

DIN EN 61649

ICS 03.120.30

**Weibull-Analyse (IEC 61649:2008);
Deutsche Fassung EN 61649:2008**

Weibull analysis (IEC 61649:2008);
German version EN 61649:2008

Analyse de Weibull (CEI 61649:2008);
Version allemande EN 61649:2008

Gesamtumfang 73 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2008-10-01 angenommene EN 61649 gilt als DIN-Norm ab 2009-03-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 61649:2004-11.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 132 „Zuverlässigkeit“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im 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 (maintenance result 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 eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

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

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen 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.

Deutsche Fassung

Weibull-Analyse
(IEC 61649:2008)

Weibull analysis
(IEC 61649:2008)

Analyse de Weibull
(CEI 61649:2008)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2008-10-01 angenommen. Die 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 Zentralsekretariat 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 Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

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

CENELEC

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

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

© 2008 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 61649:2008 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 56/1269/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 61649, ausgearbeitet von dem IEC/TC 56 „Dependability“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2008 10 01 als EN 61649 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2009-07-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2011-10-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61649:2008 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 60300-1	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60300-1:2003 (nicht modifiziert).
IEC 60300-2	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60300-2:2004 (nicht modifiziert).
IEC 60300-3-1	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60300-3-1:2004 (nicht modifiziert).
IEC 60300-3-2	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60300-3-2:2005 (nicht modifiziert).
IEC 60300-3-4	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 60300-3-4:2008 (nicht modifiziert).
IEC 61703	ANMERKUNG	Harmonisiert als EN 61703:2002 (nicht modifiziert).

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe, Abkürzungen und Formelzeichen	8
3.1 Begriffe	8
3.2 Abkürzungen	9
3.3 Formelzeichen	10
4 Anwendung der Verfahren	10
5 Die Weibull-Verteilung	11
5.1 Die zweiparametrische Weibull-Verteilung	11
5.2 Die dreiparametrische Weibull-Verteilung	13
6 Datenmerkmale	13
6.1 Datenarten	13
6.2 Dauer bis zum ersten Ausfall	13
6.3 Materialeigenschaften und die Weibull-Verteilung	13
6.4 Stichprobenumfang	14
6.5 Zensurierte und gestutzte Daten	14
7 Graphische Methoden und Passgenauigkeit	14
7.1 Überblick	14
7.2 Einzeichnen der Stichprobendaten in das Weibull-Netz	15
7.3 „Hazard plotting“-Verfahren	18
8 Interpretation des Weibull-Wahrscheinlichkeitsdiagramms	19
8.1 Badewannenkurve	19
8.2 Verdeckte bzw. maskierte Ausfallarten	21
8.3 Kleine Stichproben	21
8.4 Ausreißer	22
8.5 Interpretation nicht-linearer Diagramme	22
9 Numerische Verfahren und Passgenauigkeit	26
9.1 Einführung	26
9.2 Annahmen und Bedingungen	26
9.3 Einschränkungen und Genauigkeit	26
9.4 Ein- und Ausgabedaten	26
9.5 Statistischer Test der Passgenauigkeit (en: goodness-of-fit test)	27
9.6 MLE – Punktschätzungen der Verteilungsparameter β und η	28
9.7 Punktschätzung der mittleren Dauer bis zum Ausfall	28
9.8 Punktschätzung des Quantils (10 %) der Dauer bis zum Ausfall	28

	Seite
9.9 Punktschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit zur Zeit t ($t \leq T$)	29
9.10 Softwareprogramme	29
10 Vertrauensbereiche	29
10.1 Intervallschätzung von β	29
10.2 Intervallschätzung von η	30
10.3 Median-Rank-Regression (MRR) zur Ermittlung der binomialen Grenzen	31
10.4 Grenzen nach der Methode „Fisher-Matrix“	31
10.5 Untere Vertrauensgrenze für B_{10}	31
10.6 Untere Vertrauensgrenze für R	32
11 Vergleich der Schätzverfahren Median-Rank-Regression (MRR) und Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE).....	32
11.1 Graphische Darstellung	32
11.2 Schätzungen der B-Lebensdauer, manchmal auch B- oder L-Quantile genannt	32
11.3 Kleine Stichprobenumfänge	32
11.4 Formparameter β	33
11.5 Vertrauensbereiche	33
11.6 Ein einziger Ausfall	33
11.7 Mathematische Strenge.....	33
11.8 Präsentation der Ergebnisse	33
12 WeiBayes-Methode	33
12.1 Beschreibung.....	33
12.2 Methode.....	34
12.3 WeiBayes ohne Ausfälle.....	34
12.4 WeiBayes mit Ausfällen.....	34
12.5 WeiBayes-Fallbeispiel	35
13 Methode „plötzlicher Tod“	36
14 Andere Verteilungen.....	38
Anhang A (informativ) Beispiele und Fallstudien.....	39
A.1 Ausfälle kurzlebiger Teile	39
A.2 Nah beisammen liegende Seriennummern	39
A.3 Steile Geraden.....	40
Anhang B (informativ) Rechenbeispiel	41
Anhang C (informativ) Median-Rank-Tabellen	43
C.1 Median-Rank-Tabellen, 5%-Ranks	43
C.2 Median-Rank-Tabellen, 95%-Ranks	45
C.3 Median-Rank-Tabellen 50%-Ranks	47
C.4 Ranks mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms erzeugen	48
Anhang D (normativ) Statistische Tabellen	49
D.1 Tabelle der Gammafunktion	49

	Seite
D.2 Quantile der Normalverteilung	50
Anhang E (informativ) Beispiel einer Tabellenkalkulation	51
E.1 Beispiel einer Weibull-Analyse mittels einer Tabellenkalkulation	51
E.2 Beispiel mit gestutzten Merkmalswerten	52
E.3 „Hazard plotting“ – Beispiel 1	54
E.4 „Hazard plotting“ – Beispiel 2	56
Anhang F (informativ) Beispiel eines Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetzes	59
Anhang G (informativ) Mischung mehrerer Ausfallarten	60
G.1 Beschreibung	60
G.2 Konkurrierende Risiken	61
G.3 Einfache Mischung	61
G.4 Konkurrierende Risikomischungen	61
Anhang H (informativ) Beispiel einer dreiparametrischen Weibull-Verteilung	62
Anhang I (informativ) Konstruktion eines Weibull-Netzes	64
I.1 Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz	64
I.2 Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms zur Konstruktion eines Weibull-Diagramms	65
I.3 Handelsübliche Software	66
Anhang J (informativ) Technische Hintergrundinformation und Verweise	67
J.1 Statistischer Test der Passgenauigkeit (en: goodness of fit test)	67
J.2 Maximum-Likelihood-Schätzung von β und η	67
J.3 Vertrauensbereiche und untere Vertrauensgrenzen	67
J.4 Genauigkeit der genormten Verfahren	67
J.4.1 Bain und Engelhardt (1986)	67
J.4.2 Lawless (1978)	68
J.4.3 Meeker und Nelson (1976)	68
J.4.4 Guida (1985)	68
J.5 Schriftstückverweise	68
Literaturhinweise	69
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	71
Bild 1 – Die Formen der Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibull-Familie für $\eta = 1,0$	12
Bild 2 – Gesamtprüfdauer (in Minuten)	17
Bild 3 – Typische Badewannenkurve einer Einheit	20
Bild 4 – Weibull-Diagramm mit möglicherweise maskierten Ausfallarten	21
Bild 5 – Stichprobenumfang 10	22
Bild 6 – Stichprobenumfang 100	22
Bild 7 – Beispiel einer ungenügenden Passung einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung	23

	Seite
Bild 8 – Dieselben mit einer dreiparametrischen Weibull-Verteilung aufgetragenen Daten zeigen eine gute Einpassung bei einem Versatz von 3 Monaten (Verschiebungsparameter: 2,99 Monate)	24
Bild 9 – Beispiel einer Schätzung von t_0 mit dem Auge	25
Bild 10 – Neue WeiBayes-Kompressorkonstruktion gegen alte Konstruktion.....	36
Bild A.1 – Kurzlebige Teile einer Hauptölpumpe	39
Bild A.2 – Lagerausfälle bei Druckerhöhungspumpen	40
Bild A.3 – Steile Geraden (sehr große β) verbergen Probleme	40
Bild B.1 – In ein Weibull-Netz eingetragene numerische Berechnungen	42
Bild E.1 – Weibull-Diagramm zur graphischen Analyse	52
Bild E.2 – Weibull-Diagramm zensorisierter Merkmalswerte	54
Bild E.3 – Kumulierte momentane Ausfallrate $H(t)$, aufgetragen mit den Daten der Tabelle E.4.....	56
Bild E.4 – Diagramm der kumulierten momentanen Ausfallraten mit den Daten aus Tabelle E.6	58
Bild F.1 – Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz	59
Bild H.1 – Bruchfestigkeit von Stahl – kurvige Daten	62
Bild H.2 – Ursprungsverschiebung t_0 verbessert die Einpassung der Daten von Bild H.1	63
 Tabelle 1 – Anleitung zur Anwendung der Norm IEC 61649.....	 10
Tabelle 2 – Geordnete Merkmalswerte (Ausfallzeitpunkt) von losen Nieten.....	15
Tabelle 3 – Angepasste Rangfolgen bei gestutzten oder zensorisierten Daten	16
Tabelle 4 – Untergruppengröße zur Schätzung der Dauer bis $X\%$ Ausfälle mittels der Methode „plötzlicher Tod“	37
Tabelle 5 – Ergebnisse aus einer Prüfung von Ketten: Zyklen bis zum Ausfall	38
Tabelle B.1 – Dauern bis zum Ausfall.....	41
Tabelle B.2 – Ergebniszusammenfassung	42
Tabelle C.1 – Median-Rank, 5%-Ranks	43
Tabelle C.2 – Median-Rank, 95%-Ranks	45
Tabelle C.3 – Median-Rank, 50%-Ranks	47
Tabelle D.1 – Werte der Gammafunktion	49
Tabelle D.2 – Quantile der Normalverteilung.....	50
Tabelle E.1 – Beispiel einer praktischen Analyse.....	51
Tabelle E.2 – Aufbau einer Tabellenkalkulation zur Analyse zensorisierter Daten.....	53
Tabelle E.3 – Beispiel einer Weibull-Analyse mit gestutzten Daten.....	53
Tabelle E.4 – Beispiel einer auf zensorisierte Daten angewendeten Tabellenkalkulation	55
Tabelle E.5 – Beispiel Tabellenkalkulation	55
Tabelle E.6 – Von IEC/TC94 zur Verfügung gestellte Relaisdaten und „Hazard-Analyse“ für Ausfallart Modus 1.....	57
Tabelle I.1 – Konstruktion der Ordinate (Y)	65
Tabelle I.2 – Konstruktion der Abszisse (t).....	65
Tabelle I.3 – Zur Eingabe in ein Tabellenkalkulationsprogramm aufbereitete Daten.....	65

Einleitung

Mit der Weibull-Verteilung kann man die Ausfallrate unabhängig davon modellieren, ob sie zu- oder abnimmt oder gleich bleibt. Die Weibull-Verteilung ist flexibel und kann an einen weiten Datenbereich angepasst werden. Von allen Einheiten müssen die Dauer bis zum Ausfall, die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall, die Entfernung bis zum Ausfall, die mechanische Beanspruchung oder ähnliche kontinuierlich wirkende Parameter aufgezeichnet werden. Selbst wenn nicht alle Einheiten ausgefallen sind, kann die Lebensdauer-Verteilung modelliert werden.

In dieser Norm wird zur Datenanalyse mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms angeleitet. Ebenfalls wird dazu angeleitet, verschiedene Ausfallarten getrennt zu analysieren und eine möglicherweise schwache Grundgesamtheit zu identifizieren. Mittels der dreiparametrischen Weibull-Verteilung kann man Informationen über die Dauer bis zum ersten Ausfall oder über die minimale Lebensdauer der Einheiten einer Stichprobe erhalten.

1 Anwendungsbereich

Diese internationale Norm enthält Verfahren zur Analyse von Daten, die einer Weibull-Verteilung folgen, wobei kontinuierliche Parameter wie Dauer bis zum Ausfall, Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall, mechanische Beanspruchung usw. verwendet werden.

Diese Norm ist dann anwendbar, wenn Daten über die Beanspruchbarkeit, also etwa Daten zu Ausfällen, Zyklen, Beanspruchung usw., von einer Stichprobe von Einheiten verfügbar sind und diese Einheiten dabei entweder unter Prüfbedingungen betrieben werden oder aus dem tatsächlichen Betrieb stammen, um anhand dieser Angaben Maßgrößen der Zuverlässigkeit (Funktionsfähigkeit) für die Grundgesamtheit zu schätzen, aus der diese Stichprobe entnommen wurde.

Diese Norm ist dann anwendbar, wenn die zu analysierenden Daten statistisch voneinander unabhängig und in gleicher Weise verteilt sind. Diese Annahme sollte entweder durch statistische Tests bestätigt oder als wahr angenommen werden (siehe IEC 60300-3-5).

In dieser Norm werden numerische und graphische Verfahren beschrieben, mittels derer man Daten graphisch auftragen, einen Anpassungstest machen, die Parameter einer zweiparametrischen oder dreiparametrischen Weibull-Verteilung schätzen und die Vertrauensgrenze graphisch auftragen kann. Es wird dazu angeleitet, wie die Weibull-Diagramme hinsichtlich des Risikos in Abhängigkeit von der Zeit, Ausfallarten und möglicherweise schwachen Grundgesamtheit, Dauer bis zum ersten Ausfall oder minimalen Lebensdauer zu interpretieren sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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 60050-191:1990, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 191: Dependability and quality of service*

IEC 60300-3-5:2001, *Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles*

IEC 61810-2, *Electromechanical elementary relays – Part 2: Reliability*

ISO 2854:1976, *Statistical interpretation of data – Techniques of estimations and tests relating to means and variances*

ISO 3534-1:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Probability and general statistical terms*

3 Begriffe, Abkürzungen und Formelzeichen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-191 und ISO 3534-1 sowie die folgenden Begriffe.

3.1.1

zensorisieren^{N1)}

Beenden der Prüfung, nachdem entweder eine gegebene Dauer oder eine gegebene Ausfallanzahl erreicht wurde

ANMERKUNG Wird eine Prüfung beendet und gibt es noch nicht ausgefallene Einheiten (Prüflinge), darf diese „zensorisierte Prüfung“ genannt werden, und die zeitbezogenen Daten aus solchen Prüfungen dürfen mit „zensorisierte Daten“ bezeichnet werden.

3.1.2

gestutzte Einheit

Einheit, deren Prüfung ohne relevanten Ausfall abgebrochen wurde

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist möglicherweise noch nicht ausgefallen oder ist in einer anderen als der untersuchten Fehlerart ausgefallen.

ANMERKUNG 2 Eine „frühe Stutzung“ erfolgte vor dem ersten Ausfall. Eine „späte Stutzung“ erfolgte nach dem letzten Ausfall.

3.1.3

Lebensdauerprüfung

Prüfung, um die Haltbarkeit eines Produkts zu schätzen oder zu verifizieren

ANMERKUNG Das Ende der brauchbaren Lebensdauer wird oft als die Zeit definiert, zu der ein gewisser Anteil der nicht instand zu setzenden Einheiten ausgefallen ist, beziehungsweise als die Zeit, zu der die Ausfallintensität auf ein für instand zu setzende Einheiten vorab festgelegtes Maß zugenommen hat.

3.1.4

nicht instandsetzbare Einheit

Einheit, die bei gegebenen Bedingungen nach einem Ausfall nicht in einen Zustand zurückgesetzt werden kann, in dem sie bestimmungsgemäß funktioniert

ANMERKUNG Die gegebenen Bedingungen können technischer, wirtschaftlicher, ökologischer oder anderer Art sein.

3.1.5

Betriebszeitintervall

Betriebszeit

Zeitintervall, während dessen eine Einheit in Betrieb ist

ANMERKUNG „Betriebszeit“ ist allgemein zu verstehen. Sie sollte in solchen Maßgrößen ausgedrückt werden, die der Betrachtungseinheit angemessen sind, also etwa Kalenderzeit, Betriebszyklen, zurückgelegte Entfernung usw. Dabei sollten die Maßeinheiten klar genannt werden.

3.1.6

zu wertender (relevanter) Ausfall

Ausfall, der in die Bewertung von Prüf- oder Betriebsergebnissen oder in die Berechnung des Wertes einer Maßgröße der Funktionsfähigkeit einbezogen werden sollte

ANMERKUNG Die Kriterien für die Einbeziehung sollten festgelegt sein.

^{N1)} Nationale Fußnote: Nach DIN 55303-7:1996-03 bedeutet das Wort „zensorisieren“ den Verzicht auf einen direkt oder indirekt festgelegten Anteil derjenigen Werte der Stichprobe, die bei vollständiger Untersuchung der Stichprobe ermittelt werden könnten. Das Wort „stutzen“ bezeichnet den Verzicht auf einen Teil der Werte der Grundgesamtheit.

3.1.7

Zuverlässigkeitsprüfung

durchgeführtes Experiment, um eine Zuverlässigkeitsmaßgröße oder Eigenschaft (Merkmal) einer Einheit zu messen, zu quantifizieren oder zu klassieren

ANMERKUNG 1 Die Zuverlässigkeitsprüfung unterscheidet sich von der Umweltprüfung; bei letzterer soll nachgewiesen werden, dass die Prüflinge extreme Lager-, Transport- und Einsatzbedingungen überleben können.

ANMERKUNG 2 Zu Zuverlässigkeitsprüfungen können auch Umweltprüfungen gehören.

3.1.8

instandsetzbare Einheit

Einheit, die bei gegebenen Bedingungen nach einem Ausfall in einen Zustand zurückgesetzt werden kann, in dem sie bestimmungsgemäß funktioniert

ANMERKUNG Die gegebenen Bedingungen können technischer, wirtschaftlicher, ökologischer oder anderer Art sein.

3.1.9

Dauer bis zum Ausfall

akkumulierte Dauer der Betriebszeiten einer Einheit ab Anwendungsbeginn bis zum Ausfall oder ab dem Zeitpunkt der Wiederherstellung bis zum nächsten Ausfall

ANMERKUNG Bei Anwendungen, bei denen die im Lager oder in Bereitschaft verbrachte Zeit signifikant größer ist als die „Betriebszeit“, kann die Dauer bis zum Ausfall auf der in der spezifizierten Verwendung verbrachten Zeit beruhen.

3.1.10

Ausfallabstand

Dauer zwischen aufeinander folgenden Ausfällen einer instand zu setzenden Einheit

ANMERKUNG 1 Die Zeit zwischen Ausfällen umfasst die Klarzeit und die Unklarzeit.

ANMERKUNG 2 Bei Anwendungen, bei denen die im Lager oder in Bereitschaft verbrachte Zeit signifikant größer ist als die „Betriebszeit“, kann die Dauer bis zum Ausfall auf der in der spezifizierten Verwendung verbrachten Zeit beruhen.

3.1.11

B-Lebensdauer

L-Quantil

Alter, bei dem ein gegebener Anteil der Einheiten ausgefallen ist

ANMERKUNG „ B_{10} “-Lebensdauer ist das Alter, bei dem 10 % der Einheiten (z. B. Lager) ausgefallen sind. Manchmal wird dies auch mit dem L-(Lebensdauer-)Wert bezeichnet. B-Lebensdauer kann direkt aus dem Weibull-Diagramm ausgelesen oder genauer anhand der Weibull-Gleichung bestimmt werden. Das Alter, bei dem 50 % der Einheiten ausgefallen sind, B_{50} -Lebensdauer, ist der Median der Dauer bis zum Ausfall.

3.2 Abkürzungen

ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung (en: application specific integrated circuit)
BGA	Kugelgitteranordnung (en: ball grid array)
CDF	Verteilungsfunktion (en: cumulative distribution function)
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichte (Dichtefunktion) (en: probability density function)
MLE	Maximum-Likelihood-Schätzung
MRR	Median-Rank-Regression
MTTF	mittlere Dauer bis zum Ausfall

3.3 Formelzeichen

t	Zeit – Variable
η	charakteristische Lebensdauer oder Skalenparameter der Weibull-Verteilung
β	Formparameter der Weibull-Verteilung (Ausfallsteilheit)
t_0	Verschiebungsparameter (Startpunkt oder Ausgangspunkt der Verteilung, ausfallfreie Zeit)
r^2	Bestimmungskoeffizient
$f(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichte (Dichtefunktion)
$F(t)$	Verteilungsfunktion ^{N2)}
$h(t)$	momentane Ausfallrate (en: hazard function)
$\lambda(t)$	momentane Ausfallrate
$H(t)$	kumulierte momentane Ausfallrate (en: cumulative hazard function)
F_1	Anzahl von Ausfällen mit der Ausfallart 1
F_2	Anzahl von Ausfällen mit der Ausfallart 2
F_3	Anzahl von Ausfällen mit der Ausfallart 3

4 Anwendung der Verfahren

Tabelle 1 enthält eine Übersicht, in welchen Fällen die einzelnen in dieser Norm beschriebenen Verfahren anwendbar sind. Sie zeigt die drei Hauptverfahren für die Schätzung der Parameter mittels der Weibull-Verteilung, nämlich das graphische Verfahren, das Berechnungsverfahren und WeiBayes, und gibt die Merkmale der jeweils erforderlichen Daten für jedes dieser drei Verfahren an.

Tabelle 1 – Anleitung zur Anwendung der Norm IEC 61649

Verfahren / Datenmerkmale der Stichprobe	Graphische Verfahren	Berechnungsverfahren	WeiBayes
In Intervallen zensorisiert	✓	NB	✓
Mehrfach zensorisiert	✓	NB	✓
Einfach zensorisiert	✓	✓	✓
Null Ausfälle	NB	NB	✓
Kleine Stichprobe (≤ 20)	✓	NB	✓
Große Stichprobe	✓	✓	NB
„kurvige“ Daten	✓	NB	NB
Vollständige Stichprobendaten	✓	✓	✓
ANMERKUNG NB bedeutet: in dieser Norm nicht behandelt.			

^{N2)} Nationale Fußnote: Übliche Bezeichnungen für die Verteilungsfunktion sind $F(x)$ und $G(x)$, wobei x ein beliebiger Merkmalswert sein kann. Das betrachtete Merkmal x ist häufig die Zeit t . Die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ oder $g(x)$ ist die erste Ableitung der Verteilungsfunktion $F(x)$ beziehungsweise $G(x)$, falls sie existiert.

5 Die Weibull-Verteilung

5.1 Die zweiparametrische Weibull-Verteilung

Die zweiparametrische Weibull-Verteilung ist die am häufigsten verwendete Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Analyse von Lebensdauerdaten. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibull-Verteilungsfunktion ist in Gleichung (1) dargestellt.

$$f(t) = \beta \cdot \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

Dabei ist

- t Zeit, ausgedrückt als Variable;
- η charakteristische Lebensdauer oder Skalenparameter;
- β Formparameter (Ausfallsteilheit).

Die Weibull-Verteilungsfunktion ist in Gleichung (2) dargestellt.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

Die beiden Parameter sind die charakteristische Lebensdauer (Skalenparameter) η und der Formparameter β . Der Formparameter zeigt die Änderungsgeschwindigkeit der momentanen Ausfallrate über der Zeit an. Beispiele hierfür sind Früh-, Zufalls- oder Verschleißausfälle. Dieser Formparameter bestimmt die am besten geeignete Verteilung in der Weibull-Familie. Die verschiedenen Mitglieder haben sehr unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsdichten $f(t)$, siehe Bild 1. Mit der Weibull-Verteilung kann im Vergleich zu anderen Verteilungen ein weiterer Datenbereich analysiert werden. Die Variable t ist allgemeiner Art und kann für verschiedene Maßgrößen stehen, wie etwa Zeit, Entfernung, Anzahl der Zyklen oder einwirkende mechanische Beanspruchung.

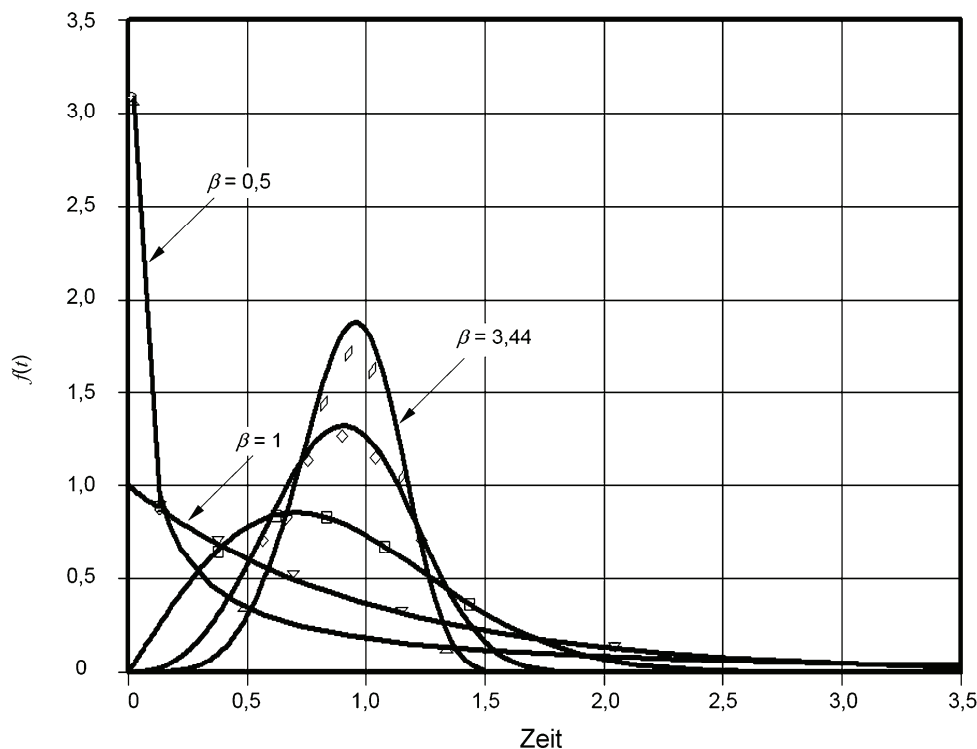


Bild 1 – Die Formen der Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibull-Familie für $\eta = 1,0$

In Bild 1 sieht die Form der Wahrscheinlichkeitsdichte für $\beta = 3,4$ (bezeichnet) wie diejenige einer Normalverteilung aus: Dies ist eine brauchbare Näherung, außer dem Schwanz der Verteilung.

Die Funktion der momentanen Ausfallrate $\lambda(t)$ (oder die im englischen Sprachraum auch benutzte alternative Bezeichnung hazard function $h(t)$) der zweiparametrischen Weibull-Verteilung ist in Gleichung (3) gezeigt.

$$\lambda(t) = h(t) = \beta \cdot \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (3)$$

Drei Wertebereiche des Formparameters β sind kennzeichnend:

- Für $\beta = 1,0$ ist die Weibull-Verteilung identisch zur Exponentialverteilung, und die momentane Ausfallrate $\lambda(t)$ wird dann zu einer Konstanten, die gleich dem Kehrwert des Skalenparameters (gleich dem Kehrwert der charakteristischen Lebensdauer) η ist.
- Für $\beta > 1,0$ nimmt die momentane Ausfallrate zu.
- Für $\beta < 1,0$ nimmt die momentane Ausfallrate ab.

Die charakteristische Lebensdauer η ist die Zeit, zu der erwartungsgemäß 63,2 % aller Einheiten ausgefallen sind. Dies gilt für alle Weibull-Verteilungen, unabhängig vom Formparameter β . Falls Einheiten ersetzt werden, haben erwartungsgemäß 63,2 % aller Einheiten eine Dauer bis zum Ausfall, die kleiner oder gleich der charakteristischen Lebensdauer η ist. Für eine tiefergehende Behandlung des Themas instandsetzbarer und nicht instandsetzbarer Einheiten wird auf IEC 60300-3-5 verwiesen. Der Wert 63,2 % ergibt sich aus der Gleichsetzung $t = \eta$ in der Gleichung (2), was zur Gleichung (4) führt.

$$F(\eta) = 1 - e^{-(\eta/\eta)^\beta} = 1 - e^{-(1)^\beta} = 1 - (1/e) = 0,632 \quad (4)$$

5.2 Die dreiparametrische Weibull-Verteilung

Die Verteilungsfunktion der dreiparametrischen Weibull-Verteilung ist in Gleichung (5) dargestellt.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Der Parameter t_0 wird ausfallfreie Zeit, Verschiebungsparameter (en: location parameter) oder minimale Lebensdauer genannt.

Üblicherweise begreift man die Wirkung des Verschiebungsparameters erst dann, wenn sich bei einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung eine schlechte Einpassung im Weibull-Diagramm ergibt. Wird eine mangelhafte Einpassung beobachtet, versuchen Ingenieure, andere Verteilungen zu verwenden, mit denen sie eine bessere Einpassung erzielen. Jedoch kann eine mangelhafte Einpassung durch die Verwendung der dreiparametrischen Weibull-Verteilung und entsprechendes Einzeichnen im Diagramm behoben werden (siehe 8.5). Verwendet man den Verschiebungsparameter, so wird es offensichtlich, dass die Produktausfälle durch einen festen Zeitbetrag, auch Schwellenwert genannt, versetzt sind. Die Wirkung des Verschiebungsparameters wird üblicherweise dann beobachtet, wenn das Produkt Lagerzeiten aufweist und sich die ersten Ausfälle danach ergeben. Ein guter Indikator für die Wirkung des Verschiebungsparameters ist die konvexe Form der Linie im Diagramm.

6 Datenmerkmale

6.1 Datenarten

Lebensdauerdaten beziehen sich auf „alternde“ Einheiten. Weibull-Ausfalldaten sind üblicherweise Lebensdauerdaten; sie können aber auch Materialdaten beschreiben, bei denen sich das „Altern“ auf Beanspruchung, Krafteinwirkung oder Temperatur bezieht. „Alter“ kann für Merkmale wie zum Beispiel Betriebsdauer, Anfahren und Anhalten, Starts und Landungen, Ermüdungszyklen, zurückgelegte Entfernung, Lagerungsdauer, Zyklen oder Verweildauer bei hoher Beanspruchung oder hoher Temperatur oder für viele weitere kontinuierliche Parameter stehen. In dieser Norm wird der „Alter“-Parameter „Zeit“ genannt. Falls erforderlich, kann „Zeit“ durch irgendeinen der vorstehend genannten „Alter“-Parameter ersetzt werden.

6.2 Dauer bis zum ersten Ausfall

Die Weibull-„Zeit“-Variable wird üblicherweise als ein Maß für den Verbrauch der Zeit gesehen. Dabei können nachfolgende Auslegungen gewählt werden:

- Dauer bis zum ersten Ausfall einer instandsetzbaren Einheit;
- Dauer bis zum Ausfall einer nicht instandsetzbaren Einheit;
- Zeit von „neu“ bis zu jedem Ausfall eines instandsetzbaren Systems, falls eine nicht instandsetzbare Einheit in dem System während der Beobachtungsperiode mehr als einmal ausfällt. Dabei wird angenommen, dass die Instandsetzung (Reparatur durch Austausch der Einheit) keinen neuen Ausfall bewirkt, so dass das System nach der Reparatur näherungsweise als ein System mit derselben Zuverlässigkeit als vor dem Ausfall angesehen werden kann (gemeinhin mit „so gut wie neu“ bezeichnet);
- Dauer bis zum ersten Ausfall einer nicht instandsetzbaren Einheit im Anschluss an eine geplante Instandhaltungsmaßnahme unter der Annahme, dass der Ausfall im Zusammenhang mit der vorausgegangenen Instandhaltung steht.

6.3 Materialeigenschaften und die Weibull-Verteilung

Materialeigenschaften wie Kriechen, Beanspruchungsrisso oder Bruch und Ermüdung werden oft in ein Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen. Die betrachteten Merkmale können in diesen Fällen Beanspruchung, Zyklenanzahl, Last, Anzahl der Lastwechselzyklen oder Temperatur usw. sein und werden über der Abszisse aufgetragen.

6.4 Stichprobenumfang

Die Ungewissheit bei der Schätzung der Weibull-Parameter ergibt sich aus dem Stichprobenumfang und der Anzahl der zu wertenden Ausfälle. Weibull-Parameter können bereits bei nur zwei bekannten Ausfällen geschätzt werden; in solch einem Fall würde die Ungewissheit solch einer Schätzung jedoch übermäßig hoch sein, und man könnte die Anwendbarkeit des Weibull-Modells nicht bestätigen. Für jeden Stichprobenumfang sollten die Vertrauensgrenzen berechnet und zeichnerisch aufgetragen und die Schätzungsgewissheit beurteilt werden.

Wie immer bei statistischen Analysen wird die Schätzung umso besser, je mehr Daten verfügbar sind. Wenn der Datensatz aber begrenzt ist, wird auf den in 11.3 gegebenen Rat verwiesen.

6.5 Zensorisierte und gestutzte Daten

Bei der Analyse von Lebensdauerdaten müssen sowohl die Daten der nicht ausgefallenen Einheiten der Stichprobe als auch die gemäß dem Ergebnis einer Ausfallartenanalyse nicht ausgefallenen Einheiten mit beachtet werden. Diese Daten werden als zensorisiert oder gestutzt bezeichnet (siehe IEC 60300-3-5). Wenn die Dauern bis zum Ausfall aller Prüflinge beobachtet werden, werden die dabei erfassten Daten als vollständig bezeichnet.

Ein Prüfling, der nicht in der gefragten Ausfallart ausgefallen ist, wird als zensorisierte oder gestutzte Einheit bezeichnet. Der Prüfling kann in einer anderen Ausfallart ausgefallen oder überhaupt nicht ausgefallen sein. Eine „frühe Stutzung“ liegt dann vor, wenn eine Einheit vor der ersten Ausfalldauer gestutzt wurde. Eine „späte Stutzung“ liegt dann vor, wenn eine Einheit nach der letzten Ausfalldauer gestutzt wurde. Stutzungen zwischen Ausfällen werden als zufällige oder progressive Stutzungen bezeichnet.

Wenn Prüflinge nach Ablauf der Prüfdauer immer noch nicht ausgefallen sind, bezeichnet man die dabei erhaltenen Daten als zensorisiert. Wenn eine Prüfung zu einer vorgegebenen Zeit T beendet wird, noch bevor alle Prüflinge ausgefallen sind, dann bezeichnet man die dabei erhaltenen Daten als Zeit-zensorisiert. Wenn eine Prüfung nach einer vorgegebenen und eingetretenen Anzahl von Ausfällen beendet wird, bezeichnet man die dabei erhaltenen Daten als Ausfall-zensorisiert.

Für Einzelheiten zur Zensorisierung wird auf IEC 60300-3-5 verwiesen.

7 Graphische Methoden und Passgenauigkeit

7.1 Überblick

Bei der graphischen Analyse werden die Messdaten in ein Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz eingezeichnet, durch die Datenpunkte wird eine Gerade eingepasst, die Zeichnung wird interpretiert und die Parameter werden geschätzt. Dabei wird ein spezielles Wahrscheinlichkeitsnetz verwendet, das man durch Transformation der Weibull-Gleichung in eine lineare Form erhalten hat. Dies ist in Anhang I detailliert beschrieben.

Die Daten werden zunächst geordnet in der Rangfolge frühester Ausfall bis letzter Ausfall, ein Vorgang, der im Englischen mit Ranking bezeichnet wird. Die einzelnen Dauern bis zum Ausfall werden als X-Achse (Abszisse) im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen.

Die Y-Achse ist die relative Häufigkeitssumme^{N3)} (Median-Rank) wie in 7.2.1 festgelegt. Für Stichprobenumfänge größer 30 ist die Häufigkeitssumme (Median-Rank) praktisch gleich dem Ausfallprozentsatz. Folgen die so eingetragenen Werte einem linearen Trend, darf eine Regressionslinie gezogen werden.

^{N3)} Nationale Fußnote: Die relative Häufigkeitssumme ist nach DGQ 11-04 „die Anzahl der Einzel-Istwerte, die einen vorgegebenen Zahlenwert nicht überschreiten, dividiert durch die Gesamtzahl der Einzel-Istwerte“. Einzel-Istwerte sind hier die Ausfallereignisse. Der Kürze wegen wird in dieser Übersetzung die relative Häufigkeitssumme durch Häufigkeitssumme ersetzt.

Die Parameter dürfen dann aus der Zeichnung ausgelesen werden. Die charakteristische Lebensdauer η ist der Zeitpunkt, zu dem 63,2 % der Einheiten ausgefallen sind, sie wird „B63,2-Lebensdauer“ genannt. Die Steilheit der Geraden im Weibull-Netz liefert einen Schätzwert für den Formparameter β .

Median-Rank-Regression (MRR) ist eine Methode zur Schätzung der Verteilungsparameter, die sich linearer Regressionstechniken bedient, wobei die Variablen dabei die Häufigkeitssumme (Median-Rank) und Lebensdauer oder Beanspruchung usw. sind.

Ein weiteres graphisches Verfahren zur Schätzung der Parameter einer Weibull-Verteilung ist das „hazard plotting“-Verfahren. Dieses ist in 7.3 beschrieben.

7.2 Einzeichnen der Stichprobendaten in das Weibull-Netz

Um das Weibull-Wahrscheinlichkeitsdiagramm zu erstellen, muss eine Abfolge von Arbeitsschritten ausgeführt werden. Diese Arbeitsschritte werden nachfolgend im Detail beschrieben.

7.2.1 Die Rangfolge

Vor dem Einzeichnen der Stichprobendaten in das Weibull-Netz müssen die Merkmalswerte in aufsteigender Rangfolge (kürzeste Dauer bis längste Dauer bis zum Ausfall) geordnet werden. Durch dieses Ordnen (en: ranking) erhält man die Ordinatenwerte $F(i)$ in Prozent zu den zugehörigen Abszissenwerten (Zeitachse t). Hieraus ergeben sich die für das Einzeichnen der Weibull-Geraden gemäß Gleichung I.3 benötigten Angaben.

Die Werte der geordneten Merkmalswerte (Median-Ranks) können aus Anhang C entnommen werden. Als Beispiel gehe man für einen Stichprobenumfang 5 in diese Tabellen und entnehme die 50-%-Median-Ranks für fünf Ausfalldauern, siehe mittlere Spalte in Tabelle 2. Bei allen Arten von Wahrscheinlichkeitsnetzen (z. B. Weibull, Lognormal, Normal und Extremwerte) werden beim Einzeichnen der Median-Ranks dieselben Positionen gemäß Anhang C verwendet.

ANMERKUNG 1 Man beachte, dass bei zwei gleichen Merkmalswerten (Punkte gleicher Dauer) diese Punkte bei verschiedenen Median-Ranks eingezeichnet werden.

Tabelle 2 – Geordnete Merkmalswerte (Ausfallzeitpunkt) von losen Nieten

Ordnungszahl (i)	Merkmalswert „Ausfallzeitpunkt t “ (in Minuten auf der Abszisse)	Median-Rank (% auf der Ordinate)
1	30	12,94
2	49	31,38
3	82	50,00
4	90	68,62
5	96	87,06

Bei unsymmetrischen Verteilungen wird die Median-Schätzung dem Mittel- oder Durchschnittswert vorgezogen. Die meisten Lebensdauerverteilungen sind schief, daher kommt dem Median eine wichtige Rolle zu.

Sollte eine Tabelle der Median-Ranks und Mittel zur Berechnung der Median-Ranks anhand der Beta-Verteilung nicht verfügbar sein, darf auch die Benard-Näherung nach Gleichung (6) verwendet werden.

$$F_i = \frac{(i - 0,3)}{(N + 0,4)} \% \quad (6)$$

Hierbei bezeichnet N den Stichprobenumfang und i die geordnete Position (Ordnungszahl) des betrachteten Merkmalwertes.

ANMERKUNG 2 Diese Gleichung wird hauptsächlich für $N \leq 30$ verwendet; für $N > 30$ kann die Korrektur der Häufigkeitssumme vernachlässigt werden: $F_i = (i/N) \cdot 100 \%$.

7.2.2 Das Weibull-Wahrscheinlichkeitsdiagramm

Nach der Datentransformation kann das Diagramm mittels dreier verschiedener Verfahren konstruiert werden:

- Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz – im Anhang F ist ein Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz gezeigt;
- Tabellenkalkulationsprogramm – Anhang E enthält ein Beispiel einer Tabellenkalkulation;
- handelsübliche Software.

7.2.3 Behandlung gestutzter und zensorisierter Daten

Nicht ausgefallene Einheiten oder Einheiten, die aufgrund einer anderen Ausfallart ausfallen, sind „zensurierte“ bzw. „gestutzte“ Einheiten. Diese Merkmale können nicht ignoriert werden. Die Dauern gestutzter Einheiten müssen bei der Analyse berücksichtigt werden.

Nachfolgende Formel gibt die angepassten Rangfolgen (en: ranks) ohne die Notwendigkeit zur Berechnung inkrementeller Rangfolgen. Sie wird für jeden Ausfall angewendet und bedarf einer weiteren Spalte für inverse Rangfolgen. Bei dem Verfahren werden die gestutzten Daten geordnet und die Ordnungen (Rangfolgen) mittels der folgenden, auf das Vorhandensein gestutzter Merkmalswerte angepassten Gleichung (7) bestimmt.

$$\text{angepasste Rangfolge} = \frac{(\text{inverser Rang}) \times (\text{vorheriger angepasster Rang}) + (N + 1)}{(\text{inverser Rang}) + 1} \quad (7)$$

Die Ordnungszahlen werden gemäß der Auswirkung der drei gestutzten Einheiten in Tabelle 3 angepasst.

Tabelle 3 – Angepasste Rangfolgen bei gestutzten oder zensorisierten Daten

Ordnungszahl	Zeit	Status	Inverse Rangfolge	Angepasste Rangfolge	Median-Rank (%)
1	10	Stutzung	8	gestutzt ...	
2	30	Ausfall	7	$[7 \times 0 + (8+1)] / (7+1) = 1,125$	9,8
3	45	Stutzung	6	gestutzt ...	
4	49	Ausfall	5	$[5 \times 1,125 + (8+1)] / (5+1) = 2,438$	25,5
5	82	Ausfall	4	$[4 \times 2,438 + (8+1)] / (4+1) = 3,750$	41,1
6	90	Ausfall	3	$[3 \times 3,750 + (8+1)] / (3+1) = 5,063$	56,7
7	96	Ausfall	2	$[2 \times 5,063 + (8+1)] / (2+1) = 6,375$	72,3
8	100	Stutzung	1	gestutzt ...	

In diesem Beispiel wird für die angepassten Rangfolgen die Benard-Näherung zur Berechnung der Median-Ranks verwendet, da dies einfacher als das Interpolieren in der Tabelle ist. Die Ergebnisse in Tabelle 3 sind in Bild 2 eingezeichnet.

ANMERKUNG Wenn zwei gleichaltrige Einheiten ausfallen, werden ihnen aufeinanderfolgende Ordnungsnummern zugewiesen. Im Falle späterer Stutzung muss das Verfahren für den Rest der Ausfälle wiederholt werden.

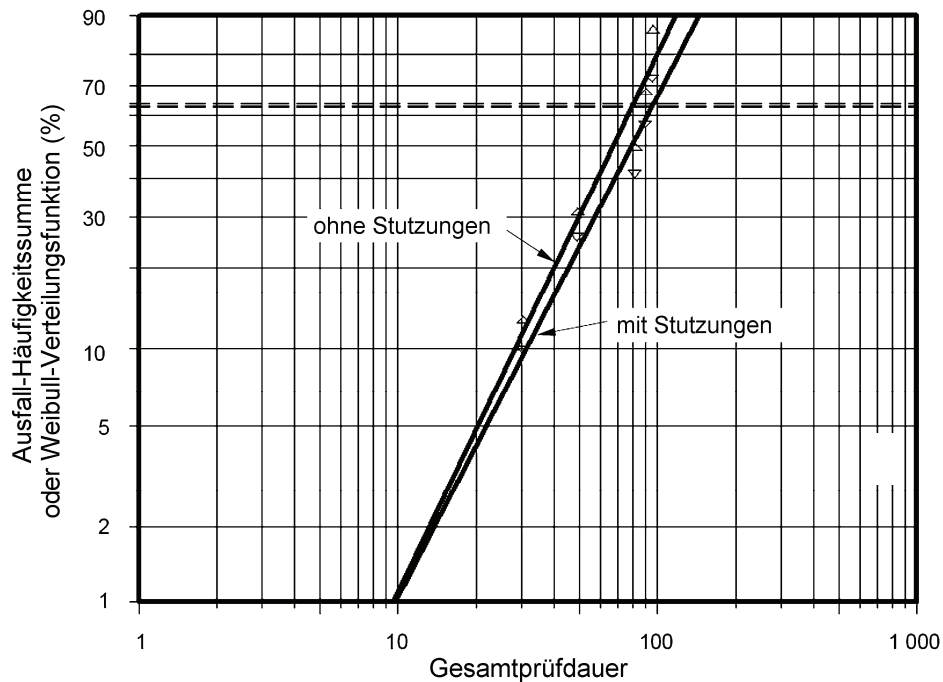


Bild 2 – Gesamtprüfdauer (in Minuten)

Wenn man Stützungen verwendet, ist die Benard-Näherung der Median-Ranks für das Zeichnen der Weibull-Verteilung und zur Schätzung der Parameter ausreichend genau. Hier ist „ i “ der angepasste Rang und „ N “ die Summe der Ausfälle und Stützungen (also der Stichprobenumfang). Die Median-Ranks werden zum Eintragen in ein Weibull-Netz in Prozentwerte umgewandelt. So gilt beispielsweise für den ersten Ausfall in Tabelle 3 mit einem angepassten Rang von 1,125:

$$\text{Median-Rank (\%)} = \frac{(1,125 - 0,3)}{(8 + 0,4)} \times 100 = 9,82 \% \quad (8)$$

Da Bild 2 die Stützungen enthält, zeigt es das korrekte Weibull-Diagramm.

Folgende Schritte gelten für das Einzeichnen von Datensätzen mit Stützungen:

- Die Ausfallzeitpunkte und Stützungen werden in aufsteigender Reihenfolge geordnet.
- Die angepassten Rangfolgen der Ausfälle (Stützungen werden nicht eingezeichnet) werden berechnet.
- Mittels der Benard-Näherung werden die Median-Ranks berechnet.
- Die Median-Ranks (y) werden über den entsprechenden Ausfallzeitpunkten (x) in ein Weibull-Netz eingezeichnet.
- Die charakteristische Lebensdauer η wird durch Ablesen der B63,2-Lebensdauer im Netz geschätzt.
- Die Steilheit wird mit einem Lineal gemessen und ergibt einen Schätzwert für β . Anstelle des Lineals kann auch eine üblicherweise auf einem Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz vorhandene spezielle Beta-Skala genommen werden.
- Das Diagramm wird interpretiert.

7.2.4 Eintragen der Stichprobendaten

Das Eintragen der Merkmalswerte (Stichprobendaten) in ein Weibull-Netz von Hand oder die Eingabe in einen Rechner kann ausreichend sein, um die Passgenauigkeit (en: goodness-of-fit) zu prüfen. Subjektives Einpassen einer Geraden mit dem Auge kann einen Hinweis auf die Passgenauigkeit geben.

7.2.5 Überprüfen der Passgenauigkeit

Wenn die Merkmalswerte (Daten) sich um eine Gerade in einem Wahrscheinlichkeitsnetz herum häufen, ist dies ein Beweis, dass diese Daten durch die betreffende Verteilung repräsentiert werden. Jedoch bereiten kleine Stichproben Schwierigkeiten, die Passgenauigkeit zu beurteilen. Es gibt statistische Verfahren zur Beurteilung der Passgenauigkeit (en: goodness-of-fit) wie Chi-Quadrat, Kolmogorov-Smirnoff und Nancy Mann's Tests. In dieser Norm wird der quadrierte Korrelationskoeffizient benutzt, genannt Bestimmungskoeffizient.

Dieser kann mittels folgender Gleichung (9) berechnet werden

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - N(\bar{x})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - N(\bar{y})^2 \right)} \quad (9)$$

Hierbei sind x_i und y_i der Median-Rank bzw. der Ausfallzeitpunkt, $\bar{x}$ und $\bar{y}$ sind Mittelwerte von x_i und y_i , und N ist der Stichprobenumfang.

r^2 ist der Variationsanteil der Daten, der durch die Weibull-Hypothese erklärt werden kann. Je näher dieser bei 1 liegt, desto besser passen die Daten zu einer Weibull-Verteilung. Liegt er näher bei 0, deutet dies auf eine schlechte Anpassung hin. Mit dem Korrelationskoeffizienten r soll die Strenge einer linearen Beziehung zwischen zwei Variablen gemessen werden. „ r “ ist eine Zahl zwischen -1 und $+1$, je nach Neigung. Wenn das Weibull-Netz alternativ mittels einer Tabellenkalkulation konstruiert wird und lineare Regressions-techniken eingesetzt werden, wird der Korrelationskoeffizient vom Programm meist mit ausgegeben, falls die Daten durch eine Gerade eingepasst werden (meist eine Option). In ähnlicher Weise liefern handelsübliche Softwarepakete den Bestimmungskoeffizienten.

Dies sollte mit Vorsicht und nur dann benützt werden, wenn die visuelle Inspektion mit der Beobachtung übereinstimmt.

7.3 „Hazard plotting“-Verfahren

Für die Darstellung der Weibull-Wahrscheinlichkeit in Diagrammen wird zuerst die Häufigkeitssumme der ausgefallenen Einheiten $F(t)$ mittels Median-Ranks geschätzt. Dann werden die Dauern bis zum Ausfall neben der jeweiligen geschätzten Häufigkeitssumme im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen.

Beim „Hazard plotting“-Verfahren beginnt man mit der Schätzung der momentanen Ausfallrate, im englischen Sprachraum auch „hazard function“ genannt.

$$\lambda(t) = h(t) = \frac{f(t)}{[1 - F(t)]} \quad (10)$$

Hierfür wird eine Schätzung der kumulierten momentanen Ausfallrate (en: cumulative hazard function) verwendet.

Die kumulierte momentane Ausfallrate

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt = -\ln[1 - F(t)] \quad (11)$$

wird geschätzt durch die Aufsummierung der geschätzten momentanen Ausfallraten (en: hazard functions).

Die Weibull-Verteilung

$$H(t) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (12)$$

wird auf beiden Seiten logarithmiert; daraus erhält man eine lineare Beziehung für $\ln H(t)$ zu $\ln t$:

$$\ln(H(t)) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \quad (13)$$

Das Weibull-Hazardnetz ist somit ein doppellogarithmisches In-In-Netz. Die nominale Neigung der in die Daten eingepassten Linie ist β , und es ist des Weiteren $t = \eta$ für $H(t) = 1$.

ANMERKUNG Es können sowohl natürliche als auch dezimale Logarithmen für das Weibull-Hazardnetz genommen werden.

Obwohl das Weibull-Hazardnetz in einigen Ländern verfügbar ist, kann diese Technik auch mit dem üblichen Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz verwendet werden, sofern man sich folgender Transformation bedient:

$$F(t) = 1 - e^{-H(t)} \quad (14)$$

Dies kann sehr einfach mit einem Tabellenkalkulationsprogramm realisiert werden.

Das „Hazard plotting“-Verfahren besteht aus den folgenden Schritten:

- Zuerst werden die Zeiten bzw. Dauern, sowohl Ausfälle als auch Stutzungen gleichzeitig, von den frühesten bis zu den spätesten Zeiten sortiert.
- Für jeden Ausfall wird die momentane Ausfallrate berechnet, gegeben zu $1/(\text{Anzahl der verbleibenden Einheiten nach dem vorausgegangenen Ausfall oder Zensorisierung})$.
- Für jeden Ausfall wird die kumulierte Summe (en: cumulative sum) der momentanen Ausfallraten berechnet, also eine Schätzung der kumulierten momentanen Ausfallrate.
- Die geschätzte kumulierte momentane Ausfallrate (en: cumulative hazard function) wird über dem Ausfallzeitpunkt in einem Wahrscheinlichkeitsnetz aus natürlichen oder dezimalen Logarithmen aufgetragen.
- Es wird eine Gerade durch die eingezeichneten Punkte eingepasst.
- Die Parameter werden geschätzt.

Anhang E enthält ein ausgearbeitetes Beispiel. Auch IEC 61810-2 enthält Beispiele zum „Hazard plotting“-Verfahren zur Schätzung der Parameter einer Weibull-Verteilung.

8 Interpretation des Weibull-Wahrscheinlichkeitsdiagramms

8.1 Badewannenkurve

8.1.1 Allgemeines

Die häufig erwähnte Badewannenkurve (siehe Bild 3) zeigt die Beziehung zwischen dem Weibull-Formparameter β und der momentanen Ausfallrate während der gesamten Lebensdauer einer Einheit. Jedoch zeigen nicht alle Einheiten während ihrer Lebensdauern alle Elemente der Badewannenkurve.

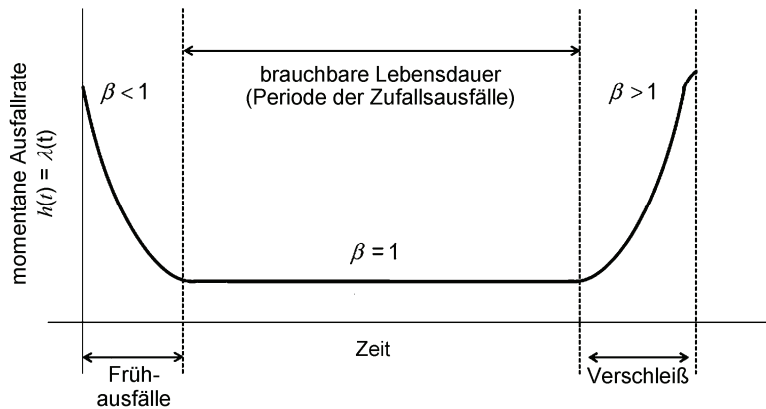


Bild 3 – Typische Badewannenkurve einer Einheit

8.1.2 Formparameter $\beta < 1$ – impliziert Frühausfälle

Sowohl elektronische als auch mechanische Systeme können anfangs hohe Ausfallraten haben. Um Frühausfälle vor Auslieferung der Produkte an den Kunden zu vermeiden, überwachen die Hersteller den Fertigungsprozess, führen Fertigungsfreigabeprüfungen, Verfahren zum „Einbrennen“ oder zur Zuverlässigkeitsvorbehandlung (en: reliability stress screening, RSS) durch. Daher deuten Formparameter kleiner eins auf Folgendes hin:

- keine adäquate Prozesslenkung;
- inadäquates Einbrennen oder Vorbehandeln durch Beanspruchung;
- Fertigungsprobleme, schlechter Zusammenbau, ungenügende Qualitätslenkung;
- Instandsetzungsprobleme;
- vermischte Populationen;
- Einlaufen oder Verschleiß.

Viele elektronische Bauelemente zeigen während ihrer brauchbaren Lebensdauer eine abnehmende momentane Ausfallrate, der Formparameter bleibt somit kleiner als 1. Vorbeugende Instandhaltung solch eines Bauelementes wäre nicht angebracht, da alte Teile besser als neue sind.

8.1.3 Formparameter $\beta = 1$ – impliziert konstante Ausfallrate

Dieser Bereich wird oft mit Periode der Zufallsausfälle bezeichnet, da die Ausfälle zufällig über der Zeit verteilt auftreten. Diese Ausfallarten werden als zeitlich unabhängig angesehen. In diesem Fall würde eine vorbeugende Instandhaltung das System nicht verbessern.

Es können somit folgende Einflüsse vermutet werden:

- zufällige Irrtümer bei der Instandhaltung, menschliches Fehlverhalten;
- zufällige Überlastung;
- Ausfälle, deren Ursachen in der Natur liegen, Beschädigung durch fremde Gegenstände, Blitzeinschlag;
- mit drei oder mehr Ausfallarten vermischte Merkmalswerte (unter der Annahme verschiedener Formparameter β der einzelnen Ausfallarten), wobei kein Ausfallmechanismus das Ausfallverhalten dominiert.

Auch hier ist vorbeugende Instandhaltung nicht angebracht. Bei $\beta = 1$ ist die Weibull-Verteilung mit der Exponentialverteilung identisch. Von den Einheiten, die bis zu einer Zeit t überlebt haben, wird ein konstanter Anteil während der nächsten Zeiteinheit ausfallen. Dies wird mit konstanter momentaner Ausfallrate bezeichnet.