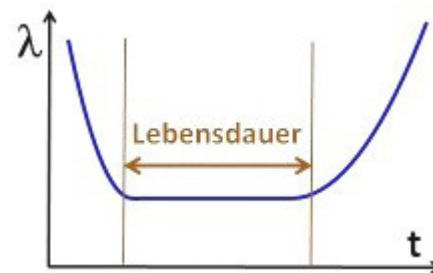
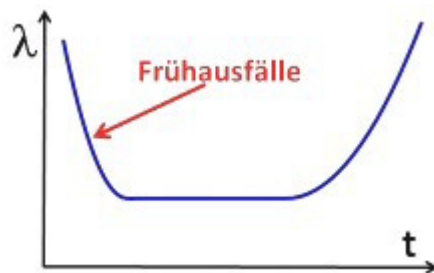
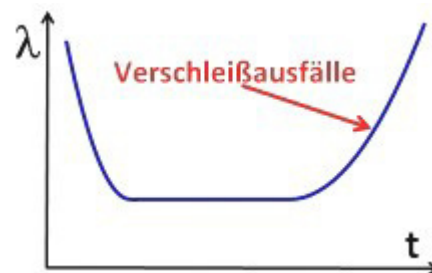
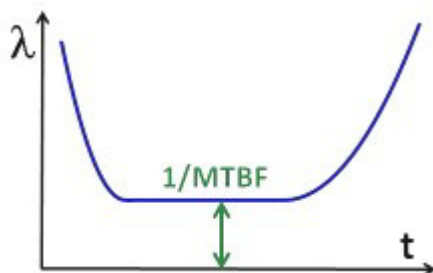




Mean Time Between Failures (MTBF)



$$R(t) = e^{-\lambda t}$$



$$\chi_{2 \cdot (n+1), \alpha}^2 = \frac{2 \cdot \text{kumulierte_Zeitdauer}}{MTBF}$$



Einführung in das Thema

Mean Time Between Failures (MTBF)

Zielsetzung:

Dieses Werk

- beschreibt die grundlegenden Zusammenhänge zum, sowie aktuelle und praktikable Umgangsmethoden mit dem Thema MTBF,
- soll den Leser in die Lage versetzen mit dem Thema MTBF gegenüber Kunden und Lieferanten professionell umzugehen, sowie auf entsprechende Anfragen fachlich fundiert zu reagieren,
- soll ein Gefühl für die generelle quantitative Unsicherheit vermitteln, die mit dem Thema MTBF einher geht,
- möchte mit so wenig wie möglich Mathematik auskommen,
- gibt erste Einblicke, wie man MTBF Werte quantitativ ermitteln kann.

Die Inhalte werden mit fortschreitender Seitenzahl spezifischer.
Damit sollen unterschiedliche Ansprüche an den Tiefgang erfüllt werden.

So können sich beispielsweise Leitungspersonen nach Kapitel 2, und Produktmanager nach Kapitel 3 ausklinken, während für Entwickler und Qualitätsmitarbeiter möglicherweise die gesamte Unterlage interessant ist.

Daher werden manchmal Inhalte an früher Stelle grob eingeführt, um an späterer Stelle dann detailliert behandelt zu werden.

Versionsgeschichte

Datum, Version	Anmerkungen
12. März 2015, V1	Erstausgabe
16. Februar 2016, V2	Vollständige Überarbeitung und Erweiterung
17. Juni 2016, V2.1	Anhang „Arrheniusgleichung“ hinzugefügt
16. Dezember 2016, V2.2	Vollständige Überarbeitung
26. Februar 2017, V2.3	Kapitel 4.4.3.1 um mehrere Bilder erweitert Kapitel 4.4.3.3 neu hinzu



Inhaltsverzeichnis, Ebenen 1 und 2

1	Zuverlässigkeit: Grundlagen	8
1.1	Allgemeine Definition von Zuverlässigkeit (engl. Reliability)	8
1.2	Messgrößen der Zuverlässigkeit.....	8
1.3	Die Badewannenkurve.....	14
2	MTBF.....	21
2.1	MTBF Annahme 1: Konstante Ausfallrate	22
2.2	MTBF Annahme 2: Serielles Modell.....	35
3	Umgang mit dem Thema MTBF	38
3.1	Seriosität.....	38
3.2	Ermittlung von MTBF Werten.....	39
3.3	MTBF Informationslage nach Systemart: Überblick	47
3.4	MTBF Informationslage nach Systemart: Details	48
4	MTBF Berechnung für Elektronik nach Standards	52
4.1	Allgemeine Betrachtungen	52
4.2	Funktionsweise elektronischer Berechnungsstandards.....	53
4.3	Die elektronischen Berechnungsstandards im Einzelnen.....	54
4.4	Physikalische vs. managementtechnische Parameter.....	61
4.5	MTBF Stellungnahmen	73
5	Weiterführende Methoden.....	77
6	Anhänge	80
6.1	Fehlerrate eines 1-aus-2 Parallelsystems	80
6.2	Verfügbarkeit eines 1-aus-2 Parallelsystems	82
6.3	Zuverlässigkeit eines 1-aus-n Parallelsystems.....	83
6.4	Weibullverteilung für zeitlich veränderliche Ausfallraten.....	84
6.5	Poissonverteilung, homogener Poissonprozess.....	87
6.6	Auswirkungen des Zufalls auf berechnete Mittelwerte.....	89
6.7	Das Null Ausfall Problem	93
6.8	B ₁₀ Lebensdauer	95
6.9	Die Arrheniusgleichung für beschleunigte Tests	97
6.10	MTBF Schätzbeispiele	98
6.11	Rechenbeispiele mit Mil-HDBK-217F N2	101





Inhaltsverzeichnis, alle Ebenen

1	Zuverlässigkeit: Grundlagen	8
1.1	Allgemeine Definition von Zuverlässigkeit (engl. Reliability)	8
1.2	Messgrößen der Zuverlässigkeit	8
1.2.1	Zuverlässigkeit R (Reliability)	9
1.2.2	MTBF oder MTTF	10
1.2.3	Ausfallrate	11
1.2.4	Verfügbarkeit (A, availability)	12
1.2.5	Beziehungen zwischen MTBF, R und A	13
1.2.6	Zusammenfassung	13
1.3	Die Badewannenkurve	14
1.3.1	Produktlebensphasen	15
1.3.1.1	Frühausfälle, infant mortality, early failures	15
1.3.1.2	Nutzbare Produktlebensphase	16
1.3.1.3	Verschleissphase	17
1.3.2	Lebensdauer vs. MTBF	18
1.3.2.1	Beispiele für MTBF vs. Lebensdauer	19
2	MTBF	21
2.1	MTBF Annahme 1: Konstante Ausfallrate	22
2.1.1	Veranschaulichung konstanter Ausfallrate	22
2.1.1.1	Ersatz ausgefallener Einheiten	22
2.1.1.2	Kein Ersatz ausgefallener Einheiten	23
2.1.2	Mathematischer Hintergrund	24
2.1.3	Implikationen bezüglich konstanter Ausfallrate	27
2.1.3.1	Minimale Anforderungen an Datenqualität und -quantität	27
2.1.3.2	Schlechte bis gar keine Rückmeldung aus dem Feld	27
2.1.3.3	Konstante Ausfallrate = Zufallsausfälle	28
2.1.3.4	Perfektes Produkt	28
2.1.3.5	Keine Alterung vorhanden	28
2.1.3.6	Vorbeugende Wartung im herkömmlichen Sinne sinnlos	28
2.1.3.7	Prinzip der maximalen Entropie	29
2.1.3.8	Nicht genau hinsehen: Scheinbar Zufallsausfälle	31
2.1.3.9	Was bedeutet eigentlich "Zufallsausfall"?	33
2.1.3.10	"Geplante Obsoleszenz"	34
2.2	MTBF Annahme 2: Serielles Modell	35
2.2.1	Beispiele <i>gegen</i> das serielle Modell	35
2.2.2	Warum dennoch serielles Modell	37
2.2.2.1	Fakten	37
2.2.2.2	Praxis	37
3	Umgang mit dem Thema MTBF	38
3.1	Seriosität	38
3.1.1	Beispiel 1: Ziviles Wegwerfprodukt	38
3.1.2	Beispiel 2: Ziviles Sicherheitsprodukt, militärisches, oder Luftfahrtprodukt	38
3.2	Ermittlung von MTBF Werten	39
3.2.1	Genauigkeit von MTBF Werten (1)	39
3.2.2	Datenquellen	39
3.2.2.1	Felddaten des aktuellen Produktes	40
3.2.2.2	Felddaten eines ähnlichen Produktes	41
3.2.2.3	Orientierung an einem Konkurrenzprodukt	41
3.2.2.4	Labortestdaten	42
3.2.2.5	Nur Elektronik: Berechnung mit etablierten MTBF Standards	43
3.2.2.6	Vergleich mit Baugruppen mit bekannter MTBF	45
3.2.2.7	Parametrische Abschätzung	46
3.3	MTBF Informationslage nach Systemart: Überblick	47





3.3.1	Software	47
3.3.2	Mechanik	47
3.3.3	Elektronik.....	47
3.4	MTBF Informationslage nach Systemart: Details	48
3.4.1	Software	48
3.4.2	Mechanik	49
3.4.2.1	NSWC-11 (national surface warfare center) für militärische Oberflächenschifffahrt 49	
3.4.2.2	NPRD-1995 bzw. NPRD-2011	50
3.4.3	Elektronik.....	51
4	MTBF Berechnung für Elektronik nach Standards	52
4.1	Allgemeine Betrachtungen	52
4.2	Funktionsweise elektronischer Berechnungsstandards.....	53
4.3	Die elektronischen Berechnungsstandards im Einzelnen	54
4.3.1	Mil-HDBK-217 (1995)	54
4.3.2	Telcordia (2016)	55
4.3.2.1	Vertrauensintervalle	56
4.3.3	IEC-TR-62380 (2004)	57
4.3.4	Siemens SN 29500 (2004 ... 2015).....	58
4.3.5	FIDES 2009 (2009).....	59
4.3.6	217 Plus (2015)	60
4.4	Physikalische vs. managementtechnische Parameter.....	61
4.4.1	Beispiel für physikalische Parameter	61
4.4.2	Beispiel für management-technische Parameter.....	62
4.4.3	Genauigkeit von MTBF Werten (2)	64
4.4.3.1	Beispiel 1: Streuung der Fehlerraten-Ergebnisse auf Bauteilebene.....	64
4.4.3.2	Beispiel 2: Streuung der Fehlerraten-Ergebnisse auf PCB-Ebene, IEEE Publikation.....	68
4.4.3.3	Beispiel 3: Streuung der Fehlerraten-Ergebnisse auf PCB-Ebene, Temperaturverhalten	70
4.5	MTBF Stellungnahmen	73
4.5.1	Mil-HDBK-217.....	74
4.5.2	Telcordia.....	74
4.5.3	IEC-TR-62380	74
4.5.4	Siemens SN29500.....	75
4.5.5	FIDES.....	75
4.5.6	217Plus	76
4.5.7	Handhabung bei unterschiedlichen MTBF Angaben	76
5	Weiterführende Methoden.....	77
6	Anhänge	80
6.1	Fehlerrate eines 1-aus-2 Parallelsystems	80
6.2	Verfügbarkeit eines 1-aus-2 Parallelsystems	82
6.3	Zuverlässigkeit eines 1-aus-n Parallelsystems.....	83
6.4	Weibullverteilung für zeitlich veränderliche Ausfallraten.....	84
6.5	Poissonverteilung, homogener Poissonprozess.....	87
6.6	Auswirkungen des Zufalls auf berechnete Mittelwerte.....	89
6.7	Das Null Ausfall Problem	93
6.8	B ₁₀ Lebensdauer.....	95
6.9	Die Arrheniusgleichung für beschleunigte Tests	97
6.10	MTBF Schätzbeispiele	98
6.11	Rechenbeispiele mit Mil-HDBK-217F N2	101
6.11.1	SMD Film Resistor 0805	101
6.11.2	Transient Suppressor Diode	103
6.11.3	Integrated Circuit, Digital, 7414 (Inverting Hex Schmitt Trigger).....	104





Abbildungsverzeichnis

Bild 1: R(t), allgemein.....	9
Bild 2: MTBF vs. MTTF	10
Bild 3: Verfügbarkeit.....	12
Bild 4: Badewannenkurve	14
Bild 5: Badewannenkurve	18
Bild 6: R(t) für ausgewählte λ , grob	25
Bild 7: R(t) für ausgewählte λ , fein	26
Bild 8: Maskierter systematischer Ausfall	31
Bild 9: Maskierte systematische Ausfälle	32
Bild 10: Serielles Zuverlässigkeitsmodell	35
Bild 11: RADC Toolkit Software	48
Bild 12: NSWC-98 Beispiel Magnetventil	49
Bild 13: NSWC-98 Diverse Sensoren.....	50
Bild 14: NPRD-1995 Beispiel Kugellager	51
Bild 15: Beispiel Physikalische Parameter: Mil-HDBK-217 Digitales IC	61
Bild 16: Beispiel Managementtechnische Parameter: FIDES 2009 Digitales IC	62
Bild 17: Beispiel FIDES 2009 Fragenkatalog zur Ermittlung managementtechnischer Parameter	63
Bild 18: Filmwiderstand, Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500.....	65
Bild 19: Kerko 100nF X7R, Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500	65
Bild 20: IC SN7400, Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500	66
Bild 21: Diode 1N4001, Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500	66
Bild 22: Schalter 1 x Ein, Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500.....	67
Bild 23: Genauigkeit von MTBF auf PCB-Ebene	68
Bild 24: Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500 auf PCB Ebene	70
Bild 25: Fehlerraten-Vergleich Mil 217 / Telcordia / SN 29500 auf PCB Ebene	71
Bild 26: Fehlerraten-Vergleich verschiedener Telcordia Ausgaben auf PCB Ebene	72
Bild 27: Ausfallrate eines 1oo2 Systems	81
Bild 28: Weibullnetz, Beispiel	85
Bild 29: R(t), Weibullverteilung und Ausfallrate(t) für verschiedene Eta.....	86
Bild 30: Poissonverteilung für 1 Ereignis/h	90
Bild 31: Poissonverteilung für 1,68 Ereignisse/h	91
Bild 32: Poissonverteilung für 0,69 Ereignisse/h	92
Bild 33: Parametrische MTBF Abschätzung	99





Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für MTBF, R und A	13
Tabelle 2: MTBF vs. Lebensdauer -1	19
Tabelle 3: MTBF vs. Lebensdauer -2	20
Tabelle 4: Konstante Ausfallrate, Veranschaulichung-1	22
Tabelle 5: Konstante Ausfallrate, Veranschaulichung-2	23
Tabelle 6: Prinzip maximaler Entropie, Anschauungsbeispiele.....	30
Tabelle 7: Über reine MTBF Berechnung hinausgehende Methoden	36
Tabelle 8: MTBF Datenquellen für Mechanik	47
Tabelle 9: MTBF Berechnungsstandards für Elektronik	47
Tabelle 10: MTBF Berechnungsstandards für Elektronik.....	52
Tabelle 11: Beispiele für Bauteilfehlerraten-Gleichungen	53
Tabelle 12: Beispiele für Pi-Faktoren	53
Tabelle 13: Physikalische vs. managementtechnische Parameter	61
Tabelle 14: Genauigkeit von MTBF auf Bauteilebene	64
Tabelle 15: MTBF Stellungnahmen, Beispiele.....	73
Tabelle 16: Methodenüberblick	79
Tabelle 17: Formeln bei homogenem Poissonprozess	87
Tabelle 18: MTBF mit Chi ² Formel berechnet	94
Tabelle 19: Umrechnung B ₁₀ - MTBF	96
Tabelle 20: Parametrische MTBF Abschätzung-1	100
Tabelle 21: Parametrische MTBF Abschätzung-2	100

1 Zuverlässigkeit: Grundlagen

1.1 Allgemeine Definition von Zuverlässigkeit (engl. Reliability)

Wahrscheinlichkeit, dass ein Betrachtungsgegenstand

- eine geforderte Funktion
- unter festgelegten Bedingungen
- für eine festgelegte Zeit

fehlerfrei erfüllt.

Dies wird auch Überlebenswahrscheinlichkeit genannt.

- Was genau als Fehler anzusehen ist, insbesondere ob es tolerierbare Fehlerarten gibt, muss ggfs. vorher festgelegt werden.
- Betrachtungsgegenstand kann ein Einzelbauteil (z.B. ein elektrischer Widerstand), eine Baugruppe (z.B. ein PCB), oder ein komplexes System sein.
- Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist oft nicht der geeignete Parameter, um das Ausfallverhalten, bzw. die "wahrgenommene Zuverlässigkeit" einer Betrachtungseinheit angemessen zu beschreiben.
- Deswegen sind mehrere Messgrößen gebräuchlich, mit denen Zuverlässigkeit auf unterschiedliche Weise quantifiziert werden kann.

1.2 Messgrößen der Zuverlässigkeit

1. Zuverlässigkeit im mathematischen Sinne als Überlebenswahrscheinlichkeit, wie zuvor beschrieben
2. MTBF oder MTTF
3. Ausfallrate
4. Verfügbarkeit

Diese 4 Größen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

1.2.1 Zuverlässigkeit R (Reliability)

1. Allgemeine Definition aus Kapitel 1.1:

Wahrscheinlichkeit, dass ein Betrachtungsgegenstand eine geforderte Funktion unter festgelegten Bedingungen für eine festgelegte Zeit fehlerfrei erfüllt.

- $R(t)$ berücksichtigt *keine Reparaturen*. Ausfälle innerhalb der festgelegten Zeit gelten als grundsätzliches und unwiederbringliches Versagen.
- Je nach Einsatzmodell kann jedoch *vorbeugende Wartung* gestattet sein.
- Vorbeugende Wartung ist planbar, trifft den Anwender also nicht unvorbereitet, und ist demnach im Rahmen des zugrunde liegenden Zuverlässigkeitsmodells tolerierbar.
- Oft ist es gerade die vorbeugende Wartung, die eine erwünschte Zuverlässigkeit erst ermöglicht.

2. Mathematische Definition

- Bei nicht näherer Kenntnis der Systemeigenschaften kann man lediglich sagen, dass $R(t)$ eine monoton fallende Funktion über die Zeit sein muss.
- Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Betrachtungseinheit noch nicht ausgefallen ist, muss mit der Zeit nur abnehmen.

$R(t)$ ist eine Funktion, die stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängt. Insbesondere sind folgende Punkte für den Verlauf von $R(t)$ massgeblich:

- Technischer Aufbau des Systems
 - Fehlertoleranz, Redundanz
- Wartungsphilosophie
- Welche Ereignisse gelten als Ausfall, und welche nicht, z.B.
 - Einfaches Quittieren von Fehlermeldungen
 - "Reset" der gesamten Anlage
 - Eigenhändiger Tausch von z.B. 19" Einschüben
 - "Echte" Reparaturen, Bestellung eines Monteurs, schwierige Diagnose, etc.

Beispiel:

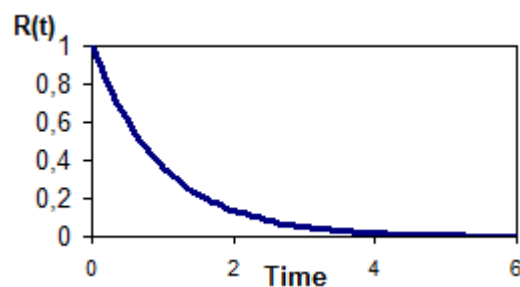


Bild 1: $R(t)$, allgemein

Im Kontext des Begriffes "MTBF", der wiederum zwei grundlegende Annahmen voraussetzt, nimmt $R(t)$ eine ganz bestimmte Form an. Dazu Näheres ab Kapitel 2.1.2.

1.2.2 MTBF oder MTTF

MTBF = Mean time *between* failures

MTTF = Mean time *to* failure

MTBF ist der Kehrwert der Ausfallrate λ (Kapitel 1.2.3).

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (1)$$

Bei der Unterscheidung zwischen MTBF und MTTF gibt es zwei unterschiedliche Handhabungsweisen:

1. MTBF = MTTF + MTTR (Mean time to repair)

MTBF enthält neben der Betriebszeit auch die Reparaturzeit, MTTF dagegen enthält nur die Betriebszeit.

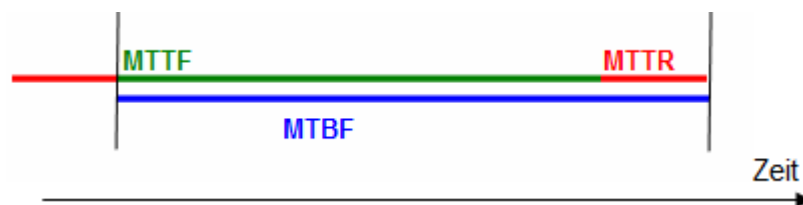


Bild 2: MTBF vs. MTTF

Meistens spielt diese Unterscheidung keine praktische Rolle, denn in den meisten Fällen liegen die MTTF im Bereich von Jahren, und die MTTR im Bereich von Stunden.

2. Fehlertolerante Systeme

MTTF = Mean time to [first] failure

MTBF = Mean time between failures [im eingeschwungenen Zustand, für $t \rightarrow \infty$]

- Bei fehlertoleranten Systemen kann die Zeit bis zum ersten Ausfall beträchtlich grösser sein als die Zeit zwischen zwei Ausfällen im eingeschwungenen Zustand, nachdem das System schon mehrere Male ausgefallen ist. (Begründung in Anhang 6.1)
- Während MTBF (bzw. MTTF) die anschaulichere Grösse darstellt, ist deren Kehrwert, die Ausfallrate λ , *meistens* besser für Berechnungen geeignet
 - Ausnahmen z.B. in Kapitel 6.2 und 6.3.
- Gesamt-Ausfallraten erhält man durch einfache Addition von Teil-Ausfallraten, während man bei MTBF die Kehrwerte addieren muss:

$$\frac{1}{MTBF_{Gesamt}} = \frac{1}{MTBF_1} + \frac{1}{MTBF_2} + \dots \quad (2)$$

↔