HANSER

Leseprobe

Arno Meyna, Bernhard Pauli

Zuverlässigkeitstechnik

Quantitative Bewertungsverfahren

ISBN: 978-3-446-41966-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

http://www.hanser.de/978-3-446-41966-7

sowie im Buchhandel.

Einführung

Das Fachgebiet technische Zuverlässigkeit – auch Zuverlässigkeitssystemtheorie genannt – entstand in den 40er Jahren bei der Entwicklung des Flugkörpers F_i 103 in Peenemünde.
Aufgrund des häufigen, unvorhersehbaren Versagens jeweils anderer Komponenten und Baugruppen wurden erstmalig wahrscheinlichkeitstheoretische und statistische Überlegungen zur Zuverlässigkeitsbewertung im ingenieurwissenschaftlichen Bereich – als Systemdenken – eingeführt.
Ausgehend aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt entwickelte sich die neue Disziplin technische Zuverlässigkeit mit ihrer probabilistischen Denkweise zu einer selbstständigen ingenieurwissenschaftlichen Fachdisziplin, d.h. die Methoden und Verfahren sind allgemeingültig, und werden heute in fast allen technischen Fachsparten u.a. zur probabilistisch orientierten und sicherheitstechnischen Bewertung komplexer Systeme einschließlich Produkte und Produktionsmittel genutzt.

Was ist Zuverlässigkeit?
Stellt man dem Käufer eines technischen Produktes diese Frage, so wird er wahrscheinlich antworten, dass das Produkt eine gewisse Zeit entsprechend dem Verwendungszweck und den Anforderungen einwandfrei funktionieren soll. Die Nutzungszeit soll möglichst groß und ungefähr vorausbestimmbar sein.
Der Kunde weiß auch, dass ein hochwertiges Produkt in der Regel teurer ist als ein vergleichbares weniger zuverlässiges, und dass die Reparaturanfälligkeit entsprechend geringer sein wird.
Auch der Hersteller eines Produktes möchte prinzipiell mit einem vertretbaren wirtschaftlichen Aufwand ein zuverlässiges Produkt auf den Markt bringen; bedeutet hohe Zuverlässigkeit doch einen Wettbewerbsvorteil. Er ist sich auch bewusst, dass ein unzuverlässiges Produkt erhebliche zusätzliche Kosten verursachen und zu einem Imageverlust oder gar zu Haftungsansprüchen führen kann.
Da die Zuverlässigkeit nicht in ein Produkt hineingeprüft, sondern hineinentwickelt und gefertigt werden muss, setzt hohe Zuverlässigkeit eine systematische Planung in Form eines Zuverlässigkeitsprogrammplans („reliability program plan“) unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs, LCC) voraus (⇒ Kap. 5). Neben den technischen kommen somit auch verstärkt wirtschaftswissenschaftliche, organisatorische u.a. Methoden zur Sicherstellung einer hohen Produktzuverlässigkeit zur Anwendung.
Die wesentlichen Schritte und die Grundlagen eines Zuverlässigkeitsprogramms sind beispielhaft in der „DIN EN 60300 – Zuverlässigkeitsmanagement“ und im

„VDI – Handbuch Technische Zuverlässigkeit VDI 4003“ aufgeführt. Frühere Standards, wie „US-MIL-STD-785 Revision B Reliability Program for Systems and Equipment“, „BS 5760 – Reliability of systems, equipment and components“ und „IEC 300 – Dependability Management“ werden im Rahmen der internationalen Harmonisierung sukzessive durch die „IEC 60300“ und ihre nationalen Unsetzungen ersetzt. Die internationale Koordination erfolgt hierbei maßgeblich durch das „IEC Technical Committee 56: Dependability“ sowie die nationalen Normenausschüsse. Leider berücksichtigt die „DIN EN ISO 9004“ die Aspekte eines modernen Qualitäts- und Zuverlässigkeitssystems nur ungenügend.
Die Begriffe und Kenngrößen der Zuverlässigkeit sind in „DIN 40041 – Zuverlässigkeit; Begriffe“ (siehe hierzu auch „VDI Handbuch Technische Zuverlässigkeit, VDI 4001 bis 4010“) und „IEC 60050-191 – Quality vocabulary“ genormt. Hiernach wird unter Zuverlässigkeit („dependability“) „die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen“, bzw. einen Teil der Qualität im Hinblick auf das Verhalten der Einheit während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen; verkürzt spricht man auch von „Zuverlässigkeit ist Qualität auf Zeit“, verstanden. Dabei kann anstelle einer Zeitspanne, z.B. Stunden, auch eine vorgegebene Anzahl von Betriebszyklen oder ähnliches benutzt werden.

„Der Begriff Zuverlässigkeit ist hier umfassend zu verstehen. Der Begriff „reliability“ ist dagegen teils in der Bedeutung Funktionsfähigkeit, teils in der Bedeutung Überlebenswahrscheinlichkeit definiert und daher als Übersetzung für Zuverlässigkeit missverständlich.“

Als Teil der Qualität eines Produktes hat die Zuverlässigkeit einen großen Einfluss auf dessen Akzeptanz. Aufgabe der Zuverlässigkeitsplanung und -berechnung ist es, schon in der Planungs- und Entwicklungsphase die zu erwartende Zuverlässigkeit des Produktes den Forderungen der Verwendung anzupassen, während der Zuverlässigkeitsprüfung die laufende Überwachung der Einhaltung der Zuverlässigkeitsforderungen obliegt.
Die Zuverlässigkeit einer Einheit ist nur im Hinblick auf vorgegebene Anwendungsbedingungen definiert; Erhöhungen der Umwelt- oder Funktionsbeanspruchungen gegenüber den vorgegebenen Anwendungsbedingungen bewirken regelmäßig eine Abnahme der Zuverlässigkeit. Die Einflussnahme auf die Anwendungsbedingungen durch den Hersteller sind allerdings in der Regel sehr begrenzt; um dennoch den Zuverlässigkeitsanforderungen der Verwender zu genügen, bietet sich die Entwicklung robuster Systeme (Versuchsplanung) an.

Wurden früher rein deterministische Vorgehensweisen, Berechnungen, Auslegungen etc. praktiziert, so werden diese heute durch probabilistische Analysen und Berechnungen und Abschätzungen ergänzt. Denn die Lebensdauer einer Komponente oder eines Systems unterliegt – wie die Lebensdauer des Menschen auch – einer gewissen Stochastik und ist dementsprechend eine Zufallsvariable.
Aus diesem Grunde bezieht die Zuverlässigkeits- und Sicherheitstheorie ihre fundamentalen Gesetzmäßigkeiten aus der Wahrscheinlichkeitstheorie, der mathematischen Statistik, der Mengenalgebra und weiteren mathematischen Disziplinen. Unabhängig davon verfügt die moderne Zuverlässigkeits- und Sicherheitstheorie über ein eigenständiges theoretisches Gebäude (welches ständig weiterentwickelt wird) mit entsprechenden Bewertungskenngrößen und speziellen mathematischen Verfahren und Methoden zu deren Bestimmung. Diese werden im vorliegenden Taschenbuch sehr ausführlich dargestellt und durch zahlreiche Beispiele praxisnah erläutert.

Bemühungen zur Berechnung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems haben nach Meyna (1994) primär folgende Gründe:

Schwierigkeiten signifikanter Tests
Durch die ständig wachsende Komplexität und die dadurch entstehenden Kosten eines aus vielen Bauelementen zusammengesetzten Systems, wie z.B. eines Flugzeuges, Kraftfahrzeuges oder Kraftwerkes, kann eine Lebensdauer-Prüfung zur Ermittlung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems als 100%-Prüfung oder auch nur als Stichprobenprüfung am fertigen System oder Gerät kaum mehr mit der notwendigen Signifikanz vorgenommen werden. Da aber Aussagen über voraussichtliche Ausfälle und die Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung benötigt werden, wird versucht, mit Hilfe der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie aus den Daten (Ausfallraten, Reparaturraten usw.) der einzelnen Bauelemente dieses Systems oder Gerätes, die sich entweder durch Lebensdauerprüfungen oder Feldausfälle haben ermitteln lassen, eine quantitative Aussage über das zuverlässigkeitstechnische Verhalten des gesamten Systems zu erhalten.

Vergleich von Systementwürfen
Die Durchführung einheitlicher Analysen auf der Basis der Zuverlässigkeitstheorie für verschiedene Systeme oder Gerätetypen ermöglicht eine quantitative, vergleichende Aussage über die inhärente Zuverlässigkeit dieser Geräte, wenn für die einzelnen Bauelemente der verschiedenen Geräte Gleichartigkeit vorausgesetzt wird. Es ist damit ein Kriterium zur zuverlässigkeitstechnischen Beurteilung gegeben. Der absolute Wert der quantitativen Aussage einer derartigen

Berechnung ist aufgrund der Datenunsicherheit häufig strittig, der Wert der vergleichenden Analyse dürfte jedoch unbestritten sein.

Ermittlung von Schwachstellen
Zur Zuverlässigkeitssicherung und Ermittlung von Schwachstellen werden in der Regel analytische Verfahren (z.B. Beanspruchungsanalyse), prüfende Verfahren (z.B. Festigkeitsuntersuchungen) oder organisatorische Verfahren (z.B. Zuverlässigkeitsmanagement-Programme) angewendet. Aber auch mittels probabilistischer Verfahren (z.B. Fehlerbaumanalyse) können Systemschwachstellen bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt eines Entwicklungsprozesses ermittelt und somit kostengünstige Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Quantitativer Sicherheitsnachweis
Ist die Sicherheit (lat. securus, sicher) eines Systems ein Entscheidungskriterium, so kann eine Sicherheitsanalyse mit entsprechender Quantifizierung des Risikos zur Annahme oder Verwerfung eines technischen Systems führen. Dabei versteht man nach „DIN 31000/A1 (2007.07)“ unter Sicherheit („safety“) eine Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzrisiko, d.h. das größte noch vertretbare Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustandes, ist.
Um den Begriff Sicherheit als Wahrscheinlichkeit quantitativ zu erfassen und entsprechende Kenngrößen abzuleiten (⇒ Kap. 2), wird „Sicherheit als Wahrscheinlichkeit, dass von einer Betrachtungseinheit während einer bestimmten Zeitdauer keine Gefährdungen ausgehen“, definiert (Meyna, 1982).

Mit den modernen probabilistischen Methoden der Zuverlässigkeitsplanung und -prüfung lassen sich die Zuverlässigkeit und Sicherheit durch entsprechende Bewertungskenngrößen, wie z.B. Überlebenswahrscheinlichkeit oder (Nicht-) Verfügbarkeit, aber auch das Risiko technischer Systeme quantifizieren. Dabei wird unter Risiko die Eintrittswahrscheinlichkeit (relative Häufigkeit) der Ereignisse pro Zeiteinheit multipliziert mit den Ausfallfolgen, d.h. den Auswirkungen pro Ereignis verstanden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach dem notwendigen Maß der Zuverlässigkeit bzw. Sicherheit, das für bestimmte technische Systeme (Kraftwerke, Verkehrssysteme, Chemieanlagen usw.) zu fordern wäre, bzw. nach dem Höchstmaß an Unsicherheit, welches von Einzelpersonen und der Gesellschaft akzeptiert wird (Technikfolgenabschätzung). So werden z.B. technische Systeme mit relativ hoher Eintrittswahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ereignisses, aber geringen Auswirkungen (z.B. Automobile) im Gegensatz zu denen mit geringerer Eintrittshäufigkeit und großen Auswirkungen (z.B. Kernkraftwerke) eher akzeptiert. Wie die Diskussion über das Für und Wider der Kernkraftwerke zeigt, lässt sich allein mit einer

probabilistischen Aussage über deren Zuverlässigkeit und Sicherheit kein Konsens in breiten Teilen der Bevölkerung erreichen. Notwendig sind bei neuen Technologien vorausschauende Untersuchungen und Analysen, die interdisziplinär durch Einbeziehung der Sozialwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften, Psychologie, Medizin, Philosophie, um nur einige der unmittelbar angesprochenen Disziplinen aufzuführen, erfolgen sollten.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass in einigen technischen Bereichen (besonders in der Luftfahrt) probabilistische Bewertungen gesetzlich vorgeschrieben sind. So werden nach „Joint Aviation Requirements (JAR) 25.1309“ bzw. „Federal Aviation Regulations (FAR) 25.1309“ vier Klassen von Auswirkungen und deren zugeordneten Fehlerwahrscheinlichkeiten unterschieden:

1. Katastrophale Auswirkungen, d.h. Verlust des Flugzeugs (Fehlerrate $< 10^{-9}$ pro Flugstunde);
2. Gefährliche Auswirkungen, d.h. starke Verringerung von Sicherheitsfaktoren (Fehlerrate $<10^{-7}$ pro Flugstunde);
3. Bedeutende Auswirkungen, d.h. bedeutende Verringerung von Sicherheitsfaktoren (Fehlerrate $< 10^{-5}$ pro Flugstunde);
4. Unbedeutende Auswirkungen, d.h. unbedeutende Verringerung von Sicherheitsfaktoren (Fehlerrate $< 10^{-3}$ pro Flugstunde).

(⇒ Kap. 5).

Das Buch gliedert sich in drei Hauptabschnitte:

I. Grundlagen,
II. Zuverlässigkeits- und Sicherheitsplanung und
III. Zuverlässigkeits- und Sicherheitsprüfung.

Der erste Hauptabschnitt beginnt mit einigen Grundlagen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, wie sie zum Verständnis der folgenden Kapitel erforderlich sind. Darauf aufbauend werden Zuverlässigkeits- und Sicherheitskenngrößen eingeführt und diese für einige wichtige stetige und diskrete Verteilungsfunktionen für Zuverlässigkeits- und Sicherheitsuntersuchungen formuliert. Des Weiteren wird besonders der Anwendungsbezug der jeweiligen Verteilungsfunktion für Zuverlässigkeits- und Sicherheitsuntersuchungen herausgestellt. Die Problematik von Ausfallratenmodellen wird gesondert in einem eigenständigen Kapitel diskutiert.

Der zweite Hauptabschnitt behandelt die wichtigsten und in der heutigen Praxis angewendeten Methoden der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsplanung. Nach einem einführenden Kapitel Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmanagement wird gezeigt, wie die Zuverlässigkeit und weitere Bewertungskenngrößen einfacher Systemstrukturen mit Hilfe der Grundgesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung leicht bestimmt werden können. Es folgt eine Erläuterung der wichtigsten Redundanzprinzipien und deren analytische Behandlung; dies auch besonders unter Sicherheitsaspekten.
Sehr ausführlich werden anschließend die Boolesche Modellbildung und darauf aufbauend die für die Praxis wichtige Fehlerbaumanalyse behandelt.
Im Kapitel 9 wird gezeigt, dass bei unscharfen und mit Unsicherheiten behafteten Daten eine Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Fuzzy-Logik erfolgen kann, was besonders bei Neuentwicklungen von Bedeutung ist. Ferner wird gezeigt, dass die Fuzzy-Logik erfolgreich mit der bekannten FMEA und der Fehlerbaumanalyse verknüpft werden kann.

Die Kapitel 10 und 11 widmen sich der Modellbildung mittels stochastischer Prozesse.
Nach einer Einführung in die stochastische Modellbildung werden die in der Praxis etablierten und leicht zu handhabenden Markovschen Prozesse einschließlich Semi-Markov-Prozesse anhand einfacher praktischer Beispiele dargestellt.

Aufgrund der in den letzten Jahren wachsenden Bedeutung einer möglichst realitätsnahen Systemmodellierung und –analyse („Dynamische Zuverlässigkeit"), die nach heutigem Kenntnisstand ausschließlich nur mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation praktikable Ergebnisse liefert, wird dieses bekannte Verfahren im Kapitel 12 allgemein reflektiert und deren Verknüpfung mit der Systemtransporttheorie anwendungsbezogen behandelt.
Ebenfalls neu aufgenommen wurde die Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Graphentheorie, die sich auch in der industriellen zuverlässigkeitstechnischen Praxis zwischenzeitlich bewährt hat (Kap. 3).

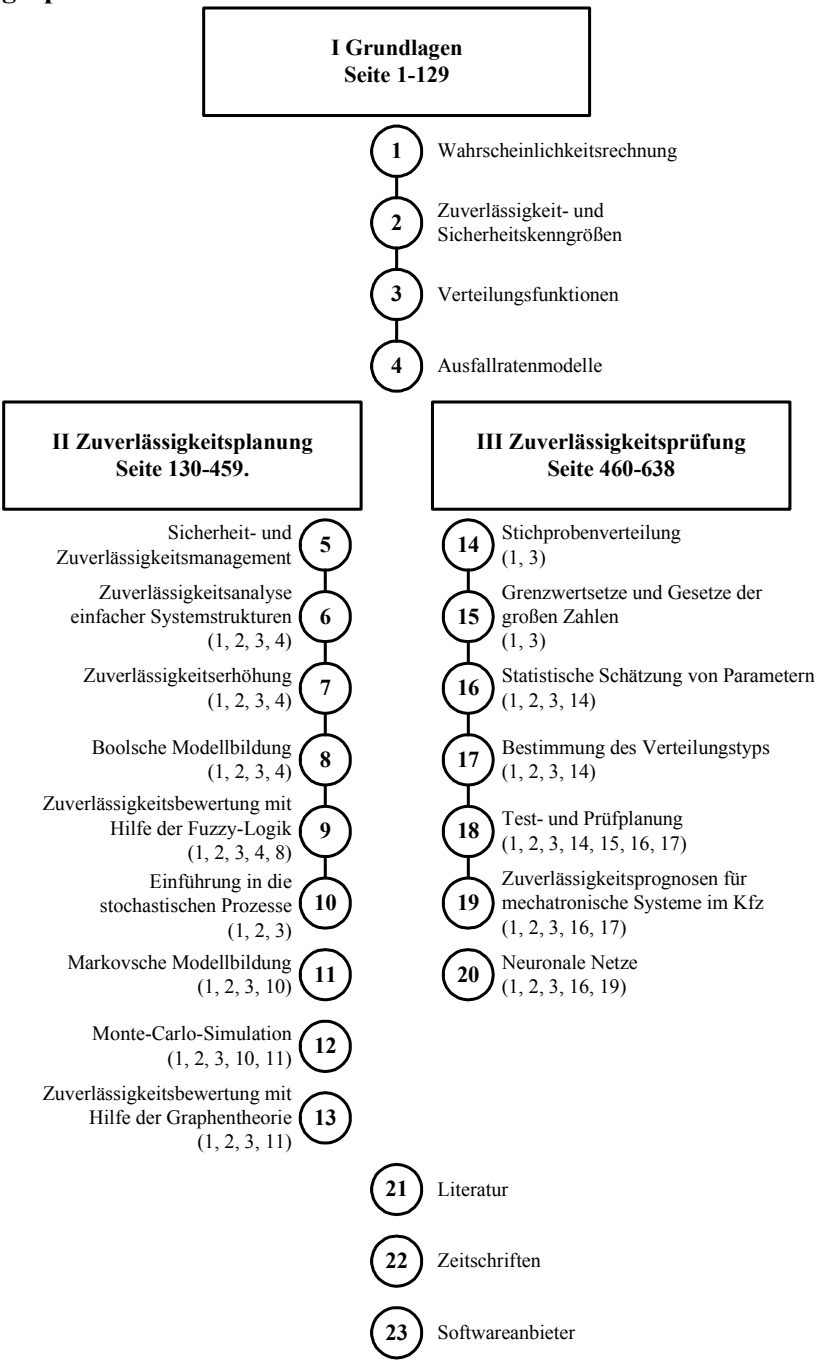
Im dritten Hauptteil Zuverlässigkeits- und Sicherheitsprüfung werden dann zunächst einige Grundlagen der Stichprobenverteilung und kurz einige wichtige Grenzwertsätze und Gesetze der großen Zahlen abgehandelt.
Es folgt darauf aufbauend die für die Praxis wichtige Schätzung von Parametern, wie z.B. mittels Maximum-Likelihood-Methode, Momentenmethode und Methode der kleinsten Quadrate. Schließlich werden die ebenfalls für die Praxis sehr wichtigen Wahrscheinlichkeitsnetze, hier erläutert am Wahrscheinlichkeitsnetz der Weibull-Verteilung, sowie der Chi-Quadrat-Anpassungstest und

der Kolmogorov-Smirnov-Test zur Bestimmung des Verteilungstyps dargestellt. Darauf aufbauend werden die in der Praxis etablierten und erprobten Methoden und Verfahren der Test- und Prüfplanung behandelt.

Den erst in den letzten Jahren von den Autoren weiterentwickelten Zuverlässigkeitsprognosemodellen für die Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen mit Garantiedaten, Prognosen von Kenngrößen und weiterführende praktische Prognoseanwendungen zur Bestimmung der durchschnittlichen Ausfallrate, der Garantiekosten, des Serienersatzbedarf und den Endbevorratungsmengen für elektronische Systeme im Kraftfahrzeug wird ein gesondertes Kapitel gewidmet.
Im Gegensatz zur 1. Auflage wurde dieses Kapitel 19, unter Einbeziehung neuer Forschungsergebnisse, erheblich erweitert.
Ebenfalls neu aufgenommen wurde – aufgrund der wachsenden Bedeutung auch im Bereich der technischen Zuverlässigkeit – die Parameterschätzung und Zuverlässigkeitsprognose mittels Neuronaler Netze (Kap. 20).

Das Buch lässt sich aus methodischer Sicht durch nachfolgenden Flussgraphen ordnen:
Für das Verständnis der jeweiligen Kapitel ist es empfehlenswert, die in den Klammern aufgeführten Kapitel (falls keine entsprechenden Vorkenntnisse vorhanden sind) vorab zu studieren.

Flussgraph


I Grundlagen
Seite 1-129
1 Wahrscheinlichkeitsrechnung
2 Zuverlässigkeit- und Sicherheitskenngrößen
3 Verteilungsfunktionen
4 Ausfallratenmodelle
II Zuverlässigkeitsplanung
Seite 130-459.
III Zuverlässigkeitsprüfung
Seite 460-638
5 Sicherheit- und Zuverlässigkeitsmanagement
6 Zuverlässigkeitsanalyse einfacher Systemstrukturen (1, 2, 3, 4)
7 Zuverlässigkeitserhöhung (1, 2, 3, 4)
8 Boolsche Modellbildung (1, 2, 3, 4)
9 Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Fuzzy-Logik (1, 2, 3, 4, 8)
10 Einführung in die stochastischen Prozesse (1, 2, 3)
11 Markovsche Modellbildung (1, 2, 3, 10)
12 Monte-Carlo-Simulation (1, 2, 3, 10, 11)
13 Zuverlässigkeitsbewertung mit Hilfe der Graphentheorie (1, 2, 3, 11)
14 Stichprobenverteilung (1, 3)
15 Grenzwertsetze und Gesetze der großen Zahlen (1, 3)
16 Statistische Schätzung von Parametern (1, 2, 3, 14)
17 Bestimmung des Verteilungstyps (1, 2, 3, 14)
18 Test- und Prüfplanung (1, 2, 3, 14, 15, 16, 17)
19 Zuverlässigkeitsprognosen für mechatronische Systeme im Kfz (1, 2, 3, 16, 17)
20 Neuronale Netze (1, 2, 3, 16, 19)
21 Literatur
22 Zeitschriften
23 Softwareanbieter

2.3 Zuverlässigkeitskenngrößen reparierbarer Systeme, Instandhaltung

Die unter Punkt 2.1 eingeführten Zuverlässigkeitskenngrößen behalten auch bei reparierbaren Systemen ihre Gültigkeit.
Nachfolgende Kenngrößen stellen deshalb eine Erweiterung der bisher eingeführten Kenngrößen dar.

Die **Reparatur** (Instandsetzung) eines technischen Gerätes bewirkt die Wiederherstellung des Sollzustandes nach einem störungsbedingten Ausfall und erfolgt, im Gegensatz zur Wartung, außerplanmäßig.

Bei der **Wartung** handelt es sich sinngemäß um Maßnahmen zur Erhaltung des Sollzustandes. Dies kann durch Überwachung und vorhergehenden Austausch von Systembestandteilen geschehen (Bild 2.3-1).

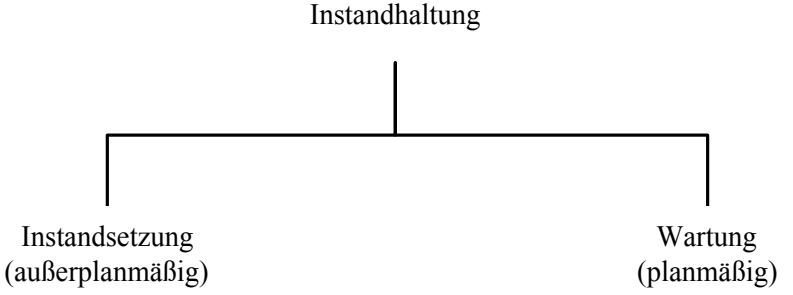


Bild 2.3-1: Instandhaltung

Wird davon ausgegangen, dass die Instandsetzungszeit T_S eine Zufallsvariable ist, so lässt sich in Analogie zur Kenngröße Ausfallwahrscheinlichkeit eine **Instandsetzungswahrscheinlichkeit** (maintainability) M(t) durch

$$M(t) = P(T_S \leq t) \qquad (2.3\text{-}1)$$

definieren ($\Rightarrow$ Bild 2.3-2).

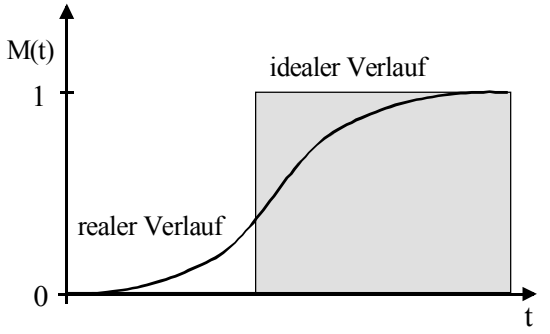


Bild 2.3-2: Instandsetzungswahrscheinlichkeit

Die zugehörige Dichte heißt **Instandsetzungsdichte,** beziehungsweise Wartbarkeitsdichte m(t), und ist in Analogie zur Ausfalldichte im stetigen Fall durch

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} \qquad (2.3\text{-}2)$$

definiert.

In Analogie zur Ausfallrate lässt sich eine **Instandsetzungsrate,** auch **Reparaturrate** $\mu(t)$ genannt, definieren. Es folgt

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} \qquad (2.3\text{-}3)$$

und hieraus die wichtige Beziehung

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(\tau)d\tau}. \qquad (2.3\text{-}4)$$

Für den Spezialfall, dass $\mu(t) = \mu$ = konstant ist, der in der Praxis jedoch äußerst selten vorkommt, folgt aus Gleichung (2.3-4)

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}. \qquad (2.3\text{-}5)$$

Der Erwartungswert der Instandsetzungszeit $E(T_S)$ lässt sich in Analogie zur Gleichung (2.1-21) definieren.

Es gilt:

$$E(T_S) = \int_0^\infty t \cdot m(t)dt. \qquad (2.3\text{-}6)$$

Im Fall einer exponentiell verteilten Instandsetzungszeit, mit $\mu(t) = \mu$ = konstant, ergibt sich aus Gleichung (2.3-6)

$$E(T_S) = \int_0^\infty t \cdot \mu e^{-\mu t}dt = \frac{1}{\mu}. \qquad (2.3\text{-}7)$$

Dabei wird $1/\mu$ als MTTR (mean time to repair) bezeichnet.

Neben den vorstehend eingeführten Kenngrößen wird in der Praxis zur Charakterisierung der Wartungsfreundlichkeit eines Systems ein so genannter Wartungsfaktor W verwendet.

$$W = \frac{T_N - T_{pl}}{T_N} = 1 - \frac{T_{pl}}{T_N} \qquad (2.3\text{-}8)$$

mit

T_N = Nennzeitraum (Betrachtungszeitraum) und

$T_{pl} = \sum_{i=1}^{n} t_{pl_i}$ = Gesamtdauer der planmäßigen Wartungen in T_N.

Bei reparierbaren Systemen charakterisiert die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System (beziehungsweise eine Systemkomponente) zur Zeit t im funktionsfähigen Zustand befindet, also verfügbar ist, die Wirtschaftlichkeit eines Systems. Diese Wahrscheinlichkeit wird mit **Verfügbarkeit** (availability) V(t) bezeichnet:

V(t) = P(System ist funktionsfähig zum Zeitpunkt t). (2.3-9)

Die komplementäre Größe wird **Nichtverfügbarkeit** $\overline{V}(t)$ beziehungsweise **Unverfügbarkeit** U(t) genannt.

$$V(t) = 1 - \overline{V}(t) = 1 - U(t). \qquad (2.3\text{-}10)$$

Die Verfügbarkeit lässt sich gleichermaßen über eine Boolesche- (⇒ Kap.8) beziehungsweise stochastische Modellbildung, z.B. nach Markov (⇒ Kap.11), ermitteln. Sie geht im Fall nicht-reparierbarer Systeme, das heißt bei

absorbierenden Systemzuständen, in

$$V(t)\,|_{\mu=0} = R(t) \qquad (2.3\text{-}11)$$

über. Bei reparierbaren Systemen ist V(t) stets größer als R(t).

2.4 Sicherheitskenngrößen[10]

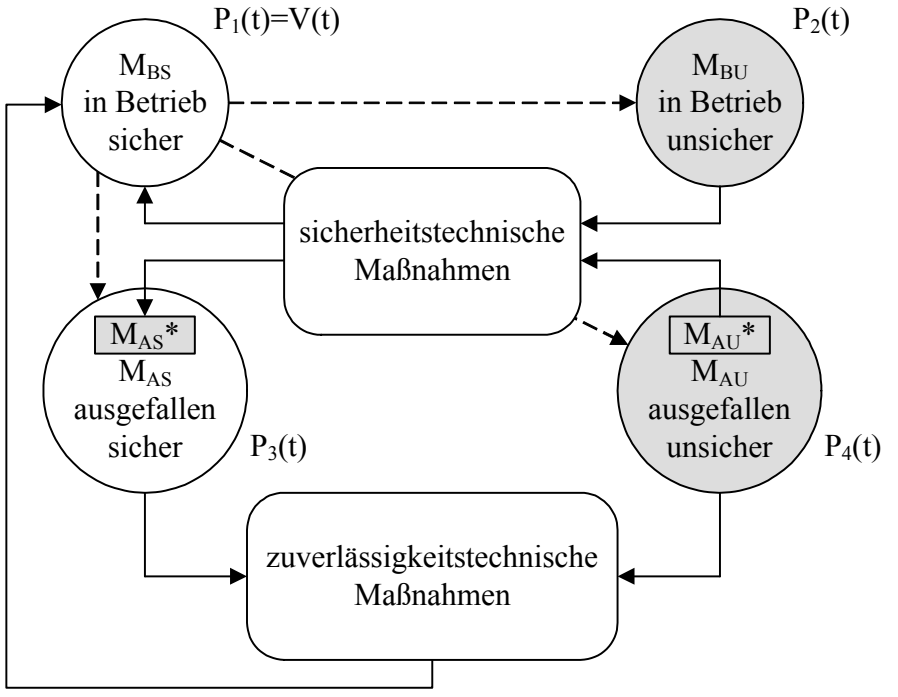
Sicherheitskenngrößen sind in Analogie zu den Zuverlässigkeitskenngrößen definiert. Allerdings werden hier nicht die Ausfälle als solche in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt, sondern die sicherheitsrelevanten Teilmengen dieser Ereignisse, die eine Gefährdung bewirken (Bild 2.4-1).
Formale Analogien zur Zuverlässigkeitstheorie dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Sicherheitstheorie weitere Kenngrößen berücksichtigen muss. Hierzu zählen insbesondere die Auswirkungen einer Gefährdung und der Einfluss des (mehr oder weniger beeinflussbaren) Menschen durch die Wahrscheinlichkeit des möglichen Fehlverhaltens.
Wird davon ausgegangen, dass sich die Menge aller Ausfall- und Betriebszustände eines Systems bzw. die Menge aller Fehlhandlungen eines Menschen in Ausfallzuständen/Fehlhandlungen mit gefährlichen Auswirkungen und Ausfall- und Betriebszuständen/Fehlhandlungen mit ungefährlichen Auswirkungen einteilen lässt, so ist leicht einzusehen, dass für die Sicherheit eines Systems lediglich die Menge der gefährlichen Zustände von Bedeutung ist.
Für die Berechnung der Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit) bzw. Verfügbarkeit müssen jedoch alle Ausfallzustände/Fehlhandlungen berücksichtigt werden.

Anhand Bild 2.4-1 lässt sich ein weiterer interessanter Sachverhalt verifizieren:

a) dass ein System ohne gefährliche Ausfall- und Betriebszustände eine absolute Sicherheit (Sicherheitswahrscheinlichkeit) S = 1 hat. Die Zuverlässigkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit) bzw. Unverfügbarkeit kann dagegen immer noch sehr schlecht sein, besonders dann, wenn die Teilmenge der gefährlichen Zustände viel kleiner als die der ungefährlichen Zustände (praktisch oft gegeben) ist. D.h. weitere Maßnahmen, die einer Erhöhung der Sicherheit dienen, müssen nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit führen. Oft wird diese schlechter, besonders dann, wenn zur Sicherheitssteigerung zusätzlich die Menge der ungefährlichen Systemzustände stark ansteigt.

---

[10] Siehe in diesem Zusammenhang auch VDI/VDE 3542 „Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme“.



Sicherheitsrel.: $U_S(t) = P_2(t) + P_4(t)$
Zuverlässigkeitsrel.: $U(t) = P_3(t) + P_4(t)$

——→ eigenständiger Zustandsübergang des Systems

- - - -→ Zustandsübergang des Systems nach technischen Maßnahmen

Bild 2.4-1: Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Sicherheit

b) dass ein System mit einer hohen Zuverlässigkeit, durchaus im Vergleich mit anderen Systemen mit der gleichen hohen Zuverlässigkeit, eine geringere Sicherheit aufweisen kann.

Eine Übersicht der Nomenklatur zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischer Grundgrößen zeigt Tabelle 2.4-1.

Nicht reparierbare Systeme			
Zuverlässigkeit		**Sicherheit**	
Kenngröße	Formel-zeichen	Kenngröße	Formel-zeichen
Ausfallwahr-scheinlichkeit	F(t)	Gefährdungswahr-scheinlichkeit	G(t)
Überlebenswahr-scheinlichkeit	R(t)	Sicherheitswahr-scheinlichkeit	S(t)
Ausfalldichte	f(t)	Gefährdungsdichte	g(t)
Ausfallrate	h(t)	Gefährdungsrate	$\delta(t)$

Reparierbare Systeme			
Zuverlässigkeit		**Sicherheit**	
Kenngröße	Formel-zeichen	Kenngröße	Formel-zeichen
Instandsetzungs-wahrscheinlichkeit	M(t)	Sicherheitswiederher-stellungswahrscheinlichkeit	W(t)
Instandsetzungs-dichte	m(t)	Sicherheitswiederher-stellungsdichte	w(t)
Reparaturrate	$\mu(t)$	Sicherheitsrestitutionsrate	$\nu(t)$
Verfügbarkeit	V(t)	Sicherheitsverfügbarkeit (Schutzgüte)	$V_S(t)$

Tabelle 2.4-1: Nomenklaturen Zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischer Grundgrößen