



Leitfaden

# Mythos MTBF

Korrekte Interpretation einer hilfreichen Maßzahl für  
Schaltnetzteile

# Inhalt

<b>EINFÜHRUNG</b>	<b>3</b>
Motivation	3
<b>1  UNTERSCHIEDE ZWISCHEN: MTBF / MTTF / FIT / LEBENSZEIT / B10%</b>	<b>4</b>
1.1 Die Grundlagen	4
1.2 Prinzip der Teilezählung	5
1.3 Teile zählen Spannungsprinzip	5
1.4 Zuverlässigkeitsdatenbanken, Überblick	5
<b>2  VORTEILE VON ZUVERLÄSSIGKEITSBERECHNUNGEN</b>	<b>6</b>
2.1 Prädiktive Zuverlässigkeit (MTBF)	6
2.2 Nachgewiesene Zuverlässigkeit (dMTBF)	6
2.3 Berechnete Lebenszeit	6
<b>3  ZUVERLÄSSIGKEITSSTANDARDS</b>	<b>7</b>
3.1 MIL-HDBK-217F	7
3.2 IEC 61709 (SN 29500)	7
3.3 Belcore/Telcordia SR-332	7
3.4 Übersicht	8
<b>4  BERECHNUNGSBEISPIELE</b>	<b>9</b>
4.1 Vergleich der verschiedenen Standards	9
4.2 Vergleich der verschiedenen Temperaturen	10
4.3 Ergebnisse für verschiedene Eingangsspannungen	12
4.4 Einfluss von Betriebsbedingungen und Umgebung	13
<b>5  LEARNINGS &amp; SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>14</b>
5.1 Learnings / Unterschiede zwischen Schemata	14
5.2 Schlussfolgerungen	15
<b>6  ANHANG</b>	<b>16</b>
Temperatur .....	16
Elektrische Belastung .....	16
Umweltstress .....	16
Qualitätsfaktor .....	17
Profil der Mission .....	17

# Einführung

## Motivation

MTBF-Berechnungen (Mean Time Between Failure) werden oft nicht ganz richtig verstanden und falsch angewendet.

- Hält ein Netzgerät mit einer MTBF von einer Million Stunden 114 Jahre lang? (Nein).
- Ist die Stromversorgung mit der höchsten MTBF immer die zuverlässigste im Betrieb? (Nein).
- Sind MTBF-Berechnungen also ohne Wert? (Definitiv nicht!)

Um Licht ins Dunkel dieses oft missverstandenen Themas zu bringen, hat der ZVEI eine Ad-hoc-Gruppe gebildet, und deren Erfahrungen mit MTBF-Berechnungen, -Normen und -Einsatzprofilen in einem Leitfaden zusammengetragen. Dieser Leitfaden beschreibt die Herleitung und Umsetzung von MTBF-Zahlen anhand von Praxisbeispielen und zeigt Unterschiede und Gemeinsamkeiten der verschiedenen MTBF-Protokolle auf.

Bei richtiger Anwendung sind MTBF-Berechnungen ein sehr nützliches Instrument, das es den Herstellern ermöglicht, äußerst zuverlässige Stromversorgungen zu entwickeln und lange Garantien für fabrikneue Produkte zu gewähren. Zudem können die Benutzer die voraussichtliche Lebensdauer ihrer Systeme im Voraus abschätzen und entsprechende Wartungs- oder Austauschpläne einführen.

Auch kann der MTBF-Wert als Grundlage für weitere Berechnungen oder Auswertungen verwendet werden. So zum Beispiel, um die zu erwartende Anzahl von Ausfällen pro Jahr für eine bekannte Anzahl von Produkten im Feld zu bestimmen:

$$failures\ per\ time = \frac{1}{MTBF} \cdot number\ of\ products \cdot usagetime$$

$$failures\ per\ year = \frac{1}{500.000h} \cdot 10.000\ pcs \cdot 24h \cdot 365$$

Es ist jedoch auch wichtig zu beachten, dass diese Berechnung nur dann effektiv angewendet werden kann, wenn der angegebene MTBF-Wert für die Anwendung und die Umgebungsbedingungen geeignet ist. Das bringt uns zurück zu der Frage, (1) was MTBF ist, (2) wie dieser berechnet wird und (3) was den berechneten Wert beeinflusst.

# 1 Unterschiede zwischen: MTBF / MTTF / FIT / Lebenszeit / B10%

## 1.1 Die Grundlagen

Um den Unterschied zwischen MTTF (Mean Time to Failure - mittlere Zeit bis zum Ausfall), MTBF (Mean Time Between Failures - mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen) und Lebensdauer zu verstehen, ist es hilfreich, das Beispiel der Zuverlässigkeit eines Autos zu betrachten:

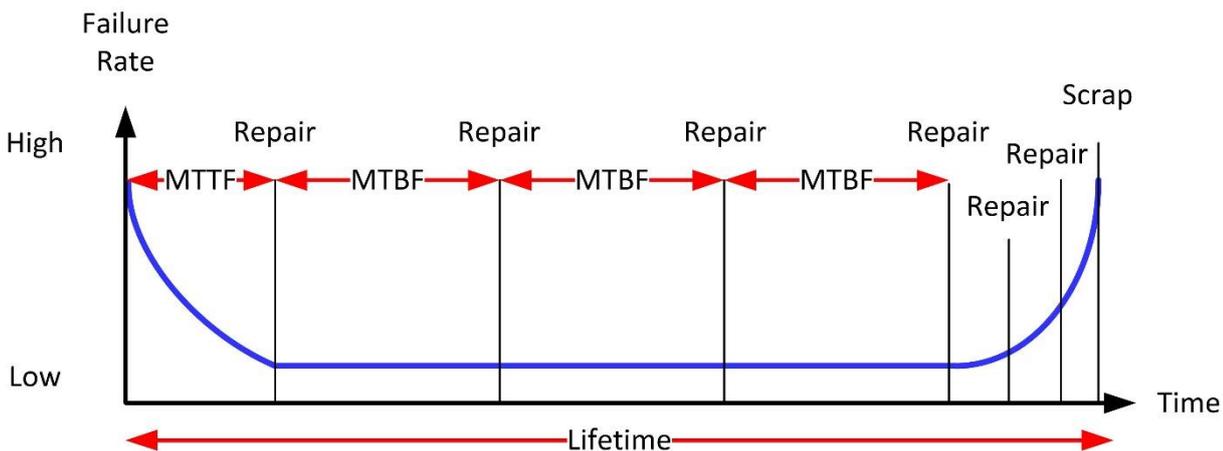


Abbildung 1: Ausfallrate einer großen Stichprobe von Bauteilen oder Systemen mit zunehmendem Alter.

Die MTTF ist die Zeit bis zum ersten Ausfall des Fahrzeugs, die kurz sein kann, da sie Herstellungs- und Montagefehler einschließt, also nur wenige Monate betragen kann. Nachdem das Fahrzeug regelmäßig genutzt wird, können regelmäßige Reparaturen erforderlich sein, in der Regel alle drei bis vier Jahre. Je älter das Fahrzeug wird, desto häufiger sind Reparaturen erforderlich, und schließlich wird das Fahrzeug so unzuverlässig, dass es verschrottet wird. Das regelmäßig wiederkehrende MTBF-Intervall ist ein nützliches Maß für die Basisausfallrate des Fahrzeugs, da es die Frühausfälle und Verschleißausfälle nicht berücksichtigt.

Elektronische Systeme werden nur selten repariert, aber MTBF ist immer noch eine nützliche Methode zur Berechnung der grundlegenden Zuverlässigkeit eines Schaltkreisdesigns, normalerweise ausgedrückt in tausend Stunden. Häufig wird auch der Kehrwert des MTBF-Intervalls, Failure in Time (FIT), verwendet - die Beziehung ist einfach:  $FIT = 10^9 / MTBF$ , ausgedrückt in Ausfällen pro Milliarde Betriebsstunden. Es können auch andere Zuverlässigkeitswerte verwendet werden, z. B. B10%, d. h. die Zeit, die vergeht, bis 10 % der Stichprobe außerhalb der Spezifikation liegen und nicht vollständig ausfallen.

### MTBF versus Lifetime

MTBF (Mean Time Between Failures) ist die durchschnittliche Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Ausfällen eines Systems oder einer Komponente. Sie ist ein Maß für die Zuverlässigkeit. Im Gegensatz dazu bezieht sich die Lebensdauer im Allgemeinen auf die gesamte Betriebszeit eines Systems oder einer Komponente, bevor sie außer Betrieb genommen oder ersetzt wird. Die MTBF ist ein statistisches Maß, während die Lebensdauer eine reale Zeitdauer ist. Sie sind nicht dasselbe.

Nochmals anders ausgedrückt: Die Lebensdauer ist die Zeit, die vergeht, bevor ein Produkt seine Spezifikation aufgrund von Gebrauch/Verschleiß nicht mehr erfüllt. Das schwächste Glied/Komponente bestimmt die Lebensdauer.

Die MTBF hingegen berücksichtigt nicht den Verschleiß, sondern den Ausfall aufgrund eines Fehlers und stellt somit den statistischen Ausfall eines Produktes dar.

Warum kann die MTBF größer sein als die Lebensdauer?

Die Lebensdauer eines Schaltnetzteils beschreibt typischerweise den Verschleiß eines Elektrolytkondensators, während die MTBF den statistischen Ausfall aller Komponenten beschreibt, wobei der "Verschleiß" des Elektrolytkondensators nicht als Ausfall gezählt wird.

In Bezug auf das obige Beispiel mit dem Auto lässt sich dies leicht erklären, indem man einen Blick auf die Reifen wirft. Nach einer bestimmten Laufleistung sind diese abgefahren und erfüllen ihren Zweck nicht mehr. Aus Sicherheitsgründen ist die MTBF (z.B. das Platzen eines Reifens) signifikant höher.

## 1.2 Prinzip der Zählung aller Teile

Die berechneten MTBF-Zahlen basieren auf dem Prinzip der Teileanzahl. Jede Komponente in einem System hat ihre eigene Zuverlässigkeitszahl, die auf ihrer individuellen Umwelt- und Betriebsbelastung beruht, und die Summe all dieser Zuverlässigkeiten ergibt die Gesamtzuverlässigkeit des Systems. Je komplexer ein System ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass es zu einem Ausfall kommt.

## 1.3 Bedeutung von Stress

Bei der MTBF-Berechnung spielen viele Umwelt- und Betriebsbelastungsfaktoren eine Rolle. Neben Temperatur und elektrischer Belastung gibt es auch mechanische Belastungen wie Stöße und Vibrationen. Alle diese Faktoren haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit. Eine detaillierte Beschreibung der Stressfaktoren findet sich in Kapitel '6 Anhang'.

## 1.4 Zuverlässigkeitsdatenbanken, Übersicht

Die MTBF-Berechnungen basieren auf einer großen Datenbank von Komponenten, die jeweils mit ihrer eigenen grundlegenden Zuverlässigkeit aufgeführt sind, welche aus der statistischen Analyse von Ausfällen im Feld abgeleitet wurde. Verschiedene Datenbanken listen unterschiedliche Zuverlässigkeitsraten auf, so dass sich die Zahlen aus dem Military Standards Handbook 217, Edition F (MIL-HDBK-217F) von denen der Siemens-Norm (SN 29500) unterscheiden. Es ist wichtig, sich darüber im Klaren zu sein, dass die Zahlen nicht direkt vergleichbar sind, da sie unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Komponentenbelastungsfaktoren und der Basiszuverlässigkeit der Komponenten verwenden, wie z. B. im MIL-Handbuch (Abschnitt 5.5) dargestellt:

$$\text{Overall Reliability, } \lambda = \sum (\text{Number of parts, } N_C \times \text{Part base reliability, } \lambda_C) (1 + 0.2 \text{ Environmental Factor, } \pi_E) \times \text{Interaction Factor, } \pi_F \times \text{Quality Factor, } \pi_Q \times \text{Maturity Factor, } \pi_L$$

## 1.5 B10%

B10% ist ein Wert für die Betriebslebensdauer, nach der 10 % der Probe ausgefallen und 90 % noch funktionsfähig sind. B10% wird normalerweise verwendet, um die Lebensdauer von Geräten zu bestimmen, die relativ schnell verschleissen und zu Totalausfällen führen, wie z. B. Lampen und

Lager. Die B10-Berechnung verwendet im Gegensatz zu MTBF-Berechnungen eine statistische Methode. Die B10-Stunden werden aus realen Ausfalldaten abgeleitet. Für langlebige Produkte wie Stromversorgungen wäre es unverhältnismäßig zeitaufwendig, ausreichend Felddaten zu sammeln. Zudem ist die Definition von "Ausfall" nicht allgemein anerkannt - ist es ein kompletter Ausfall der Stromversorgung oder ist es ein Ausfall, bei dem die Ausgangsspannung außerhalb der Spezifikation liegt oder zu lange zum Hochfahren benötigt?

## 2 Vorteile von Zuverlässigkeitsberechnungen

### 2.1 Vorhersagbare Zuverlässigkeit (MTBF)

Wie bereits erwähnt, ist die MTBF eine statistische Berechnung, die auf gemittelten Ausfallraten von Komponenten multipliziert mit bestimmten Belastungsfaktoren beruht. Bei der MTBF-Berechnung wird jedoch das Ergebnis dieser einzelnen Ausfälle ignoriert - ein Netzteil kann auch dann noch funktionieren, wenn ein einzelnes Bauteil defekt ist, wenn auch vielleicht nicht mit dem vollen Funktionsumfang.

Dennoch lässt sich die prognostizierte Zuverlässigkeit aus der MTBF-Zahl ableiten. Wenn z. B. die Ausfallrate eines Geräts nach einem Jahr Betrieb weniger als 1 % betragen soll, dann ist die erforderliche MTBF:

$$\text{required MTBF} = \frac{365 \times 24 \text{ h}}{0.01} = 876 \text{ khours}$$

### 2.2 Nachgewiesene Zuverlässigkeit (dMTBF)

Die nachgewiesene (demonstrated) MTBF basiert auf tatsächlichen Ausfällen in der Praxis und ist daher eine zuverlässigere, wenn auch sehr ressourcenintensive Methode zur Bestimmung der Ausfallraten. Für eine statistisch fundierte Aussage, müssen mindestens 50 Einheiten über einen langen Zeitraum überwacht werden.

### 2.3 Berechnete Lebenszeit

Da viele elektronische Bauteile nicht repariert werden können, kann anstelle der MTBF auch die berechnete Lebensdauer zur Vorhersage der Gesamtzuverlässigkeit verwendet werden. Da Elektrolytkondensatoren oft als das unzuverlässigste Bauteil in einer elektronischen Schaltung gelten, ist die Berechnung ihrer Lebensdauer eine nützliche Methode zur Vorhersage der Lebensdauer der gesamten Einheit:

$$\text{Capacitor Lifetime, } L = L_0 K_T K_R K_V$$

Wobei:  $L_0$  die im Datenblatt angegebene Lebensdauer bei maximalem Ripplestrom, maximaler Betriebstemperatur und maximaler Spannung ist,  $K_T$  der Betriebstemperaturfaktor,  $K_R$  der Ripplestromfaktor und  $K_V$  der Betriebsspannungsfaktor ist.

Wird beispielsweise ein Kondensator mit einer Lebensdauer  $L_0$  von 7000 Stunden (0,8 Jahre) bei der Hälfte des maximalen Ripplestroms und 90 % der maximalen Betriebsspannung, sowie bei 70°C statt der maximalen Temperatur von 105°C, verwendet, so beträgt die voraussichtliche Lebensdauer  $L$   $7000 \text{ h} \times 32 \times 1,3 \times 0,6 = 174 \text{ khours}$  bzw. fast 20 Jahre.

## 3 Zuverlässigkeitsstandards

### 3.1 MIL-HDBK-217F

Das "US Military Handbook 217" wurde 1962 als erste Verfahrensanweisung auf der Grundlage einer Norm veröffentlicht. Es ist eine der ältesten Verfahrensanweisungen zur Berechnung der Ausfallrate elektronischer Systeme und etablierte sich schnell als weltweiter Standard. Aufgrund seines weltweit hohen Bekanntheitsgrades wird es von vielen Herstellern noch immer befolgt, obwohl es seit 1995 nicht mehr öffentlich gepflegt wird.

### 3.2 IEC 61709 (SN 29500)

In Deutschland hat sich die Siemens AG mit der Frage der Zuverlässigkeit beschäftigt. Als Ergebnis der Erfahrungen als Hersteller von Komponenten, Geräten und Systemen wurde die Siemens-Norm 29500 "Ausfallraten von Komponenten" verfasst. Diese Norm ist sehr allgemein gehalten und kann auf alle elektronischen Geräte angewendet werden. Darüber hinaus enthält sie eine umfangreiche Basisdatenbank über Ausfallraten von Bauteilen.

Mit zunehmender Globalisierung wurde im Rahmen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) eine einheitliche Verfahrensanweisung geschaffen. Die Siemens-Norm SN 29500 setzte sich als Grundlage für eine internationale Norm durch, welche im Oktober 1996 als Norm IEC 61709 "Reference conditions for failure rates and stress models for conversion" veröffentlicht wurde. Sie beschreibt Definitionen, Referenzbedingungen und Umrechnungsmodelle und steht in voller Übereinstimmung mit der bereits bestehenden SN 29500. Die IEC-Norm enthält nur das mathematische Berechnungsmodell, während die grundlegenden Ausfallraten der Komponenten vom Hersteller oder durch praktische Erfahrungen ermittelt werden müssen.

Die IEC 61709 wurde im März 1998 als europäische Norm EN 61709 übernommen und im Januar 1999 als DIN EN 61709 veröffentlicht.

### 3.3 Belcore/Telcordia SR-332

Parallel zur Militärindustrie entwickelte die Telekommunikationsindustrie in den frühen 1980er Jahren ihre eigenen Berechnungsmethoden. Sie basierten häufig auf dem Militärhandbuch, befassten sich aber spezifischer mit branchenspezifischen Kriterien. Bekannte Vertreter sind:

- "Zuverlässigkeitsvorhersageverfahren für elektronische Geräte" (TR-NWT-332) von Bell Communications Research USA
- "Handbook of Reliability Data for Components used in Telecommunications Systems" (HRD) der British Telecom.
- "Recueil de Données de Fiabilité du CNET" (RDF) der France Telecom.

Dass diese Verfahrensregelungen nur auf spezielle elektronische Anwendungsbereiche zugeschnitten sind, zeigt sich unter anderem an der Länge der Verfahrenshandbücher, die teilweise nur wenige Seiten umfasst.

Eine detaillierte Zeitleiste der Belcore/Telcordia-Normen finden Sie im Anhang.

## 3.4 Übersicht

	MIL-HDBK-217F	Telcordia SR-332	Siemens SN 29500	IEC 61709 <sup>(a)</sup>
<b>Letzte Aktualisierung</b>	1995	2016	2014	2017
<b>Gültig bis:</b>	-	-	-	2025
<b>Umweltbedingung</b>	Ground Benign <sup>(b)</sup>	Ground Benign <sup>(c)</sup>	Ground Benign <sup>(d)</sup>	E1 <sup>(e)</sup>
<b>Temperatur</b>	25°C <sup>(f)</sup>	40°C	40°C	40°C
<b>Belastung / Stress</b>	100% <sup>(g)</sup>	50%	100% <sup>(g)</sup>	100% <sup>(g)</sup>
<b>Qualitätsfaktor(en)</b>	möglich	möglich <sup>(h)</sup>	für spezifische Komponenten, z.B.: e-caps	-
<b>Berechnungsprinzip</b>	Anzahl der Teile oder Teilebelastung	Anzahl der Teile oder Teilebelastung	Teilebeanspruchung	Teilebeanspruchung
<b>Verwendung von echten Felddaten</b>	keine	möglich	keine	möglich <sup>(i)</sup>

Tabelle 1: Verschiedene Standards zur Berechnung der MTBF

- (a) die IEC-Version basiert auf der Siemens SN 29500
- (b) weitere möglich: Bodenfest, Bodenmobil, luftgestützt, ...
- (c) weitere möglich: Bodenfest, Kontrolliert
- (d) weitere möglich: Kraftfahrzeuge, extreme Umweltverschmutzung
- (e) Stationärer Einsatz an wettergeschützten Standorten
- (f) Gemäß der Norm werden alle Berechnungen bei einer Umgebungstemperatur von 25°C durchgeführt, es können jedoch auch andere Situationen berücksichtigt werden.
- (g) Mit der Methode der "Teilbeanspruchung" kann jede Belastungssituation berücksichtigt werden.
- (h) mögliche Stufen: 0, 1, 2, 3
- (i) die Verwendung allgemeiner Daten ist möglich.

Hinweis: Die im MIL-HDBK-217 verwendeten Einsatzarten lauten:

- GB Ground Benign: Ortsfester Betrieb in gepflegten Räumen  
(Amtrräume Nachrichtentechnik / Rechner- u. Büroräume)*
- GF Ground Fixed: Ortsfester Betrieb unter erschwerten Bedingungen  
(Nicht gepflegte, im Winter nicht beheizte Räume)*
- GM Gound Mobile: Betrieb auf Landfahrzeugen / tragbare Geräte*
- Sonstige Umgebungsbedingungen wie Schiffe, Flugzeuge*

## 4 Berechnungsbeispiele

### 4.1 Vergleich der verschiedenen Normen

In jeder Norm werden die Einflüsse der Belastungsfaktoren unterschiedlich gewichtet, so dass ein Vergleich zwischen den Normen nur bedingt möglich ist. Dies wird durch eine Analyse des nachstehenden (schematischen) Abwärtswandlers veranschaulicht.

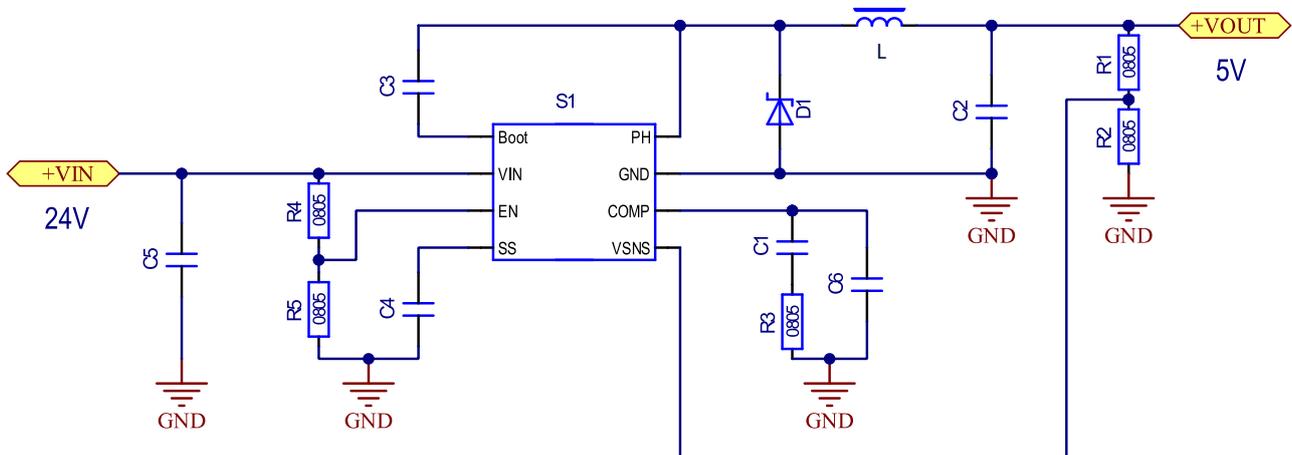


Abbildung 2: Einfaches DC/DC-Schaltbild, das für die folgende Berechnung verwendet wird.

Ergebnisse für verschiedene Berechnungsmethoden (EN/IEC 61709 (SN-29500) und MIL-HDBK)

Vorbedingungen:

SNA: Nonmobile operation ground benign

Ta: 25°C mittlere Umgebungstemperatur der Komponente

Zf: Dauerbetrieb 8760 h pro Jahr

Menge	Komponente	Ident.	SN 29500	MIL-HDBK-217F
1	NICHT SYNCHR. BUCK I	IC-S1	16,4	70,9
1	DIODE	D1	2,2	4,8
1	KAP 220NF 25V	C1	0,6	0,3
1	KAP 4,7µF 25V	C2	0,4	1,3
1	KAP 220NF 25V	C3	0,3	0,2
1	KAP 220NF 25V	C4	0,2	0,2
1	CAPCE 2.2/50V/0603	C5	1,5	4,9
1	KAP 220NF 25V	C6	0,6	0,4
1	RES 0805 10K	R1	0,1	3,0
1	RES 0805 4K7	R2	0,1	3,0
1	RES 0805 33K	R3	0,1	3,0
1	RES 0805 56K	R4	0,1	3,0
1	RES 0805 10K	R5	0,1	3,0
1	Induktor 07HCP	L	1,4	0,8
34	Lötverbindungen		1,0	2,3
<b>FIT-Sum</b>			<b>26</b>	<b>101</b>
<b>MTBF</b>	[khrs]		<b>38.462</b>	<b>9.901</b>

Tabelle 2: MTBF-Berechnung mit Exar Software 11.0. ( $T_{ambient}$  25° mit Standardwerten für Bauteile und mit spezifischen, gemessenen Bauteiltemperaturen)

### Analyse und Kommentare zu den Ergebnissen

Wie man an diesem einfachen DC/DC-Schaltplan mit nur 14 Komponenten sehen kann, ergeben die MTBF-Werte nach zwei verschiedenen Normen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Jede Norm ist in ihrer eigenen Logik konsistent, aber Vergleiche zwischen ihnen sind nicht sinnvoll. Beim Vergleich

von MTBF-Werten aus Datenblättern muss daher unbedingt angegeben werden, welche Norm zur Ermittlung der Ergebnisse verwendet wurde.

## 4.2 Vergleich bei verschiedenen Temperaturen

Der Einfluss verschiedener Temperaturen auf die MTBF wird anhand des folgenden vereinfachten AC/DC-Schaltkreises gezeigt:

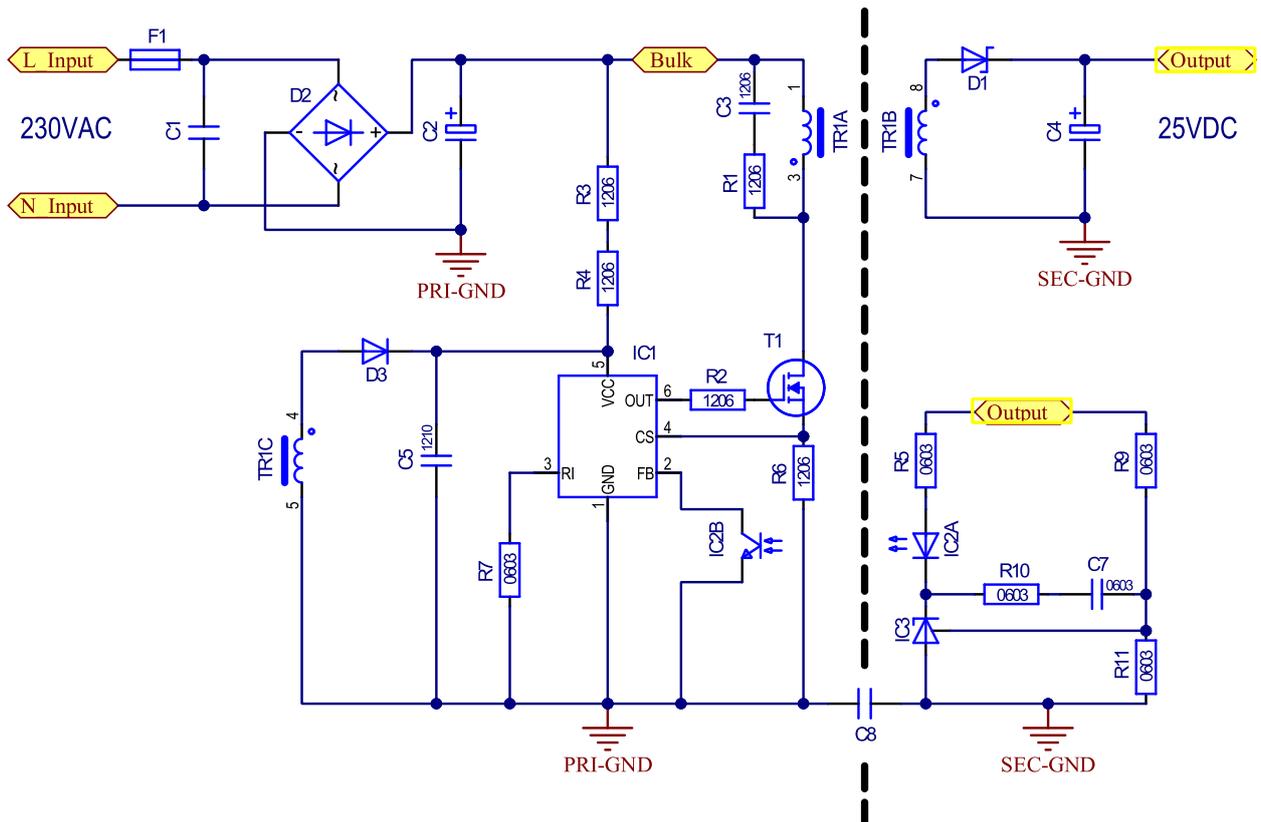


Abbildung 3: Vereinfachte AC/DC-Schaltung für die Berechnungen.

Die Berechnung erfolgte nach EN/IEC 61709 (SN29500) und MIL-HDBK-217 mit unterschiedlichen Belastungsfaktoren / Umgebungstemperaturen (25°C, 40°C, 60°C), wobei das Temperaturmodell auf EN/IEC 61709 (modifizierter Arrhenius) basiert.

Vorbedingungen:

SNA: Nonmobile operation ground benign

Ta: 25-60°C mittlere Bauteil-

Umgebungstemperatur

Zf: Dauerbetrieb 8760 h pro Jahr

			SN-29500			MIL-HDBK-217		
			25 °C	40°C	60°C	25 °C	40°C	60°C
Menge	Komponente	Ident.	fit	fit	fit	fit	fit	fit
1	SG6859	IC1	5,5	10,0	22,6	42,1	109,8	388,2
1	Sicherung TR5 1A 300V	F1	25,0	25,0	25,0	10,0	10,0	10,0
1	TR1	TR1	4,4	5,0	6,7	4,9	5,8	8,1
1	STU5N65M6	T1	31,6	60,0	143,1	1169,2	1451,4	1887,3
1	MKP X2 0,1µF/275V	C1	0,3	0,7	2,2	10,9	12,4	19,6
1	B250D	D2	5,7	10,0	19,9	472,0	688,6	1087,3
1	ELCAP 10UF 400V	C2	1,8	5,0	18,6	37,1	57,1	117,2
1	KAPPE 1206 X7R 10NF	C3	1,0	2,0	4,4	5,4	5,6	6,0
1	RES 0204 47R	R1	0,5	0,7	1,1	3,0	3,5	4,4
1	BAS20	D3	0,5	1,0	2,3	5,5	8,7	14,9
1	CHIP 10UF 25V	C5	1,0	2,0	4,4	5,4	5,6	6,0
2	RES 0204 1M	R3 R4	1,0	1,4	2,2	6,0	7,1	8,8
1	RES 100K /0603	R7	0,1	0,2	0,3	3,0	3,5	4,4
1	RES 0204 100R	R2	0,5	0,7	1,1	3,0	3,5	4,4
1	RES 0204 4R7	R6	0,5	0,7	1,1	3,0	3,5	4,4
1	30BQ100	D1	5,7	10,0	19,9	22,1	32,3	51,0
1	ELCAP 470UF/35V	C4	1,8	5,0	18,6	37,1	57,1	117,2
1	TLP785	IC2	6,4	15,0	41,5	91,6	137,7	224,6
1	RES 3K3/0603	R5	0,1	0,2	0,3	3,0	3,5	4,4
2	RES 10K/0603	R9 R10	0,3	0,4	0,6	6,0	7,1	8,8
1	KAPZ 10N/50V/0603	C7	1,0	2,0	4,4	5,4	5,6	6,0
1	RES 1,1K /0603	R11	0,1	0,2	0,3	3,0	3,5	4,4
1	GAP Y1 1NF	C8	1,0	2,0	4,4	5,4	5,6	6,0
1	TL431CLP	IC3	1,6	3,0	6,7	10,5	27,5	102,9
69	Lötverbindungen		2,1	2,1	2,1	4,8	4,8	4,8

<b>fit<sub>sum</sub></b>			<b>100</b>	<b>164</b>	<b>354</b>	<b>1970</b>	<b>2661</b>	<b>4101</b>
<b>MTBF</b>	[khrs]		<b>10.029</b>	<b>6.088</b>	<b>2.828</b>	<b>508</b>	<b>376</b>	<b>244</b>

*Tabelle 3: Mit EXAR Software 11.0 berechnete Werte*

## Analyse und Kommentare zu den Ergebnissen

Wie an diesem einfachen Schaltplan zu erkennen ist, nehmen die MTBF-Werte nach den verschiedenen Normen mit zunehmender Temperaturbelastung ab (werden unzuverlässiger), aber die Änderungsrate ist nicht proportional zueinander, was wiederum auf die von jeder Norm verwendeten unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren zurückzuführen ist.

### 4.3 Ergebnisse für verschiedene Eingangsspannungen

Der Einfluss unterschiedlicher Eingangsspannungen wird beispielhaft an der Berechnung nach EN/IEC 61709 (SN-29500) dargestellt.

Je nach Stromstärke weisen die Bauteile unterschiedliche Eigenerwärmungen  $T_{self}$  auf.

Vorbedingungen:

SNA: Nonmobile operation, ground benign

Ta: 25°C mittlere Bauteil-Umgebungstemperatur

Zf: Dauerbetrieb 8760 h pro Jahr

			110Vac		230Vac	
Menge	Komponente	Iden.	fit	$\Delta$ Temperaturbelastung [°C]	fit	$\Delta$ Temp. Spannung [°C]
1	SG6859	IC1	11,7	$T_{self} = 34$	10,4	$T = 31_{self}$
1	Sicherung TR5 1A 300V	F1	25,0		25,0	
1	TR1	TR1	7,5	$T = 54_{self}$	7,3	$T = 53_{self}$
1	STU5N65M6	T1	20,8	$T = 50_{self}$	24,5	$T = 54_{self}$
1	MKP X2 0,1µF/275V	C1	0,8	$T = 17_{self}$	0,6	$T = 11_{self}$
1	B250D	D2	4,1	$T = 37_{self}$	2,3	$T = 24_{self}$
1	ELCAP 10UF 400V	C2	7,9	$T = 22_{self}$	5,0	$T = 15_{self}$
1	KAPPE 1206 X7R 10NF	C3	4,4	$T = 35_{self}$	5,4	$T = 41_{self}$
1	RES 0204 47R	R1	0,8	$T = 35_{self}$	0,9	$T = 41_{self}$
1	BAS20	D3	1,1	$T = 32_{self}$	0,9	$T = 28_{self}$
1	CHIP 10UF 25V	C5	4,2	$T = 34_{self}$	3,8	$T = 31_{self}$
2	RES 0204 1M	R3 R4	1,5	$T = 33_{self}$	1,3	$T = 26_{self}$
1	RES 100K /0603	R7	0,2	$T = 34_{self}$	0,2	$T = 31_{self}$
1	RES 0204 100R	R2	0,9	$T = 39_{self}$	0,8	$T = 37_{self}$
1	RES 0204 4R7	R6	0,9	$T = 41_{self}$	0,8	$T = 36_{self}$
1	30BQ100	D1	5,5	$T = 44_{self}$	4,6	$T = 40_{self}$
1	ELCAP 470UF/35V	C4	7,9	$T = 22_{self}$	5,7	$T = 17_{self}$
1	TLP785	IC2	14,2	$T = 29_{self}$	11,4	$T = 25_{self}$
1	RES 3K3/0603	R5	0,2	$T = 31_{self}$	0,2	$T = 25_{self}$
2	RES 10K/0603	R9 R10	0,4	$T = 31_{self}$	0,4	$T = 25_{self}$
1	KAPZ 10N/50V/0603	C7	3,8	$T = 31_{self}$	3,0	$T = 25_{self}$
1	RES 1,1K /0603	R11	0,2	$T = 31_{self}$	0,2	$T = 25_{self}$
1	GAP Y1 1NF	C8	3,0	$T = 25_{self}$	2,5	$T = 20_{self}$
1	TL431CLP	IC3	4,7	$T = 31_{self}$	3,7	$T = 25_{self}$
69	Maschinelle Lötverbindung		2,1		2,1	
<b>FIT-Sum</b>			<b>134</b>		<b>123</b>	
<b>MTBF</b>	[khrs]		<b>7.484</b>		<b>8.141</b>	

Tabelle 4: Verschiedene Eingangsspannungen berechnet für SN 29500 basierend auf EXAR Software 11.0

## Analyse und Kommentare zu den Ergebnissen

Ein AC/DC-Wandler mit Universaleingang weist unter verschiedenen Betriebsbedingungen unterschiedliche Komponentenbelastungen auf, die bei den MTBF-Berechnungen nicht immer berücksichtigt werden.

Bei einer Eingangsspannung von 110 Vac/60Hz ist der Eingangsstrom beispielsweise doppelt so hoch wie bei 230 Vac/50Hz für die gleiche Last. Dieser höhere Strom und die höhere Netzfrequenz belasten die Eingangssicherung und den Brückengleichrichter überproportional, aber die niedrigere Netzspannung verringert die Belastung des Eingangskondensators. Andererseits führt der Betrieb mit 230 oder 277 Vac zu einer geringeren Belastung des Eingangsstroms, aber zu einer höheren Spannungsbelastung des Eingangskondensators und des Schalttransistors.

## 4.4 Einfluss der Betriebsbedingungen und der Umgebung

### Einfluss der Umgebungstemperatur

Das folgende Diagramm zeigt den berechneten MTBF-Wert (MIL-HDBK-217F, GB) in Blau im Vergleich zu einer einfachen logarithmischen Beziehung zur Umgebungstemperatur (gestrichelte rote Linie) für einen einfachen DC-Schaltregler. Die enge Korrelation deutet darauf hin, dass bei Schaltungen mit einer geringen Anzahl von Bauteilen die Temperatur der Hauptbelastungsfaktor ist und die anderen Belastungsfaktoren weitgehend ignoriert werden können.

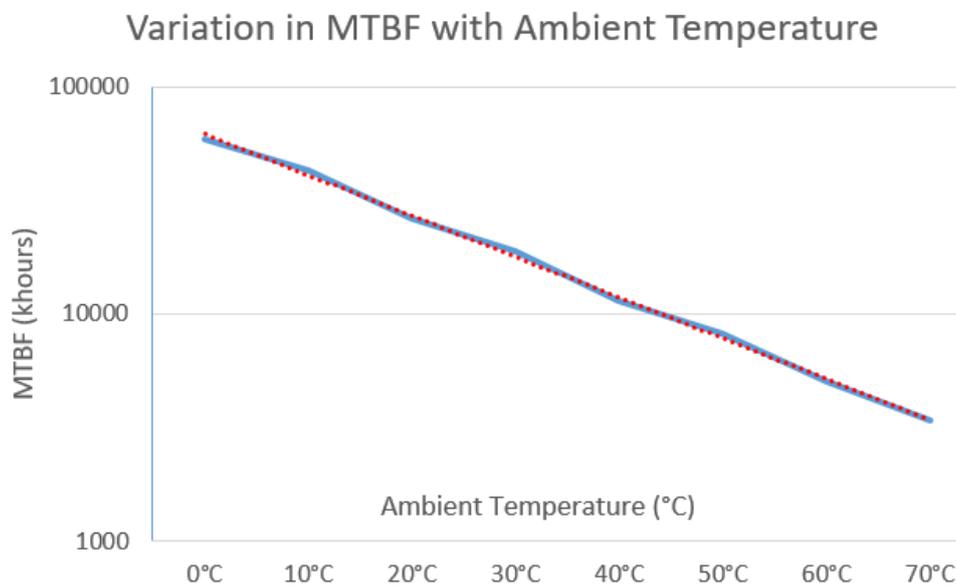


Abbildung 4: Korrelation von MTBF und Temperatur, berechnete Werte.

## Analyse und Kommentare zu den Ergebnissen

Als Faustregel gilt, dass sich der MTBF-Wert bei einem Anstieg der Umgebungstemperatur um jeweils 10 °C halbiert (die vertikale Achse ist logarithmisch, die horizontale Achse ist linear).

Diese Beziehung gilt zwar nur für einen begrenzten Temperaturbereich und für einfache Wandler, sie ist jedoch ein nützlicher Näherungswert, der zur Schätzung der MTBF-Werte für Umgebungstemperaturen verwendet werden kann, die nicht im Datenblatt des Herstellers angegeben sind.

## Einfluss von anderen Betriebsbedingungen

Bitte beachten Sie: Bei einem DC/DC-Wandler sind die Bauteilbelastungen an den Grenzen des Eingangsspannungsbereichs am höchsten. Wenn ein Wandler mit 18-36 VDC mit einem Nenneingang von 24 VDC betrieben wird, hat der PWM-Regler in der Regel ein Tastverhältnis von 50 %, aber bei 18 VDC sind die Aus-Zeiten sehr kurz, während bei 36 VDC die Einschalt-Zeiten sehr kurz sind. Diese hohen Tastverhältnisse mit hohen Spannungs- und Strom-Anstiegsgeschwindigkeiten ( $dv/dt$  und  $di/dt$ ) belasten den Schalttransistor, die Induktivität und den Ausgangskondensator überproportional.

Bei den MTBF-Berechnungen können zusätzliche Belastungsfaktoren berücksichtigt werden, wenn bekannt ist, dass die Eingangsspannung im normalen Betrieb stark schwankt, indem der Umgebungsbelastungsfaktor  $\pi_E$  angepasst wird. Dementgegen gehen die MTBF-Berechnungen im Datenblatt jedoch immer von der Nenneingangsspannung aus.

# 5 Lehren und Schlussfolgerungen

## 5.1 Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden

Alle MTBF-Berechnungsmethoden und -Normen haben das gleiche Ziel: die Beschreibung der Zuverlässigkeit und Ausfallrate von elektronischen Geräten. Da sie aus unterschiedlichen Branchen wie dem Militär oder der Telekommunikation stammen, verwenden sie unterschiedliche Quellendatenbanken für ihre Berechnungen. Außerdem stammen die FIT-Werte, die zur Berechnung der MTBF-Ergebnisse verwendet werden, aus unterschiedlichen Veröffentlichungszeiträumen. Dies ist wichtig zu wissen, da sich elektronische Bauteile und ihre Zuverlässigkeit im Laufe der Jahre erheblich verändert haben und mit der Verbesserung der Produktionsprozesse und der Qualitätskontrolle zuverlässiger geworden sind. Ein weiterer Unterschied zwischen den Normen besteht in der Definition fester Belastungs- und Umgebungsbedingungen, die von einer realen Anwendung abweichen können. Die Verwendung von gemessenen Felddaten kann die Ungenauigkeit der "alten" Zuverlässigkeitsdaten beheben. Eine erwartete Zuverlässigkeit kann jedoch nur berechnet werden, wenn langfristigen Betriebsdaten gesammelt wurden.

Die Quellendatenbanken aus denen die FIT-Werte stammen zum einen, sowie die den Belastungsbedingungen zugewiesenen Gewichtungsfaktoren zum anderen, sind der Schlüssel zur Berechnung eines genauen Ergebnisses und stellen die Hauptunterschiede zwischen den Normen dar.

## 5.2 Schlussfolgerungen:

- *Alle Berechnungsmethoden (Schemata) sind im Rahmen ihrer angegebenen Anwendung und Begründung gültig.*
- *Je nach Belastung und anderen Beanspruchungsfaktoren können verschiedene Komponenten als das schwächste Glied eingestuft werden, so dass die Berechnungen mit verschiedenen „zu erwartenden“ Betriebsbedingungen wiederholt werden sollten, um die am stärksten belastete Komponente zu ermitteln.*
- *MTBF-Werte aus verschiedenen Normen sind nicht gleichwertig und können nicht verglichen oder von einer Norm auf eine andere übertragen werden.*
- *Die berechnete Zuverlässigkeit ist ein statistisches Ergebnis, das nicht die Lebensdauer einer einzelnen Einheit darstellt, sondern die Zuverlässigkeit einer großen Anzahl von Einheiten genau vorhersagen kann*
- *MTBF-Werte ohne Angabe der Norm und der Betriebsumgebung, die für die Berechnung verwendet wurden, sind unbrauchbar.*
  
- **Bei richtiger Anwendung ist die MTBF ein nützliches Instrument für Zuverlässigkeitsvorhersagen, selbst für ein neues Produkt, zu dem es noch keine Erfahrungen mit der Zuverlässigkeit im Betrieb gibt.**

## 6 Anhang

Im Folgenden werden die zu berücksichtigenden Stressfaktoren beschrieben.

### Temperatur

#### *Arrhenius*

Der schwedische Chemiker Svante Arrhenius entwickelte eine Gleichung, die die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen mit der Temperatur in Beziehung setzt und im Wesentlichen besagt, dass sich die chemische Reaktionsgeschwindigkeit pro 10 °C Temperaturanstieg verdoppelt. Da viele Komponentenausfälle chemischen Ursprungs sind (Korrosion, Leckströme, Diffusions- und Migrationseffekte usw.), ist die Temperatur in der Regel der aggressivste Stressfaktor.

#### *Eyring-Modell*

Henry Eyring entwickelte, basierend auf der Arbeit von Arrhenius ein Modell, das neben der Temperatur noch weitere Belastungsfaktoren einbezieht. So ist beispielsweise die Zuverlässigkeit eines Kondensators oder Halbleiterbauteils sowohl von der Temperatur als auch von der Spannungsbelastung abhängig. Das Eyring-Modell ist die Rechtfertigung für die Akkumulation mehrerer Beschleunigungsfaktoren bei der MTBF-Berechnung.

### Elektrische Belastung

Häufig versagen Komponenten aufgrund eines "Electrical Over-Stress" (EOS), selbst wenn sie innerhalb ihrer Datenblattparameter verwendet werden:

#### *Modell der Heißträgerinjektion*

In Halbleiterbauelementen können Elektronen oder "Löcher" im Material genügend Energie gewinnen, um die Potenzialbarriere zu überwinden und sich so „frei beweglich“ über Isolationsbarrieren hinwegsetzen. Die eingeschlossene Ladung führt schließlich zu einer dauerhaften Schädigung des Halbleiters. Je höher die Spannungsbelastung ist, desto mobiler oder "heißer" werden diese Ladungsträger.

#### *Modell Elektromigration/Korrosion*

Die Elektromigration ist ein ähnlicher Mechanismus wie die Heißträgerinjektion, allerdings mit Atomen statt mit Elektronen. Unter thermischer und spannungsbedingter Belastung können sich Atome aus den Strukturen lösen und sich an anderer Stelle ablagern, wodurch offene oder kurze Schaltkreise entstehen. Auch die Korrosion kann beschleunigt werden, wenn Atome freiliegende Oberflächen verlassen und das Eindringen von Flüssigkeiten oder Gasen ermöglichen.

### Umweltbelastung

#### *Mil Std.*

MIL HDBK 217F definiert militärische Standard-Umgebungsbedingungen, je nachdem, wo das Bauteil eingesetzt wird: am Boden (GB), am Boden fest (GF), am Boden beweglich (GM), bei der Marine, geschützt (NS), bei der Marine, ungeschützt (NU), in der Luftfracht, bemannt (AIC), bemannte Luftfahrt (AUC), im Weltraum (SF) und beim Raketenstart (ML). GB ist der am wenigsten belastende Faktor, während, wenig überraschend, der Raketenstart der aggressivste ist. Für elektronische Schaltkreise ist GB der am meisten genutzte Faktor, da er die Umgebung darstellt, in der die meisten elektrischen Geräte verwendet werden.

### *Mechanische Ermüdung (Schock/Erschütterung)*

Wiederholte mechanische Stöße und Vibrationen führen zu Metallermüdung und damit zu strukturellen Schäden wie gebrochenen Bauteilfüßen, trockenen Lötstellen oder losen Bonddrähten sowie zu systematischen Fehlern wie losen Steckern, Befestigungselementen oder mechanischem Verschleiß.

### *Luftfeuchtigkeit*

Hohe Luftfeuchtigkeit kann zu Oxidation und Korrosion bei Metallen, zum Abbau von Kunststoffen und zum Aufquellen und Ablösen von PCBs führen. Die Wirkung wird beschleunigt, wenn Salz im Spiel ist.

### *Hohe Temperatur und Luftfeuchtigkeit*

Hohe Luftfeuchtigkeit und hohe Temperatur sind starke Beschleunigungsfaktoren für die Arrhenius-Gleichung (die Kombination wird Arrhenius-Peck-Gleichung genannt). Beim Highly Accelerated Stress Screening (HASS) können Tests über 96 Stunden bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden, um einen jahrelangen Betrieb unter Standardbedingungen zu simulieren.

### *Niedrige Temperaturen*

Bei extrem niedrigen Temperaturen werden Bauteile und Lötstellen spröde und sind anfälliger für mechanische Stöße und Vibrationen. Außerdem können Unterschiede in den Wärmekontraktionskoeffizienten zwischen den Materialien bei niedrigen Temperaturen mechanische Spannungen in den Bauteilen verursachen, die zu Brüchen, Delamination und Trennung der Teile führen.

### *Temperaturwechsel*

Temperaturzyklen belasten elektronische Bauteile und Lötstellen stark, so dass Qualitätsstandards in der Automobil- und Eisenbahnindustrie häufig einen zuverlässigen Betrieb über Jahrzehnte hinweg verlangen. Die Anzahl der Zyklen, die Verweildauer und die Geschwindigkeit der Temperaturänderung sind allesamt wichtige Belastungsfaktoren. Die meisten MTBF-Berechnungen gehen jedoch von stabilen, gleichbleibenden Betriebstemperaturen aus.

## Faktor Qualität

Der Qualitätsfaktor bezieht sich auf die Prüfung der verwendeten Komponenten vor ihrer Verwendung, um sicherzustellen, dass die Produktions- und Qualitätstoleranzen so gering wie möglich sind. Mil Spec verwendet das strengste Prüfprotokoll, gefolgt von Automobil- und kommerziellen Qualitätsstufen.

## Belastungsprofil

Die Häufigkeit des Ein- und Ausschaltens eines Produkts innerhalb eines 24-Stunden-Zeitraums beeinflusst dessen Zuverlässigkeit, was in einem Einsatzprofil berücksichtigt werden kann. Während MIL HDBK 217F von einem kontinuierlichen 24/7-Betrieb ausgeht, ermöglicht IEC 62380 eine Anpassung des Einsatzprofils an die Gesamtzuverlässigkeit, indem zusätzliche Stressfaktoren wie Einschaltstromstöße und Temperaturschwankungen der Komponenten durch wiederholtes Ein- und Ausschalten berücksichtigt werden.

Eine ausführliche Darstellung der Bedeutung eines Aufgabenprofils für alle Zuverlässigkeitsaussagen finden Sie im [ZVEI-Handbuch zur Robustheitsbewertung](#).

<https://www.zvei.org/en/subjects/robustness-validation-general/robustness-validation-device-level>

**Telcordia-Geschichte:** (Bell Communications Research, Inc oder Bellcore)

Bellcore TR-TSY-000332 Ausgabe 2 (1988)

Bellcore TR-NWT-000332 Ausgabe 3 (1990)

Bellcore TR-NWT-332 Ausgabe 4 (1992)

Bellcore TR-332 Ausgabe 5 (1995)

Bellcore TR-332 Ausgabe 6 (1997)

Telcordia SR-332 Ausgabe 1 (2001) <sup>(1)</sup>

Telcordia SR-332 Ausgabe 2 (2006)

Telcordia SR-332 Ausgabe 3 (2011)

Telcordia SR-332 (Ausgabe 4) (2016)

<sup>(1)</sup> 1997 wurde das Unternehmen Bellcore von der Science Applications International Corporation (SAIC) übernommen und der Name des Unternehmens in Telcordia geändert.

Notizen:

### **Redaktionsteam / Arbeitsgruppenmitglieder:**

Manuel Berwardt , BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH

Michael Kreuzpaintner , Deutronic Elektronik GmbH

Andreas Frehland , FRIWO Gerätebau GmbH

Benjamin Stoll , inpotron Schaltnetzteile GmbH

Wolfgang Neumärker , MTM Power Messtechnik Mellenbach GmbH

Robert Gradischnig , Murrelektronik GmbH

Chenje Gu, Murrelektronik GmbH

Benjamin Schob , PULS GmbH

Steve Roberts , RECOM Electronic GmbH & Co. KG

Timur Uludag , Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Bernd Waser , Murrelektronik GmbH

### **Kontakt**

Rolf Winter • Geschäftsführer • Fachverband Transformatoren & Stromversorgungen -  
Tel.: +49 69 6302 402 • Mobil: +49 162 2664 937 • E-Mail: Rolf.Winter@zvei.org

ZVEI e. V. • Verband der Elektro- und Digitalindustrie • Lyoner Straße 9 • 60528 Frankfurt a.M.  
Lobbying Register ID.: R002101 • EU-Transparenzregister ID: 94770746469-09 • [www.zvei.org](http://www.zvei.org)