,
 213

P

Parallelsystem 144
 Parts Count Method (PCM) 177
 Phasendreher *Siehe* Mengenoperationen
 21
 Plausibilitätstest 250
 Poisson-Verteilung 201, 210
 Poka-Yoke-Prinzip 255
 Produktionsdaten
 – Zuordnung von 251
 Prüfbedingung 19
 Prüfling 19
 Prüfniveau 204
 Prüfplan 19
 Prüfumfang 19
 Prüfzeit 205

Q

Qualität 1
 Qualitative Merkmale 195
 Qualitätsleistung 245, 255
 – Gesamt- 256
 – maschinenbedingte 256
 Qualitätsniveau 206
 Quantil 39
 Quantitative Merkmale 195

R

Raffungsfaktor RF 224
 Raffungstest 223f.
 Rechengesetze der Mengenalgebra 22
 Redundanz 145, 248
 – analytische 248
 – analytische Redundanz 145
 – Hardware- 248
 – Hardwareredundanz 145
 – heiße 146 ff.
 – kalte 145
 – nicht reparierbare, redundante
 Grundstrukturen 147
 – redundante Systeme 147
 – Redundanzarten 146
 – Redundanzgrad 146
 – reparierbare, redundante Grund-
 strukturen 148
 – warme 146
 Redundanzkonzept 245
 Reihensystem 142
 Relative Häufigkeit *Siehe* Häufigkeit 24
 Risikobewertung 126
 Risikoprioritätszahl 257
 Risikoprioritätszahl (RPZ) 126 f.
 Rückrufaktionen 4
 Rückweisewahrscheinlichkeit 202
 Rückzuweisende Qualitätsgrenzlage 202
 Rüstvorgänge 254

S

- Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit 149
- Schäden 115
- Schlechtbewertung 254
- Sekundärausfall 12
- Selbsttest 245, 249 f.
- Seriensystem 142
- SN-29500 2004 184, 188
- Spannungsabhängigkeit 188
- Spannungsprüfung 231
- Standardabweichung 40
- Statistische Prozessregelung (Qualitätsregelkartentechnik) 194
- Stichprobe 193
- Stichprobenanweisung 196, 199, 202, 204, 217, 219
- Stichprobenplan 196
- Stichprobenprüfung 193
- Stichprobensysteme 196, 206
- Stichprobenumfang 202, 210
- Störungen 115
- Stromabhängigkeit 188
- Strukturanalyse 125
- System 134
 - eigensicheres 247
 - fehlersicheres *Siehe* eigensicheres System 247
- Systematische Stichprobenprüfung 193 f.

T

- Technologiegrenze
 - fundamentale 229, 232
- Teilekennzeichnung 251
- Teilerückverfolgbarkeit 251
- Teilmenge *Siehe* Menge 22
- Temperaturabhängigkeit 189
- Temperaturwechselprüfung 230
- Testen
 - beschleunigtes 223
- Testfrequenz 231
- Thorndike-Nomogramm 213 f.
- Totale Wahrscheinlichkeit *Siehe* Wahrscheinlichkeit 27

U

- Überlebenswahrscheinlichkeit 15, 144, 212
- Überwachung
 - Bewegungs- 253
 - Bewegungs- und Zeit- 253
 - Messbereichs- 253
- Umweltbeanspruchung 116
- upper destruct limit *Siehe* Zerstörungsgrenze
- upper operational limit *Siehe* Funktionsgrenze
- upper operational temperature limit *Siehe* Funktionstemperatur

V

- Variablenstichprobenprüfung 202
- Varianz 40
- Verfahren der Probenentnahme 197
- Verfügbarkeit 12, 241, 245
 - Steigerung 244
- Verschärfte bzw. reduzierte Prüfung 205
- Verteilungsfunktion 35, 200 f.
 - grafische Bestimmung der Verteilungsparameter 66
 - logarithmische Normalverteilung 105
- Vertrauensbereich 42
- Vibrationsprüfung 231

W

- Wahrscheinlichkeit 24 f.
 - bedingte 26
 - totale 27
- Wahrscheinlichkeitsraum 25
- Wahrscheinlichkeitsrechnung 24
- Wartungszeit TW 242
- Wechselbilanz 209
- Weibull-verteilte Lebensdauer 217
- Weibull-Verteilung 61, 217
 - analytische Bestimmung der Verteilungsparameter 69
 - Dichtefunktion 61

- Trainingsmodul 72
- Verteilungsfunktion 61
- Wiederholmessung 249

Z

- Zehnerregel der Fehlerkosten 5, 229
- Zeitpunktprognose 242
- Zerstörendes Prüfverfahren 204
- Zerstörungsgrenze 227
- Zerstörungstemperatur 228
- Ziel der Stichprobenprüfung 193
- Zufällige Stichprobenprüfung 193
- Zufallsexperiment 24
- Zufallsgröße 36
 - diskrete 36
 - stetige 36
- Zufallsstichprobe 195
- Zustände 173
- Zustandsgraph 171
- Zuverlässigkeit 2
 - technische 11
- Zuverlässigkeitsberechnung 117
- Zuverlässigkeitsforderung 12
- Zuverlässigkeitskenngröße 12
- Zuverlässigkeitsmanagement 18
- Zuverlässigkeitsprognose 116
- Zuverlässigkeitsprüfung 19
- Zuverlässigkeits Schaltbilder 142
- Zuverlässigkeitsstichprobenprüfung 219
- Zuverlässigkeitsstruktur 142
- Zuverlässigkeit von Systemen 117
- Zweiparametrische Weibull-Verteilung 217
- Zwischenkastenprinzip 252