

DIN EN 61703



ICS 03.120.30; 29.020

Ersatz für
DIN EN 61703:2002-09
Siehe Anwendungsbeginn

**Mathematische Ausdrücke für Begriffe der Zuverlässigkeit,
Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft
(IEC 61703:2016);
Deutsche Fassung EN 61703:2016**

Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms

(IEC 61703:2016);
German version EN 61703:2016

Expressions mathématiques pour les termes de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de logistique de maintenance

(IEC 61703:2016);
Version allemande EN 61703:2016

Gesamtumfang 102 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE



Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2016-09-16 angenommene Europäische Norm als DIN-Norm ist 2017-08-01.

Für DIN EN 61703:2002-09 besteht eine Übergangsfrist bis 2019-09-16.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 61703:2013-11.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 132 „Zuverlässigkeit“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 56 „Dependability“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61703:2002-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Norm wurde dahingehend geändert, dass sie in sich abgeschlossen ist;
- b) die Norm differenziert nun die Betrachtungsweise zwischen individuellen Einheiten und Systemen;
- c) in der Norm wurde eine Verallgemeinerung von Zuverlässigkeitskonzepten für Systeme herbeigeführt, bestehend aus mehreren Komponenten:
 - Einführung von bedingter Ausfalldichte (Vesely-Ausfallrate),
 - Einführung von Zustandsübergangsmodellen und Markov-Modellen,
 - Verallgemeinerung der Verfügbarkeit auf Produktionsverfügbarkeit;
- d) in der Norm wurden Grafiken zur Illustration verschiedener Konzepte eingeführt;
- e) die Deutsche Fassung wurde in den Abschnitten 2 und 3 sowie im Anhang ZA an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 61703: 2002-09

Mathematische Ausdrücke für Begriffe der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit,
Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft
(IEC 61703:2016)

Mathematical expressions for reliability,
availability, maintainability and maintenance
support terms
(IEC 61703:2016)

Expressions mathématiques pour les termes de
fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de
logistique de maintenance
(IEC 61703:2016)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2016-09-16 angenommen. CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC Management Centre oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem CEN-CENELEC Management Centre mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2016 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 61703:2016 D

Europäisches Vorwort

Der Text des Dokuments 56/1682/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe der IEC 61703, erarbeitet vom IEC/TC 56 „Dependability“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 61703:2016 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2017-06-16
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2019-09-16

Dieses Dokument ersetzt EN 61703:2002.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61703:2016 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung sind unter „Literaturhinweise“ zu den aufgelisteten Normen die nachstehenden Anmerkungen einzutragen:

IEC 61508 (alle Teile)	ANMERKUNG	Harmonisiert in der Reihe EN 61508.
IEC 61511 (alle Teile)	ANMERKUNG	Harmonisiert in der Reihe EN 61511.
IEC 61025	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61025.
IEC 61078	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61078.
IEC 61165	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61165.

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	2
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	13
4.1 Allgemeines	13
4.2 Verwendete Abkürzungen	13
4.3 Verwendete Symbole	14
5 Allgemeine Modelle und Annahmen	18
5.1 Bestandteile der Klarzeiten und der Unklarzeiten	18
5.2 Einführung in Modelle und Annahmen	19
5.3 Methode der Zustandsübergangsmodellierung	20
5.4 Modell und Annahmen für nicht instandsetzbare individuelle Einheiten	22
5.5 Modell und Annahmen für instandsetzbare individuelle Einheiten	23
5.5.1 Annahmen für instandsetzbare, individuelle Einheiten	23
5.5.2 Augenblickliche Instandsetzung	24
5.5.3 Nicht augenblicklich Instandsetzung	25
5.6 Gegenüberstellung von Einheiten im Dauerbetrieb (COI) und Einheiten im Aussetzbetrieb (IOI)	26
6 Mathematische Modelle und Ausdrücke	27
6.1 Systeme	27
6.1.1 Allgemeine Bemerkungen	27
6.1.2 Ausdrücke zur Verfügbarkeit	29
6.1.3 Ausdrücke zur Überlebenswahrscheinlichkeit	36
6.1.4 Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen [192-05-13] und mittlerer Ausfallabstand	40
6.1.5 Momentane Ausfallrate [192-05-06] und bedingte Ausfalldichte (Vesely-Ausfallrate)	41
6.1.6 Ausfallhäufigkeit und unbedingte Ausfalldichte [192-05-08]	44
6.1.7 Vergleich zwischen $\lambda(t)$, $\lambda_V(t)$, $z(t)$ und $f(t)$ für große und kleine Werte der MTTR	47
6.1.8 Auf die Wiederherstellung bezogene Ausdrücke	47
6.2 Nicht instandsetzbare individuelle Einheiten	49
6.2.1 Allgemeine Bemerkungen	49
6.2.2 Momentane Verfügbarkeit [192-08-01]	50
6.2.3 Überlebenswahrscheinlichkeit [192-05-05]	50
6.2.4 Momentane Ausfallrate [192-05-06]	51
6.2.5 Mittlere Ausfallrate [192-05-07]	52
6.2.6 Mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall [192-05-11]	53

	Seite
6.3 Instandsetzbare individuelle Einheiten mit einer Wiederherstellungsdauer gleich Null	54
6.3.1 Allgemeine Bemerkungen	54
6.3.2 Überlebenswahrscheinlichkeit [192-05-05]	55
6.3.3 Momentane Ausfalldichte [192-05-08].....	56
6.3.4 Asymptotische Ausfalldichte [192-05-10]	58
6.3.5 Mittlere Ausfalldichte [192-05-09].....	59
6.3.6 Mittlerer Ausfallabstand (siehe 3.3).....	60
6.3.7 Mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall [192-05-11].....	60
6.3.8 Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen [192-05-13].....	61
6.3.9 Momentane Verfügbarkeit [192-08-01], mittlere Verfügbarkeit [192-08-05] und stationäre mittlere Verfügbarkeit [192-08-07].....	61
6.3.10 Mittlere Klardauer [192-08-09].....	61
6.4 Instandsetzbare individuelle Einheiten mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null	62
6.4.1 Allgemeine Bemerkungen	62
6.4.2 Überlebenswahrscheinlichkeit [192-05-05]	62
6.4.3 Momentane Ausfalldichte [192-05-08].....	64
6.4.4 Asymptotische Ausfalldichte [192-05-10]	67
6.4.5 Mittlere Ausfalldichte [192-05-09].....	68
6.4.6 Mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall [192-05-11].....	70
6.4.7 Mittlerer Ausfallabstand (siehe 3.3).....	71
6.4.8 Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen [192-05-13].....	71
6.4.9 Momentane Verfügbarkeit [192-08-01]	72
6.4.10 Momentane Nichtverfügbarkeit [192-08-04].....	73
6.4.11 Mittlere Verfügbarkeit [192-08-05].....	75
6.4.12 Mittlere Nichtverfügbarkeit [192-08-06].....	77
6.4.13 Stationäre mittlere Verfügbarkeit [192-08-07]	78
6.4.14 Stationäre mittlere Nichtverfügbarkeit [192-08-08].....	79
6.4.15 Mittlere Klardauer [192-08-09].....	80
6.4.16 Mittlere Unklardauer [192-08-10].....	82
6.4.17 Instandhaltbarkeit [192-07-01].....	83
6.4.18 Momentane Instandsetzungsrate [192-07-20]	84
6.4.19 Mittlere Reparaturdauer [192-07-21].....	87
6.4.20 Mittlere aktive Instandsetzungsdauer [192-07-22]	88
6.4.21 Mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung [192-07-23].....	89
6.4.22 Mittlere administrative Verzugsdauer [192-07-26]	90
6.4.23 Mittlere logistische Verzugsdauer [192-07-27].....	91
Anhang A (informativ) Leistungsmerkmale und Deskriptoren	92
Anhang B (informativ) Zusammenfassung von auf die Dauer bis zum Ausfall bezogenen Messgrößen.....	93

Anhang C (informativ) Vergleich einiger Zuverlässigkeitsmessgrößen für dauernd betriebene Einheiten	96
Literaturhinweise	98
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	100
Bilder	
Bild 1 – Bestandteile der Klarzeit	18
Bild 2 – Bestandteile der Unklarzeit	18
Bild 3 – Abkürzungen bezüglich Ausfallzeiten.....	19
Bild 4 – Einfaches Zustandsübergangsdiagramm.....	21
Bild 5 – Musterbeispiel (Chronogramm) bezüglich des Systems in Bild 4.....	22
Bild 6 – Zustandsübergangsdiagramm für eine nicht instandsetzbare individuelle Einheit	22
Bild 7 – Musterbeispiel einer nicht instandsetzbaren individuellen Einheit	23
Bild 8 – Zustandsübergangsdiagramm einer augenblicklich instandsetzbaren individuellen Einheit	24
Bild 9 – Musterbeispiel einer instandsetzbaren individuellen Einheit mit einer Wiederherstellungsdauer gleich Null	25
Bild 10 – Zustandsübergangsdiagramm für eine instandsetzbare individuelle Einheit.....	25
Bild 11 – Musterbeispiel einer instandsetzbaren individuellen Einheit mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null	26
Bild 12 – Vergleich eines betriebsbereiten Zeitintervalls für eine COI und eine IOI	27
Bild 13 – Äquivalente Betriebszeit für IOI-Einheiten	27
Bild 14 – Zustandsübergangs-Graph für ein einfaches redundantes System.....	28
Bild 15 – Markov-Graph für ein einfaches redundantes System.....	28
Bild 16 – Entwicklung der Zustandswahrscheinlichkeiten nach Markov-Modell in Bild 15	29
Bild 17 – Entwicklung von $A(t)$ und $U(t)$ bezüglich des Markov-Modells in Bild 15	30
Bild 18 – Entwicklung der $Ast_i(0, t)$ bezüglich des Markov-Modells in Bild 15.....	31
Bild 19 – Momentane Verfügbarkeit und mittlere Verfügbarkeit einer periodisch geprüften Einheit.....	33
Bild 20 – Beispiel eines einfachen Produktionssystems	34
Bild 21 – Zeitliche Entwicklung von $A(t)$ und $K(t)$	35
Bild 22 – Darstellung des Überlebenswahrscheinlichkeitsverhaltens eines Systems im Zeitintervall $[0, t]$	36
Bild 23 – Darstellung des Überlebenswahrscheinlichkeitsverhaltens eines Systems im Zeitintervall $[t_1, t_2]$	37
Bild 24 – Zustandsübergänge und Markov-Graph zur Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit.....	37
Bild 25 – Zeitliche Entwicklung der Zustandswahrscheinlichkeiten bezüglich des Markov-Modells in Bild 24	38
Bild 26 – Zeitliche Entwicklung von $R(t)$ und $F(t)$ bezüglich des Markov-Modells in Bild 24	39
Bild 27 – Zeitliche Entwicklung von $Ast_i(0, t)$ bezüglich des Markov-Modells in Bild 24.....	40
Bild 28 – Gegenüberstellung Ausfallabstand und Betriebszeit zwischen Ausfällen.....	40
Bild 29 – Vergleich zwischen $\lambda(t)$ und $\lambda_V(t)$ bezüglich des Modells in Bild 24	43

	Seite
Bild 30 – Vergleich zwischen $z(t)$ und $f(t)$	46
Bild 31 – Vergleich zwischen $\lambda(t)$, $\lambda_V(t)$, $z(t)$ und $f(t)$ für große und kleine Werte der MTTR.....	47
Bild 32 – Darstellung des Überlebenswahrscheinlichkeitsverhaltens eines Systems im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ mit einer Wiederherstellungsdauer individueller Einheiten gleich Null	55
Bild 33 – Musterbeispiel der möglichen Anzahl von Ausfällen zur Erneuerungszeit t	57
Bild 34 – Darstellung des Überlebenswahrscheinlichkeitsverhaltens eines Systems im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ bei einer Wiederherstellungsdauer größer Null einer individuellen Einheit	62
Bild 35 – Zeitliche Entwicklung von $R(t, t + 1/4)$	64
Bild 36 – Musterbeispiel möglicher Reparaturanzahlen zur Erneuerungszeit t	65
Bild 37 – Zeitliche Entwicklung der Ausfalldichte $z(t)$	67
Bild 38 – Zeitliche Entwicklung der mittleren Ausfalldichte $z(t, t + 1/4)$	70
Bild 39 – Darstellung des Verfügbarkeitsverhaltens eines Systems zur Zeit t bei einer Wiederherstellungsdauer größer Null einer individuellen Einheit	72
Bild 40 – Zeitliche Entwicklung der momentanen Verfügbarkeit $A(t)$	73
Bild 41 – Darstellung des Nichtverfügbarkeitsverhaltens eines Systems zur Zeit t bei einer Wiederherstellungsdauer einer individuellen Einheit größer Null	74
Bild 42 – Zeitliche Entwicklung momentanen Nichtverfügbarkeit $U(t)$	75
Bild 43 – Zeitliche Entwicklung der mittleren Verfügbarkeit $\bar{A}(t, t + 1/4)$	76
Bild 44 – Zeitliche Entwicklung der mittleren Nichtverfügbarkeit $\bar{U}(t, t + 1/4)$	78
Bild 45 – Musterbeispiel des individuellen Einheitenzustands	81
Bild 46 – Bildliche Darstellung der Hazardrate-Funktion der Klarzeiten $\lambda_U(t)$	81
Bild 47 – Zeitliche Entwicklung der Instandhaltbarkeit $M(t, t + 16 \text{ h})$	84
Bild 48 – Zeitliche Entwicklung der lognormalen Instandsetzungsrate $\mu(t)$	87
Bild A.1 – Leistungsmerkmale und Deskriptoren.....	92
Tabellen	
Tabelle B.1 – Beziehungen zwischen den Messgrößen mit Bezug auf die Dauer bis zum Ausfall dauernd betriebener Einheiten	93
Tabelle B.2 – Zusammenfassung von Merkmalen einiger kontinuierlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Dauer bis zum Ausfall dauernd betriebener Einheiten	94
Tabelle B.3 – Zusammenfassung von Merkmalen einiger Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Reparaturdauer	95
Tabelle C.1 – Vergleich einiger Zuverlässigkeitsmessgrößen dauernd betriebener Einheiten mit konstanter Ausfallrate λ und Wiederherstellungsrate μ_R	96

Einleitung

IEC 60050-192 enthält Definitionen zu Zuverlässigkeit und ihren Einflussfaktoren Überlebenswahrscheinlichkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsunterstützung zusammen mit weiteren Definitionen von in diesem Gebiet üblicherweise verwendeten Benennungen. Einige dieser Benennungen beschreiben spezielle Messgrößen einzelner Kenngrößen, die mathematisch ausgedrückt werden können.

Für den Anwender sind das Verständnis der mathematischen Bedeutung dieser Ausdrücke und deren Herleitung wichtig. Dies ist der Zweck der vorliegenden Internationalen Norm die, zusammen mit IEC 60050-192 angewendet, praktische Anleitungen bereitstellt, die für die Quantifizierung dieser Messgrößen wesentlich sind. Falls Bedarf an weiteren Informationen besteht, beispielsweise zu einzelnen statistischen Verfahren, wird auf die Normenreihe IEC 60605 [23]¹⁾ verwiesen.

Anhang A enthält eine schematische Darstellung der Beziehungen zwischen einigen grundlegenden Zuverlässigkeitsbenennungen, zugehörigen Zufallsvariablen sowie wahrscheinlichkeitstheoretischen Deskriptoren und konkretisierenden Adjektiven.

Anhang B enthält eine Zusammenfassung von Messgrößen mit Bezug auf die Dauer bis zum Ausfall.

Anhang C vergleicht einige Zuverlässigkeitsmessgrößen für dauernd betriebene Einheiten.

Die Literaturhinweise stellen Verweise auf die mathematischen Grundlagen dieser Norm zur Verfügung. Insbesondere basiert das mathematische Material auf den Verweisen [2], [6], [8], [9], [13], [14] und [18]; Hinweise zur Erneuerungstheorie (Erneuerungsprozesse und alternierende Erneuerungsprozesse) finden sich in [6], [8], [9], [10], [11], [13], [15] und [17]. Eine weitergehende Behandlung der Erneuerungstheorie findet sich in den Hinweisen [1], [3], [12], [16], [19] und [20]. Weitere Angaben zur Theorie und Anwendung der Markov-Prozesse finden sich in den Hinweisen [3], [9], [10], [15], [16], [17] und [19].

¹⁾ Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

1 Anwendungsbereich

In dieser Internationalen Norm werden mathematische Ausdrücke für ausgewählte Begriffe zu Zuverlässigkeit und ihren Einflussfaktoren Überlebenswahrscheinlichkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsunterstützung bereitgestellt, die in IEC 60050-192:2015 festgelegt sind. Zusätzlich werden einige nicht in IEC 60050-192:2015 behandelte Benennungen definiert. Diese stehen in Bezug zu dem System der Klassen von Einheiten (siehe nachfolgend).

Nach IEC 60050-192:2015 ist Zuverlässigkeit [192-01-22] die Fähigkeit einer Einheit, zu funktionieren, wie und wann gefordert; eine Einheit [192-01-01] kann ein Einzelteil, ein Bauelement, ein Gerät, eine Funktionseinheit, ein Betriebsmittel, ein Subsystem oder ein System sein.

Um mathematische Einschränkungen ausreichend berücksichtigen zu können, wird in dieser Norm zwischen den individuellen Einheiten unterschieden, die für sich genommen als Ganzes betrachtet werden können (z. B. einzelne Bauelemente), und den Systemen, die aus mehreren individuellen Einheiten bestehen. In dieser vorliegenden Norm werden mathematische Ausdrücke für Systeme wie auch individuelle Einheiten allgemein behandelt; die leichter zu modellierenden individuellen Einheiten werden jedoch hinsichtlich ihrer Reparaturaspekte eingehender analysiert.

Folgende Klassen von Einheiten werden getrennt behandelt:

- Systeme;
- einzelne individuelle Einheiten:
 - nicht instandsetzbare [192-01-12];
 - instandsetzbare [192-01-11]:
 - i) mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung gleich Null (oder einer vernachlässigbaren Dauer);
 - ii) mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null.

In dieser Norm werden folgende grundlegende mathematische Modelle verwendet, mittels derer die Zuverlässigkeitsmessgrößen quantifiziert werden können; mit diesen Modellen können die nicht immer leicht verständlichen Zuverlässigkeitskonzeptionen erklärt werden, die Norm bleibt dabei in sich geschlossen und die mathematischen Formeln bleiben so einfach wie möglich:

- Systeme:
 - Zustandsübergangsmodelle;
 - Markov-Modelle.
- einzelne individuelle Einheiten:
 - Zufallsvariable (Dauer bis zum Ausfall) für nicht instandsetzbare Einheiten;
 - einfacher (gewöhnlicher) Erneuerungsprozess für instandsetzbare Einheiten mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung gleich Null;
 - einfacher (gewöhnlicher), alternierender Erneuerungsprozess für instandsetzbare Einheiten mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null.

Die Anwendung der einzelnen Zuverlässigkeitsmessgrößen wird durch einfache Beispiele erläutert.

Diese Norm ist hauptsächlich auf die Zuverlässigkeit von Geräten anwendbar, viele Begriffe und deren Definitionen können jedoch auch auf Software enthaltende Einheiten angewendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-192:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability* (verfügbar unter <http://www.electropedia.org>)

ISO 3534-1:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-192:2015, ISO 3534-1 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Für ein leichteres Auffinden der vollständigen Definition wird für jeden Begriff [mittels rechteckiger Klammern] auf IEC 60050-192 unmittelbar hinter dem Begriff verwiesen, beispielsweise:

mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung [192-07-23].

Die in Abschnitt 3 genannten Benennungen und Definitionen, die nicht in IEC 60050-192 aufgeführt sind, werden verwendet, um die Darstellung mathematischer Ausdrücke einiger in IEC 60050-192 enthaltener Benennungen zu erleichtern. Einige Begriffe sind IEC 60050-192 entnommen und für die Bedürfnisse dieser Norm modifiziert worden.

3.1

momentane Wiederherstellungsdichte

Wiederherstellungsdichte

Wiederherstellungshäufigkeit

$\nu(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der mittleren Anzahl von Wiederherstellungen [192-06-23] einer instandsetzbaren Einheit [192-01-11] während eines Zeitintervalls $[t, t + \Delta t]$, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, die Einheit ist zum Zeitpunkt $t = 0$ so gut wie neu

$$\nu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{E[N_R(t + \Delta t) - N_R(t)] \text{ so gut wie neu bei } t=0}{\Delta t}$$

Dabei ist

$N_R(t)$ die Anzahl der Wiederherstellungen im Zeitintervall $[0, t]$;

E der Erwartungswert.

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Unterschied zwischen der Wiederherstellungsdichte und der Instandsetzungsrate hängt von folgenden Bedingungen ab: Die Einheit ist so gut wie neu zur Zeit $t = 0$ hinsichtlich der Wiederherstellungsdichte, und hinsichtlich der Instandsetzungsrate beginnt die Instandsetzung zur Zeit $t = 0$. Aus einer mathematischen Sichtweise entspricht die Instandsetzungsrate der unbedingten Ausfalldichte (siehe 3.8).

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Maßeinheit für die momentane Ausfallrate ist die Maßeinheit der Zeit hoch -1 .

3.2

momentane Instandsetzungsrate

Instandsetzungsrate

$\mu(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Instandsetzung in einem Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ beendet wird, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, dass die Instandsetzung zur Zeit $t = 0$ begonnen hat und nicht vor der Zeit t beendet ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Unterschied zwischen der Wiederherstellungsdichte und der Instandsetzungsrate hängt von folgenden Bedingungen ab: Die Einheit ist so gut wie neu zur Zeit $t = 0$ hinsichtlich der Wiederherstellungsdichte, und hinsichtlich der Instandsetzungsrate beginnt die Instandsetzung zur Zeit $t = 0$. Aus einer mathematischen Sichtweise entspricht die Instandsetzungsrate der Ausfallrate (siehe 3.6).

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-07-20, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde ersetzt und Anmerkung 2 zum Begriff entfernt]

3.3 **mittlerer Ausfallabstand**

METBF (en: mean time between failures)

Erwartungswert der zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen verstrichenen Zeit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Benennung und Definition „mittlerer Ausfallabstand“ ist in IEC 60050-192 entfallen. Der Begriff war in IEC 60050-191 definiert als „Erwartungswert der Verteilung der Ausfallabstände“. Die Definition wurde modifiziert, um die Abkürzung METBF (en: mean elapsed time between failures) zu erklären, die in dieser Norm verwendet wird. Mit dieser Benennung soll jegliche Verwechslung zwischen mittlerem Ausfallabstand (METBF) und der mittleren Betriebszeit zwischen Ausfällen (MTBF) vermieden werden.

[QUELLE: IEC 60050-191:1990, 191-12-08, modifiziert – Abkürzung und Anmerkung 1 zum Begriff zugefügt]

3.4 **Verteilungsfunktion der Klarzeit**

Funktion, die jedem Wert t die Wahrscheinlichkeit zuordnet, dass die Dauer eines Klarzeitintervalls kleiner oder gleich t ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Falls die Klarzeit (absolut stetig) positiv und eine kontinuierliche Zufallsvariable ist, dann ist $F_U(0) = 0$ und

$$F_U(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda_U(x) dx\right)$$

Dabei ist $\lambda_U(t)$ die momentane Klarzeit-Hazardrate-Funktion.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Verteilungsfunktion der Klarzeit ist die allgemeine Klarzeitverteilung, die sowohl für Einheiten im Dauerbetrieb (COI) (en: continuously operating item) als auch für Einheiten im Aussetzbetrieb (IOI) (en: intermittently operating item) gilt. Für COIs gilt $F_U(t) = F(t)$.

Anmerkung 3 zum Begriff: Falls die Klardauer exponentiell verteilt ist, gilt

$$F_U(t) = 1 - \exp(-t/MUT)$$

Dabei ist MUT die mittlere Klardauer.

In diesem Falle wird der Kehrwert der MUT mit λ_U bezeichnet und $\lambda_U = 1/MUT$.

3.5 **momentane Klarzeit-Hazardrate-Funktion** **Klarzeit-Hazardrate-Funktion**

$\lambda_U(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Klarzeit innerhalb des Zeitintervalls $[t, t + \Delta t]$ enden wird, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, die Klarzeit hat bei $t = 0$ begonnen und hat nicht vor der Zeit t geendet

Anmerkung 1 zum Begriff: Die momentane Klarzeit-Hazardrate-Funktion wird durch nachfolgende Formel ausgedrückt:

$$\lambda_U(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{F_U(t) - F_U(t + \Delta t)}{1 - F_U(t)} = \frac{f_U(t)}{1 - F_U(t)}$$

Dabei ist $F_U(t)$ die Klarzeit-Verteilungsfunktion und $f_U(t)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte^{N1)} der Klarzeiten.

Anmerkung 2 zum Begriff: $\lambda_U(t)$ ist die allgemeine Hazardrate für die Klarzeiten, gültig sowohl für COI als auch für IOI. Für COIs gilt $\lambda_U(t) = \lambda(t)$ (siehe 3.6).

Anmerkung 3 zum Begriff: Falls die Klarzeit exponentiell verteilt ist, dann ist die momentane Klarzeit-Hazardrate-Funktion zeitlich konstant und wird mit λ_U bezeichnet.

Anmerkung 4 zum Begriff: Die Maßeinheit für die momentane Klarzeit-Hazardrate-Funktion ist die Maßeinheit der Zeit hoch -1 .

3.6 momentane Ausfallrate Ausfallrate

$\lambda(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Zeitpunkt eines Ausfalls einer Einheit in ein Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ fällt, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, dass sich der Ausfall nicht im Zeitintervall $[0, t]$ ereignet

Anmerkung 1 zum Begriff: Die momentane Ausfallrate wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{1}{\Delta t} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Hierbei sind $F(t)$ und $f(t)$ jeweils die Verteilungsfunktion bzw. die Wahrscheinlichkeitsdichte zum Ausfallzeitpunkt, und $R(t)$ ist die Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion bezogen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t_1, t_2)$ bei $R(t) = R(0, t)$.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einschränkung auf nicht instandsetzbare Einheiten in der Definition in IEC 60050-192 kann entfernt werden, um so diese Definition für jede Art von Einheiten zu verallgemeinern, beispielsweise Systeme oder individuelle Einheiten, seien diese instandsetzbar oder nicht.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die momentane Ausfallrate ist die Klarzeit-Hazardrate-Funktion für COIs. In diesem Falle ist $\lambda(t) = \lambda_U(t)$ (siehe 3.5).

Anmerkung 4 zum Begriff: Sofern $\Delta t \rightarrow 0+$, so ist die Ausfallrate die bedingte Wahrscheinlichkeit je Zeiteinheit, dass die Betrachtungseinheit zwischen der Zeit t und $t + \Delta t$ ausfällt, vorausgesetzt die Betrachtungseinheit war das gesamte Zeitintervall $[0, t]$ über in einem Klarzustand. Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass die Betrachtungseinheit zur Zeit 0 so gut wie neu ist.

Anmerkung 5 zum Begriff: Die momentane Ausfallrate kann auch durch folgende Formel ausgedrückt werden:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{E[N(t + \Delta t) - N(t) | \text{Klarzustand während } [0, t]]}{\Delta t}$$

Dabei ist $N(t)$ die Anzahl von Ausfällen im Zeitintervall $[0, t]$, E bezeichnet den Erwartungswert.

Mit dieser Art der Definition wird der Vergleich zwischen einer Ausfallrate mit der bedingten Ausfallintensität und der unbedingten Ausfallintensität möglich.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-05-06, modifiziert – verallgemeinert auf Systeme mit instandsetzbaren Komponenten und um Anmerkungen zum Begriff erweitert]

^{N1)} Nationale Fußnote: Wird auch mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, oft kurz Dichtefunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte oder nur Dichte bezeichnet.

3.7 bedingte Ausfallintensität Vesely-Ausfallrate

$\lambda_V(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der mittleren Anzahl von Ausfällen einer instandsetzbaren Einheit während eines Zeitintervalls $(t, t + \Delta t)$, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, die Einheit befindet sich zur Zeit t in einem Klarzustand und ist zur Zeit $t = 0$ so gut wie neu

Anmerkung 1 zum Begriff: Die momentane Ausfallintensität kann durch folgende Formel ausgedrückt werden:

$$\lambda_V(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{E[N(t + \Delta t) - N(t) | \text{Klarzustand bei } t \text{ und so gut wie neu zur Zeit } t = 0]}{\Delta t}$$

Dabei ist $N(t)$ die Anzahl von Ausfällen im Zeitintervall $[0, t]$, E bezeichnet den Erwartungswert.

Anmerkung 2 zum Begriff: Sofern $\Delta t \rightarrow 0+$, so ist die bedingte Ausfallintensität die Wahrscheinlichkeit je Zeiteinheit, dass die Betrachtungseinheit zwischen t und $t + dt$ ausfällt, vorausgesetzt, die Einheit befindet sich zur Zeit t in einem Klarzustand und ist zur Zeit $t = 0$ so gut wie neu. In besonderen Fällen (schnelle Wiederherstellung) liefert dies eine gute Annäherung der Ausfallrate. Diese Messgröße wurde 1970 von W. E. Vesely [26] eingeführt und wird daher auch Vesely-Ausfallrate genannt.

Anmerkung 3 zum Begriff: Entsprechend den Definitionen sind $\lambda_V(t)$ und $z(t)$ durch die Formel $\lambda_V(t) = z(t)/A(t)$ miteinander verbunden, wobei $A(t)$ die momentane Verfügbarkeit der Betrachtungseinheit zur Zeit t ist.

3.8 unbedingte Ausfallintensität momentane Ausfallintensität Ausfallintensität Ausfallhäufigkeit

$z(t)$

Grenzwert – falls er existiert – des Quotienten aus der mittleren Anzahl von Ausfällen einer instandsetzbaren Einheit während eines Zeitintervalls $(t, t + \Delta t)$, und Δt , sofern Δt gegen Null geht, vorausgesetzt, die Einheit ist zur Zeit $t = 0$ so gut wie neu

Anmerkung 1 zum Begriff: Die momentane Ausfalldichte kann durch folgende Formel ausgedrückt werden:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{E[N(t + \Delta t) - N(t) | \text{so gut wie neu zur Zeit } t = 0]}{\Delta t}$$

Dabei ist $N(t)$ die Anzahl von Ausfällen im Zeitintervall $[0, t]$, E bezeichnet den Erwartungswert, und die implizite Bedingung, dass die Betrachtungseinheit zur Zeit $t = 0$ so gut wie neu sein muss, wurde mit aufgenommen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die unbedingte Ausfallintensität ist die in IEC 60050-192:2015 [192-05-08] definierte Ausfallintensität. Sie wird manchmal auch mit ROCOF benannt (en: rate of occurrence of failure).

Anmerkung 3 zum Begriff: Sofern $\Delta t \rightarrow 0+$, ist die unbedingte Ausfallintensität die Wahrscheinlichkeit je Zeiteinheit dass die Betrachtungseinheit zwischen t und $t + dt$ ausfällt, vorausgesetzt, die Einheit befindet sich zur Zeit $t = 0$ in einem Klarzustand. Hier kann die Betrachtungseinheit zur Zeit t in einem beliebigen Zustand sein, und daher wird hierfür das Adjektiv „unbedingt“ verwendet.

Anmerkung 4 zum Begriff: Entsprechend den Definitionen sind $\lambda_V(t)$ und $z(t)$ durch die Formel $z(t) = A(t) \cdot \lambda_V(t)$ miteinander verbunden, wobei $A(t)$ die momentane Verfügbarkeit der Betrachtungseinheit zur Zeit t ist.

[QUELLE: 60050-192:2015, 192-05-08, modifiziert – Synonyme und weitere Anmerkungen zum Begriff wurden aufgenommen]

3.9 Einheit im Dauerbetrieb

COI (en: continuously operating item)

Einheit, deren Betriebszeitintervall [192-02-05] gleich des betriebsbereiten Zeitintervalls [192-02-17] ist

3.10

Einheit im Aussetzbetrieb

IOI (en: intermittently operating item)

Einheit, deren Betriebszeitintervall [192-02-05] kleiner als das betriebsbereite Zeitintervall [192-02-17] ist

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Fall setzt sich die betriebsbereite Zeit der Einheit zusammen aus den im Betriebszustand [192-02-04], im Leerlauf [192-02-14] und im Bereitschaftszustand [192-02-10] verbrachten Zeiten.

4 Symbole und Abkürzungen

4.1 Allgemeines

Die nachstehend aufgeführten Symbole und Abkürzungen sind weit verbreitet und werden empfohlen, sind aber nicht obligatorisch. Um eine durchgehend konsistente Präsentation im vorliegenden Dokument zu erreichen, können die Bezeichnungen in diesem Dokument von denjenigen in den zitierten Dokumenten abweichen.

4.2 Verwendete Abkürzungen

Abkürzungen	Bedeutung
COI	Einheit im Dauerbetrieb
IOI	Einheit im Aussetzbetrieb
MACMT	mittlere aktive Instandsetzungsdauer, d. h. der Erwartungswert der aktiven Instandsetzungszeit
$\hat{MACMT}$	Schätzwert der mittleren aktiven Instandsetzungsdauer
MAD	mittlere administrative Verzugsdauer
$\hat{MAD}$	Schätzwert der mittleren administrativen Verzugsdauer
$MADT(t_1, t_2)$	mittlere akkumulierte Unklardauer im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\hat{MADT}(t_1, t_2)$	Schätzwert der mittleren akkumulierte Unklardauer im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$MAUT(t_1, t_2)$	mittlere akkumulierte Klardauer im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\hat{MAUT}(t_1, t_2)$	Schätzwert der mittleren akkumulierten Klardauer im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
MDT	mittlere Unklardauer
$\hat{MDT}$	Schätzwert der mittleren Unklardauer
METBF	mittlerer Ausfallabstand
MFDT	mittlere Fehlzustandserkennungszeit, d. h. der Erwartungswert der Fehlzustandserkennungszeit
MLD	mittlere logistische Verzugsdauer
$\hat{MLD}$	Schätzwert der mittleren logistische Verzugsdauer
MMAT	mittlere Dauer eines Instandhaltungsvorgangs, d. h. der Erwartungswert einer gegebenen Instandhaltungsvorgangdauer
MRT	mittlere Reparaturdauer
$\hat{MRT}$	Schätzwert der mittleren Reparaturdauer
MOTBF	mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen

Abkürzungen	Bedeutung
MTD	mittlere technische Verzugsdauer, d. h. der Erwartungswert der technischen Verzugsdauer
MTTF	mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall
$\hat{MTTF}$	Schätzwert der mittleren Betriebszeit bis zum Ausfall
MTTR	mittlere Betriebszeit bis zur Wiederherstellung
$\hat{MTTR}$	Schätzwert der mittleren Betriebszeit bis zur Wiederherstellung
MUT	mittlere Klardauer
$\hat{MUT}$	Schätzwert der mittleren Klardauer
RT_i	beobachtete Reparaturdauer der Einheit i
TTF_i	Dauer bis zum Ausfall der Einheit i
VRT	die Varianz der Reparaturdauer, $VRT = Var[\zeta] = E[\zeta^2] - MRT^2$, wobei ζ eine Zufallsvariable ist, welche für die Reparaturdauer steht, Var bezeichnet die Varianz und E bezeichnet den Erwartungswert

4.3 Verwendete Symbole

Symbole	Bedeutung
$[t_1, t_2]$	Intervall mit der unteren Grenze t_1 und der oberen Grenze t_2 ($t_1 < t_2$)
$Ast_i(t_1, t_2)$	mittlere akkumulierte Verweildauer im Zustand i über das Intervall $[t_1, t_2]$
A	asymptotische Verfügbarkeit
$A(t)$	momentane Verfügbarkeit (Verfügbarkeitsfunktion), d. h. die Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zum Zeitpunkt t in einem Klarzustand anzutreffen
$\bar{A}(t_1, t_2)$	mittlere Verfügbarkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\bar{A}$	asymptotische mittlere Verfügbarkeit
$\hat{A}(t_1, t_2)$	Schätzwert der mittleren Verfügbarkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
Δt	kleine (absolut stetige) positive Zunahme der Zeit, $\Delta t > 0$
dt	Infinitesimale (absolut stetige) positive Zunahme der Zeit (d. h. Δt geht gegen Null)
$E[.]$	Erwartungswert
$F_U(t)$	Klarzeit-Verteilungsfunktion
$f_U(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Dauern der Klarzeitintervalle
	ANMERKUNG 1 Bei COIs ist $f_U(t) = f(t)$.
$f(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der (Betriebs-)Dauern bis zum Ausfall
$\hat{f}(t)$	Schätzwert zum Zeitpunkt t der Wahrscheinlichkeitsdichte der (Betriebs-)Zeiten bis zum Ausfall
$f_{R+U}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Summe der Dauern bis zur Wiederherstellung und der folgenden Klarzeiten
$G(t)$	Verteilungsfunktion der Reparaturdauern
$G_{ACM}(t)$	Verteilungsfunktion der aktiven Instandsetzungsdauer

Symbole	Bedeutung
$G_R(t)$	Verteilungsfunktion der Dauern bis zur Wiederherstellung
$g(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Reparaturdauern
$\hat{g}(t)$	Schätzwert zum Zeitpunkt t der Wahrscheinlichkeitsdichte der Reparaturdauern
$g_{ACM}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der aktiven Instandsetzungsdauern
$g_{AD}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der administrativen Verzugsdauern
$g_D(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Unklarzeitintervalle
$g_{LD}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der logistischen Verzugsdauern
$g_{MA}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der gegebenen Instandhaltungsvorgangsdauer
$g_R(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Dauern bis zur Wiederherstellung
$h_{CTTF}^{(n)}(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Kalenderzeit bis zum n -ten Ausfall, $n \geq 1$
K_A, K_S, K_i	Nominelle (Produktions-)Kapazität bezogen auf eine Einheit A, ein System S oder einen Zustand i
$K(t)$	momentane (Produktions-)Kapazität bezogen auf ein System
k	Anzahl der Reparaturen während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_{ACM}	Anzahl der aktiven Instandsetzungen während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_{AD}	Anzahl der administrativen Verzugsdauern während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_D	Anzahl der Unklarzeitintervalle während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_F	Anzahl der Ausfälle während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_{LD}	Anzahl der logistischen Verzugsdauern während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_O	Anzahl der Ausfälle im Betrieb während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_R	Anzahl der Zeitintervalle bis zur Wiederherstellungen während einer gegebenen Beobachtungsperiode
k_U	Anzahl der Klarzeitintervalle während einer gegebenen Beobachtungsperiode
λ	konstante Ausfallrate, d. h. der Kehrwert der mittleren Betriebszeit bis zum Ausfall (MTTF), falls die Dauern bis zum Ausfall exponentiell verteilt sind
$\lambda(t)$	momentane Ausfallrate
$\lambda(\infty)$	asymptotische Ausfallrate
$\hat{\lambda}$	Schätzwert der konstanten Ausfallrate
$\hat{\lambda}(t)$	Schätzwert der momentanen Ausfallrate zur Zeit t
$\bar{\lambda}(t_1, t_2)$	mittlere Ausfallrate im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
λ_U	konstante Hazardrate-Funktion der Klarzeiten, d. h. der Kehrwert der mittleren Klardauer (MUT), falls die Dauern der Klarzeitintervalle exponentiell verteilt sind
	ANMERKUNG 2 Für COIs gilt: $\lambda_U = \lambda$.
$\lambda_U(t)$	die Hazardrate-Funktion der Klarzeiten

Symbole	Bedeutung
	ANMERKUNG 3 Für COIs gilt: $\lambda_U(t) = \lambda(t)$.
$\lambda_V(t)$	bedingte Ausfalldichte (Vesely-Ausfalldichte)
$\lambda_V(\infty)$	asymptotische bedingte Ausfalldichte (asymptotische Vesely-Ausfalldichte)
$M(t)$	Instandhaltbarkeitsfunktion, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine aktive Instandhaltungsmaßnahme während der Zeit t ausgeführt und abgeschlossen werden kann, wobei $M(t) = M(t_1, t_2)$ für $t_1 = 0$ und $t_2 = t$ gilt
$\hat{M}(t)$	Schätzwert der Instandhaltbarkeitsfunktion zur Zeit t
$M(t_1, t_2)$	Instandhaltbarkeit für das Zeitintervall $[t_1, t_2]$
m	Anzahl der beobachteten Instandhaltungsvorgangsdauern
$m_{\text{MAT}}(t)$	Anzahl der Instandhaltungsvorgangsdauern größer als t ($m_{\text{MAT}}(0) = m$)
μ	konstante Instandsetzungsrate, d. h. der Kehrwert der mittleren Instandsetzungsdauer (MRT), falls die Instandsetzungszeiten exponentiell verteilt sind
$\mu(t)$	momentane Instandsetzungsrate
$\hat{\mu}(t)$	Schätzwert der momentane Instandsetzungsrate zur Zeit t
μ_{ACM}	Kehrwert der mittleren aktiven Instandsetzungsdauer (MACMT), falls die aktiven Instandsetzungszeiten exponentiell verteilt sind
μ_{AD}	Kehrwert der mittleren administrativen Verzugsdauer (MAD), falls die administrativen Verzugsdauern exponentiell verteilt sind
μ_{D}	Kehrwert der mittleren Unklarzeit (MDT), falls die Dauern der Unklarzeitintervalle exponentiell verteilt sind
μ_{LD}	Kehrwert der mittleren logistische Verzugsdauer (MLD), falls die logistischen Verzugsdauern exponentiell verteilt sind
μ_{MA}	konstante Rate des Abschlusses eines gegebenen Instandhaltungsvorganges, falls die Instandhaltungsvorgangsdauern exponentiell verteilt sind
μ_{R}	konstante Rate, mit der eine Einheit in einen betriebsfähigen Zustand wiederhergestellt wird (konstante Wiederherstellungsrate), d. h. der Kehrwert der mittleren Dauer bis zur Wiederherstellung (MTTR), falls die Zeitintervalle bis zur Wiederherstellung exponentiell verteilt sind
$N(t)$	Anzahl der Ausfälle im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$N_{\text{R}}(t)$	Anzahl der Wiederherstellungen im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
n	Gesamtheit der in Betracht gezogenen Einheiten (Grundgesamtheit)
$n_{\text{D}}\{t\}$	Anzahl der Einheiten, die sich zum Zeitpunkt t in einem Unklarzustand befinden
$n_{\text{F}}(t, t + \Delta t)$	Anzahl der im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ beobachteten Ausfälle, wobei die Zeitskala sowohl Klar- als auch Unklarzeiten enthält
$n_{\text{F}}(t_1, t_2)$	Anzahl der im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ beobachteten Ausfälle, wobei die Zeitskala sowohl Klar- als auch Unklarzeiten enthält

Symbole	Bedeutung
$n_R(t)$	Anzahl der instandsetzbaren Einheiten, die zum Zeitpunkt t ($n_R(0) = n$) immer noch repariert werden
$n_R(t + \Delta t) - n_R(t)$	Anzahl der Einheiten, deren Instandsetzung im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ abgeschlossen wurde
$n_S(t)$	Anzahl der (nicht instandsetzbaren) Einheiten, die zum Zeitpunkt t ($n_S(0) = n$) betriebsfähig waren
$n_S(t_1, t_2)$	Anzahl der Einheiten, die zum Zeitpunkt t_1 betriebsfähig und die im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ ohne Ausfall in Betrieb waren
$n_S(t + \Delta t) - n_S(t)$	Anzahl der Einheiten, die im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ ausfallen
$n_U\{t\}$	Anzahl der Einheiten, die sich zum Zeitpunkt t im Klarzustand befinden
$v(t)$	momentane Wiederherstellungsdichte
$P(.)$	Wahrscheinlichkeit. Der Punkt steht für jedes relevante Ereignis oder jede relevante Zufallsvariable
$P_i(t), P_i^{(av)}(t), P_i^{(rel)}(t)$	Wahrscheinlichkeit des Zustandes i in Zustandsübergangsmodellen, Wahrscheinlichkeit des Zustandes i in einem „Verfügbarkeits“-Markov-Graphen (siehe 6.1.2.1), Wahrscheinlichkeit des Zustandes i in einem „Überlebenswahrscheinlichkeits“-Markov-Graphen (siehe 6.1.3.1)
$Prod(t)$	momentane Produktion zur Zeit t
$\overline{Prod}(t_1, t_2)$	mittlere Produktions-Verfügbarkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion, d. h. die Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung bis zur Zeit t , wobei $R(t) = R(t_1, t_2)$ für $t_1 = 0$ und $t_2 = t$
$\hat{R}(t)$	Schätzwert beim Zeitpunkt t der Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion
$R(t_1, t_2)$	Überlebenswahrscheinlichkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\hat{R}(t_1, t_2)$	Schätzwert der Überlebenswahrscheinlichkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ der Überlebenswahrscheinlichkeitsfunktion
$R(t, t + x t)$	bedingte Überlebenswahrscheinlichkeit im Zeitintervall $[t, t + x]$ unter der Annahme, dass sich die Einheit zur Zeit t in einem Klarzustand befindet
ρ	Produktion je Zeiteinheit
t	Zeit, Zeitpunkt
T	Zeitpunkt oder Dauer, je nach Kontext
$\overline{Tbf}(t)$	mittlere vergangene Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Ausfällen, die sich im Zeitintervall $[0, t]$ ereignen
τ	Zeitpunkt oder Prüfintervall je nach Kontext
U	asymptotische Nichtverfügbarkeit
$U(t)$	momentane Nichtverfügbarkeit (Nichtverfügbarkeitsfunktion)
$\overline{U}(t_1, t_2)$	mittlere Nichtverfügbarkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\overline{U}$	asymptotische mittlere Nichtverfügbarkeit
$\hat{\overline{U}}(t_1, t_2)$	Schätzwert der mittleren Nichtverfügbarkeit im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$V(t_1, t_2)$	mittlere Anzahl der Wiederherstellungen im Zeitintervall $[t_1, t_2]$

Symbole	Bedeutung
$Z(t)$	erwartete Anzahl von Ausfällen im Zeitintervall $[0, t]$, $Z(t) = E[N(t)]$, wobei E den Erwartungswert bezeichnet
$z(t)$	momentane Ausfalldichte (Ausfallhäufigkeit)
$z(\infty)$	asymptotische Ausfalldichte
$\hat{z}(t)$	Schätzwert der momentanen Ausfalldichte zur Zeit t
$\bar{z}(t_1, t_2)$	mittlere Ausfalldichte im Zeitintervall $[t_1, t_2]$
$\hat{\bar{z}}(t_1, t_2)$	Schätzwert der mittleren Ausfalldichte im Zeitintervall $[t_1, t_2]$

5 Allgemeine Modelle und Annahmen

5.1 Bestandteile der Klarzeiten und der Unklarzeiten

Für das Verständnis der mathematischen Ausdrücke in dieser Norm ist das Verständnis der Bestandteile der Klarzeiten und Unklarzeiten besonders wichtig. In IEC 60052-192 sind die Klarzeit (in der eine Einheit wie gefordert funktioniert) und die Unklarzeit (in der eine Einheit nicht wie gefordert funktioniert) in ihre einzelnen Bestandteile aufgeteilt. Diese Zeitbegriffe sind in IEC 60050-192 in den Bildern 1 und 2 übersichtlich zusammen gestellt.

Bild 1 und Bild 2 (die aus IEC 60050-192 übernommen und angepasst wurden) fassen jeweils die für diese Norm relevanten Bestandteile der Klarzeit und der Unklarzeit zusammen. (Weder die „Wartungsdauer“ noch die „extern bedingte Nichtverfügbarkeitszeit“ wurden berücksichtigt.) Die in dieser Norm verwendeten Abkürzungen für die Mittelwerte sind in diese Bilder mit aufgenommen worden.

Klarzeitintervall [192-02-02]		
betriebsbereites Zeitintervall [192-02-17]		
Betriebszeit (intervall) [192-02-05]	Nichtbetriebszeitintervall [192-02-07]	
	Zeitintervall des betriebsfreien Zustands [192-02-15]	Zeitintervall des Stand-by-Zustands [192-02-13]
MUT [192-08-09]		

Bild 1 – Bestandteile der Klarzeit

Unklarzeitintervall [192-02-21]						
Nichtbetriebszeitintervall [192-02-07]						
Dauer bis zur Wiederherstellung [192-07-06]						
Instandsetzungsdauer [192-07-07]					Fehlzustands- erkennungs- dauer [192-07-11]	administrative Verzugsdauer [192-07-12]
logistische Verzugsdauer [192-07-13]	aktive Instandsetzungsdauer [192-07-10]					
	technische Verzugsdauer [192-07-15]	Reparaturzeit [192-07-19]				
		Fehlzustands- lokalisierungs- dauer [192-07-18]	Fehlzustands- behebungsdauer [192-07-14]	Funktions- prüfungsdauer [192-07-16]		
MLD [192-07-27]	MTD	MRT [192-07-21]			MFDT	MAD [192-07-26]
	MACMT [192-07-22]					
MTTR [192-07-23]						
MDT [192-08-10]						

Bild 2 – Bestandteile der Unklarzeit

Zur mittleren Dauer bezogen auf die Ausfälle von Betrachtungseinheiten, die sich im Betriebszustand ereignen sind in IEC 60050-192 mehrere Abkürzungen festgelegt. Diese sind in Bild 3 zusammengefasst.

nicht instandsetzbare Einheit [192-01-12]			
Betriebszeit bis zum ersten Ausfall [192-05-02]	Betriebszeit bis zum Ausfall [192-05-01]	Betriebszeit zwischen Ausfällen [192-05-04]	Ausfallabstand [192-05-03]
MTTFF [192-05-12]	MTTF [192-05-11]	MOTBF/MTBF [192-05-13]	METBF
instandsetzbare Einheit [192-01-11]			

Bild 3 – Abkürzungen bezüglich Ausfallzeiten

ANMERKUNG In Fachbüchern zur Zuverlässigkeit wird für den mittleren Ausfallabstand häufig die Abkürzung MTBF (en: mean time between failures) benutzt. In IEC 60050-192 wird diese Abkürzung für die mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen verwendet. Um jegliche Verwechslung zu vermeiden, wird in dieser Norm für den mittleren Ausfallabstand die Abkürzung METBF (siehe 3.3) verwendet.

5.2 Einführung in Modelle und Annahmen

Um für ausgewählte und in IEC 60050-192 definierte Zuverlässigkeitsmerkmale und Messgrößen korrekte mathematische Ausdrücke ableiten zu können, wird in dieser Norm zwischen Einheiten unterschieden, die für sich genommen als Ganzes betrachtet werden können (z. B. einzelne Bauelemente), und Systemen, die aus mehreren individuellen Einheiten bestehen. Die folgenden Klassen von Einheiten werden in dieser Norm getrennt behandelt:

- Systeme;
- einzelne individuelle Einheiten:
 - nicht instandsetzbare [192-01-12];
 - instandsetzbare [192-01-11]:
 - i) mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung gleich Null (oder einer vernachlässigbaren Dauer);
 - ii) mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null.

ANMERKUNG 1 Die Benennung „Betrachtungseinheit“ bzw. „Einheit“^{N2)} wird in dieser Norm für Systeme und Einheiten angewendet.

ANMERKUNG 2 Der Begriff „nicht instandsetzbare“ Einheit umfasst Einheiten, die entweder nicht-instandsetzbar oder reparierbar sind oder die zwar instandsetzbar^{N3)} sind, die aber nach ihrem Ausfall gewollt nicht repariert werden. Der Begriff „instandsetzbare“ Einheit umfasst dagegen nur diejenigen Einheiten, die instandsetzbar sind und nach einem Ausfall auch tatsächlich repariert werden.

In dieser Norm werden die folgenden grundlegenden mathematischen Modelle verwendet, mittels derer die Zuverlässigkeitsmessgrößen quantifiziert werden können, die Norm bleibt somit in sich geschlossen und die mathematischen Formeln bleiben so einfach wie möglich:

- Zustandsübergangsmodelle für Systeme;
- Erneuerungsprozesse für individuelle Einheiten.

^{N2)} Nationale Fußnote: Im folgenden Text wird für „Betrachtungseinheit“ die Kurzform „Einheit“ verwendet, wenn nach dem Kontext keine Verwechslung mit der Maßeinheit, beispielsweise Stunde (h) möglich ist.

^{N3)} Nationale Fußnote: Nach der deutschen Ausgabe von IEC 192 kann sowohl „instandsetzbar“ als auch „reparierbar“ ohne Unterschied verwendet werden.

Um die Zuverlässigkeit einer Einheit zu modellieren, ermittelt man im Allgemeinen deren verschiedene Zustände und analysiert, wie die Einheit im Laufe der Zeit von einem Zustand zu einem anderen gelangen kann; hierfür kann man Zustandsübergangsmodelle einsetzen. Solche Modelle sind hilfreich für die Entwicklung der mathematischen Ausdrücke für die verschiedenen Zuverlässigkeitsmessgrößen. Sofern keine besonderen Annahmen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gemacht worden sind, können diese Modelle nur in bestimmten und einfachen Fällen anhand analytischer Berechnungen verwendet werden. Andernfalls müssen Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt werden. Aus diesem Grunde wird sowohl für Systeme als auch für individuelle Einheiten oft von der Hypothese konstanter Übergangsraten ausgegangen; dann kann man Markov-Modelle einsetzen, die wohlbekannt sind und für die leistungsstarke analytische Algorithmen verfügbar sind.

Für individuelle Einheiten können unter der Annahme, dass diese lediglich zwei Zustände einnehmen, die allgemeinen Formeln mit nicht-konstanten Übergangsraten in gewissem Ausmaß abgeleitet werden. Dies ist in 6.2, 6.3 und 6.4 dargestellt:

- nicht instandsetzbare individuelle Einheiten: Dies ist das einfachste mathematische Modell, da es dabei nur eine Zufallsvariable gibt: die Dauer bis zum Ausfall der Einheit [192-05-01]. Die Einheit kann durch ihre Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ gekennzeichnet werden, durch ihre momentane Ausfallrate, $\lambda(t)$ [192-05-06], die im Englischen im Zusammenhang mit der Verteilung der Dauern bis zum Ausfall auch mit „hazard rate“ bezeichnet wird, oder durch ihre mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall MTTF [192-05-11], die auch deren mittlere Betriebszeit bis zum ersten Ausfall MTTF [192-05-12] ist.
- instandsetzbare individuelle Einheiten: Das Basismodell ist ein einfacher (gewöhnlicher) Erneuerungsprozess, falls die Dauer bis zur Wiederherstellung einer Einheit vernachlässigt werden darf oder es sich um einen einfachen (gewöhnlichen) alternierenden Erneuerungsprozess mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null handelt. In zweiten Fall wechselt die Einheit zwischen einem Klarzustand und einem Unklarzustand hin und her. Zusätzlich zu den üblichen Zuverlässigkeitsmessgrößen ist ein häufig verwendetes Maß für die Zuverlässigkeit einer Einheit die Ausfalldichte [192-05-08], diese ist in diesem Falle gleich der Erneuerungsichte.

Um eine falsche Verwendung dieser mathematischen Ausdrücke zu vermeiden, was zu fehlerhaften Ergebnissen führen könnte, sollten die in 5.4 und 5.5 dargelegten speziellen Annahmen beachtet werden.

Für ein leichteres Verständnis wurden einige Definitionen in verschiedenen Teilen dieser Norm je nach Erfordernis wiederholt.

5.3 Methode der Zustandsübergangsmodellierung

Ein einfacher Weg der Untersuchung der Zuverlässigkeit einer Einheit (also einer individuellen Einheit oder eines System) ist die Analyse ihres Verhaltens während des Wechsels zwischen Klar- und Unklarzuständen.

Hierfür kann man einen Zustandsübergangs-Graphen verwenden, wie im rechten Teil von Bild 4 dargestellt. Dieser steht in Bezug zu dem mittels eines Zuverlässigkeitsblockdiagramms (siehe IEC 61078 [25]) im linken Teil von Bild 4 dargestellten Systems. Dieses System besteht aus drei ähnlichen Blöcken (A_i), die in einer „zwei von drei“-Architektur organisiert sind, sowie aus einem Block B im Stand-by-Zustand. Dieser übernimmt unmittelbar die Funktion eines der Blöcke A_i sollte einer davon in einen Unklarzustand fallen. Der Umschaltvorgang zwischen A_i und B wird als perfekt angesehen (also augenblicklich und ohne Ausfall).

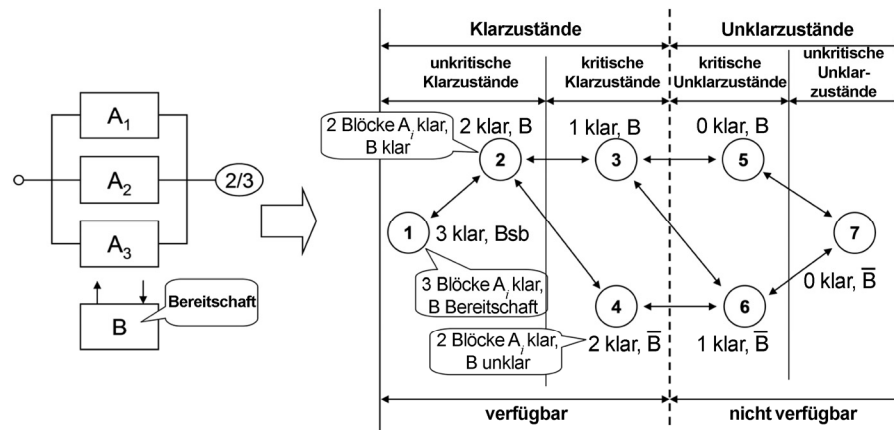


Bild 4 – Einfaches Zustandsübergangsdiagramm

Da die Blöcke (A_i) ähnlich sind, können auch ähnlich Zustände zusammengefasst werden, um das im rechten Teil von Bild 4 dargestellte Zustandsübergangsdiagramm zu erhalten. Dieses umfasst sieben Zustände, die durch Kreise und sechzehn Übergänge (durch Pfeile) dargestellt sind. So fasst beispielsweise der Zustand 3 drei ähnliche Zustände zusammen (A_1 und B in Klarzuständen und die anderen Blöcke in Unklarzuständen, A_2 und B in Klarzuständen und die anderen Blöcke in Unklarzuständen, A_3 und B in Klarzuständen und die anderen Blöcke in Unklarzuständen); die Linie mit Pfeilen an beiden Enden zwischen den Zuständen 2 und 3 bedeutet, dass das System Übergänge von 2 nach 3 und von 3 nach 2 haben kann.

Dieses Zustandsübergangsdiagramm reicht aus, um die Zustandsklassen zu identifizieren, die erforderlich sind, um die Zuverlässigkeitsmessgrößen (z. B. Verfügbarkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Ausfallrate, Ausfalldichten) zu definieren und zu verstehen.

Die Zustände können in zwei Hauptklassen gruppiert werden, die ihrerseits wieder in zwei Unterklassen aufgeteilt werden können:

- Systemklarzustands-Klasse: Zustände 1, 2, 3 und 4 (wobei sich mindestens zwei der Blöcke in Klarzuständen befinden). Diese wird weiter unterteilt in:
 - unkritische Klarzustands-Klasse: Zustände 1 und 2, die von der Unklarzustands-Klasse durch mehr als einen Übergang getrennt sind;
 - kritische Klarzustands-Klasse: Zustände 3 und 4, die von der Unklarzustands-Klasse lediglich durch einen Übergang getrennt sind.
- Systemunklarzustands-Klasse: Zustände 5, 6 und 7 (in der sich weniger als zwei Blöcke in Klarzuständen befinden). Diese wird weiter unterteilt in:
 - unkritische Unklarzustands-Klasse: Zustand 7, der von der Klarzustands-Klasse durch mehr als einen Übergang getrennt ist;
 - kritische Unklarzustands-Klasse: Zustände 5 und 6, die von der Klarzustands-Klasse lediglich durch einen Übergang getrennt sind.

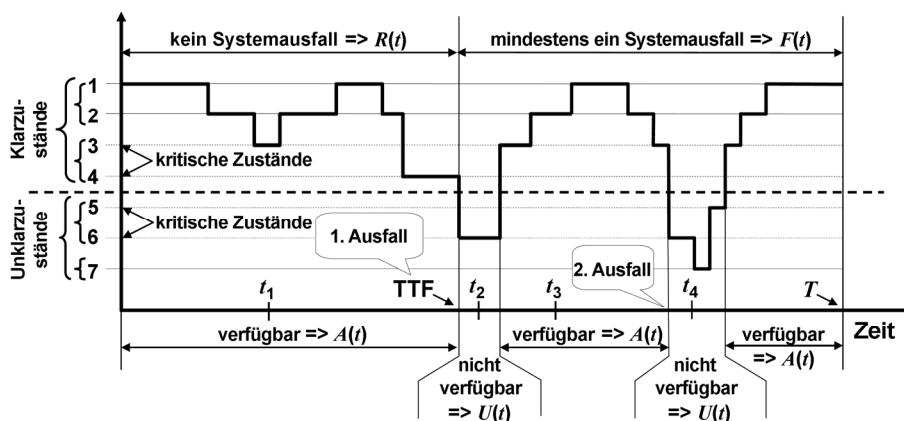


Bild 5 – Musterbeispiel (Chronogramm) bezüglich des Systems in Bild 4

Falls sich die Übergänge zwischen den Zuständen zufällig ereignen (z. B. durch Ausfälle und Wiederherstellungen der verschiedenen Blöcke), stellt das Verhalten des Systems einen stochastischen Prozess dar. In Bild 5 ist ein Beispiel der Realisierung solch eines stochastischen Prozesses dargestellt (also der zeitliche Ablauf des Prozesses) während eines Zeitintervalls $[0, T]$:

- das System befindet sich zu den Zeitpunkten t_1 , t_3 oder T in einem Klarzustand (d. h. es ist verfügbar);
- das System befindet sich zu den Zeitpunkten t_2 oder t_4 in einem Unklarzustand (d. h. es ist nicht verfügbar);
- das System war ohne Unterbrechung (also kontinuierlich) bis zum ersten Ausfall beim Zeitpunkt TTF (Betriebszeit bis zum Ausfall) in einem Klarzustand (d. h. es war funktionsfähig bzw. es hat zuverlässig funktioniert).

Dieses Beispiel umfasst alle Fälle, die angetroffen werden können.

5.4 Modell und Annahmen für nicht instandsetzbare individuelle Einheiten

Folgende Modelle und Annahmen gelten sowohl für einzelne, individuelle Einheiten allein als auch für individuelle Einheiten, die Teil eines Systems sind. Dies ist das einfachste spezielle Beispiel das aus Bild 5 abgeleitet werden kann, da lediglich zwei Zustände berücksichtigt werden müssen (siehe Bild 6 und Bild 7).

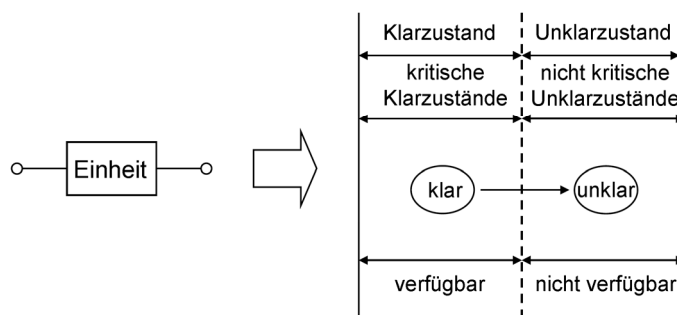
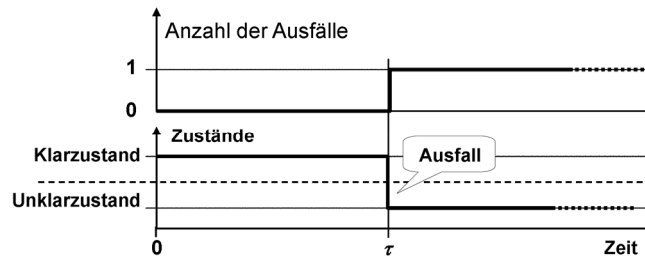


Bild 6 – Zustandsübergangsdiagramm für eine nicht instandsetzbare individuelle Einheit

Zu jedem beliebigen Zeitpunkt befindet sich die nicht instandsetzbare Einheit entweder

- in einem Klarzustand, in dem die Einheit ausfallen kann (d. h. sie fällt zum Zeitpunkt τ (Betriebszeit bis zum Ausfall) in einen Unklarzustand) oder
- in einem Unklarzustand, in dem die Einheit ausgefallen ist und dort für alle Ewigkeit verbleibt.

Daher ist in diesem einfachen Fall der Klarzustand auch ein kritischer Klarzustand und der Unklarzustand ist ein nicht kritischer Zustand, da es keine Reparatur geben kann und wird. Das Verhalten solch einer Einheit ist in Bild 7 dargestellt.



Legende

τ Betriebszeit bis zum Ausfall

Bild 7 – Musterbeispiel einer nicht instandsetzbaren individuellen Einheit

Die Anzahl der beobachteten Ausfälle kann in diesem Falle 0 oder 1 sein und die Anzahl der Instandsetzungen ist gleich Null.

Sofern nichts anderes angegeben, liegen der Ableitung der mathematischen Formeln folgende Annahmen zugrunde:

- Befindet sich die Einheit in einem Klarzustand, wird Dauerbetrieb angenommen.

ANMERKUNG Die in 5.4 angegebenen mathematischen Ausdrücke gelten möglicherweise nicht immer für IOIs.

- Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich die Einheit in einem Betriebszustand und ist so gut wie neu. Latente Fehlzustände werden nicht berücksichtigt; sollten diese dennoch präsent sein, könnte dieser Umstand einige mathematische Ausdrücke ungültig machen.
- Wartung bzw. vorbeugende Instandhaltung oder andere geplante Maßnahmen, wegen denen die Einheit eine geforderte Funktion nicht ausführen kann, werden nicht berücksichtigt.
- Die Betriebszeit bis zum Ausfall ist eine positive und stetige Zufallsvariable mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und einem endlichen Erwartungswert.

5.5 Modell und Annahmen für instandsetzbare individuelle Einheiten

5.5.1 Annahmen für instandsetzbare, individuelle Einheiten

Sofern nichts anderes angegeben, liegen der Ableitung der mathematischen Formeln folgende Annahmen zugrunde:

- Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich die Einheit in einem Klarzustand und ist so gut wie neu. Daher gilt, $R(0) = A(0) = 1$. Latente Fehlzustände werden nicht berücksichtigt.
- Befindet sich die Einheit in einem Klarzustand, wird Dauerbetrieb angenommen.
- Aufeinanderfolgende Klarzeitintervalle der Einheit sind statistisch voneinander unabhängig, identisch verteilt, sie sind positive, stetige Zufallsvariable mit einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und einem endlichen Erwartungswert.
- Im Fall länger als Null dauernder Unklarzeitintervalle sind die nachfolgenden Unklarzeitintervalle der Einheit statistisch voneinander unabhängig und identisch verteilt, sie sind positive, stetige Zufallsvariable mit einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und einem endlichen Erwartungswert.
- Die Klarzeitintervalle sind von den Unklarzeitintervallen statistisch unabhängig.
- Wartung bzw. vorbeugende Instandhaltung oder andere geplante Maßnahmen, wegen denen die Einheit eine geforderte Funktion nicht ausführen kann, werden nicht berücksichtigt.

- g) Sofern nichts anderes angegeben ist, sind andere in dieser Norm betrachtete Zufallsvariable (beispielsweise Betriebszeit bis zum Ausfall, Reparaturdauer, logistische Verzugsdauer und weitere Variable), positive und stetige Zufallsvariable mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und einem endlichen Erwartungswert.

Zusammengefasst:

- jeder Übergang von einem Klarzustand in einen Unklarzustand ist ein Ausfall;
- jeder Übergang von einem Unklarzustand in einen Klarzustand ist eine Wiederherstellung;
- jeder Unklarzustand ist ein Fehlzustand und folglich ist die Unklarzeit gleich der Dauer bis zur Wiederherstellung;
- nach jeder Wiederherstellung einer individuellen Einheit ist diese so gut wie neu.

ANMERKUNG 1 Mit dieser letztgenannten Annahme können alle mathematischen Ausdrücke zu Zuverlässigkeitsmessgrößen mit Bezug auf die Betriebszeit bis zum Ausfall einer nicht instandsetzbaren individuellen Einheit auch auf jede Betriebszeit bis zum Ausfall einer dauernd (kontinuierlich) betriebenen instandsetzbaren individuellen Einheit angewendet werden.

ANMERKUNG 2 Die Komponenten eines Systems sind nach einer Wiederherstellung so gut wie neu, aber das Gesamtsystem wird nur dann so gut wie neu wenn alle ausgefallenen Komponenten wiederhergestellt wurden.

5.5.2 Augenblickliche Instandsetzung

Folgende Modelle und Annahmen gelten sowohl für einzelne individuelle Einheiten allein als auch für individuelle Einheiten, die Teil eines Systems sind und die voneinander unabhängig sind. Dies ist ein weiteres einfaches Beispiel, das aus Bild 5 abgeleitet werden kann. In diesem Beispiel werden lediglich zwei Zustände berücksichtigt (siehe Bild 8 und Bild 9); dabei ist der Unklarzustand ein Zustand der Dauer Null, da die Instandsetzungen augenblicklich erfolgen.

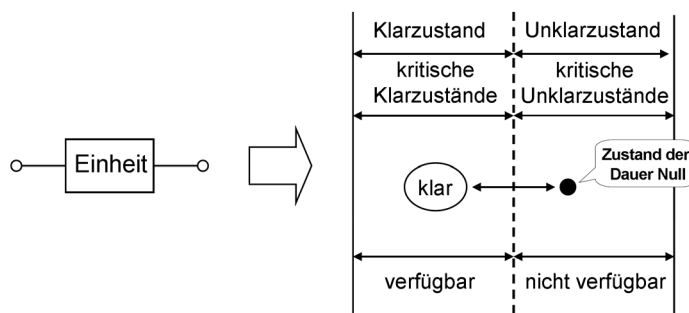


Bild 8 – Zustandsübergangsdiagramm einer augenblicklich instandsetzbaren individuellen Einheit

Zu jedem beliebigen Zeitpunkt befindet sich die instandsetzbare Einheit entweder

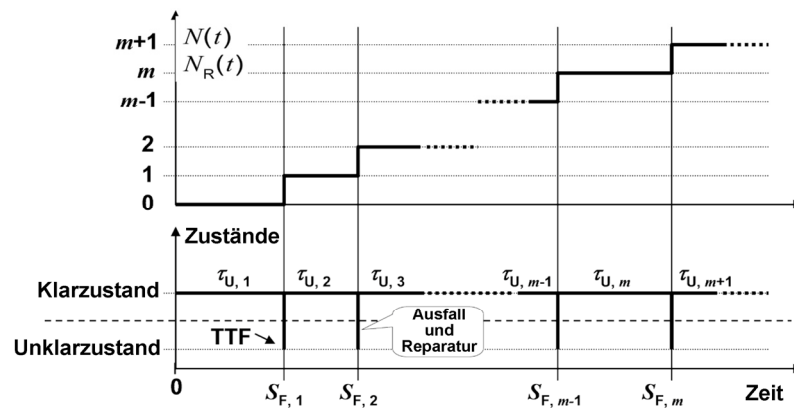
- in einem Klarzustand, in dem die Einheit ausfallen kann (d. h. sie fällt in einen Unklarzustand). In Bild 9 sind $S_{F,1}$, $S_{F,2}$, $S_{F,3}$... Ausfallzeitpunkte;
- in einem Unklarzustand, in dem die Einheit augenblicklich repariert wird (d. h. sie wechselt in einen Klarzustand). In Bild 9 sind $S_{F,1}$, $S_{F,2}$, $S_{F,3}$... ebenfalls Reparaturzeitpunkte.

Das Verhalten solch einer Einheit ist in Bild 9 dargestellt. Sofern die Einheit nach der Reparatur so gut wie neu ist, so kann sie mittels eines einfachen (gewöhnlichen) Erneuerungsprozesses modelliert werden.

Da die instandsetzbare Einheit sich jederzeit in einem Klarzustand befindet, ist sie auch immer verfügbar. Daher ist dieses Modell hauptsächlich dafür geeignet, die Anzahl der Ausfälle während eines gegebenen Zeitintervalls zu zählen (siehe Bild 9).

Falls diese Vorgehensweise für die Modellierung einer Einheit gewählt wird, wenn also die Wiederherstellungsdauern nicht betrachtet werden, umfassen die in Bild 9 betrachteten Zeiten lediglich die Betriebszeitintervalle; mit diesem Modell kann somit die Anzahl der Ausfälle während einer aufgelaufenen Betriebszeit berechnet werden.

Falls diese Vorgehensweise für die Modellierung einer Einheit gewählt wird, wenn also die Wiederherstellungsdauern im Vergleich zu den Betriebszeiten bis zum Ausfall klein sind, dann ist die in Bild 9 betrachtete Zeit die Kalenderzeit; diese umfasst natürlich sowohl die Betriebszeiten als auch die Wiederherstellungsdauern. Die Kalenderzeit überschätzt die Betriebszeiten, und somit ist die berechnete Anzahl der Ausfälle eine konservative Annahme.



Legende

$N(t)$	Anzahl der Ausfälle im Zeitintervall $[0, t]$
$N_R(t)$	Anzahl der Wiederherstellungen im Zeitintervall $[0, t]$
$S_{F,1}, S_{F,2}, S_{F,3}$	aufeinanderfolgende Ausfallzeitpunkte
$\tau_{U,1}, \tau_{U,2}, \tau_{U,3}$	aufeinanderfolgende Klarzeitintervalle
TTF	Dauer bis zum Ausfall

Bild 9 – Musterbeispiel einer instandsetzbaren individuellen Einheit mit einer Wiederherstellungsdauer gleich Null

5.5.3 Nicht augenblicklich Instandsetzung

Dies ist derselbe Fall wie in 5.5.2, außer dass der Unklarzustand einige Zeit anhält, da die Instandsetzungen nicht augenblicklich erfolgen (siehe Bild 10 und Bild 11).

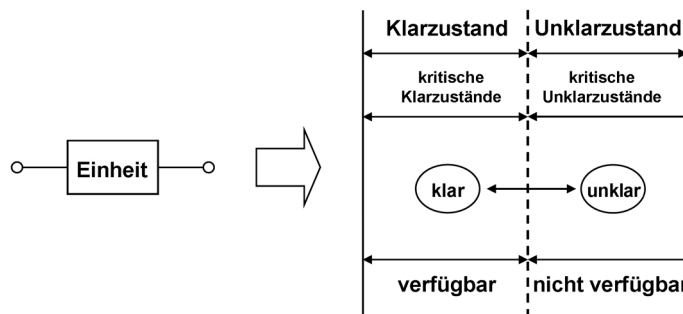
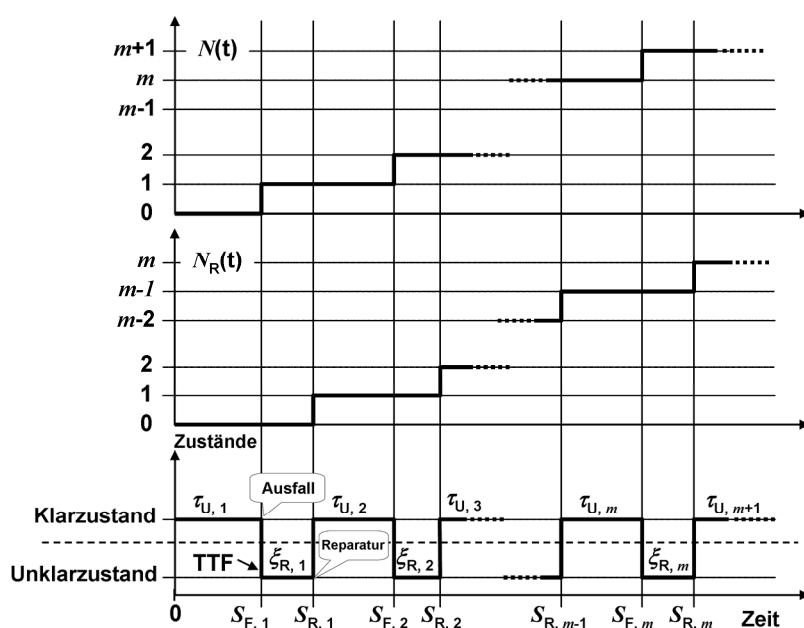


Bild 10 – Zustandsübergangsdiagramm für eine instandsetzbare individuelle Einheit

Zu jedem beliebigen Zeitpunkt befindet sich die individuelle instandsetzbare Einheit entweder

- in einem Klarzustand, in dem die Einheit ausfallen kann (d. h. sie kann in einen Unklarzustand übergehen). In Bild 11 sind $S_{F,1}, S_{F,2}, S_{F,3} \dots$ Ausfallzeitpunkte;
- in einem Unklarzustand, in dem die Einheit instandgesetzt (repariert) werden kann (d. h. sie kann in einen Klarzustand übergehen). In Bild 11 sind $S_{R,1}, S_{R,2}, S_{R,3} \dots$ Reparaturzeitpunkte.

Das Verhalten solch einer Einheit ist in Bild 11 dargestellt. Sofern die Einheit nach der Reparatur so gut wie neu ist, kann sie mittels eines einfachen (gewöhnlichen) Erneuerungsprozesses modelliert werden.



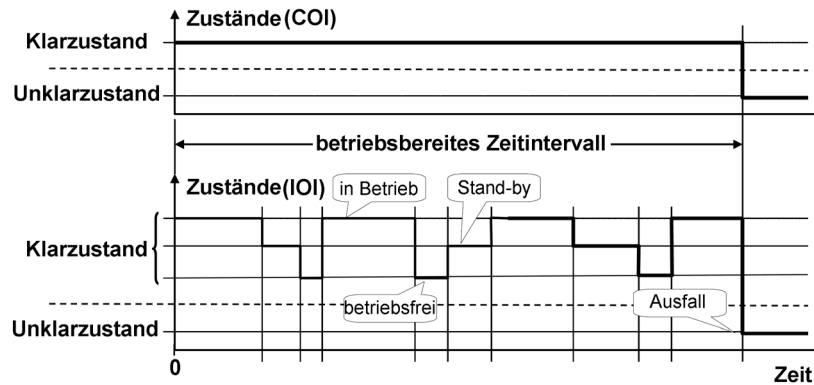
Legende

$N(t)$	Anzahl der Ausfälle im Zeitintervall $[0, t]$
$N_R(t)$	Anzahl der Wiederherstellungen im Zeitintervall $[0, t]$
$S_{F,1}, S_{F,2}, S_{F,3}$	aufeinanderfolgende Ausfallzeitpunkte
$S_{R,1}, S_{R,2}, S_{R,3}$	aufeinanderfolgende Wiederherstellungszeitpunkte
$\tau_{U,1}, \tau_{U,2}, \tau_{U,3}$	aufeinanderfolgende Klarzeitintervalle
$\xi_{R,1}, \xi_{R,2}, \xi_{R,3}$	aufeinanderfolgende Dauern bis zur Wiederherstellung

Bild 11 – Musterbeispiel einer instandsetzbaren individuellen Einheit mit einer Dauer bis zur Wiederherstellung größer Null

5.6 Gegenüberstellung von Einheiten im Dauerbetrieb (COI) und Einheiten im Aussetzbetrieb (IOI)

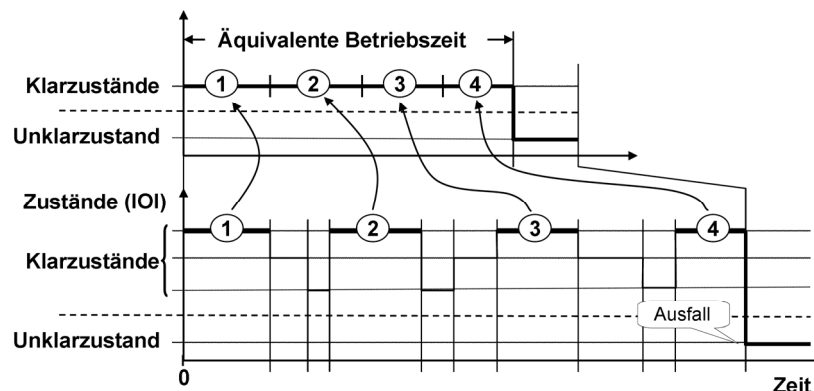
Bei Einheiten im Dauerbetrieb (COI) reduziert sich der Klarzustand zum Betriebszustand, damit ist dann die Klarzeit gleich der Betriebszeit. Bei Einheiten im Aussetzbetrieb (IOI) teilt sich die Klarzustandsklasse in die unterschiedlichen Zustandsarten auf: z. B. Betriebszustand [192-02-04], Leerlauf bzw. betriebsfreier Zustand [192-02-14] und Stand-by-Zustand bzw. Bereitschaftszustand [192-02-10] (siehe Bild 12).



ANMERKUNG Bei Einheiten im Dauerbetrieb (COI) gilt: betriebsbereites Zeitintervall = Betriebszeitintervall; bei Einheiten im Aussetzbetrieb (IOI) gilt: betriebsbereites Zeitintervall = Betriebszeitintervall + Zeitintervall des Stand-by-Zustands + Zeitintervall des betriebsfreien Zustands.

Bild 12 – Vergleich eines betriebsbereiten Zeitintervalls für eine COI und eine IOI

Die Ausdrücke zu Zuverlässigkeitsmessgrößen kontinuierlich betriebener, instandsetzbarer Einheiten sind möglicherweise für IOIs nicht gültig. Wenn dennoch davon ausgegangen wird, dass die Einheit nicht ausfallen kann (d. h. nicht in den Unklarzustand geht), solange sie sich nicht in einem Betriebszustand befindet, bleiben diese Ausdrücke dennoch gültig, sofern die äquivalente Betriebszeit, wie in Bild 13 gezeigt, verwendet wird. Sollte die Einheit während Nichtbetriebszuständen (also betriebsfreie oder Stand-by-Zustände) ausfallen, so sollten allgemeine stochastische Prozesse, wie in Bild 5 gezeigt, in Betracht gezogen werden.



ANMERKUNG Die Äquivalenz ist nur dann gültig, wenn die Einheit im Stand-by- oder im betriebsfreien Zustand nicht ausfallen kann.

Bild 13 – Äquivalente Betriebszeit für IOI-Einheiten

6 Mathematische Modelle und Ausdrücke

6.1 Systeme

6.1.1 Allgemeine Bemerkungen

Zur Erläuterung der verschiedenen Begriffe wird der in Bild 14 gezeigte Zustandsübergangs-Graph verwendet. Dieser dient der Modellierung eines aus zwei redundanten instandsetzbaren Komponenten A und B bestehenden Systems. Dieses umfasst lediglich 4 Zustände: 3 Klarzustände, von denen 2 kritisch sind, und einen einzigen kritischen Unklarzustand. Dieses einfache System reicht zur Darstellung der Konzeption der Verfügbarkeit/Nichtverfügbarkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfallrate, Ausfalldichte und bedingte und unbedingte Ausfallintensität aus.

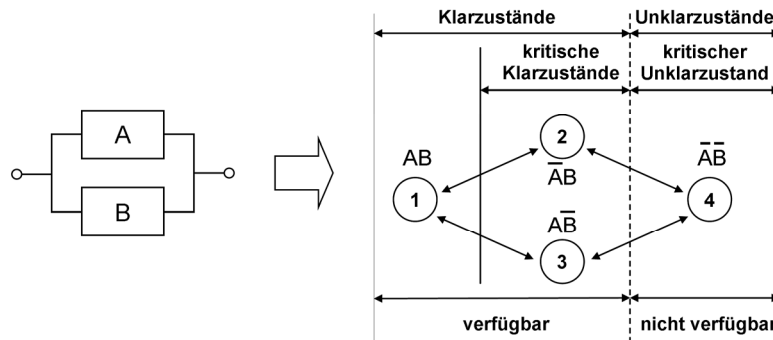


Bild 14 – Zustandsübergangs-Graph für ein einfaches redundantes System

In diesem Zustandsübergangs-Graphen werden keine Annahmen zu den Regeln gemacht, wie das System zum Zeitpunkt t aus einem Zustand i in einen anderen Zustand j gelangen kann. Im allgemeinen Fall hängt dies von den Zuständen i und j ab, aber auch von der im Zustand i verbrachten Zeit, bevor sich der Übergang ereignet, sowie davon, wie der Zustand i zuvor erreicht worden war. Außer in speziellen Fällen gibt es keine einfachen analytischen Ausdrücke und es muss daher eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden.

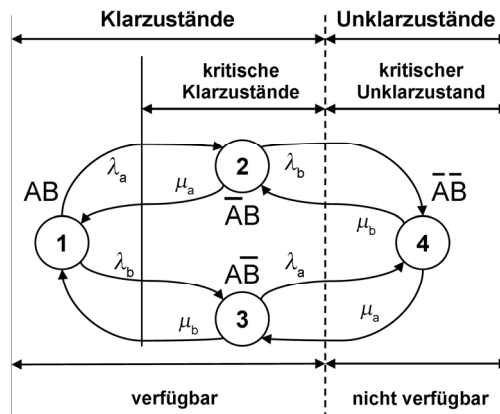


Bild 15 – Markov-Graph für ein einfaches redundantes System

Meist können jedoch die Ausfallraten und Instandsetzungsraten von Komponenten (Bauelementen) als einigermaßen konstant angesehen werden und der Zustandsübergangs-Graph wird zu einem Markov-Graphen [27], mit dem analytische Berechnungen ermöglicht werden. In diesem Fall werden die Regeln für den Übergang von einem Zustand i in einen anderen Zustand j durch konstante Übergangsraten beschrieben, die lediglich von den Zuständen i und j abhängen. Falls dann des Weiteren die Komponenten (Bauelemente) A und B in obigem Beispiel noch konstante Ausfallraten (λ_a , λ_b) und Instandsetzungsraten (μ_a , μ_b) haben, kann Bild 14 als der in Bild 15 dargestellte Markov-Graph gezeichnet werden.

Dieser Markov-Graph wird zur Ableitung gültiger mathematischer Ausdrücke verwendet, nachdem die Markov-Annahme verifiziert wurde. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Zustände stehen Algorithmen zur Verfügung. Bild 16 zeigt die typische Entwicklung der Zustandswahrscheinlichkeiten im Verlauf der Zeit. Diese Kurven wurden ausgehend von folgenden Parameterwerten berechnet und gezeichnet: $\lambda_a = 2 \text{ Jahr}^{-1}$, $\lambda_b = 3 \text{ Jahr}^{-1}$ und $\mu_a = \mu_b = 10 \text{ Jahr}^{-1}$.

Die Ausfallraten wurden in diesem Beispiel bewusst hoch und die Instandsetzungsraten relativ niedrig angenommen; dies führt zu einer eher geringen Verfügbarkeit, erlaubt es aber, die transiente Periode bildlich deutlich zu machen, ehe die asymptotischen Werte erreicht werden.

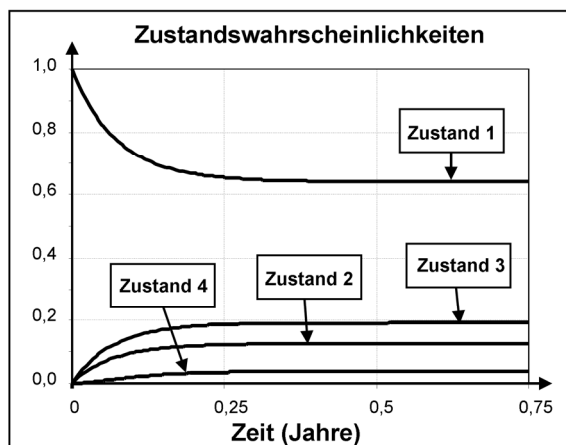


Bild 16 – Entwicklung der Zustandswahrscheinlichkeiten nach Markov-Modell in Bild 15

6.1.2 Ausdrücke zur Verfügbarkeit

6.1.2.1 Momentane Verfügbarkeit [192-08-01] und momentane Nichtverfügbarkeit [192-08-04]

Nach der Definition ist die momentane Verfügbarkeit $A(t)$ die Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zu einem gegebenen Zeitpunkt t in einem wie geforderten funktionsfähigen Zustand anzutreffen.

Nach Definition [192-02-01] ist ein Klarzustand ein Zustand, in dem die Einheit wie gefordert funktionieren kann.

Die momentane Verfügbarkeit $A(t)$ einer Einheit ist somit die Wahrscheinlichkeit, sich zu einem gegebenen Zeitpunkt t in einem Klarzustand zu befinden:

$$A(t) = P(\text{Klarzustand zur Zeit } t)$$

Auf gleiche Weise ist die momentane Nichtverfügbarkeit $U(t)$ die Wahrscheinlichkeit, sich zu einem gegebenen Zeitpunkt t in einem Unklarzustand zu befinden:

$$U(t) = P(\text{Unklarzustand zur Zeit } t)$$

und

$$A(t) = 1 - U(t)$$

Die momentane Verfügbarkeit und die momentane Nichtverfügbarkeit ergeben sich für das nach dem Zustandsübergangs-Graphen (siehe Bild 14) oder dem Markov-Graphen (siehe Bild 15) modellierte System wie folgt:

$$A(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)$$

$$U(t) = P_4(t)$$

Die zeitliche Entwicklung von $A(t)$ und von $U(t)$ ist in Bild 17 dargestellt. Für die darin eingezeichneten Kurven wurden die Werte der Zustandswahrscheinlichkeit nach Bild 16 verwendet.