

DIN EN 61078

ICS 03.120.01; 29.020

Ersatz für
DIN EN 61078:2006-10
Siehe Anwendungsbeginn

**Zuverlässigkeitsblockdiagramme
(IEC 61078:2016);
Deutsche Fassung EN 61078:2016**

Reliability block diagrams
(IEC 61078:2016);
German version EN 61078:2016

Diagrammes de fiabilité
(IEC 61078:2016);
Version allemande EN 61078:2016

Gesamtumfang 125 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 2018-03-01.

Für DIN EN 61078:2006-10 besteht eine Übergangsfrist bis 2019-09-16.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 61078:2015-04.

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 Abschnittsnummer, 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 61078:2006-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) das Thema wird vertieft dargestellt;
- b) erweiterte Behandlung von Modellen und Strukturen;
- c) detailliertere Behandlung von Analysemethoden;
- d) erweiterte Behandlung von Booleschen Techniken und Reduktionsverfahren;
- e) Erweiterungen der Techniken der Zuverlässigkeitsblockdiagramme;
- f) Erweiterungen begleitender Themen in den Anhängen;
- g) die Deutsche Fassung wurde in den Abschnitten 2 und 3 sowie im Anhang ZA an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 61078: 1994-10, 2006-10

Deutsche Fassung

Zuverlässigkeitsblockdiagramme
(IEC 61078:2016)

Reliability block diagrams
(IEC 61078:2016)

Diagrammes de fiabilité
(IEC 61078:2016)

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 61078:2016 D

Europäisches Vorwort

Der Text des Dokuments 56/1685/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe der IEC 61078, erarbeitet vom IEC/TC 56 „Dependability“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 61078:2016 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 61078:2006.

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 61078:2016 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 61025	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61025.
IEC 61165	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61165.
IEC 62551	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 62551.
IEC 60812	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60812.
IEC 61508:2010 (alle Teile)	ANMERKUNG	Harmonisiert in der Reihe EN 61508:2010.
IEC 61511:2016 (alle Teile)	ANMERKUNG	Harmonisiert in der Reihe EN 61511:2016.
ISO/TR 12489	ANMERKUNG	Harmonisiert als CEN ISO/TR 12489.

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	2
Einleitung	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe	11
4 Symbole und Abkürzungen	20
5 Vorbetrachtungen, Hauptannahmen und Einschränkungen	26
5.1 Allgemeine Betrachtungen	26
5.2 Voraussetzung/Hauptannahmen	26
5.3 Einschränkungen	27
6 Definition von Zuständen des Systemerfolgs/-ausfalls	27
6.1 Allgemeine Betrachtungen	27
6.2 Detailbetrachtungen	28
6.2.1 Systembetrieb	28
6.2.2 Umweltbedingungen	28
6.2.3 Betriebszyklen	28
7 Einfache Modelle	28
7.1 Modellentwicklung	28
7.2 Reihenstrukturen	29
7.3 Parallelstrukturen	29
7.4 Gemischte Reihen- und Parallelstrukturen	30
7.5 Andere Strukturen	31
7.5.1 m von n Strukturen	31
7.5.2 Strukturen mit gemeinsamen Blöcken	31
7.5.3 Zusammengesetzte Blöcke	32
7.6 Große ZBDs und die Verwendung von Transferelementen	33
8 Qualitative Analyse: minimale Verknüpfungs- und Trennbündel	33
8.1 Elektrische Analogie	33
8.2 Reihen-Parallel-Darstellung mit minimalem Erfolgspfad und Trennbündeln	35
8.3 Qualitative Analyse anhand minimaler Trennbündel	36
9 Quantitative Analyse: Blöcke mit konstanter Ausfall-/Erfolgswahrscheinlichkeit	36
9.1 Reihenstrukturen	36
9.2 Parallelstrukturen	37
9.3 Gemischte Reihen- und Parallelstrukturen	38
9.4 m/n -Architekturen (identische Einheiten)	38
10 Quantitative Analyse: Blöcke mit zeitabhängigen Wahrscheinlichkeiten von Ausfall/Erfolg	38
10.1 Allgemeines	38

	Seite
10.2 Nicht reparierte Blöcke	39
10.2.1 Allgemeines	39
10.2.2 Einfache nicht reparierte Blöcke.....	39
10.2.3 Nicht reparierte zusammengesetzte Blöcke.....	40
10.2.4 ZBDs mit nicht reparierten Blöcken.....	41
10.3 Reparierte Blöcke	41
10.3.1 Verfügbarkeitsberechnungen	41
10.3.2 Berechnungen der mittleren Verfügbarkeit	43
10.3.3 Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit.....	45
10.3.4 Berechnungen der Häufigkeit.....	47
11 Boolesche Techniken zur quantitativen Analyse großer Modelle	47
11.1 Allgemeines	47
11.2 Verfahren der ZBD-Reduktion.....	47
11.3 Anwendung des Theorems der totalen Wahrscheinlichkeit	48
11.4 Anwendung von Booleschen Wahrheitstabellen.....	49
11.5 Anwendung von Karnaugh-Plänen.....	51
11.6 Anwendung der Shannon-Zerlegung und binärer Entscheidungsdiagramme	52
11.7 Anwendung der Sylvester-Poincaré-Formel.....	53
11.8 Beispiele der ZBD-Anwendung	54
11.8.1 Modelle mit wiederholten Blöcken.....	54
11.8.2 m -von- n -Modelle (nicht identische Einheiten).....	57
12 Erweiterung der Techniken von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen	58
12.1 Inkohärente Zuverlässigkeitsblockdiagramme	58
12.2 Dynamische Zuverlässigkeitsblockdiagramme	60
12.2.1 Allgemeines	60
12.2.2 Logische Interaktionen	61
12.2.3 Systemische, dynamische Interaktionen.....	62
12.2.4 Grafische Darstellung dynamischer Interaktionen	63
12.2.5 Wahrscheinlichkeitsberechnungen.....	66
Anhang A (informativ) Gleichungsüberblick	67
Anhang B (informativ) Verfahren der Booleschen Algebra	71
B.1 Einleitende Bemerkungen	71
B.2 Notation	71
B.3 Analyse der Verknüpfungsbündel (Erfolgspfade) und Trennbündel (Ausfallpfade).....	72
B.3.1 Vorstellung von Trenn- und Verknüpfungsbündeln.....	72
B.3.2 Reihen-Paralleldarstellung unter Verwendung minimaler Verknüpfungs- und Trennbündel.....	73
B.3.3 Identifikation minimaler Trenn- und Verknüpfungsbündel.....	74
B.4 Berechnungsprinzipien.....	75
B.4.1 Reihenstrukturen	75

	Seite
B.4.2 Parallelstrukturen	75
B.4.3 Gemischte Reihen- und Parallelstrukturen	77
B.4.4 <i>m</i> -von- <i>n</i> -Architekturen (identische Einheiten)	77
B.5 Anwendung der Sylvester-Poincaré-Formel für große ZBDs und wiederholte Blöcke	78
B.5.1 Allgemeines	78
B.5.2 Sylvester-Poincaré-Formel mit Verknüpfungsbündeln	78
B.5.3 Sylvester-Poincaré-Formel mit Trennbündeln	80
B.6 Verfahren für die Zerlegung Boolescher Ausdrücke	81
B.6.1 Einleitung und Hintergrund	81
B.6.2 Zerlegungsprinzip	82
B.6.3 Zerlegungsverfahren	83
B.6.4 Beispiel für die Anwendung des Zerlegungsverfahrens	83
B.6.5 Kommentare	85
B.7 Binäre Entscheidungsdiagramme	85
B.7.1 Erstellen eines BDD	85
B.7.2 Minimale Erfolgspfade und Trennbündel mit BDDs	88
B.7.3 Wahrscheinlichkeitsberechnungen mit BDDs	90
B.7.4 Schlüsselbemerkungen zur Verwendung von BDDs	91
Anhang C (informativ) Zeitabhängige Wahrscheinlichkeiten und ZBD-angetriebene Markov-Prozesse	92
C.1 Allgemeines	92
C.2 Berechnungsprinzip zeitabhängiger Wahrscheinlichkeiten	92
C.3 Nicht reparierte Blöcke	93
C.3.1 Allgemeines	93
C.3.2 Einfache, nicht reparierte Blöcke	93
C.3.3 Zusammengesetzter Block: Beispiel eines nicht reparierten Systems in Bereitschaft	93
C.4 ZBD-angetriebene Markov-Prozesse	95
C.5 Berechnungen der mittleren und asymptotischen (stationären mittleren) Verfügbarkeit	96
C.6 Häufigkeitsberechnungen	97
C.7 Überlebenswahrscheinlichkeits-Berechnungen	98
Anhang D (informativ) Wichtigkeitsfaktoren	100
D.1 Einleitung	100
D.2 Vesely-Fussell-Wichtigkeitsfaktor	100
D.3 Birnbaum-Wichtigkeitsfaktor oder marginaler Wichtigkeitsfaktor	100
D.4 Lambert-Wichtigkeitsfaktor oder kritischer Wichtigkeitsfaktor	101
D.5 Diagnostischer Wichtigkeitsfaktor	101
D.6 Risikoerfolgswert	102
D.7 Risikoverringungswert	102
D.8 Differentielles Wichtigkeitsmaß	102

	Seite
D.9 Anmerkungen zu Wichtigkeitsfaktoren	103
Anhang E (informativ) ZBD-angetriebene Petri-Netze	104
E.1 Allgemeines	104
E.2 Beispiel eines Unter-PN, das innerhalb ZBD-angetriebener PN-Modelle zu verwenden ist.....	104
E.3 Auswertung des DZBD-Zustandes	106
E.4 Verfügbarkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Häufigkeit und MTTF-Berechnungen.....	108
Anhang F (informativ) Numerische Beispiele und Kurven.....	109
F.1 Allgemeines	109
F.2 Typische Reihen-ZBD-Struktur	109
F.2.1 Nicht reparierte Blöcke	109
F.2.2 Reparierte Blöcke	110
F.3 Typische parallele ZBD-Struktur	111
F.3.1 Nicht reparierte Blöcke	111
F.3.2 Reparierte Blöcke	112
F.4 Komplexe ZBD-Strukturen.....	113
F.4.1 Keine Reihen-Parallel-ZBD-Struktur	113
F.4.2 Konvergenz gegen asymptotische Werte im Vergleich zur MTTR	114
F.4.3 System mit regelmäßig geprüften Komponenten.....	115
F.5 Dynamisches ZBD-Beispiel.....	117
F.5.1 Vergleich zwischen den Ergebnissen der analytischen und der Monte-Carlo-Simulation.....	117
F.5.2 Dynamisches ZBD-Beispiel.....	117
Literaturhinweise.....	120
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	123
 Bilder	
Bild 1 – Shannon-Zerlegung eines einfachen Booleschen Ausdrucks und sich ergebendes BDD	19
Bild 2 – Reihen-Zuverlässigkeitsblockdiagramm	29
Bild 3 – Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramm	29
Bild 4 – Parallelstruktur, erstellt aus duplizierten Reihen-Unter-ZBD.....	30
Bild 5 – Reihenstruktur, erstellt aus parallelen Zuverlässigkeitsblockdiagrammen.....	30
Bild 6 – Allgemeines Reihen-Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramm.....	30
Bild 7 – Anderer Typ eines Allgemeines Reihen-Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramms	31
Bild 8 – 2-von-3-Redundanz	31
Bild 9 – 3-von-4-Redundanz	31
Bild 10 – Nicht einfach durch Reihen-/Parallel-Schaltung von Blöcken darstellbares Diagramm.....	32
Bild 11 – Beispiel für ein ZBD mit Implementierung von abhängigen Blöcken	32
Bild 12 – Beispiel für einen zusammengesetzten Block.....	32
Bild 13 – Verwendung von Transferelementen und Unter-ZBDs.....	33
Bild 14 – Analogie zwischen einem Block und einem elektrischen Schalter.....	33

	Seite
Bild 15 – Analogie zu einem elektrischen Stromkreis	34
Bild 16 – Beispiel eines minimalen Erfolgspfades (Verknüpfungsbündel)	34
Bild 17 – Beispiel eines minimalen Ausfallpfades (Trennbündel)	35
Bild 18 – Äquivalente ZBDs mit minimalen Erfolgspfaden	36
Bild 19 – Äquivalente ZBDs mit minimalen Trennbündeln	36
Bild 20 – Verbindung zwischen einer grundlegenden Reihenstruktur und den Wahrscheinlichkeitsberechnungen	37
Bild 21 – Verbindung zwischen einer Parallelstruktur und den Wahrscheinlichkeitsberechnungen	37
Bild 22 – „Verfügbarkeits“-Markov-Graph für einen einfachen reparierten Block	41
Bild 23 – Bereitschafts-Redundanz	42
Bild 24 – Typische Verfügbarkeit eines regelmäßig geprüften Blocks	43
Bild 25 – Beispiel eines ZBD, das einen stationären Zustand erreicht	44
Bild 26 – Beispiel eines ZBD mit wiederkehrenden Phasen	44
Bild 27 – ZBD und äquivalenter Markov-Graph zur Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit	45
Bild 28 – Veranschaulichung der Gruppierung von Blöcken vor der Reduktion	48
Bild 29 – Reduzierte Zuverlässigkeitsblockdiagramme	48
Bild 30 – Darstellung von Bild 10, wenn Einheit A ausgefallen ist	49
Bild 31 – Darstellung von Bild 10, wenn Einheit A in Betrieb ist	49
Bild 32 – Drei redundante Einheiten darstellendes ZBD	49
Bild 33 – Zu Tabelle 5 äquivalente Shannon-Zerlegung	52
Bild 34 – Zu Tabelle 5 äquivalentes binäres Entscheidungsdiagramm	53
Bild 35 – ZBD mit einem Pfeil für die Definition des Systemerfolgs	54
Bild 36 – Alternative Darstellung unter Verwendung wiederholter Blöcke und Erfolgspfade	55
Bild 37 – Andere alternative Darstellung von Bild 35 unter Verwendung wiederholter Blöcke und minimaler Trennbündel	55
Bild 38 – Auf Bild 35 bezogene Shannon-Zerlegung	57
Bild 39 – 2-von-5-System mit nicht identischen Einheiten	57
Bild 40 – Direkter und invertierter Block	58
Bild 41 – Beispiel eines elektrischen Stromkreises mit einem Kommutator A	58
Bild 42 – Elektrischer Stromkreis: Ausfallpfade	59
Bild 43 – Beispiel-ZBD mit Blöcken mit invertierten Zuständen	59
Bild 44 – Zu Bild 43 äquivalentes BDD	60
Bild 45 – Symbol für externe Elemente	61
Bild 46 – Dynamische Interaktion zwischen einem CCF und ZBD-Blöcken	63
Bild 47 – Verschiedene Arten, dynamische Interaktionen zwischen Blöcken anzugeben	63
Bild 48 – Dynamische Interaktion zwischen einem einzelnen Instandsetzungsteam und ZBD-Blöcken	64
Bild 49 – Implementierung eines PAND-Gatters	64
Bild 50 – Äquivalenter endlicher Zustandsautomat und Beispiel eines Chronogramms für ein PAND-Gatter	65

	Seite
Bild 51 – Implementierung eines SEQ-Gatters	65
Bild 52 – Äquivalenter endlicher Zustandsautomat und Beispiel eines Chronogramms für ein SEQ-Gatter	65
Bild B.1 – Beispiele für minimale Verknüpfungsbündel (Erfolgspfade)	72
Bild B.2 – Beispiele für nicht minimale Verknüpfungsbündel (nicht minimale Erfolgspfade)	72
Bild B.3 – Beispiele für minimale Trennbündel	73
Bild B.4 – Beispiele für nicht minimale Trennbündel	73
Bild B.5 – Beispiel eines ZBD mit Verknüpfungs- und Trennbündeln verschiedener Ordnung	74
Bild B.6 – Erinnerung an das ZBD in Bild 35	86
Bild B.7 – Shannon-Zerlegung der in Bild B.6 dargestellten Booleschen Funktion	86
Bild B.8 – Identifikation der Teile, die nicht von Bedeutung sind	87
Bild B.9 – Vereinfachung der Shannon-Zerlegung	87
Bild B.10 – Mit dem ZBD in Bild B.6 in Beziehung stehendes BDD	88
Bild B.11 – Bestimmung von Erfolgspfaden (Verknüpfungsbündel) aus einem ZBD	88
Bild B.12 – Bestimmung von Ausfallpfaden (Trennbündel) aus einem ZBD	89
Bild B.13 – Finden von Trenn- und Verknüpfungsbündeln in BDD	89
Bild B.14 – Wahrscheinlichkeitsberechnungen an einem BDD	90
Bild B.15 – Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten unter Verwendung von BDD	91
Bild C.1 – Prinzip der zeitabhängigen Verfügbarkeitsberechnungen	92
Bild C.2 – Prinzip ZBD-angetriebener Markov-Prozesse	95
Bild C.3 – Typische Verfügbarkeit eines ZBD bei schnell reparierten Ausfällen	95
Bild C.4 – Beispiel für einen einfachen, Mehrphasen-Markov-Prozess	96
Bild C.5 – Typische Verfügbarkeit eines ZBD bei regelmäßig geprüften Ausfällen	96
Bild E.1 – Beispiel eines Unter-PN, das einen DZBD-Block modelliert	104
Bild E.2 – Beispiel eines Unter-PN, das einen Ausfall aufgrund gemeinsamer Ursache modelliert	105
Bild E.3 – Beispiel eines DZBD, das auf einem ZBD-angetriebenen PN beruht	106
Bild E.4 – Logische Berechnung klassischer ZBD-Strukturen	106
Bild E.5 – Beispiel der logischen Berechnung für ein n/m -Gatter	106
Bild E.6 – Beispiel eines Unter-PN, das ein PAND-Gatter mit zwei Eingängen modelliert	107
Bild E.7 – Beispiel für das Hemmen des Ausfalls eines Blocks	108
Bild E.8 – Unter-PN für Verfügbarkeits-, Überlebenswahrscheinlichkeits- und Häufigkeitsberechnungen	108
Bild F.1 – Verfügbarkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit einer typischen nicht reparierten Reihenstruktur	109
Bild F.2 – Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.1	110
Bild F.3 – Äquivalenz einer nicht reparierten Reihenstruktur mit einem einzelnen Block	110
Bild F.4 – Verfügbarkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit einer typischen reparierten Reihenstruktur	110
Bild F.5 – Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.4	111
Bild F.6 – Verfügbarkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit einer typischen nicht reparierten Parallelstruktur	111

	Seite
Bild F.7 – Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.6	112
Bild F.8 – Verfügbarkeit/Überlebenswahrscheinlichkeit einer typischen reparierten Parallelstruktur	112
Bild F.9 – Vesely-Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.8	113
Bild F.10 – Beispiel 1 aus 7.5.2	113
Bild F.11 – Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.10	114
Bild F.12 – Einfluss der MTTR auf die Konvergenzgeschwindigkeit.....	115
Bild F.13 – System mit regelmäßig geprüften Blöcken	116
Bild F.14 – Ausfallrate und Ausfallhäufigkeit bezüglich Bild F.13	116
Bild F.15 – Gegenüberstellung der Ergebnisse der analytischen und der Monte-Carlo-Simulation.....	117
Bild F.16 – Einfluss von CCF und einer begrenzten Anzahl an Instandsetzungsteams	118
Bild F.17 – Markov-Graphen, die den Einfluss von Instandsetzungsteams modellieren.....	119
Bild F.18 – Näherung für zwei redundante Blöcke	119
 Tabellen	
Tabelle 1 – In IEC 61078 verwendete Abkürzungen.....	20
Tabelle 2 – In IEC 61078 verwendete Symbole	20
Tabelle 3 – Grafische Darstellung von ZBDs: Boolesche Strukturen	24
Tabelle 4 – Grafische Darstellung von ZBDs: nicht Boolesche Strukturen/DZBD	25
Tabelle 5 – Anwendung der Wahrheitstabelle auf das Beispiel in Bild 31	50
Tabelle 6 – Auf Bild 10 bezogener Karnaugh-Plan, wenn sich A im Klarzustand befindet.....	51
Tabelle 7 – Auf Bild 10 bezogener Karnaugh-Plan, wenn sich A im Unklarzustand befindet.....	51
Tabelle 8 – Auf Bild 35 bezogener Karnaugh-Plan	56
Tabelle A.1 – Beispiel für Gleichungen zur Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit der Grundkonfigurationen.....	67
Tabelle F.1 – Einfluss der funktionalen Abhängigkeiten	118

Einleitung

Ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) ist eine bildhafte Darstellung der erfolgreichen Funktionsfähigkeit eines Systems. Es zeigt die logische Verknüpfung der (funktionsfähigen) Komponenten (dargestellt durch Blöcke), die für den erfolgreichen Betrieb des Systems (nachfolgend als „Systemerfolg“ bezeichnet) benötigt wird. Folglich ist ein ZBD äquivalent zu einer logischen Gleichung Boolescher Variablen und die Wahrscheinlichkeitsberechnungen beziehen sich primär auf konstante Werte der Erfolg-/Ausfall-Wahrscheinlichkeiten eines Blocks.

Es sind viele verschiedene analytische Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse verfügbar, von denen das Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) eines ist. Folglich sollte vom Analysten vor der Entscheidung für die Verwendung des ZBD der Zweck jedes Verfahrens und dessen individuelle oder kombinierte Anwendbarkeit für die Bewertung der Verfügbarkeit, der Überlebenswahrscheinlichkeit, der Ausfallhäufigkeit und anderer Maßgrößen der Zuverlässigkeit eines gegebenen Systems oder einer Komponente untersucht werden. Die von jedem Verfahren erhaltbaren Ergebnisse, die für die Durchführung der Analyse erforderlichen Daten, die Komplexität der Analyse und andere Faktoren, die in dieser Norm identifiziert werden, sollten ebenfalls in die Betrachtung einbezogen werden.

Unter der Voraussetzung, dass sich die Blöcke im ZBD unabhängig voneinander verhalten und dass die Reihenfolge, in welcher Ausfälle auftreten, nicht von Bedeutung ist, können die Berechnungen auf zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsberechnungen erweitert werden, die sowohl nicht reparierte als auch reparierte Blöcke umfassen (z. B. Blöcke, welche nicht reparierte oder reparierte Komponenten darstellen). In diesem Fall müssen drei auf die erfolgreiche Funktionsfähigkeit des Systems bezogene Maßgrößen der Zuverlässigkeit berücksichtigt werden: die Überlebenswahrscheinlichkeit selbst, $R_S(t)$, jedoch auch die Verfügbarkeit, $A_S(t)$, und die Ausfallhäufigkeit $w_S(t)$. Während die Berechnungen von $A_S(t)$ und $w_S(t)$ für Systeme mit reparierten Komponenten verhältnismäßig einfach durchgeführt werden können, unterliegt die Berechnung von $R_S(t)$ systemischen Abhängigkeiten (siehe Begriff 3.34), welche innerhalb des mathematischen Rahmens von ZBDs nicht berücksichtigt werden können. Trotzdem sind in bestimmten Fällen Näherungen von $R_S(t)$ verfügbar.

Die ZBD-Technik ist mit der Fehlerbaumanalyse [1]¹⁾ und Markov-Techniken [2] verknüpft:

- Die zugrundeliegende Mathematik ist für ZBDs und Fehlerbaumanalyse (FTA) dieselbe: Während ein ZBD auf den Systemerfolg fokussiert, fokussiert ein FT auf den Systemausfall. Es ist immer möglich, ein ZBD in einen FT und umgekehrt zu übertragen. Vom mathematischen Standpunkt teilen sich ZBD- und FT-Modelle duale logische Ausdrücke. Folglich sind die mathematischen Entwicklungen und Einschränkungen in beiden Fällen ähnlich.
- Wenn die Verfügbarkeit, $A_i(t)$, eines Blocks unter Verwendung eines individuellen Markov-Prozesses unabhängig von den anderen Blöcken berechnet werden kann, kann diese Verfügbarkeit $A_i(t)$ als Eingabe für Berechnungen in Bezug auf ein ZBD einschließlich dieses Blocks verwendet werden. Dieser Ansatz, bei welchem ein ZBD die logische Struktur und individuelle Markov-Prozesse die numerischen Werte der Verfügbarkeit der Blöcke bereitstellen, wird als „ZBD-angetriebene Markov-Prozesse“ bezeichnet.

Bei Systemen, bei denen die Reihenfolge der Ausfälle zu berücksichtigen ist oder bei welchen sich die reparierten Blöcke nicht unabhängig voneinander verhalten oder bei denen die Überlebenswahrscheinlichkeit des Systems, $R_S(t)$, nicht durch analytische Verfahren berechnet werden kann, sind möglicherweise die Monte-Carlo-Simulation oder andere Modellierungstechniken, wie z. B. dynamische ZBDs, Markov- [2] oder Petri-Netz-Techniken [3], zweckmäßiger.

¹⁾ Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt fest:

- anzuwendende Anforderungen, wenn Zuverlässigkeitsblockdiagramme (ZBDs) bei Analysen der Zuverlässigkeit verwendet werden;
- die Verfahren für die Modellierung der Zuverlässigkeit eines Systems mit Zuverlässigkeitsblockdiagrammen;
- wie ZBDs für die qualitative und quantitative Analyse zu verwenden sind;
- die Verfahren für die Verwendung des ZBD-Modells zur Berechnung von Verfügbarkeit, Ausfallhäufigkeit und Maßgrößen für die Überlebenswahrscheinlichkeit für verschiedene Typen von Systemen mit konstanten (oder zeitabhängigen) Wahrscheinlichkeiten des Erfolgs/Ausfalls von Blöcken und für nicht reparierte oder reparierte Blöcke;
- einige theoretische Aspekte und Einschränkungen für die Durchführung von Berechnungen der Verfügbarkeit, Ausfallhäufigkeit und Zuverlässigkeitsmaßgrößen;
- die Beziehungen zur Fehlerbaumanalyse (siehe IEC 61025 [1]) und zu Markov-Techniken (siehe IEC 61165 [2]).

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

IEC 61703, *Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-192 und die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG Einige Begriffe wurden von IEC 60050-192 übernommen und für die Zwecke der vorliegenden Norm modifiziert.

3.1

Zuverlässigkeitsblockdiagramm

ZBD

logische graphische Darstellung eines Systems, die aufzeigt, wie die Zuverlässigkeit der Untereinheiten (dargestellt durch Blöcke) und deren Kombinationen die Gesamtzuverlässigkeit des Systems beeinflussen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die ZBD-Technik wurde vor längerer Zeit entwickelt, als der Begriff „reliability“ (de: Überlebenswahrscheinlichkeit) als Oberbegriff für „erfolgreiche Funktionsfähigkeit“ verwendet wurde. Dieser Oberbegriff wird nun abgelöst durch „dependability“ (de: Zuverlässigkeit). Trotzdem wird der Begriff weiterhin in der Umgangssprache verwendet und in Begriffen wie „reliability engineering“ „Zuverlässigkeits-Engineering“, „reliability studies“ (Zuverlässigkeitsstudien) oder „reliability block diagram“ (Zuverlässigkeitsblockdiagramm) verwendet. Folglich bedeutet die Verwendung des Begriffs „reliability“ in RBD (en: reliability block diagram, de: Zuverlässigkeitsblockdiagramm) nicht, dass die Technik die einfache Berechnung der Zuverlässigkeit eines komplexen System aus den Funktionsfähigkeiten der einzelnen Blöcke ermöglicht (siehe 10.3.1.4).

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein ZBD ist ein gerichteter, azyklischer Graph (d. h. ein Graph ohne Schleifen), der die logischen Verbindungen zwischen dem Erfolgszustand eines Systems und den Erfolgszuständen seiner zugrundeliegenden Blöcke darstellt. Diese logische Architektur wird hauptsächlich durch konventionelle, serielle und parallele grafische Strukturen dargestellt (siehe Abschnitt 4 und Abschnitt 7).

Anmerkung 3 zum Begriff: ZBDs dürfen erweitert werden, um Systeme mit mehreren Zuständen (d. h. mehr als zwei Zuständen) darzustellen, diese Erweiterungen können aber nicht mit dem Booleschen Rahmenwerk behandelt werden.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-11-03, modifiziert – Anmerkungen hinzugefügt]

3.2

Boolesches verbundenes Modell

mathematisches Modell, bei dem der Zustand eines Systems durch eine logische Funktion Boolescher Variablen dargestellt wird, welche die Zustände seiner Komponenten repräsentieren

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Boolesche Variable a hat nur zwei Werte und eine logische Funktion mehrerer Boolescher Variablen hat auch nur zwei Werte. Diese zwei Werte dürfen z. B. $\{0, 1\}$, $\{\text{klar, unklar}\}$, $\{\text{wahr, falsch}\}$, $\{\text{funktionsfähig, ausgefallen}\}$ usw. sein. Die zugrundeliegende Mathematik der logischen Funktionen ist die Boolesche Algebra.

3.3

ZBD-angetriebener Markov-Prozess

Markov-Prozess, der durch ein ZBD modelliert wird, welches aus Blöcken erstellt wurde, die durch individuelle sich unabhängig voneinander verhaltenden Markov-Teil-Modelle modelliert wurden

Anmerkung 1 zum Begriff: Die zugrundeliegende Logik eines ZBD lässt die Kombination der individuellen Verfügbarkeiten der Blöcke zu, um die Verfügbarkeit des gesamten Systems zu erhalten. Wenn die Blöcke durch kleine, individuelle Markov-Prozesse modelliert werden (z. B. mit weniger als 10 Zuständen), dann ist das ZBD äquivalent zum auf das System bezogenen Markov-Prozess, welcher möglicherweise Millionen von Zuständen umfasst. Dies ist die Grundlage für die meisten mit ZBDs ausgeführten Wahrscheinlichkeitsrechnungen. Ein solcher Markov-Prozess, der auf der Grundlage des ZBD erstellt wurde, wird „ZBD-angetriebener Markov-Prozess“ genannt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der unabhängige Markov-Prozess wird in [2] entwickelt.

3.4

dynamisches ZBD

DZBD

Zuverlässigkeitsblockdiagramm, bei welchem die Annahme der Unabhängigkeit zwischen den Blöcken nicht erfüllt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Blöcke eines DZBD können Wechselwirkungen mit Einheiten haben, welche in Bezug auf das ZBD selbst extern sind.

3.5

inkohärentes ZBD

Zuverlässigkeitsblockdiagramm, das eine nicht monotone logische Funktion modelliert

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein inkohärentes ZBD ist ein ZBD, bei dem die Blöcke in direkten und invertierten Zuständen (siehe Tabelle 3) auftreten dürfen. In diesem Fall dürfen einige minimale Erfolgspfade (siehe 3.15) einige Blöcke im Unklarzustand (en: down state) aufweisen und einige minimale Ausfallpfade einige Blöcke im Klarzustand (en: up state). Die Konzepte der minimalen Verknüpfungsbündel (en: tie set) und Trennbündel (en: cut set) sind nicht länger gültig und sind durch das Konzept des Primimplikants zu ersetzen.

Anmerkung 2 zum Begriff: In einem inkohärenten ZBD darf ein minimaler Erfolgspfad durch die Instandsetzung eines Blocks im Unklarzustand ausfallen und ein minimaler Ausfallpfad darf durch einen weiteren Ausfall eines Blocks im Klarzustand repariert werden. Folglich werden sie „inkohärent“ genannt.

3.6

Betrachtungseinheit

Einheit

betrachtetes Subjekt

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Internationalen Norm umfasst das Wort „Einheit“ hauptsächlich das System, das durch das ZBD und die im ZBD enthaltenen „Blöcke“ modelliert wird.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-01-01, modifiziert – Anmerkungen zum Begriff wurden gelöscht, Anmerkung 1 zum Begriff wurde hinzugefügt]

3.7

Block

Grundelement, das verwendet wird, um ein ZBD aufzubauen

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Block hat nur zwei Zustände (klar und unklar) und darf jede Einheit mit zwei Zuständen darstellen (z. B. Komponenten, Funktionen, Untersysteme), repariert oder nicht repariert. Durch Analogie und zur Vereinfachung des Wortlauts stellt ein reparierter/nicht reparierter Block eine reparierte/nicht reparierte Einheit dar, der Ausfall/die Instandsetzung eines Blocks stellt den Ausfall/die Instandsetzung der modellierten Einheit und den Klar/Unklar-Zustand der modellierten Einheit dar.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Anzahl von Zuständen darf auf mehr als zwei Zustände erweitert werden, um Systeme mit mehreren Zuständen (d. h. mehr als zwei Zuständen) darzustellen, aber diese Erweiterungen können nicht im Booleschen Rahmenwerk verarbeitet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Für die Anwendung der vorliegenden Norm werden die Blöcke unterteilt in „einfache Blöcke“ – oder einfacher: „Blöcke“ – und „zusammengesetzte Blöcke“, welche mehrere „einfache Blöcke“ umfassen. Dies ist in Bild 3 veranschaulicht.

3.8

wiederholter Block

Block, der mehr als einmal in einem ZBD erscheint

Anmerkung 1 zum Begriff: Wiederholte Blöcke stellen dieselben physikalischen Einheiten dar. Dies sollte nicht mit duplizierten Blöcken verwechselt werden, die verschiedene, aber vergleichbare physikalische Elemente darstellen, welche für die Umsetzung einer Redundanz verwendet werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wiederholte Blöcke können im direkten oder umgekehrten Zustand auftreten (d. h. in einem Teil des ZBD im Klarzustand und in einem anderen Teil im Unklarzustand oder umgekehrt). Sie sind sehr nützlich, um ZBDs darzustellen, die mit komplexen Systemen in Beziehung stehen, oder um ZBDs mit Erfolgs- und Ausfallpfaden darzustellen (siehe 8.2).

3.9

Klarzustand, <einer Einheit>

betriebsfähiger Zustand, <einer Einheit>

Zustand, in dem die Einheit wie gefordert funktionieren kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Nicht vorhandene, jedoch notwendige externe Ressourcen können zwar den Betrieb verhindern, aber nicht den Klarzustand beeinflussen. Siehe Unklarzustand aufgrund externer Ursachen (192-02-23).

Anmerkung 2 zum Begriff: Klarzustand steht in Wechselbeziehung zur Verfügbarkeit der Einheit.

Anmerkung 3 zum Begriff: Eine Einheit kann für einige Funktionen als im Klarzustand befindlich betrachtet werden und gleichzeitig für die anderen Funktionen als im Unklarzustand befindlich.

Anmerkung 4 zum Begriff: Die Bezeichnungen „klar“ (en: up) und „verfügbar“ (en: available) kennzeichnen eine Einheit im Klarzustand.

Anmerkung 5 zum Begriff: Im Zusammenhang mit ZBDs ist der Zustand eines Blocks identisch mit dem Zustand der durch diesen Block modellierten Komponente. Folglich verweist ein Block im Klarzustand auf eine Komponente im Klarzustand. Das gleiche Konzept gilt für das ZBD und das entsprechende System.

Anmerkung 6 zum Begriff: Innerhalb eines ZBD und durch Analogie mit einem elektrischen Stromkreis kann ein Block im Klarzustand als ein virtueller Schalter in geschlossener Stellung interpretiert werden, und ein Block im Unklarzustand als ein virtueller Schalter in geöffneter Stellung.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-02-01, modifiziert – Anmerkung 5 zum Begriff und Anmerkung 6 zum Begriff wurden hinzugefügt]

3.10

Klarzeitintervall

Klarzeit

Zeitintervall, während dessen eine Einheit im betriebsfähigen Zustand ist

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-02-02]

3.11

mittlere Klardauer

MUT

(en: mean up time)

Erwartungswert der Verteilung der Dauern der Klarzeitintervalle

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-09]

3.12

Unklarzustand, <einer Einheit>

Zustand der Funktionsunfähigkeit wegen interner Ursachen oder wegen Wartung

Anmerkung 1 zum Begriff: „Unklar“zustand steht in Wechselbeziehung zur Nichtverfügbarkeit der Einheit.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Bezeichnungen „unklar“ (en: down) oder „nicht verfügbar“ (en: unavailable) kennzeichnen eine Einheit im Unklarzustand.

Anmerkung 3 zum Begriff: Im Zusammenhang mit ZBDs wird der Zustand eines Blocks (bzw. eines ZBD) gleichgesetzt dem Zustand der durch diesen Block (bzw. dieses ZBD) modellierten Komponente (bzw. des Systems). Folglich verweist ein Block (bzw. ein ZBD) im Unklarzustand auf eine Komponente (bzw. ein System) im Unklarzustand.

Anmerkung 4 zum Begriff: Innerhalb eines ZBD darf ein Block im Unklarzustand als ein geöffneter elektrischer Schalter interpretiert werden.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-02-20, modifiziert – Anmerkung 3 zum Begriff und Anmerkung 4 zum Begriff wurden hinzugefügt]

3.13

Unklarzeitintervall

Unklarzeit

Zeitintervall, während dessen eine Einheit in einem Unklarzustand ist

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-02-21, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde gelöscht]

3.14

mittlere Unklardauer

MDT

(en: mean down time)

Erwartungswert der Verteilung der Dauern der Unklarzeitintervalle

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-10]

3.15

Erfolgspfad

Verknüpfungsbündel

Menge von Blöcken, in welcher sich jeder Block in der Menge im Klarzustand befindet, so dass sich das ZBD auch im Klarzustand befindet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Name Verknüpfungsbündel (en: tie set) wurde als Analogie zu einem elektrischen Stromkreis gegeben: Die Blöcke im Klarzustand bilden einen geschlossenen (verknüpften) Stromkreis zwischen dem ZBD-Eingang und dem ZBD-Ausgang.

3.16

minimales Verknüpfungsbündel

Verknüpfungsbündel, bei dem der Ausfall eines der Blöcke im Klarzustand ebenfalls zu einem Ausfall des gesamten ZBD führt

Anmerkung 1 zum Begriff: In einem minimalen Verknüpfungsbündel ist jeder Block im Klarzustand erforderlich, um das ZBD im Klarzustand zu erhalten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Ordnung eines minimalen Verknüpfungsbündels ist durch die Anzahl der Blöcke im Klarzustand gegeben: Ordnung 1 umfasst einen Block im Klarzustand, Ordnung 2 umfasst zwei Blöcke im Klarzustand, usw.

3.17

Ausfallpfad

Trennbündel

Menge von Blöcken, in der sich jeder Block in der Menge im Unklarzustand befindet, so dass sich das ZBD auch im Unklarzustand befindet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Name Trennbündel (en: cut set) wurde als Analogie zu einem elektrischen Stromkreis gegeben: die Blöcke im Unklarzustand bilden einen geöffneten (getrennten) Stromkreis zwischen dem ZBD-Eingang und dem ZBD-Ausgang.

3.18

minimales Trennbündel

Trennbündel, bei dem jede Wiederherstellung eines der Blöcke im Unklarzustand auch zur Wiederherstellung des ZBD in den Klarzustand führt

Anmerkung 1 zum Begriff: In einem minimalen Trennbündel ist jeder Block im Unklarzustand erforderlich, um das ZBD im Unklarzustand zu halten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Ordnung eines minimalen Trennbündels ist durch die Anzahl der Blöcke im Unklarzustand gegeben: Ordnung 1 umfasst einen Block im Unklarzustand, Ordnung 2 umfasst zwei Blöcke im Unklarzustand, usw.

3.19

disjunkte Menge von Elementen

Menge Boolescher Elemente, deren Schnitt die leere Menge ist

BEISPIEL Wenn (C_i^d) eine Menge disjunkter Trennbündel ist, dann ergibt sich $C_i^d \cap C_j^d = \emptyset \quad \forall i \neq j$ und folglich die Wahrscheinlichkeit $P(C_i^d \cap C_j^d) = 0 \quad \forall i \neq j$.

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff „Element“ wird hier in der allgemeinen Bedeutung verwendet, die in der Mengenlehre verwendet wird, d. h. ein Element einer gegebenen Sammlung von Objekten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Disjunkte Elemente sind inkompatibel: Wenn eines wahr (true) ist, dann ist das andere falsch (false) und umgekehrt. Dies beschreibt ein gegenseitiges Ausschließen und folglich eine vollständige Abhängigkeit zwischen den Elementen.

3.20

Verfügbarkeit, <einer Einheit>

Fähigkeit, in einem wie geforderten funktionsfähigen Zustand zu sein

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-01-23, modifiziert – Anmerkungen wurden gelöscht]

3.21

momentane Verfügbarkeit

$A(t)$

Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zu einem gegebenen Zeitpunkt in einem wie geforderten funktionsfähigen Zustand anzutreffen

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-01, modifiziert]

3.22

momentane Nichtverfügbarkeit

$U(t)$

Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zu einem gegebenen Zeitpunkt nicht in einem wie geforderten funktionsfähigen Zustand anzutreffen

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-04, modifiziert]

3.23

mittlere Verfügbarkeit

$A^{avg}(t_1, t_2)$

Mittelwert der momentanen Verfügbarkeit während eines gegebenen Zeitintervalls $[t_1, t_2]$

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-05, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde gelöscht]

3.24

mittlere Nichtverfügbarkeit

$U^{avg}(t_1, t_2)$

Mittelwert der momentanen Nichtverfügbarkeit während eines gegebenen Zeitintervalls $[t_1, t_2]$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die mittlere Nichtverfügbarkeit eines Sicherheitssystem (siehe IEC 61508 [5]) wird auch bezeichnet als „mittlere Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bei Anforderung“ (Abkürzung: PFD_{avg})

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-06, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde ersetzt]

3.25

stationäre mittlere Verfügbarkeit

asymptotische Verfügbarkeit

A^{st}

A^{as}

Grenzwert – falls er existiert – der momentanen Verfügbarkeit, sofern die Zeit gegen unendlich geht

Anmerkung 1 zum Begriff: Unter bestimmten Bedingungen darf die stationäre mittlere Verfügbarkeit als der Quotient $MUT/(MUT + MDT)$ ausgedrückt sein. Siehe IEC 61703.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-08-07, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde geändert]

3.26

Funktionsfähigkeit, <einer Einheit>

Zuverlässigkeit

Fähigkeit, unter gegebenen Bedingungen und für ein gegebenes Zeitintervall wie gefordert ohne Ausfall zu funktionieren

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-01-24, modifiziert – Anmerkungen zum Begriff wurden gelöscht]

3.27

Überlebenswahrscheinlichkeit, <Messgröße>

$R(t_1, t_2)$

$R(t)$

Wahrscheinlichkeit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für das Zeitintervall $[t_1, t_2]$ zu erfüllen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ ist die Überlebenswahrscheinlichkeit im Zeitintervall $[0, t]$.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-01-24^{N1)}, modifiziert – Anmerkungen zum Begriff wurden ersetzt durch eine neue Anmerkung 1 zum Begriff]

3.28

Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit

$F(t_1, t_2)$

$F(t)$

<Maßgröße> Wahrscheinlichkeit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für das Zeitintervall $[t_1, t_2]$ nicht zu erfüllen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit $F(t)$ ist die Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit im Zeitintervall $[0, t]$.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit ist die Ergänzung zu 1 der Überlebenswahrscheinlichkeit: $F(t) = 1 - R(t)$.

3.29

momentane Ausfallrate

Ausfallrate

$\lambda(t)$

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Definition wurde aus IEC 60050-192 angepasst, um auch reparierbare Einheiten abzudecken:

- wenn die Einheit keine interne integrierte Redundanz aufweist, dann ist die Ausfallrate identisch zu jener, die sie aufweisen würde, wenn die Einheit nicht reparierbar wäre;
- wenn die Einheit eine integrierte interne Redundanz aufweist, dann kann sie im Klarzustand verbleiben, wenn einige redundante Teile ausgefallen sind. Folglich sind diese Ausfälle so lange reparierbar, wie die gesamte Einheit keinen weiteren Übergang in den Unklarzustand aufgrund eines weiteren Ausfalls eines Teils aufweist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Ausfallrate (3.29), die bedingte Ausfalldichte (3.30) und die unbedingte Ausfalldichte (3.31) scheinen ähnlich zu sein, aber sie unterscheiden sich durch die bedingten Ereignisse, die in ihren Definitionen verwendet werden. Selbst wenn diese Parameter in bestimmten Fällen nah beieinander liegende numerische Werte haben können, verhalten sie sich auf unterschiedliche Weise und sollten nicht verwechselt werden.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-05-06, modifiziert – Anmerkungen zum Begriff wurden ersetzt durch neue Anmerkungen zum Begriff]

^{N1)} Nationale Fußnote: Der Begriff wurde unter IEC 60050-192:2015, 192-05-05 definiert.

3.30

momentane bedingte Ausfalldichte **bedingte Ausfalldichte** **Vesely-Ausfallrate**

$\lambda_v(t)$

Grenzwert, falls er existiert, des Quotienten der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Ausfall einer Einheit in einem Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ auftritt, und Δt , wenn Δt gegen null geht, vorausgesetzt, dass sich die Einheit zum Zeitpunkt t und zum Zeitpunkt 0 im Klarzustand befunden hat

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Anmerkung 2 zur Definition der Ausfallrate (3.29).

3.31

momentane unbedingte Ausfalldichte **unbedingte Ausfalldichte** **Ausfallhäufigkeit**

$w(t)$

Grenzwert, falls er existiert, des Quotienten der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Ausfall einer Einheit in einem Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ auftritt, und Δt , wenn Δt gegen null geht, vorausgesetzt, dass sich die Einheit zum Zeitpunkt 0 im Klarzustand befunden hat

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Anmerkung 2 zur Definition der Ausfallrate (3.29).

Anmerkung 2 zum Begriff: Dieser Parameter entspricht der in IEC 60050-192:2015, 192-05-08, definierten Ausfalldichte. Die Benennung wurde geändert, um sie von der Benennung „bedingte Ausfalldichte“ (3.30) zu unterscheiden.

3.32

mittlere Ausfallhäufigkeit

$w^{\text{avg}}(0, T)$

Anzahl der Ausfälle je Zeiteinheit einer Einheit, gemittelt über einen gegebenen Zeitraum T

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn N die Anzahl der Ausfälle der Einheit im Intervall $[0, T]$ ist, dann wird die mittlere Ausfallhäufigkeit in diesem Zeitraum durch $w^{\text{avg}}(0, T) = N/T$ berechnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wenn m der mittlere Ausfallabstand (siehe IEC 60050-192) einer Einheit ist, dann ist die mittlere Anzahl an Ausfällen, die im Intervall $[0, T]$ auftreten, $N \approx T/m$. Folglich ist $w^{\text{avg}}(0, T) = N/T \approx 1/m$.

Anmerkung 3 zum Begriff: Mathematisch ausgedrückt ist $w^{\text{avg}}(0, T)$ der Mittelwert von $w(t)$ im Intervall $[0, T]$. Dann ist $w^{\text{avg}}(0, T) = \frac{1}{T} \int_0^T w(\tau) d\tau$.

3.33

mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall **MTTF**

Erwartungswert der Verteilung der Dauern bis zum Ausfall

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Falle von nicht instandsetzbaren Einheiten mit exponentiell verteilter Dauer bis zum Ausfall (d. h. konstanter Ausfallrate) ist die MTTF numerisch gleich dem Reziprokwert der Ausfallrate. Das ist auch für reparierbare Einheiten zutreffend, wenn sie nach ihrer Wiederherstellung als „so-gut-wie-neu“ (en: as-good-as-new) betrachtet werden können.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Anmerkung gilt nur für die französische Sprachfassung.

[QUELLE: IEC 60050-192:2015, 192-05-11, modifiziert – Anmerkung 2 zum Begriff wurde gelöscht]

3.34

systemische Abhängigkeit **ganzheitliche Abhängigkeit**

Abhängigkeit zwischen Teilen eines Systems, welche einen Bezug zum System als Ganzes haben

BEISPIEL 1 Ein einzelnes Instandsetzungsteam erzeugt eine systemische Abhängigkeit zwischen reparierbaren Einheiten: Wenn eine Einheit ausfällt, kann sie nur repariert werden, wenn das Instandsetzungsteam nicht aufgrund der Instandsetzung einer anderen zum System gehörigen Einheit beschäftigt ist.

BEISPIEL 2 Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ eines Systems kann als die Wahrscheinlichkeit des Systems ausgedrückt werden, zu einer Zeit t im Klarzustand zu sein, vorausgesetzt, es war im gesamten Intervall $[0, t]$ nie im Unklarzustand. Folglich können nur die Abfolgen von Ereignissen erhalten werden, welche im Intervall $[0, t]$ nicht zum Unklarzustand führen, und die Abfolgen von Ereignissen, welche eine Abfolge „Klarzustand“ $\rightarrow$ „Unklarzustand“ $\rightarrow$ „Klarzustand“ einschließen, müssen von diesen Berechnungen ausgenommen werden. Dies bedeutet, dass in Bezug auf die Berechnung von $R(t)$ eine Einheit, die in den Unklarzustand übergeht, nur dann reparierbar ist, wenn das System während der Instandsetzung der Einheit im Klarzustand verbleibt. Folglich ist es von den Zuständen der anderen Blöcke abhängig, ob die Einheiten in Bezug auf die Berechnung von $R(t)$ reparierbar oder nicht reparierbar sind, und dies stellt Abhängigkeiten zwischen allen Blöcken des ZBD dar, welches das System modelliert.

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine systemische Abhängigkeit kann nicht als lokale Eigenschaft der einzelnen Einheiten des Systems beschrieben werden.

3.35 binäres Entscheidungsdiagramm BDD

kompakter Entscheidungsbaum auf der Grundlage der Shannon-Zerlegung eines Booleschen Ausdrucks

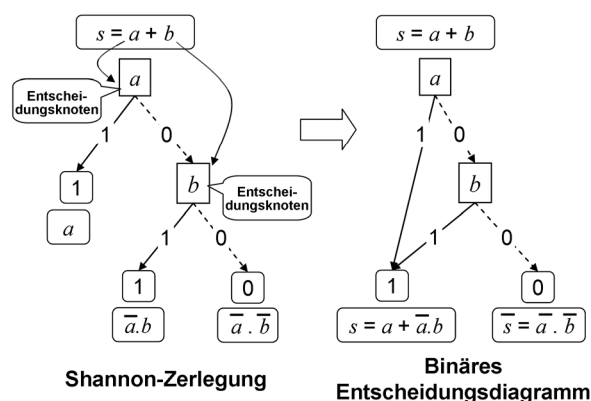


Bild 1 – Shannon-Zerlegung eines einfachen Booleschen Ausdrucks und sich ergebendes BDD

Anmerkung 1 zum Begriff: Bild 1 veranschaulicht, wie der einfache Boolesche Ausdruck $s = a + b$ unter Verwendung der Shannon-Zerlegung in einen Entscheidungsbaum überführt werden kann, und dann, wie man das entsprechende BDD durch Zusammenfügen der Pfade erhält, die den gleichen Wert (0 oder 1) des Booleschen Ausdrucks ergeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Mathematisch ausgedrückt sind BDDs azyklische, gerichtete Graphen mit einer Wurzel. Dies ist eine Datenstruktur, welche Boolesche Ausdrücke als Einheiten disjunkter Begriffe angibt. Dies führt wiederum zu genauen Wahrscheinlichkeitsberechnungen. Dies ist der neueste Stand in Bezug auf die Wahrscheinlichkeitsberechnung an Modellen mit Booleschem Bezug. Mehr Einzelheiten bezüglich BDDs sind in der Verweisung [33] zu finden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Diese Anmerkung gilt nur für die französische Sprachfassung.

4 Symbole und Abkürzungen

Tabelle 1 – In IEC 61078 verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BDD	binäres Entscheidungsdiagramm (en: binary decision diagram)
CCF	Ausfall aufgrund gemeinsamer Ursache (en: common cause failure)
FMEA	Ausfallarten- und Wirkungsanalyse (en: failure modes and effects analysis)
FT, FTA	Fehlerbaum, Fehlerbaumanalyse (en: fault tree, fault tree analysis)
MTTF	mittlere Betriebszeit bis zum Ausfall (en: mean time to fail)
MTTR	mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung (en: mean time to restoration)
DZBD	dynamisches Zuverlässigkeitsblockdiagramm (en: dynamic reliability block diagram)
PFD_{avg}	mittlere Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bei Anforderung (mittlere Nichtverfügbarkeit) (en: Average of the probability of failure on demand (mean unavailability))
PAND	„Prioritäts“-AND-Gatter (en: Priority AND gate)
PN	Petri-Netz (en: petri net)
ZBD	Zuverlässigkeitsblockdiagramm (en: reliability block diagram)
SEQ	sequentielles Gatter (en: sequential Gate)

Tabelle 2 – In IEC 61078 verwendete Symbole (1 von 4)

Symbol	Bedeutung
S	Durch ein ZBD modelliertes System.
$X \in (A, B, C, \dots), X \neq S$	Einheiten, die innerhalb eines ZBD verwendet werden. S ist für das gesamte System und die anderen Buchstaben sind für die Blöcke reserviert.
$s = S$ im „Klar“-zustand	Boolesche Variable, die angibt, dass sich das gesamte System S im Klarzustand befindet.
$\bar{s} = S$ im „Unklar“-zustand	Boolesche Variable, die angibt, dass sich das gesamte System S im Unklarzustand befindet.
$x = X$ im „Klar“-zustand	Boolesche Variable, die angibt, dass sich die Einheit X im Klarzustand befindet.
$\bar{x} = X$ im „Unklar“-zustand	Boolesche Variable, die angibt, dass sich die Einheit X im Unklarzustand befindet.

Tabelle 2 (2 von 4)

Symbol	Bedeutung
$(I_i), (C_i)$	Minimale Erfolgspfade (minimale Verknüpfungsbündel), minimale Ausfallpfade (minimale Trennbündel).
$(I_i^d), (C_i^d)$	Disjunkte Erfolgspfade (disjunkte Verknüpfungsbündel), disjunkte Ausfallpfade (disjunkte Trennbündel).
$P(.)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion
$P_s = P(\text{S im „Klar“zustand})$	Konstante Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Klarzustand befindet.
$P_{\bar{s}} = P(\text{S im „Unklar“zustand})$	Konstante Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Unklarzustand befindet.
$P_x = P(\text{X im „Klar“zustand})$	Konstante Wahrscheinlichkeit, dass sich die Einheit X im Klarzustand befindet.
$P_{\bar{x}} = P(\text{X im „Unklar“zustand})$	Konstante Wahrscheinlichkeit, dass sich die Einheit X im Unklarzustand befindet.
$P_{s x} = P(\text{S im „Klar“zustand} \mid \text{X im „Klar“zustand})$	Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Klarzustand befindet, vorausgesetzt, dass sich der Block X im Klarzustand befindet.
$P_{s \bar{x}} = P(\text{S im „Klar“zustand} \mid \text{X im „Unklar“zustand})$	Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Klarzustand befindet, vorausgesetzt, dass sich der Block X im Unklarzustand befindet.
$P_s(t)$	Zeitabhängige Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Klarzustand befindet.
$P_x(t)$	Zeitabhängige Wahrscheinlichkeit, dass sich der Block X im Klarzustand befindet.
$P_{\bar{s}}(t)$	Zeitabhängige Wahrscheinlichkeit, dass sich das gesamte System S im Unklarzustand befindet.
$P_{\bar{x}}(t)$	Zeitabhängige Wahrscheinlichkeit, dass sich der Block X im Unklarzustand befindet.
$P(OK, t)$	Wahrscheinlichkeit des OK-Zustands zum Zeitpunkt t .
t, t_i	aktueller Zeitpunkt
T, T_i	Dauer
$[t_1, t_2], [0, T] \equiv [t_1 = 0, t_2 = 0 + T]$	Zeitintervall, $t_1 < t_2$
$A_S(t) = P(\text{S im „Klar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Verfügbarkeit des gesamten Systems S zum Zeitpunkt t .
$A_S^{\text{avg}}(t_1, t_2), A_S^{\text{avg}}(0, T), A_S^{\text{avg}}(T)$	Mittlere Verfügbarkeit des gesamten Systems S im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ oder $[0, T]$.
$A_S^{\text{avg}}, A_S^{\text{st}}, A_S^{\text{as}}$	Mittlere Verfügbarkeit des gesamten Systems S im Intervall $[0, \infty]$, stationäre mittlere Verfügbarkeit, asymptotische Verfügbarkeit.

Tabelle 2 (3 von 4)

Symbol	Bedeutung
$A_X(t) = P(X \text{ im „Klar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Verfügbarkeit des Blocks X zum Zeitpunkt t .
$A_i(t) = A_{X_i}(t) = P(X_i \text{ im „Klar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Verfügbarkeit des Blocks X_i zum Zeitpunkt t .
$A_X^{\text{avg}}(t_1, t_2), A_X^{\text{avg}}(0, T), A_X^{\text{avg}}(T)$	Mittlere Verfügbarkeit des Blocks X im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ oder $[0, T]$.
$A_X^{\text{avg}}, A_X^{\text{st}}, A_X^{\text{as}}$	Mittlere Verfügbarkeit des Blocks X im Intervall $[0, \infty]$, stationäre mittlere Verfügbarkeit und asymptotische Verfügbarkeit.
$U_S(t) = P(S \text{ im „Klar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Nichtverfügbarkeit des gesamten Systems S zum Zeitpunkt t .
$U_S^{\text{avg}}(t_1, t_2), U_S^{\text{avg}}(0, T), U_S^{\text{avg}}(T)$	Mittlere Nichtverfügbarkeit des gesamten Systems S im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ oder $[0, T]$.
$U_S^{\text{avg}}, U_S^{\text{st}}, U_S^{\text{as}}$	Mittlere Nichtverfügbarkeit des gesamten Systems S im Intervall $[0, \infty]$, stationäre mittlere Nichtverfügbarkeit und asymptotische Nichtverfügbarkeit.
$U_X(t) = P(X \text{ im „Unklar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Nichtverfügbarkeit des Blocks X zum Zeitpunkt t .
$U_i(t) = U_{X_i}(t) = P(X_i \text{ im „Unklar“zustand zum Zeitpunkt } t)$	Nichtverfügbarkeit des Blocks X_i zum Zeitpunkt t .
$U_X^{\text{avg}}(t_1, t_2), U_X^{\text{avg}}(0, T), U_X^{\text{avg}}(T)$	Mittlere Nichtverfügbarkeit des Blocks X im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ oder $[0, T]$.
$U_X^{\text{avg}}, U_X^{\text{st}}, U_X^{\text{as}}$	Mittlere Nichtverfügbarkeit des Blocks X im Intervall $[0, \infty]$, stationäre mittlere Nichtverfügbarkeit und asymptotische Nichtverfügbarkeit.
$R_S(t) = P(S \text{ im „Klar“zustand im Intervall } [0, t])$	Überlebenswahrscheinlichkeit des gesamten Systems S im Intervall $[0, t]$.
$F_S(t) = 1 - R_S(t)$	Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit des gesamten Systems S im Intervall $[0, t]$ (Ausfallverteilung des Systems S).
$f_S(t)$	Funktionen der Dauer bis zur Ausfalldichte des gesamten Systems S.
$R_X(t) = P(X \text{ im „Klar“zustand im Intervall } [0, t])$	Überlebenswahrscheinlichkeit des Blocks X im Intervall $[0, t]$.
$F_X(t) = 1 - R_X(t)$	Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit des Blocks X im Intervall $[0, t]$ (Ausfallverteilung des Blocks X).
$f_X(t)$	Funktionen der Dauer bis zur Ausfalldichte des Blocks X.
$\lambda_S, \lambda_S(t)$	Konstante und zeitabhängige Ausfallraten des gesamten Systems S.
$\lambda_{VS}, \lambda_{VS}(t)$	Bedingte Ausfalldichte (Vesely-Ausfallrate) des gesamten Systems.
$w_S(t)$	Unbedingte Ausfalldichte (Ausfallhäufigkeiten) des gesamten Systems S zum Zeitpunkt t .

Tabelle 2 (4 von 4)

Symbol	Bedeutung
$W_S(0, T), W_S(T)$	Erwartete Anzahl der Ausfälle des gesamten Systems S im Intervall $[0, T]$.
$w_S^{\text{avg}}(0, T), w_S^{\text{avg}}(T)$	Mittlere unbedingte Ausfalldichte (mittlere Ausfallhäufigkeit) des gesamten Systems S im Intervall $[0, T]$.
$\lambda_X, \lambda_X(t)$	Konstante und zeitabhängige Ausfallraten des Blocks X.
$w_X(t)$	Unbedingte Ausfalldichte (Ausfallhäufigkeiten) des Blocks X zum Zeitpunkt t .
$W_X(0, T), W_X(T)$	Erwartete Anzahl der Ausfälle des Blocks X im Intervall $[0, T]$.
$w_X^{\text{avg}}(0, T), w_X^{\text{avg}}(T)$	Mittlere unbedingte Ausfalldichte (mittlere Ausfallhäufigkeit) des Blocks X im Intervall $[0, T]$.
λ_{Bd}	Schlafende Ausfallrate des Blocks B.
$\mu_X, \mu_X(t)$	Konstante oder zeitabhängige Instandsetzungsraten des Blocks X.
$\binom{n}{r}$	Anzahl der Möglichkeiten, r Blöcken ohne Reihenfolge aus n Blöcken auszuwählen: $\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$
„0“, „1“	Symbole, die in Wahrheitstabellen, im Karnaugh-Plan, bei der Shannon-Zerlegung und in binären Entscheidungsdiagrammen verwendet werden, um Unklarzustände (Ausfall) und Klarzustände (Erfolg) von Blöcken oder Systemen zu bezeichnen.
$\cap, \bullet$	Boolesche Operatoren, die eine AND-Logik bezeichnen, z. B. $a \cap b, a \bullet b$ (Schnittmenge)
$\cup, +$	Boolesche Operatoren, die eine OR-Logik bezeichnen, z. B. $a \cup b, a + b$ (Vereinigungsmenge)
Φ, Ω	„unmögliches“ Ereignis und „sichere“ Ereignisse

Bei der Erstellung eines Zuverlässigkeitsblockdiagramms (ZBD) wird die Verwendung der folgenden Symbole aus Tabelle 3 empfohlen.

Tabelle 3 – Grafische Darstellung von ZBDs: Boolesche Strukturen (1 von 2)

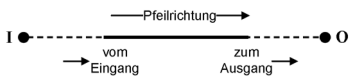
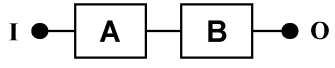
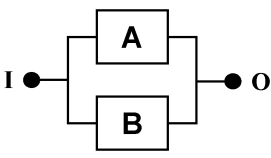
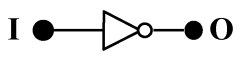
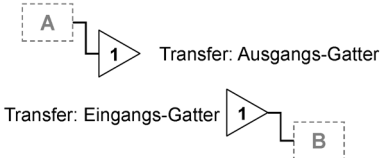
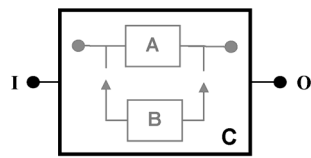
Grafische Darstellung	Bedeutung
I O	Bezeichnung für den Eingang Bezeichnung für den Ausgang Solche Bezeichnungen werden zur Verdeutlichung verwendet. Sie sind nicht vorgeschrieben, können aber dann nützlich sein, wenn die Richtungen von Verbindungen von Bedeutung sind.
	Ein ZBD ist ein gerichteter Graph. Die Richtung der Verbindung geht vom Eingang zum Ausgang (d. h. von links nach rechts). Pfeile dürfen, wenn benötigt, hinzugefügt werden, um Verwirrung zu vermeiden.
	(Einfacher) Block: Gruppierung von Ausrüstung, Komponenten, Einheiten oder anderer Systemelemente.
	Reihenstruktur: Das System ist betriebsfähig, wenn sich A und B im Klarzustand befinden. Dies wird durch die logische Funktion $s = a \cap b$ dargestellt. Vom Ausfallstandpunkt ist sie äquivalent zu $\bar{s} = \bar{a} \cup \bar{b}$.
	Parallelstruktur (vollständig aktive Redundanz): Das System ist betriebsfähig, wenn sich A oder B im Klarzustand befinden. Dies wird durch die logische Funktion $s = a \cup b$ dargestellt. Vom Ausfallstandpunkt ist sie äquivalent zu $\bar{s} = \bar{a} \cap \bar{b}$.
	NOT-Gatter: Der Ausgang des Gatters ist gleich 0, wenn der Eingang gleich 1 ist und umgekehrt.
	Transfergatter: der Ausgang i ist mit dem Eingang/den Eingängen desselben Namens verbunden. Dies ist sinnvoll, um: – große ZBD in mehrere Teile (Unter-ZBD) aufzuspalten; – den Ausgang an einer Stelle im ZBD an eine andere Stelle zu übertragen.
	Zusammengesetzter Block: Gruppierung von einfachen Blöcken. Dies kann nützlich sein, um das Zeichnen des ZBD zu vereinfachen, um Teile anzugeben, welche eine weitere Entwicklung erfordern, oder um abhängige, individuelle Blöcke in einer Struktur zu vereinen, die vom Rest des ZBD unabhängig ist.
 Direkter Zustand  Invertierter Zustand	Wiederholte Blöcke: Derselbe Block, welcher eine gegebene Einheit darstellt, erscheint an mehreren Stellen des ZBD entweder im direkten Zustand oder im invertierten Zustand, d. h., wenn der Block A im direkten Zustand betriebsfähig („up“) ist, dann ist der Block im invertierten Zustand nicht betriebsfähig („down“) und umgekehrt. Diese Symbole werden für inkohärente ZBD verwendet.
	Externes Element, das mit einem Block oder mehreren Blöcken des ZBD interagiert. Dieses Symbol wird in dynamischen ZBD verwendet.

Tabelle 3 (2 von 2)

Grafische Darstellung	Bedeutung
	Abstimmungslogik mit Erfolgsmehrheit (Symbol m/n): In einer aktiv redundanten Konfiguration werden mindestens m von n Einheiten für den Systemerfolg benötigt. ANMERKUNG Es ist wichtig, zwischen der in ZBD implementierten Abstimmungslogik mit „Erfolgs“-Mehrheit und der in Fehlerbäumen implementierten Abstimmungslogik mit „Ausfall“-Mehrheit zu unterscheiden. Im Allgemeinen ist der Kontext (ZBD oder Fehlerbaum) ausreichend, um den Unterschied aufzuzeigen. Die Beziehung ist die folgende: $(m/n)_{\text{Suc}} \equiv (n - m + 1/n)_{\text{Fail}}$

Tabelle 4 – Grafische Darstellung von ZBDs: nicht Boolesche Strukturen/DZBD

Grafische Darstellung	Bedeutung
	Stand-by Redundanz: B startet, wenn A ausfällt.
	Funktionale Abhängigkeiten: Der Zustand von A hängt vom Ereignis Ev ab. Dieses Ereignis darf ein externes oder internes Ereignis des ZBD sein. Dieses Symbol ist eine Erinnerung daran, dass eine Abhängigkeit existiert, aber der Typ der Abhängigkeit mannigfaltig sein darf und irgendwo anders zu beschreiben ist.
	Vollständige funktionale Abhängigkeit: Block A geht in den Unklarzustand, wenn das Ereignis Ev auftritt. Dieses Ereignis darf ein externes oder internes Ereignis des ZBD sein. Es übernimmt die Rolle des Schalters, der in ähnlichen Strukturen verwendet wird, die für dynamische Fehlerbäume implementiert sind.
	PAND-Gatter: Der Ausgang geht in den Unklarzustand, wenn die Eingänge I_1, dann I_2, dann I_3, dann ... I_n in dieser Reihenfolge in die Unklarzustände gehen. $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ agieren unabhängig voneinander. Dieses Gatter wurde eingeführt, um in dynamischen Fehlerbäumen verwendet zu werden, und deshalb werden zum Invertieren der Eingänge und Ausgänge NOT-Gatter verwendet, um konsistent mit der ZBD-Logik zu sein.
	SEQ-Gatter: Der Ausgang geht in den Unklarzustand, wenn die Eingänge I_1, dann I_2, dann I_3, dann ... I_n in dieser Reihenfolge in die Unklarzustände gehen, sie agieren aber nicht unabhängig, da I_n nicht in den Unklarzustand gehen kann, ehe I_{n-1} in den Unklarzustand gegangen ist, I_{n-1} nicht in den Unklarzustand gehen kann, ehe I_{n-2} in den Unklarzustand gegangen ist, usw., I_2 kann nicht in den Unklarzustand gehen, ehe I_1 in den Unklarzustand gegangen ist. Dieses Gatter wurde eingeführt, um in dynamischen Fehlerbäumen verwendet zu werden, und deshalb werden zum Invertieren der Eingänge und Ausgänge NOT-Gatter verwendet, um konsistent mit der ZBD-Logik zu sein.

5 Vorbetrachtungen, Hauptannahmen und Einschränkungen

5.1 Allgemeine Betrachtungen

Ein ZBD modelliert ein System unter Verwendung der logischen Verknüpfungen des Erfolgszustands (Klarzustand) des Systems (d. h., das gesamte ZBD) und der Erfolgszustände (Klarzustände) seiner Komponenten (d. h., die Blöcke des ZBD). Folglich bettet ein ZBD eine logische Gleichung ein, und dies ist der Grund dafür, dass ein ZBD nicht zwingenderweise gleich der physikalischen Architektur des Systems ist (z. B. werden zwei redundante Absperrventile in Reihe in derselben Rohrleitung durch zwei parallele Blöcke im entsprechenden ZBD dargestellt).

Ein ZBD kann erstens für qualitative Analysezwecke verwendet werden, indem die Kombinationen der Blöcke im Klarzustand identifiziert werden, die es dem System ermöglichen, in einem Klarzustand zu sein (Erfolgspfade oder Verknüpfungsbündel), oder indem die Kombinationen der Blöcke im Unklarzustand identifiziert werden, die dazu führen, dass das System in den Unklarzustand geht (Ausfallpfade oder Trennbündel).

Zweitens kann ein ZBD für Wahrscheinlichkeitsberechnungen verwendet werden, und da dies eine statische Darstellung (d. h. zeitunabhängig) ist, beziehen sich die Wahrscheinlichkeitsregeln im Wesentlichen auf Blöcke mit konstanten Erfolgs- oder Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Dies kann auf zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsberechnungen erweitert werden. Dies kann für Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit schwierig sein, aber für die Verfügbarkeits- und Häufigkeitsberechnungen, und vorausgesetzt, dass sich die Blöcke unabhängig voneinander verhalten, gibt es außer der mathematischen Lenkbarkeit keine Einschränkung der Verteilung, die verwendet werden darf, um die Ausfall- oder Instandsetzungszeitpunkte der Blöcke zu beschreiben. Dies ermöglicht es z. B., (Nicht-)Verfügbarkeiten für jeden der Blöcke durch individuelle analytische Gleichungen zu modellieren, deren Ergebnisse durch die Logik des ZBD kombiniert werden, um die (Nicht-)Verfügbarkeit des Systems zu erhalten. Wenn diese analytischen Gleichungen durch individuelle Markov-Prozesse bestimmt werden, dann ist das ZBD äquivalent zu einem globalen Markov-Prozess, der das gesamte System modelliert. Ein solches Modell wird „ZBD-angetriebener Markov-Prozess“ genannt. Dies ist die Grundlage für die meisten mit ZBD zu erreichenden Wahrscheinlichkeitsberechnungen.

5.2 Voraussetzung/Hauptannahmen

Ein ZBD ist ein azyklischer, gerichteter Graph (d. h. im ZBD sind keine Schleifen oder Rückwirkungen modelliert), der unter Verwendung der in Tabelle 3 dargestellten grundlegenden logischen Strukturen gezeichnet werden kann. Es wird verwendet, um das Verhalten eines Systems auf Grundlage der folgenden grundlegenden Annahmen zu modellieren:

- a) das System hat nur zwei Zustände: funktionsfähig („Erfolgs“zustand, „Klar“zustand) oder ausgefallen („Unklar“zustand);
- b) die Blöcke eines ZBD modellieren die Komponenten eines Systems oder eines Teils (d. h. Gruppen von Komponenten) des Systems. Jede von ihnen hat nur zwei Zustände: funktionsfähig („Erfolgs“zustand, „Klar“zustand) oder ausgefallen („Unklar“zustand);
- c) das ZBD stellt die logische Verknüpfung des Erfolgszustandes des Systems mit den Erfolgszuständen seiner Komponenten (Blöcke) dar;
- d) jeder Block agiert zu jeder Zeit unabhängig von den anderen.

Die vorgenannt angeführten Anforderungen müssen im Allgemeinen erfüllt werden, um die in dieser Norm entwickelten analytischen Berechnungen (d. h. Berechnungen mit Gleichungen) anzuwenden. Wenn sie nicht erfüllt werden, können die analytischen Berechnungen durch Monte-Carlo-Simulationen oder durch andere Techniken wie die Markov-Analyse [2] oder Petri-Netze [3] oder die in 12.2 und Anhang E beschriebenen dynamischen ZBDs ersetzt werden.

5.3 Einschränkungen

Die in 5.2 vorgestellten Annahmen stellen einige Einschränkungen dar; es gibt aber andere Einschränkungen, die weniger offensichtlich sind, wenn mit zeitabhängigen Wahrscheinlichkeiten umgegangen wird. Die Anwender der vorliegenden Norm sollten insbesondere die Probleme kennen, die durch die Unabhängigkeitsanforderungen, die zu jeder Zeit erfüllt werden müssen, eingebracht werden. Z. B.:

- a) Sequentielle Ereignisse liegen außerhalb des Anwendungsbereichs Boolescher Modelle. Folglich können sie prinzipiell nicht durch ZBD verarbeitet werden. Dennoch ist es in einfachen Fällen wie der nicht funktionsbeteiligten Redundanz möglich, die Probleme durch eine von den anderen Blöcken unabhängige Betrachtung zusammengesetzter Blöcke (siehe Tabelle 3 und 7.5.3) zu überwinden.
- b) Verfügbarkeits- oder Häufigkeitsberechnungen reparierter Systeme gehen davon aus, dass die Instandsetzungen reparierter Blöcke zu jeder Zeit unabhängig voneinander sind, d. h., dass jeder Block sein eigenes Instandsetzungsteam hat.
- c) Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeiten reparierter Systeme implizieren, dass ein ausfallender Block nur repariert werden kann, wenn das System zum Zeitpunkt des Blockausfalls immer noch in Betrieb ist. Dies führt systemische Abhängigkeiten zwischen den Blockzuständen und zwischen den Blöcken und den Systemzuständen ein (siehe 10.3.1.4). Dies verletzt die in 5.2, Punkt d) festgelegte Annahme, und folglich sind, außer in bestimmten Fällen und mit Näherungen, analytische Berechnungen der Überlebenswahrscheinlichkeit im Allgemeinen nicht möglich.

Kurzum, vorausgesetzt, dass die Annahmen aus 5.2 erfüllt sind, kann die ZBD-Technik einfach für qualitative Analysen und Verfügbarkeits-/Häufigkeitsberechnungen verwendet werden, aber nur in bestimmten Fällen für die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit.

Es sollte beachtet werden, dass für den Umgang mit Wahrscheinlichkeitsberechnungen gute Näherungen mit geringen Wahrscheinlichkeiten (z. B. Ausfall von Komponenten/Blöcken) verfügbar sind, welche nicht mit hohen Wahrscheinlichkeiten (z. B. Wahrscheinlichkeiten des Erfolgs von Komponenten/Blöcken) verwendet werden können. Um diese Einschränkungen zu überwinden ist es folglich häufig besser, mit Ausfallwahrscheinlichkeiten (Nichtverfügbarkeit oder Nicht-Überlebenswahrscheinlichkeit) als mit Erfolgswahrscheinlichkeiten (Verfügbarkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit) zu arbeiten.

6 Definition von Zuständen des Systemerfolgs/-ausfalls

6.1 Allgemeine Betrachtungen

Eine Voraussetzung für das Erstellen eines System-Zuverlässigkeitsmodells ist ein gründliches Verständnis der Möglichkeiten, wie ein System und seine Komponenten betrieben werden können. Systeme erfordern häufig mehr als eine Definition von Erfolg/Ausfall. Diese sollten festgelegt und aufgeführt werden. Ein ZBD kann für verschiedene Ebenen erstellt werden: Systemebene, Untersystemebene (Module) oder Baugruppenebene. Falls ein ZBD für eine weitergehende Analyse (z. B. für eine FMEA-Analyse) erstellt wurde, ist eine für diese Analyse geeignete Ebene zu wählen.

Zusätzlich sollten klare Angaben gemacht werden bezüglich:

- der auszuführenden Funktionen;
- der Leistungsparameter und der zulässigen Grenzwerte für solche Parameter;
- der Umwelt- und Betriebsbedingungen.

Nach der Erstellung der Definition eines Systemerfolgs/-ausfalls werden im nächsten Schritt logische Blöcke ermittelt, um das System in für Zwecke der Zuverlässigkeitsanalyse geeigneter Weise aufzuteilen. Systemunterstrukturen dürfen durch bestimmte Blöcke dargestellt werden, die ihrerseits wieder durch andere ZBD dargestellt werden (Systemreduktion – siehe 11.2).

Für die quantitative Auswertung eines ZBD stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Je nach Typ der Struktur dürfen einfache Boolesche Techniken (siehe Abschnitt 7) und/oder Pfad- und Trennbündelanalysen (siehe Abschnitt 8) verwendet werden. Die Berechnungen dürfen unter Anwendung analytischer Verfahren (z. B. Grundkomponenten-Verfügbarkeitsverfahren) oder der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden.

Ein Vorteil der Monte-Carlo-Simulation liegt darin, dass die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse im ZBD nicht analytisch zu kombinieren sind, da die Simulation selbst berücksichtigt, ob jeder Block ausgefallen oder betriebsbereit ist (siehe 12.2 und F.5).

Da ein ZBD die für die Systemfunktion erforderlichen logischen Beziehungen festlegt, stellt das Blockdiagramm nicht zwingenderweise die physikalischen Hardwareverbindungen dar, obwohl ein ZBD im Allgemeinen so weit wie möglich den physikalischen Systemverbindungen folgt.

6.2 Detailbetrachtungen

6.2.1 Systembetrieb

Es kann möglich sein, ein System in mehr als einer Betriebsart zu nutzen. Wenn für jede Betriebsart ein eigenes System verwendet würde, sollten solche Betriebsarten unabhängig von den anderen Betriebsarten behandelt werden, und entsprechend sollten eigene Zuverlässigkeitsmodelle verwendet werden. Wird zur Ausführung all dieser Funktionen ein und dasselbe System verwendet, sollten folglich für jede Betriebsart eigene Diagramme erstellt werden. Für jeden Aspekt des Systembetriebs sind klare Aussagen darüber, was Systemerfolg/-ausfall darstellt, eine Voraussetzung.

6.2.2 Umweltbedingungen

Die Leistungsspezifikationen des Systems sollten mit einer Beschreibung der Umweltbedingungen einhergehen, für welche der Betrieb des Systems ausgelegt ist. Darin sollte auch eine Festlegung aller Bedingungen enthalten sein, denen das System beim Transport, bei der Lagerung und während der Nutzung unterliegt.

Häufig wird ein bestimmter Ausrüstungsgegenstand in mehr als einer Umgebung verwendet, z. B. an Bord eines Schiffes, in einem Flugzeug oder am Boden. Wenn dies der Fall ist, dürfen die Bewertungen der Überlebenswahrscheinlichkeit unter Verwendung jeweils desselben ZBD durchgeführt werden, wobei jedoch die zweckmäßigen Ausfallraten der Komponente/des Blocks für jede Umgebung verwendet werden.

6.2.3 Betriebszyklen

Die Beziehung zwischen Kalenderzeit, Betriebsdauer und Ein-/Ausschaltzyklen sollte dargestellt werden. Falls angenommen werden kann, dass der Ein- und Ausschaltvorgang der Ausrüstung für sich alleine keine Ausfälle bewirkt und dass die Ausfallrate in Zeiten der Nichtbenutzung vernachlässigbar ist, dann muss nur die tatsächliche Betriebsdauer der Ausrüstung betrachtet werden.

In einigen Fällen ist jedoch der Ein- und Ausschaltvorgang selbst die Hauptursache für den Ausrüstungsausfall und die Ausrüstung hat möglicherweise in Zeiten der Nichtbenutzung eine höhere Ausfallrate als im Betrieb (z. B. aufgrund von Feuchte und Korrosion). In komplexen Fällen, in denen nur Teile des Systems ein- und ausgeschaltet werden, können andere Modellierungstechniken (z. B. die Markov-Analyse oder Petri-Netze) besser geeignet sein als ZBD.

7 Einfache Modelle

7.1 Modellentwicklung

Im ersten Schritt wird eine Definition für den Systemerfolg/-ausfall gewählt. Wenn mehr als eine Definition beteiligt ist, kann für jeden Fall ein eigenes ZBD erforderlich sein. Im nächsten Schritt wird das System in Blöcke unterteilt, um das logische Verhalten wiederzugeben, so dass jeder Block statistisch unabhängig von den anderen ist. Es wird der Versuch unternommen, die Blöcke so groß wie möglich zu machen und gleichzeitig sicherzustellen, dass jeder Block (vorzugsweise) keine Redundanz enthält.

Im nächsten Schritt wird unter Bezugnahme auf die Definition des Systemerfolgs/-ausfalls ein Diagramm erstellt, das die Blöcke miteinander verbindet, um einen „Erfolgspfad“ zu bilden (siehe 3.15). Wie in den folgenden Diagrammen angegeben, verlaufen die verschiedenen Erfolgspfade vom Eingang bis zum Ausgang des

Diagramms durch diejenigen Kombinationen von Blöcken, die funktionsfähig sein müssen, damit das System funktionsfähig ist.

ANMERKUNG In der Praxis ist es in Abhängigkeit von der Systemkonfiguration möglicherweise erforderlich, mehrere Versuche zum Erstellen des Zuverlässigkeitsblockdiagramms zu unternehmen (jeweils unter der Beachtung der vorgenannten Schritte), bis ein geeignetes Blockdiagramm fertiggestellt ist.

7.2 Reihenstrukturen

Wenn es für ein funktionsfähiges System erforderlich ist, dass alle Blöcke funktionsfähig sind, dann ist das entsprechende ZBD so beschaffen, dass alle Blöcke in Reihe miteinander verbunden sind, wie in Bild 2 dargestellt.



Bild 2 – Reihen-Zuverlässigkeitsblockdiagramm

In diesem Diagramm ist „I“ der Eingang, „O“ der Ausgang, und A, B, C, ... Z sind die Blöcke, die zusammen das System bilden. ZBD dieser Art heißen „Reihen“-ZBD oder „Reihenmodelle“.

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = a \cdot b \cdot c \cdot \dots \cdot z \quad (1)$$

Dabei stellen a , b , c und z die Erfolgszustände der Blöcke A, B, C und Z dar (siehe Tabelle 2) und s den Erfolgszustand des entsprechenden Systems.

7.3 Parallelstrukturen

Eine andere Art von ZBD wird benötigt, wenn für den Systemerfolg nur eine einzelne Komponente (d. h. ein Block) erforderlich ist. Dies ist der Fall, wenn redundante Komponenten implementiert werden.

Dies wird, wie in Bild 3 dargestellt, durch parallele Strukturen modelliert, die mehrere redundante Blöcke darstellen. In dieser Struktur ist das System nur dann nicht betriebsfähig (unklar), wenn sich alle Blöcke im Unklarzustand befinden.

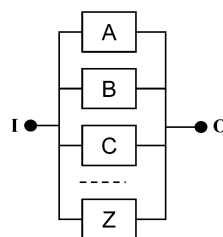


Bild 3 – Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = a + b + c + \dots + z \quad (2)$$

7.4 Gemischte Reihen- und Parallelstrukturen

Die in Bild 2 und Bild 3 dargestellte Grundstruktur kann verwendet werden, um komplexere ZBD zu modellieren. Wenn beispielsweise das gesamte in Bild 2 dargestellte ZBD dupliziert wird (d. h. redundant gemacht wird), so ergibt sich das in Bild 4 dargestellte ZBD. Wenn jedoch jeder Block innerhalb des in Bild 2 dargestellten ZBD dupliziert wird, so ergibt sich alternativ das in Bild 5 dargestellte ZBD. Diagramme dieses Typs sind als „Reihen-/Parallel“-ZBD oder „Reihen-/Parallel“-modelle bekannt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Begriffe „dupliziert“, „redundant“ und „parallel“ eine sehr ähnliche Bedeutung haben, aber nicht austauschbar verwendet werden sollten.

- 1) Dupliziert bezieht sich auf die Weise, wie das ZBD durch Wiederholung ähnlicher Strukturen aufgebaut wird. Z. B. ist Bild 4 das Duplikat der in Bild 2 dargestellten Struktur und Bild 5 ist lediglich das Duplikat der Komponenten. Tatsächlich sind die Strukturen (B1, B2), (C1, C2) usw. das Duplikat in Reihe der Parallelstruktur (A1, A2).
- 2) Redundant bezieht sich auf den Fakt, dass, wenn eine Komponente ausfällt, eine andere ihre Funktion übernehmen kann. Z. B. sind A1 und A2 in Bild 5 redundant.
- 3) Parallel bezieht sich auf die Logik der Architektur des Systems und auf die grafische Darstellung. Z. B. sind A1 und A2 in Bild 5 parallel gezeichnet, da sie redundant sind.

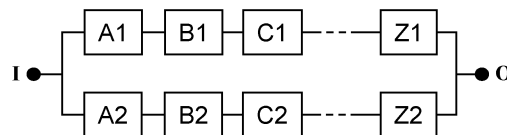


Bild 4 – Parallelstruktur, erstellt aus duplizierten Reihen-Unter-ZBD

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = (a_1 \cdot b_1 \cdot \dots \cdot z_1) + (a_2 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot z_2) \quad (3)$$

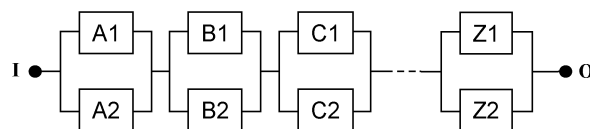


Bild 5 – Reihenstruktur, erstellt aus parallelen Zuverlässigkeitsblockdiagrammen

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = (a_1 + a_2) \cdot (b_1 + b_2) \cdot \dots \cdot (z_1 + z_2) \quad (4)$$

Die zur Modellierung der Systemzuverlässigkeit verwendeten ZBD sind oft kompliziertere Mischungen von Reihen- und Paralleldiagrammen. Z. B. kann eine duplizierte Kommunikationsverbindung aus drei Leistungsverstärkern (A₁, B₁, C₁ und A₂, B₂, C₂) sowie einem gemeinsamen Energieversorgungsblock (D) eine der in Bild 6 oder Bild 7 dargestellten Formen annehmen.

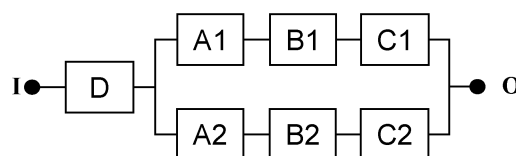


Bild 6 – Allgemeines Reihen-Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = d \cdot [(a_1 \cdot b_1 \cdot c_1) + (a_2 \cdot b_2 \cdot c_2)] \quad (5)$$

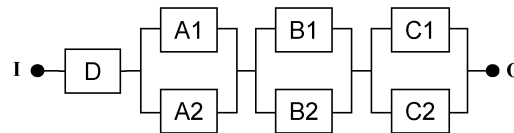


Bild 7 – Anderer Typ eines Allgemeines Reihen-Parallel-Zuverlässigkeitsblockdiagramms

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = d \cdot (a_1 + a_2) \cdot (b_1 + b_2) \cdot (c_1 + c_2) \quad (6)$$

Aufgrund der vorgenannten Annahme einer statistischen Unabhängigkeit darf der Ausfall irgendeines Blocks die Ausfallwahrscheinlichkeit irgendeines anderen Blocks innerhalb des Systems nicht erhöhen. Insbesondere beeinflusst der Ausfall eines redundanten Blocks nicht die Energieversorgung oder die Signalquellen des Systems.

7.5 Andere Strukturen

7.5.1 m von n Strukturen

Häufig ergibt sich die Anforderlichkeit, Systeme zu modellieren, bei denen nach Erfolgsdefinition mindestens m von n parallele Einheiten für den Systemerfolg erforderlich sind. Solche logischen Strukturen werden oft „Mehrheitsbeschluss“-Strukturen genannt. Das ZBD nimmt dann beispielsweise die Form in Bild 8 oder Bild 9 an.

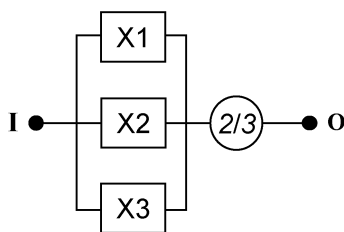


Bild 8 – 2-von-3-Redundanz

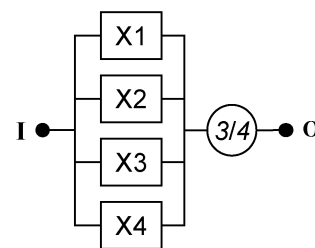


Bild 9 – 3-von-4-Redundanz

Folglich sind in Bild 8 mindestens 2 Blöcke für den Systemerfolg erforderlich und in Bild 9 sind 3 Blöcke für den Systemerfolg erforderlich. In beiden Fällen wird der Ausfall einer Einheit toleriert, nicht aber der Ausfall von zwei oder mehr Einheiten.

Diese Strukturen modellieren die folgenden logischen Funktionen:

– 2/3-Redundanz: $s = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3;$ (7)

– 3/4-Redundanz: $s = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + x_2 \cdot x_3 \cdot x_4.$ (8)

Diese logischen Funktionen können nicht durch eine einfache Kombination der einfachen Reihen- und Parallelstruktur dargestellt werden, ohne wiederholte Blöcke zu implementieren.

7.5.2 Strukturen mit gemeinsamen Blöcken

Die meisten ZBD sind leicht verständlich und die Bedingungen für den Systemerfolg sind offensichtlich. Jedoch können nicht alle ZBD zu Kombinationen von Reihen- oder Parallelstrukturen vereinfacht werden, bei denen die Blöcke nur einmal auftreten. Ein Beispiel hierfür ist das ZBD in Bild 10 mit einem für beide Pfade gemeinsamen Block A.

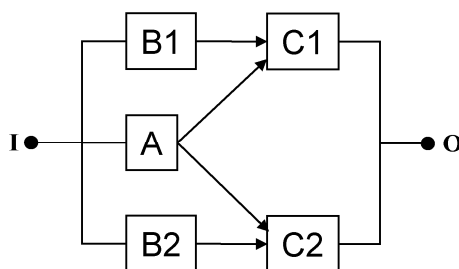


Bild 10 – Nicht einfach durch Reihen-/Parallel-Schaltung von Blöcken darstellbares Diagramm

Diese Struktur modelliert die folgende logische Funktion:

$$s = (b_1 \bullet c_1) + a \bullet (c_1 + c_2) + (b_2 \bullet c_2) \quad (9)$$

Auch hier ist das Diagramm selbsterklärend. Der Systemerfolg tritt ein, wenn sich die Blöcke B1 und C1 oder die Blöcke A und C1 oder A und C2 oder schließlich B2 und C2 im Klarzustand befinden. Bild 10 könnte die Treibstoffversorgung für die Triebwerke eines Leichtflugzeuges darstellen. B1 stellt die Versorgung des Backbordtriebwerks (C1) dar, B2 stellt die Versorgung des Steuerbordtriebwerks (C2) dar und A stellt eine gemeinsame Reserveversorgung beider Triebwerke dar. Die Definition für Systemerfolg/-ausfall lautet, dass beide Triebwerke ausfallen müssen, bevor das Flugzeug ausfällt.

Es sollte angemerkt werden, dass in allen vorgenannten Diagrammen (Bild 2 bis Bild 10) kein Block mehr als einmal in einem gegebenen Diagramm erscheint. Die Verfahren, die bei Diagrammen dieser Art für die Entwicklung des Ausdrucks für die Überlebenswahrscheinlichkeit verwendet werden, sind in 8.2 erläutert. Bild 18 und Bild 19 stellen Reihen-Parallel-ZBDs bereit, die äquivalent zu Bild 10, jedoch mit wiederholten Blöcken implementiert sind.

7.5.3 Zusammengesetzte Blöcke

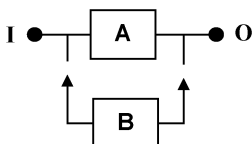


Bild 11 – Beispiel für ein ZBD mit Implementierung von abhängigen Blöcken

Bild 11 modelliert ein System mit einer kalten Bereitschaftsredundanz, bei der Einheit B startet, wenn Einheit A ausfällt, und mit einem perfekten Umschalten von A zu B. Dann sind die Blöcke A und B im entsprechenden ZBD nicht unabhängig voneinander, und diese Struktur verletzt die grundlegende Annahme der Unabhängigkeit zwischen Blöcken, welche die Grundlage der vorliegenden Norm ist.

Da die Blöcke A und B nicht als voneinander unabhängig erachtet werden können, ist es erforderlich, sie als ein Ganzes zu betrachten und dies kann mit Hilfe eines zusammengesetzten Blocks wie dem in Bild 12 dargestellten Block C erfolgen.

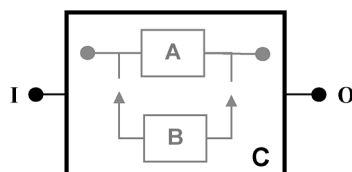


Bild 12 – Beispiel für einen zusammengesetzten Block

Der zusammengesetzte Block C hat zwei Zustände: Erfolg/Ausfall. Wenn er dann unabhängig von den anderen Blöcken des ZBD ist, kann er als einzelner Block behandelt werden. Natürlich muss seine Ausfall-/Erfolgswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Blöcke A und B und der Abhängigkeit zwischen ihnen berechnet werden.

7.6 Große ZBDs und die Verwendung von Transferelementen

ZBD industrieller Systeme können zu groß sein, um als Ganzes auf einem einzigen Blatt Papier gezeichnet zu werden. In diesem Fall können sie in mehrere kleinere Teile (Unter-ZBD) aufgeteilt werden, die mit Hilfe von Transferelementen miteinander verbunden sind.

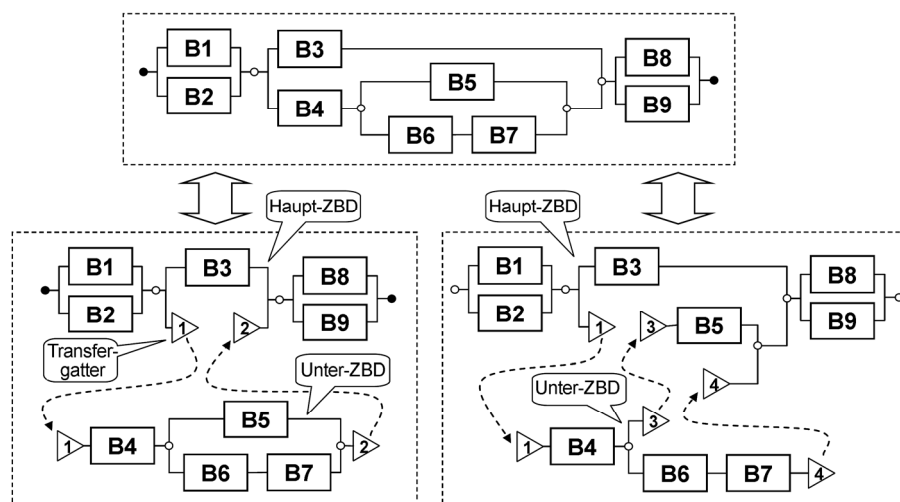


Bild 13 – Verwendung von Transferelementen und Unter-ZBDs

Bild 13 stellt zwei Beispiele für die Verwendung von Transferelementen dar: Die zwei Unter-ZBDs unten im Bild sind beide äquivalent mit dem oben stehenden ZBD. Sie sind in zwei Teile aufgespalten: Haupt-ZBD und Unter-ZBD. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Unter-ZBD nicht erforderlicherweise nur einen Eingang und einen Ausgang aufweist.

Die gesamte zugrundeliegende logische Funktion wird durch solch eine Aufspaltung nicht beeinflusst, aber dies ermöglicht das Zeichnen eines großen ZBD auf mehreren einzelnen Seiten. Es ist eine Angelegenheit des Analytikers, eine Aufteilung zu wählen, während ein gutes Verständnis des gesamten ZBD und seiner Unter-ZBD bewahrt wird.

8 Qualitative Analyse: minimale Verknüpfungs- und Trennbündel

8.1 Elektrische Analogie

Das ZBD kann zuerst für qualitative Analyse Zwecke verwendet werden durch Identifizierung:

- der Kombinationen der Blöcke im Klarzustand, die dazu führen, dass sich das System im Klarzustand befindet („Erfolgs“-Pfad oder „Verknüpfungs“-Bündel);
- der Kombinationen der Blöcke im Unklarzustand, die dazu führen, dass sich das System im Unklarzustand befindet („Ausfall“-Pfad oder „Trenn“-Bündel).

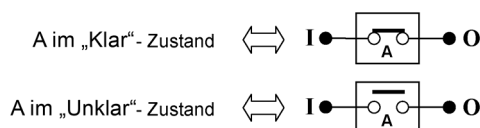


Bild 14 – Analogie zwischen einem Block und einem elektrischen Schalter

ANMERKUNG Beim Erstellen eines ZBE mit Bezug zu einem physikalischen elektrischen Stromkreis kann die Schalterstellung von ihrer in Bild 14 festgelegten Darstellung unter Verwendung einer Analogie abweichen. Z. B. wird ein physikalischer Schalter, der im geschlossenen Zustand festhängt, durch einen virtuellen Schalter dargestellt, welcher wie im Unklarzustand offen ist.

Dafür ist die Analogie mit dem in Bild 14 dargestellten elektrischen Stromkreis sehr nützlich. Sie besteht darin, dass jeder Block äquivalent zu einem elektrischen Schalter ist, der geschlossen ist, wenn sich der Block im Klarzustand befindet, und geöffnet ist, wenn er sich im Unklarzustand befindet. Dies erfolgte, um Bild 10 durch das äquivalente Bild 15 darzustellen, in dem jeder Block als elektrischer Schalter modelliert wurde.

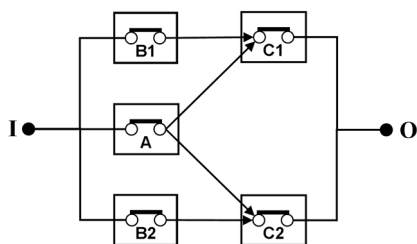


Bild 15 – Analogie zu einem elektrischen Stromkreis

Wenn dieser elektrische Stromkreis geschlossen („verknüpft“) ist, dann fließt ein elektrisches Signal, das vom Eingang gesendet wurde, durch das ZBD und erreicht den Ausgang. Folglich modelliert jede Kombination („Bündel“) geschlossener Schalter, die es einem Signal ermöglicht, vom ZBD-Eingang zum ZBD-Ausgang zu fließen, einen Klarzustand des Systems. Dies wird als „Erfolgs“-Pfad im Hinblick auf den Zustand des Systems oder „Verknüpfungs“-Bündel im Hinblick auf den Schluss des elektrischen Stromkreises bezeichnet.

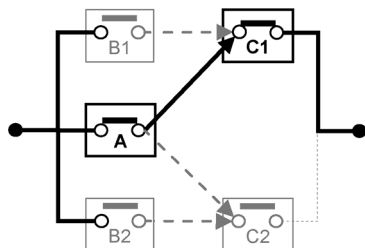


Bild 16 – Beispiel eines minimalen Erfolgspfades (Verknüpfungsbündel)

Bild 16 stellt einen der Erfolgspfade ($a \cdot c1$) des in Bild 15 dargestellten ZBD dar. Dieser Erfolgspfad ist minimal, da, wenn A oder C1 ausfallen das gesamte System auch ausfällt, d. h., die Erfolge von A und C1 sind erforderlich und ausreichend, damit das System im Erfolgszustand bleibt.

In B.3.1 sind andere Beispiele minimaler und nicht minimaler Verknüpfungsbündel angegeben.

Die Eigenschaften der Booleschen Algebra bieten eine allgemeine Darstellung des Klarzustandes s des Systems als Vereinigung der minimalen Verknüpfungsbündel (Π_i) des ZBD. Dies führt zur folgenden Gleichung:

$$s = \bigcup_i \Pi_i \quad (10)$$

Wenn dieser elektrische Stromkreis unterbrochen („getrennt“) ist, dann kann ein elektrisches Signal, das vom Eingang gesendet wurde, nicht durch das ZBD fließen und erreicht den Ausgang nicht. Folglich modelliert jede Kombination („Bündel“) geöffneter Schalter, die ein Signal davon abhält vom ZBD-Eingang zum ZBD-Ausgang zu fließen, einen Unklarzustand des Systems. Dies wird „Ausfall“-Pfad im Hinblick auf den Zustand des Systems oder „Trenn“-Bündel im Hinblick auf den Schluss des elektrischen Stromkreises genannt.

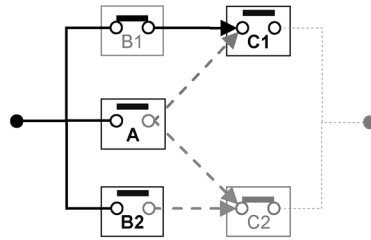


Bild 17 – Beispiel eines minimalen Ausfallpfades (Trennbündel)

Bild 17 stellt einen der Ausfallpfade $(\bar{a} \bullet \bar{b}_2 \bullet \bar{c}_1)$ des in Bild 15 dargestellten ZBD dar. Dieser Ausfallpfad ist minimal, da, wenn A, B2 oder C1 repariert sind (Schließen der Schalter), das gesamte System auch repariert ist, d. h., die Ausfälle von A, B2 und C1 sind erforderlich und ausreichend, damit das System im Ausfallzustand bleibt.

In B.3.1 sind andere Beispiele minimaler und nicht minimaler Trennbündel angegeben.

Die Eigenschaften der Booleschen Algebra bieten eine allgemeine Darstellung des Unklarzustandes $\bar{s}$ als Vereinigung der minimalen Trennbündel (C_j) des ZBD:

$$\bar{s} = \bigcup_j C_j \quad (11)$$

Folglich erhalten wir aus den Gleichungen (10) und (11) die Identität:

$$s = \bigcup_i \Pi_i \equiv \overline{\bigcup_j C_j} \quad (12)$$

Die minimalen Trennbündel und minimalen Verknüpfungsbündel können durch Erweiterung der logischen Gleichungen bestimmt werden, die dem ZBD entsprechen. Außer in einfachen Fällen ist dies nicht einfach von Hand durchzuführen, es sind aber leistungsfähige Algorithmen verfügbar, die in ZBD-Softwarepaketen implementiert sind.

8.2 Reihen-Parallel-Darstellung mit minimalem Erfolgspfad und Trennbündeln

Die Identität (12) bietet zwei äquivalente Wege, ein ZBD anhand seiner minimalen Verknüpfungsbündel oder seiner minimalen Trennbündel darzustellen.

Auf das in Bild 10 dargestellte ZBD angewandt führt dies zu zwei äquivalenten logischen Gleichungen (siehe detaillierte Erklärungen in B.3.2):

$$s = \bigcup_i \Pi_i = b_1 \bullet c_1 + a \bullet c_1 + a \bullet c_2 + b_2 \bullet c_2 \quad (13)$$

$$s = \overline{\bigcup_j C_j} = (b_1 + a + b_2) \bullet (c_1 + c_2) \bullet (b_1 + a + c_2) \bullet (b_2 + a + c_1) \quad (14)$$

Dann kann dieses ZBD durch die in Bild 18 (aus Verknüpfungsbündeln erstellt) und in Bild 19 (aus Trennbündeln erstellt) abgebildeten äquivalenten Darstellungen ersetzt werden, in denen bemerkt werden kann, dass einige Blöcke mehrfach wiederholt werden.

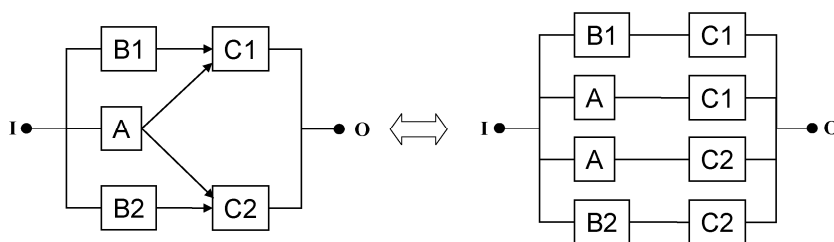


Bild 18 – Äquivalente ZBDs mit minimalen Erfolgspfaden

Bild 18 ist aus vier Verknüpfungsbündeln der Ordnung 2 erstellt (siehe 3.16, Anmerkung 2 zum Begriff):

$(b_1 \cdot c_1)$, $(a \cdot c_1)$, $(a \cdot c_2)$ und $(b_2 \cdot c_2)$.

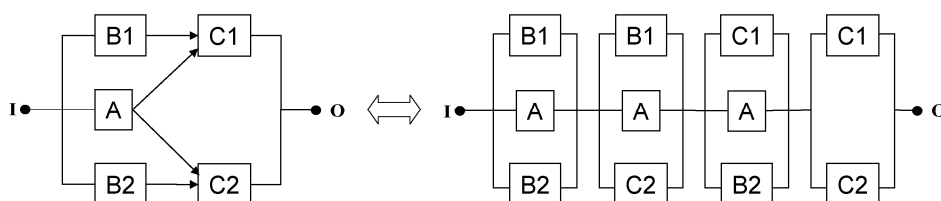


Bild 19 – Äquivalente ZBDs mit minimalen Trennbündeln

Bild 19 ist aus einem Trennbündel der Ordnung 2 und aus drei Trennbündeln der Ordnung 3 erstellt:

$(\bar{a} \cdot \bar{b}_1 \cdot \bar{b}_2)$, $(\bar{a} \cdot \bar{b}_1 \cdot \bar{c}_2)$ und $(\bar{a} \cdot \bar{b}_2 \cdot \bar{c}_1)$.

8.3 Qualitative Analyse anhand minimaler Trennbündel

Zur Durchführung einer qualitativen Analyse, ist es sinnvoller die minimalen Trennbündel anstelle der minimalen Verknüpfungsbündel zu betrachten, selbst wenn sie dieselben Informationen darstellen. Dies kann unter Anwendung des vorgenannten Beispiels gezeigt werden: Das Trennbündel der Ordnung 2 $(\bar{c}_1 \cdot \bar{c}_2)$ ist wahrscheinlicher als die Trennbündel der Ordnung 3 $(\bar{a} \cdot \bar{b}_1 \cdot \bar{b}_2)$, $(\bar{a} \cdot \bar{b}_1 \cdot \bar{c}_2)$ oder $(\bar{a} \cdot \bar{b}_2 \cdot \bar{c}_1)$. Folglich ist vom qualitativen Standpunkt das minimale Trennbündel $(\bar{c}_1 \cdot \bar{c}_2)$ der Schwachpunkt und sollte zuerst verbessert werden.

Folglich darf die qualitative Analyse mit den folgenden Schritten durchgeführt werden:

- Identifizieren der minimalen Trennbündel der logischen Gleichung des Systemausfalls;
- Sortieren der minimalen Trennbündel in aufsteigender Ordnung;
- Fokussieren auf das kürzeste minimale Trennbündel, um das System zu verbessern.

Wenn die Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Blöcke verfügbar sind, dann können die minimalen Trennbündel in Schritt b) durch die Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines jeden genauer sortiert werden.

9 Quantitative Analyse: Blöcke mit konstanter Ausfall-/Erfolgswahrscheinlichkeit

9.1 Reihenstrukturen

In Bild 20 ist die Verbindung zwischen der Booleschen Gleichung einer grundlegenden Reihenstruktur und den Wahrscheinlichkeitsberechnungen dargestellt.