Jörg R. Müller

Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme

Springer Vieweg

Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme

Jörg Rudolf Müller

Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme

Springer Vieweg

Dr. Jörg Rudolf Müller
Rieden, Deutschland

ISBN 978-3-662-46921-7 ISBN 978-3-662-46922-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-46922-4

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

Springer Vieweg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

Die vorliegende Habilitationsschrift entstand im Wesentlichen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

In ihr werden mittels formaler Spezifikationsmittel der Informatik Begrifflichkeiten der Technischen Zuverlässigkeit präzisiert und, hierauf aufbauend, wird durch horizontale wie vertikale Integration ein präzises Terminologiegebäude der heterogenen Begrifflichkeiten aus diesem Bereich geschaffen.

Vor Beginn der inhaltlichen Erörterung sei es gestattet, all denjenigen zu danken, die mich während der Erstellungszeit dieser Arbeit fachlich oder privat begleitet und unterstützt haben.

Dank gebührt an erster Stelle meinem Habilitationsvater und ehemaligen Chef, Herrn Prof. Eckehard Schnieder, für das kontinuierlich professionelle Arbeitsumfeld, die vielen intensiven und fruchtbaren Gespräche, das kaum zu würdigende, große Vertrauen das er mir entgegenbrachte und damit die Freiheit die er mir in allen Belangen lies und, nicht zu vergessen, seine große Geduld.

Als Zweit- und Drittgutachter konnte ich Frau Prof. Petra Winzer, Leiterin des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen des Fachbereichs Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal und Herrn Prof. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, gewinnen. Ich bin sehr dankbar für ihre sympathische, unprätentiöse und selbstverständliche Art der Unterstützung.

Auch möchte ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, nicht-wissenschaftlichen wie wissenschaftlichen, danken, mit denen ich in den acht Jahren am Institut zusammenarbeiten durfte. Das Verhältnis war immer von Respekt, größtmöglicher gegenseitiger Unterstützung und großer Nachsicht auf allen Seiten geprägt.

Schließen möchte ich mit großem Dank an meine Eltern und meinem Bruder, die mich während all der Jahre bestmöglich unterstützt und über vieles Vergessen und Nicht-Erledigen verständnisvoll hinweggesehen haben. Ihr Anteil an dieser Arbeit lässt sich nicht beziffern.

Kassel, im Februar 2015 Jörg R. Müller

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

1

In diesem einleitenden Kapitel werden die Probleme skizziert die zu dieser Arbeit motivierten, der zur Lösung dieser Probleme entwickelte Ansatz umrissen und gezeigt, wie sich dieser Lösungsansatz im Aufbau der Arbeit widerspiegelt.

1.1 Rahmen und Ziel

Nahezu alle Lebenszyklusphasen komplexer technischer Systeme bedürfen des abgestimmten Zusammenwirkens unterschiedlicher, oft ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen. Eine notwendige Voraussetzung zum Gelingen dieses Zusammenwirkens ist eine präzise interpersonelle, insbesondere interdisziplinäre Kommunikation. Diese Kommunikation findet in weiten Teilen mit Hilfe der natürlichen Sprache, sowohl durch akkustische als auch visuelle Signale (mittels Schrift) über entsprechende Kanäle statt. Dabei werden vom Sender kognitive Einheiten in ebendiese Signale kodiert und vom Empfänger wieder zu kognitiven Einheiten dekodiert – vgl. Abb. 1.1.

In diesem Kommunikationsmodell lassen sich u. a. die folgenden beiden möglichen Ursachen für unpräzise Kommunikation identifizieren: Zum einen können sowohl Kodierung als auch Dekodierung aufgrund unzureichender Kodes unpräzise sein. Darüber hinaus können sich Sender- und Empfängerkode unterscheiden und dadurch, trotz fehlerfreier Signalübertragung, unterschiedliche kognitive Repräsentationen nach sich ziehen.

Evident werden die erwähnten Probleme bspw. bei der Projektarbeit: Obwohl sich die beteiligten Akteure auf dieselben normativen Vorgaben in Form von Standards oder Richtlinien stützen, kommt es üblicherweise zu Missverständnissen (vgl. hierzu Lars Schnieder [14], der viele solcher Fälle identifiziert hat). Verstärkt wird dies in interdisziplinären und internationalen Projekten. Ein Grund hierfür ist, dass die normativen Vorgaben oftmals in sich mehrdeutig oder gar inkonsistent sind. Dies liegt an der natürlichen Sprache, in der solche Dokumente heute weitgehend gefasst sind: Sie hat sich durch ihre implizite Interpretierbarkeit als unzureichend erwiesen, technische Begriffe eindeutig zu

J.R. Müller, *Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme*,
DOI 10.1007/978-3-662-46922-4_1

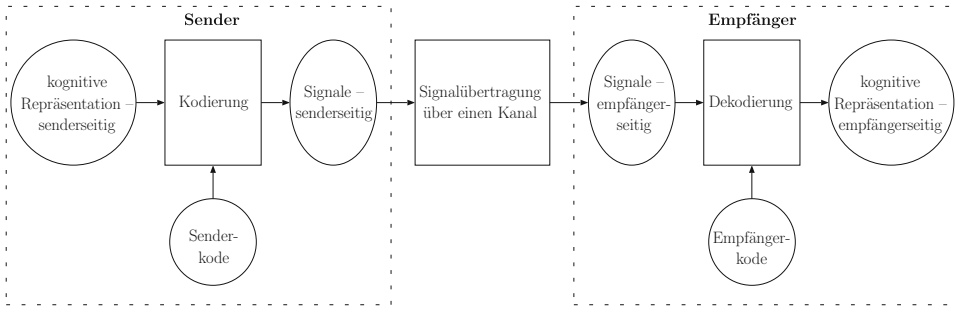

Abb. 1.1 Kommunikationsmodell in Anlehnung an Shannon/Weaver [15]

beschreiben. Das Anreichern solcher Dokumente mit mathematischen Formeln oder Skizzen vermag diese Probleme nur punktuell zu mindern.

Als charakteristisches Beispiel sei die Überarbeitung des „International Electrotechnical Vocabulary, Part 191: Dependability“ (IEC 60500-191) erwähnt. Auf Basis des 1990 veröffentlichten internationalen Standards [8] wurde 2003 eine Revision beschlossen. Auf den ersten Neufassungsvorschlag (Committee Draft), veröffentlicht 2005 [9], bekam die entsprechende Projektgruppe 823 Kommentare, bei 351 Begriffen insgesamt. Man darf durchaus voraussetzen, dass es sich bei den engagierten Personen um Experten auf dem Gebiet der Verlässlichkeit technischer Systeme handelt. Dies, die Anzahl der Kommentare im Verhältnis zur Anzahl der neu zu fassenden Begriffe und der Umstand, dass es sich lediglich um eine Revision handelt, macht die Unzulänglichkeiten bestehender Begriffsdefinitionen insbesondere in normativen Dokumenten deutlich.

Notwendig ist daher senderseitig eine Unterstützung der Kodierung: Die Abbildung kognitiver Einheiten in Sprache muss präzise, bestenfalls eineindeutig durchgeführt werden können. Empfängerseitig besteht die analoge Notwendigkeit der präzisen Dekodierung sprachlich gefasster Informationen in kognitive Einheiten. Darüber hinaus müssen die an der Kommunikation beteiligten Akteure hinsichtlich der Gründe potentieller Kommunikationsunschärfen sensibilisiert sein, um diesen Unschärften aktiv vorzubeugen.

Vor dem Hintergrund dieser Notwendigkeiten widmet sich diese Arbeit der Präzisierung der Terminologie der Verlässlichkeit technischer Systeme. Dies geschieht durch Formalisierung, Vernetzung und Vervollständigung: Mittels graphischer Beschreibungssprachen der Informatik, namentlich mittels Klassendiagrammen und Petrinetzen, werden Begriffsdefinitionen strukturiert und relationiert. Strukturgebend sind hier insbesondere die essentiellen systemtheoretischen Konzepte der Hierachie und der Emergenz einerseits, sowie die Dualität von Zustand und Ereignis andererseits. Die auf diese Weise offenbarten sprachlichen wie kognitiven Lücken werden geschlossen – das System wird hinsichtlich Begriffen, die extern in horizontaler oder vertikaler Weise relationiert sind, vervollständigt. Daneben wird die „Binnenstruktur“ (vgl. Schnieder in [13]) von Begriffen durch die

konsequente Anwendung der intensionalen Attributhierarchie offengelegt und ebenfalls vervollständigt.

Es sei an dieser Stelle explizit erwähnt, dass es *nicht* Ziel dieser Arbeit ist, die mathematischen Grundlagen zur Analyse von Zuverlässigkeitseigenschaften zu erarbeiten oder diese zu erweitern. In dieser Arbeit werden mathematische Zusammenhänge und Hintergründe generell nur insoweit behandelt, wie es zur terminologischen Präzisierung dienlich scheint. Grundsätzlich ist das Angebot an Literatur die den Schwerpunkt auf quantitative Betrachtungen legt, sehr vielfältig. Erwähnt seien beispielsweise die bekannten Werke von Börcsök [5] und Birolini [4] die als „Quasi-Standardwerke" bezeichnet werden können. Neben Grundlagen behandeln sie auch komplexe Systeme fundiert (insbesondere [4]) und beachten den generellen normativen Kontext im RAMS-Bereich (insbesondere [5]). Der aktuelle Stand der Normungsarbeit im Bereich der Spezifikation und Implementierung von Automatisierungssystemen, ihr Einfluss auf die industrielle Umsetzung und ihre Weiterentwicklung getrieben durch Anforderungen aus der Praxis sind ein Schwerpunkt der Arbeiten am Lehrstuhl der Automatisierungstechnik von Professor Frey (Universität des Saarlandes), vgl bspw. [6] und [16]. Das Institut von Prof. Bertsche (Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart) ist bekannt für seine Kompetenz im Bereich von Testmethoden mechanischer Komponenten und allgemeiner Zuverlässigkeitsbetrachtungen im Maschinenbau und speziell im Fahrzeugbau. In „Reliability in Automotive and Mechanical Engineering" (siehe [2]) wird die formale Einführung eines breiten Spektrums an Zuverlässigkeits- und Testmethoden durch ihre Anwendung an praktischen Beispielen vertieft; es gilt daher als Standardwerk für diesen Bereich. Bzgl. der Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten sei [1] empfohlen, das eine anwendungsorientierte, kurzweilige und dennoch mathematisch fundierte Einführung in die Zuverlässigkeitstheorie insbesondere für Fahrzeugingenieure bietet. Weiter sei [3] speziell für mechatronische Systeme nahegelegt. Boris Gnedenko und Igor Ushakov „felt that there should be a book covering as much as possibel a spectrum of reliability problems which are understandable to engineers" (aus [7], S. XV) – genau aus diesem Grunde kann „Probabilistic Reliability Engineering" [7] empfohlen werden. Way Kuo und Ming J. Zuo betrachten in [10] alle gängigen Zuverlässigkeitsstrukturen „that have been reported in the literature with emphasis on the more significant ones" (ebd. S. XI). Sehr anschaulich und mit sinnvollen Beispielen behandeln sie das von ihnen abgesteckte Terrain. Mit „Principles of Reliability" aus dem Jahre 1963 (siehe [11]) beweist Erich Prieruschka, dass auch schon vor einem halben Jahrhundert die Prinzipien der Zuverlässigkeit leicht verständlich und dennoch formal einwandfrei dargestellt werden konnten. Schließlich sei „Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme" von Prof. Schnieder (Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Technische Universität Braunschweig) erwähnt. Hier hat sich Prof. Schnieder schon 1999 u. a. den Herausforderungen divergierender interner und externer Modelle im Kontext der Automatisierungstechnik gestellt. Diese Divergenz zwischen dem internen „mentalen Referenzmodell" [12] und {s}einer externen Repräsentation wird

dort ausgiebig und vielschichtig behandelt. Dem Autor der vorliegenden Arbeit ist keine derartige Abhandlung älteren Datums bekannt.

Das Kommunikationsmodell nach Shannon und Weaver berücksichtigt auch Störungen die im Kanal entstehen („Rauschen“). Auf diese Weise können sich empfangene von gesendeten Signalen unterscheiden. Solches Rauschen und die damit einhergehenden Kommunikationsunschärfen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Daher die folgende Festlegung:

Festlegung 1.1 (Rauschen als Kommunikationsstörung)
In dieser Arbeit werden Kommunikationsstörungen durch Rauschen nicht betrachtet. □

1.2 Der Aufbau dieser Arbeit

Im Folgenden wird der Aufbau der vorliegenden Arbeit mit kurzen Angaben der Kapitelinhalte erläutert, siehe hierzu auch Abb. 1.2.

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der hier benutzten Beschreibungsmittel dargestellt. Im Kontext der mathematischen Grundlagen finden auch die Aussagen- wie die Prädikatenlogik in Syntax und Semantik Beachtung. UML-Klassendiagramme dienen in dieser Arbeit insbesondere zur Beschreibung der oben genannten „Binnenstruktur“ von Begriffen. Anschließend wird mit Petrinetzen ein formales Beschreibungsmittel eingeführt, das zur expliziten Beachtung der Dualität von Zuständen und Ereignissen bei der Modellierung zwingt und damit der Präzisierung dienlich ist. Schließlich werden im zweiten Kapitel die zentralen Konstituenten der Semiotik erarbeitet. Den Schwerpunkt bilden an dieser Stelle die Relationen zwischen Begriffen und Bezeichnungen. Neben einer informellen Einführung in diesen Komplex, werden diese Relationen auch mathematisch abgebildet. Dies wird im Folgenden einen „Hebel“ bieten, mit dem Kommunikationsunschärfen, wie auch sprachliche oder semantische Lücken entdeckt und erklärt werden können.

Das dritte Kapitel widment sich der Systemtheorie und der Semiotik und schließlich der Verschränkung dieser beiden Disziplinen: Nach einem kurzen historischen Abriss zur Systemtheorie werden die Konstituenten von Systemen definiert. Dort wird auch begründet, dass über den systemischen Charakter eines Gegenstandes nur subjektiv entschieden werden kann. Anschließend wird eine in der Literatur verbreitete Klassifizierung von Systemen formalisiert. Vorbereitend werden in der Folge die essentiellen Konzepte „Hierarchie“ und die eng verwandte „Emergenz“ formal definiert. Nachdem anschließend die Konstituenten der Semiotik dargelegt wurden, werden im Rahmen des trilateralen Zeichenmodells die im zweiten Kapitel bereits eingeführten Relationen zwischen Begriffen und Bezeichnungen erweitert. Diese Erweiterung ermöglicht schließlich die Relationierung von System-Hierarchieebenen zu Sprach-Hierarchieebenen. Ein Resultat ist die formale Begründbarkeit von Kommunikationsunschärfen wie Synonymien oder Ambiguitäten oder die Genese sprachlicher wie kognitiver Lücken bspw. im Zusammenhang

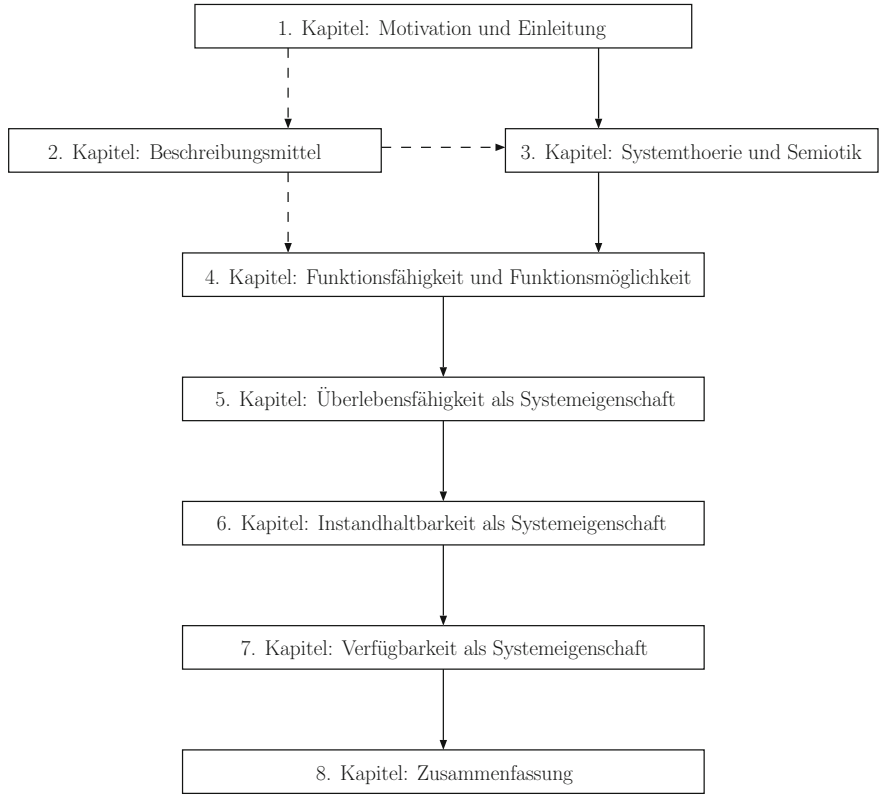

Abb. 1.2 Schematische Darstellung der Struktur der vorliegenden Arbeit

der interdisziplinären Kommunikation. Die intensive Betrachtung der intensionalen Attributhierarchisierung vervollständigt schließlich das Fundament auf dem die folgenden Kapitel das Gebäude einer formalen, vernetzten und vervollständigten Terminologie der Verlässlichkeit technischer Systeme aufbauen können.

Die ersten Präzisierungen im Kontext der Verlässlichkeit werden im vierten Kapitel vorgenommen: Die explizite Unterscheidung zwischen Funktions*fähigkeit* und Funktions*möglichkeit* und die Relationierung entsprechender Begriffe offenbaren erste Unschärfen der normativen Basis, die in diesem Kapitel insbesondere durch Vervollständigung geschlossen werden können. Integrierte Modelle der hier im Fokus stehenden Zustände und Zustandsübergänge schließen dieses Kapitel ab.

Das fünfte Kapitel schließt mit der Formalisierung der Überlebensfähigkeit an. Zunächst werden die in diesem Kontext essentiellen Begriffe definiert und anschließend hinsichtlich ihrer statischen Struktur mittels UML-Klassendiagrammen und hinsichtlich ihres potentiellen Verhaltens mittels Petrinetzen relationiert. Die terminologisch-strukturelle Beschreibung wird durch intensionale Attributhierarchisierung durchgeführt. Im Kontext

der Betrachtung von Mittelwerten ausfallfreier Zeiten wird auf die im Allgemeinen unpräzise Definition der *Mean Time To Failure* eingegangen und es werden entsprechende Präzisierungen vorgeschlagen. Die Beeinflussung der Überlebensfähigkeit durch die (Redundanz-)Struktur eines Systems wird anhand entsprechender Petrinetzmodelle beispielhaft dar- und gegenübergestellt. Die vergleichende Betrachtung von *Common Mode* und *Common Cause Failures* schließt dieses Kapitel mit einer integrierten Petrinetzdarstellung ab.

Kapitel sechs zur Instandhaltbarkeit ist ähnlich aufgebaut wie das fünfte Kapitel: Nach der Vorstellung der essentiellen Definitionen, werden auch die entsprechenden Begriffe in diesem Kontext relationiert. Insbesondere durch die Relationierung der Instandhaltungsarten (bspw. *maintainability*, *corrective maintainability*, *preventive maintainabiliy*, *active corrective maintainability*) und den Definitionen entsprechender Zeitdauern werden einige sprachliche und auch kognitive Lücken offenbart. Dies veranlasst eine „abilty to prepare“ und entsprechend eine „extended maintainability“ einzuführen, die diese schließt. Ähnlich wie für die Überlebensfähigkeit, werden auch im Kontext der Instandhaltbarkeit Mittelwerte präzisiert und mathematisch dargelegt.

Die Verfügbarkeit von Systemen, als eine durch die Überlebensfähigkeit wie auch durch die Instandhaltbarkeit beeinflusste Eigenschaft, wird im siebten Kapitel betrachtet. Der Aufbau folgt dabei im Grundsatz wieder den vorhergehenden beiden Kapiteln. Die Relationierung entsprechender Begriffe wird hier im Wesentlichen durch Integration der im Rahmen der Überlebensfähigkeit und Instandhalbarkeit eingeführten Begriffsnetze und -hierarchien vollzogen. Die Betrachtung der Zuverlässigkeit als der, die Überlebensfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Verfügbarkeit subsumierender Begriff, rundet dieses Kapitel ab.

Im inhaltlich letzten Kapitel dieser Arbeit werden Sicherheitsbegriffe im Kontext der technischen Verlässlichkeit untersucht. Zunächst wird der Begriff der Sicherheit dem der Gefahr anhand des Grenzrisikos gegenübergestellt. Die Verlässlichkeit kann dann als der die Zuverlässigkeit und die Sicherheit umfassende Begriff eingeführt werden. Schließlich werden am Ende des ersten Abschnitts des achten Kapitels „potentiell gefährdende Systemzustände“ und „potentiell gefährdete Umgebungszustände“ formal eingeführt, auf deren Basis die Definition des „hazard“ formal und damit präzise erarbeitet wird. Auf dieser Basis wird zunächst der Risikobegriff erweitert, im Anschluss können die Konzepte *tolerable hazard rate* und *probability of failure on demand* zunächst formalisiert und schließlich zueinander relationiert werden. Das achte Kapitel schließt mit der formalen Betrachtung von Integritäts- und Kritikalitätsanforderungen – dies, exemplarisch an *instrumented landing systems* aus der Luftfahrt.

Im neunten und letzten Kapitel dieser Arbeit wird schließlich die Essenz der Ergebnisse fragmentarisch zusammengefasst und ein Apell an die zukünftige Normungsarbeit geäußert, in der Hoffnung, die Präzision im Kontext der Terminologiearbeit zu erhöhen.

Konvention 1.1 (deutschsprachige und englischsprachige Bezeichnungen)
Die Bezeichnungen von Begriffen werden in dieser Arbeit meist aus dem englischsprachigen übernommen und nur in Ausnahmen übersetzt. Dies hat zwei Gründe: Zum Einen sind die meisten der englischsprachigen Bezeichnungen auch im deutschsprachigen Raum weit verbreitet; darüber hinaus besteht bei (neuen) Übersetzungen zudem die Gefahr neue Mehrdeutigkeiten und Unschärfen zu generieren.

Literatur

1. Bernd Bertsche. *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Springer, 3. Auflage, 2004.
2. Bernd Bertsche. *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Springer, 2008.
3. Bernd Bertsche, Peter Göhner, Uwe Jensen, Wolfgang Schinkothe und Hans-Joachim Wunderlich. *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Springer, 1. Auflage, 2009.
4. Alessandro Birolini. *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*. Springer, Berlin, 1997.
5. Josef Börcsök. *Elektronische Sicherheitssysteme – Hardwarekonzepte, Modelle und Berechnung*. Hüthig Verlag Heidelberg, 2007.
6. Georg Frey und K. Thramboulidis. *Einbindung der IEC 61131 in modellgetriebene Entwicklungsprozesse. Proceed the Kongress Automation, June 2011:21–24, extended 12–page on CD*, 2011.
7. Boris V. Gnedenko und Igor A. Ushakov. *Probabilistic Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, 1995.
8. IEC-60050-191. *IEC 60050-191 – Ed.1.0, International Elektrotechnical Vocabulary*. International Electrotechnical Commission, 12 1990.
9. IEC-60050-191. *IEC 60050-191 – Ed.2.0, International Elektrotechnical Vocabulary (CD)*. International Electrotechnical Commission, 12 1990.
10. Way Kuo und Ming J. Zuo. *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, 2002.
11. Erich Pieruschka. *Principles of Reliability*. Prentice-Hall – International Series in Electrical Engineering, 1963.
12. Eckehard Schnieder. *Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Vieweg Verlag, 1999.
13. Eckehard Schnieder und Lars Schnieder. *Terminologische Präzisierung des Systembegriffs, Terminological concretization of the system concept.* atp Edition 9:45–59, 2010.
14. Lars Schnieder. *Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2010.
15. Claude E. Shannon und Warren Weaver. *Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana 1949.
16. K. Thramboulidis und Georg Frey. *An MDD Process for IEC 61131 – based Industrial Automation Systems*. Proceed the 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA September 2011):DOI 10.1109/ETFA.2011.6059118, 2011.

Grundlagen der verwendeten Beschreibungsmittel

2

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Beschreibungsmittel dargelegt, die zur Formalisierung und Vernetzung von Verlässlichkeitsbegriffen der technischen Zuverlässigkeit in den folgenden Kapiteln Anwendung finden: Die Aussagenlogik, wie auch die Prädikatenlogik erster Stufe, anschließend die grundlegenden Konzepte der Wahrscheinlichkeitstheorie. Zur visuellen Darstellung statischer Begriffsrelationen, insbesondere Generalisierungen und Aggregationen, werden in Abschn. 2.2 die essentiellen Konzepte der UML-Klassendiagramme vorgestellt. Zur formalen grafischen Modellierung des Verhaltens von Systemen und damit die Relationierung entsprechender zustands- und ereignisbezogener Begriffe, werden schließlich in Abschn. 2.3 kausale wie stochastische Petrinetze eingeführt.

Grundsätzlich werden alle in diesem Kapitel betrachteten Beschreibungsmittel und Konzepte jeweils nur in dem Umfang vorgestellt, wie es für die weiteren Inhalte dieser Arbeit notwendig ist. Im Rahmen der Semiotik in Abschn. 2.4 werden darüber hinaus in Abschn. 2.4.2 die Relationen zwischen Bezeichnungen und Begriffen formal gefasst. Auf dieser Basis können die Gründe von Kommunikationsunschärfen wie bspw. *kognitive Lücken* oder *Ambiguitäten* formal spezifiziert und in Kap. 3 zur Relationierung von systemtheoretischen und semiotischen Konzepten nutzbar gemacht werden.

2.1 Mathematische Grundlagen

Zu den mathematischen Grundlagen subsumieren wir die Grundlagen der Aussagen- wie der Prädikatenlogik, grundlegende Eigenschaften von Relationen und Abbildungen und schließlich die Basis der Wahrscheinlichkeitstheorie mit einigen einfachen Verteilungsfunktionen, die im Kontext der technischen Zuverlässigkeit häufig gebraucht werden.

J.R. Müller, *Die Formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit Technischer Systeme*,
DOI 10.1007/978-3-662-46922-4_2

2.1.1 Aussagen- und Prädikatenlogik

In diesem Abschnitt werden die syntaktischen Grundlagen der Aussagenlogik und der Prädikatenlogik erster Stufe vorgestellt. Auf eine formale Einführung der Semantik dieser Logiken wird verzichtet. Die hier dargelegten Definitionen stammen aus [24].

Definition 2.1 (Syntax der Aussagenlogik)
Eine *atomare Formel* hat die Form A_i, mit $i = 1, 2, 3, \ldots$. *Formeln* werden durch folgenden induktiven Prozess definiert:

1. Alle atomaren Formeln sind Formeln.
2. Für alle Formeln F und G sind $(F \wedge G)$ und $(F \vee G)$ Formeln.
3. Für jede Formel F ist $\neg F$ eine Formel.

Eine Formel der Bauart $\neg F$ heißt *Negation* von F, $(F \wedge G)$ heißt *Konjunktion* von F und G, $(F \vee G)$ heißt *Disjunktion* von F und G. Eine Formel F, die als Teil einer Formel G auftritt, heißt *Teilformel* von G. □

Festlegung 2.1 (abkürzende Schreibweisen $\longrightarrow$ und $\longleftrightarrow$)
Es seien F_1 und F_2 Formeln nach Definition 2.1. Folgende abkürzende Schreibweisen sind üblich:

$$(F_1 \longrightarrow F_2) \text{ statt } (\neg F_1 \vee F_2)$$
$$(F_1 \longleftrightarrow F_2) \text{ statt } ((F_1 \wedge F_2) \vee (\neg F_1 \wedge \neg F_2)) .$$ □

Festlegung 2.2 (Semantik der Aussagenlogik)
Da die Semantik der Aussagenlogik meist durch Rückgriff auf natürlichsprachliche Wörter wie „und“ und „oder“ definiert wird, verzichten wir in dieser Arbeit auf eine formale Definition und beschränken uns auf die folgenden hinreichend intuitiven Festlegungen:

1. Das Symbol $\wedge$ modelliert das umgangssprachliche Wort „und“. Die Formel $F \wedge G$ ist erfüllt, wenn F *und* G erfüllt sind.
2. Das Symbol $\vee$ modelliert das umgangssprachliche Wort „oder“. Die Formel $F \vee G$ ist erfüllt, wenn F *oder* G erfüllt ist.
3. Das Symbol $\neg$ modelliert das umgangssprachliche Wort „nicht“. Die Formel $\neg F$ ist erfüllt, wenn *nicht* F erfüllt ist, d.h. wenn F nicht erfüllt ist.

Für die in Festlegung 2.1 als syntaktische Abkürzungen eingeführten Symbole gilt: $\longrightarrow$ steht für „impliziert“, „daraus folgt“, bzw. steht $F \longrightarrow G$ für „wenn F dann G“. Letztlich steht $\longleftrightarrow$ für „genau dann wenn“. □