



Inh. Dipl. Ing. Mario Blunk  
Buchfinkenweg 3  
99097 Erfurt / Deutschland

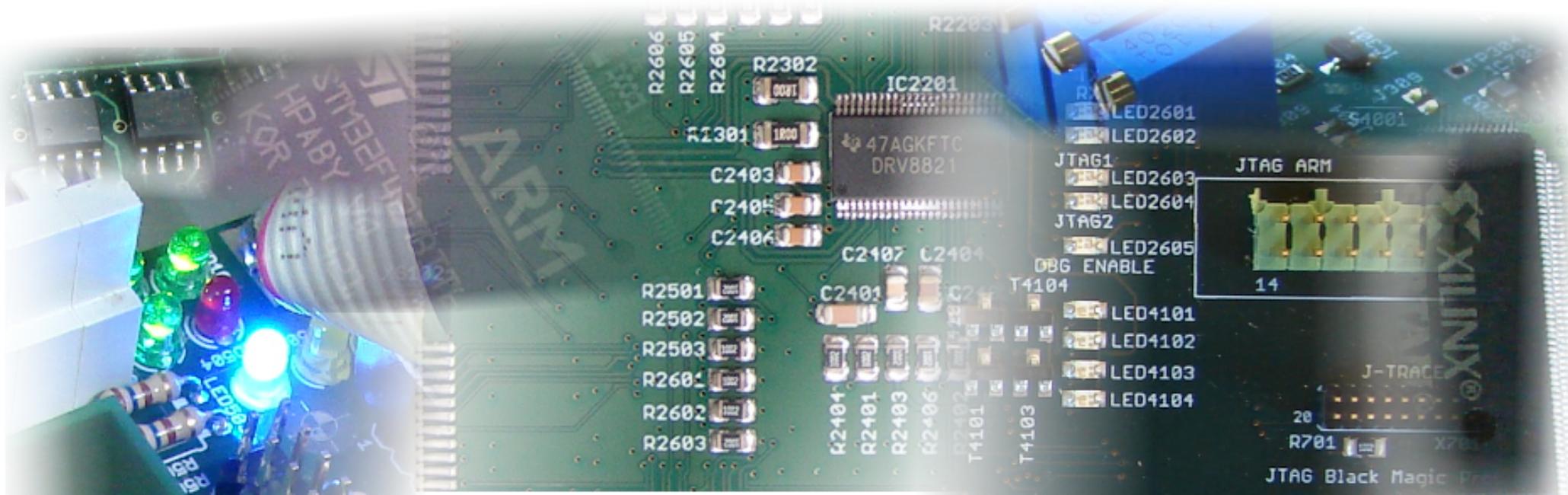
Telefon +49 176 2094 5855

Email [info@blunk-electronic.de](mailto:info@blunk-electronic.de)

Internet [www.blunk-electronic.de](http://www.blunk-electronic.de)



Design Reviews Gutachten Beratung  
HW/SW-Entwicklung



# ***Zuverlässigkeit in der Elektronik***

Für Entwicklung, Betrieb und Wartung elektronische Baugruppen und Systeme sind Abschätzungen über Zeitpunkte von Ausfällen und Zuverlässigkeit nötig. Es handelt sich hier um statistische Zahlen. Insbesondere sicherheitsrelevante Einrichtungen erfordern den Einsatz der Zuverlässigkeitstheorie.



Dieses Seminar vermittelt die Grundlagen der Theorie der Zuverlässigkeit. Es werden Begriffe wie Ausfallrate, MTBF und Zuverlässigkeit erklärt und mittels praktischer Beispiele systematisch vermittelt. Es findet eine Gegenüberstellung von Standards statt, und deren Vor- und Nachteile werden dargelegt.

Durch zahlreiche Literaturverweise ist der Teilnehmer abschließend in der Lage, sich vertiefendes Wissen anzueignen.

# ***Zuverlässigkeit in der Elektronik***

## ***Überblick***



1. Warum Zuverlässigkeit ?
2. Grundlagen
3. Berechnung der Zuverlässigkeit
4. Vor/Nachteile von Standards wie MIL-HDBK-217F,  
ANSI VITA 51.x
5. Prüfung der Zuverlässigkeit
6. Richtlinien für Entwicklung / Design Rules
7. Wärmeabführung an Bauteilen
8. klimatische Bedingungen
9. Literatur

# Warum Zuverlässigkeit ?

*Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Einrichtung ihre Funktion einwandfrei im geforderten Zeitraum unter vorgegebenen Umweltbedingungen erfüllt.*

- Verkaufsargumente
- Funktionelle Sicherheit (FUSI), Zertifizierungen, SIL-Einstufung, EN/IEC 61508, EN/IEC 62061, EN ISO 13849, EN/IEC 60601, ISO 26262, UL1998, DO-178B, MIL-STD-882-E, ...)
- Kosten
- Prognose über Lebensdauer eines Produktes
- Minimierung von Wartung → Logistik
- Rechtliche Aspekte (Garantie, Versicherung, Haftung, ...)
- sinnvolle Balance zwischen Anwendung, Zuverlässigkeit, Preis
- Schutz von Bedienpersonal, Patient, Passagier
- Schutz von Geld, Tier, Ausrüstung und Material
- Betriebssicherheit
- Verfügbarkeit

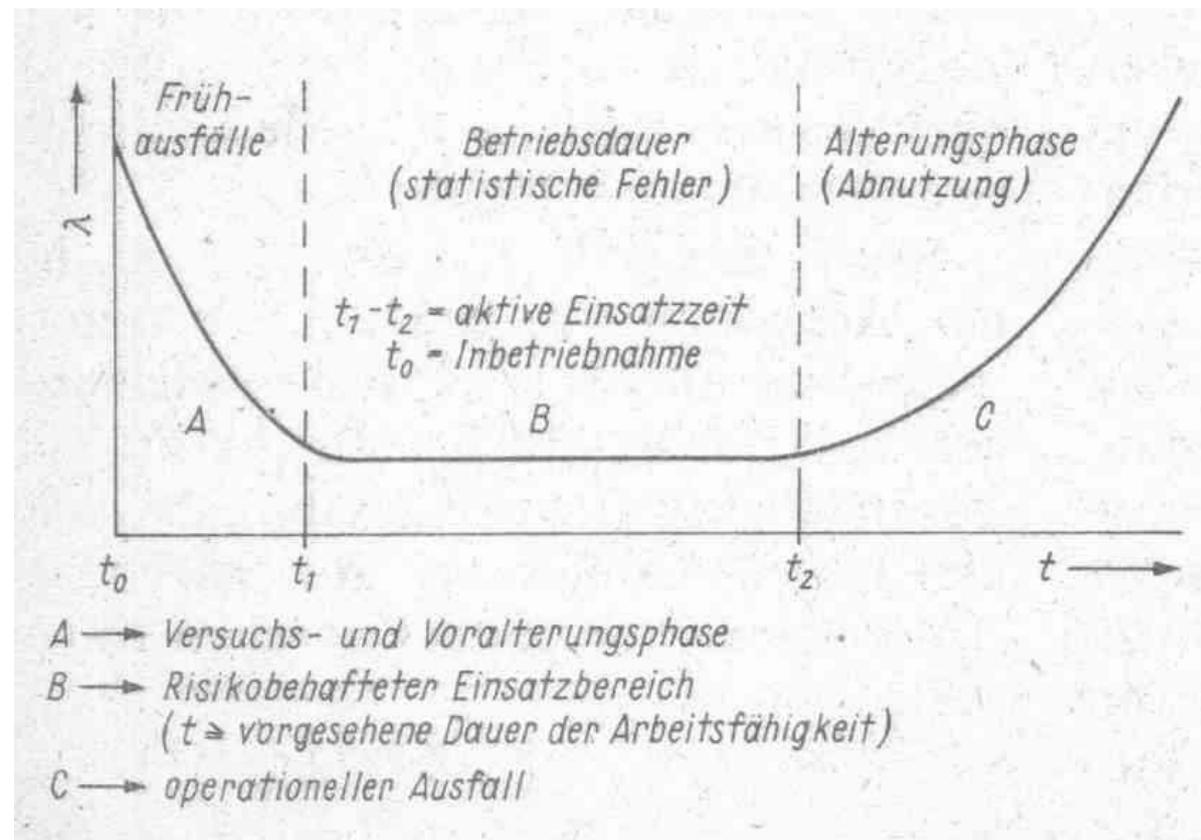


**Betriebssicherheit von Benutzersicherheit trennen !**

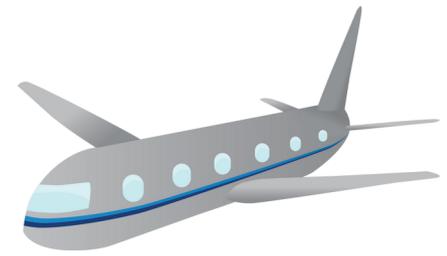
# Qualität und Zuverlässigkeit



1. Qualität ist die Beschaffenheit eines Produktes zu einem bestimmten Zeitpunkt.
2. Zuverlässigkeit beschreibt das Verhalten des Produktes in Abhängigkeit von der Zeit.



# ***Einführung #1***



Komplexe Systeme erfordern die **Theorie der Zuverlässigkeit**.

**Die Zuverlässigkeit eines Produktes wird beeinflusst durch:**

- Eigenschaften der Bauelemente (Ausfallrate, MTBF, ...)
- Dimensionierung der Schaltung (Toleranzen, Streßfaktoren, ...)
- Systemstruktur (Serienstruktur, Parallelstruktur, Redundanz, ...)
- Einfüsse aus der Umwelt (Temperatur, Feuchtigkeit, Klima, Bedienung, Transport, Strahlung, ...)

# Einführung #2



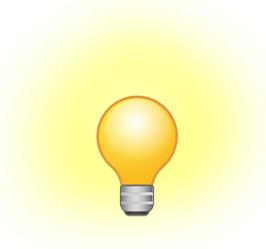
Beispiel aus [Fi/Sch, 88]:

Im Labor wurde ein Instrument zur Überwachung der Bordspannung eines Autos aufgebaut. Die Schaltung bestand aus LEDs, Transistoren und Z-Dioden. Letztere wurden mit einem Strom von **50mA** betrieben und befanden sich direkt auf der Leiterplatte. Die Schaltung arbeitete im Labor zufriedenstellend.

Nach dem Einbau ins Fahrzeug und einer Fahrt im Sommer fiel das Gerät aus. Was war die Ursache ?

Neben dem Test der Schaltung bei Über- und Unterspannung wäre ein einfacher Erwärmungstest bis etwa  $+60^{\circ}\text{C}$  notwendig gewesen. Dabei hätte man bemerkt, daß die Z-Dioden mit zu hoher **Verlustleistung** ohne Wärmeableitung betrieben wurden und deshalb ausfielen.

# Einführung #3



Ziel der Zuverlässigkeitstheorie ist die Erhöhung der Betriebssicherheit technischer Anlagen durch:

richtige Dimensionierung der Schaltung

- sinnvolle Toleranzen
- gezielte Unterlastung

prophylaktische Maßnahmen

- Redundanz
- Schutz durch Gehäuse, Verguß, Beschichtungen, Stoßdämpfer, ... [\[Du/Gr 68\]](#)

- Sollbruchstellen
- geplante Obsoleszenz

# ***MTBF #1***



zentrale Größe:       **MTBF – Mean Time Between Failures**

Formelzeichen:       MTBF oder m

**mittlere** Zeit zwischen den Ausfällen eines:

- Bauelements (Widerstand, IC, Schalter, Motor, Ventil ...)
- Gerätes (Steuerung eines Motors, Bildschirm, Telefon, ...)
- Systems/Anlage (Avionik, Netzwerk, Mobilfunk-Station, ...)

**Achtung:** MTBF ist ein statistischer Mittelwert !

Keine Aussage über garantierte Betriebsdauer !

# MTBF #2



Beispiel 1:

Die Steuerung eines Geschirrspülers fällt innerhalb von 10 Jahren 4 mal aus. Die MTBF beträgt:

$$m = MTBF = \frac{10 \text{ Jahre}}{4} = 2,5 \text{ Jahre}$$

Im Schnitt fällt die Steuerung also alle 2,5 Jahre aus.

Beispiel 2:

Ein FPGA fällt innerhalb von 50.000 Jahren 2 mal aus. Die MTBF beträgt:

$$m = MTBF = \frac{50.000 \text{ Jahre}}{2} = 200 \text{ Millionen Stunden}$$

Im Schnitt fällt der FPGA also alle 200 Millionen Stunden aus.

# ***Zeiträume***



1 Tag	24h
5-Tage Woche	120h
7-Tage-Woche	168h
1 Monat (a 30d)	720h
1 Jahr (a 365d)	8760h

# Ausfallrate #1



zentrale Größe: **Ausfallrate** oder **Fehlerrate** (engl. failure rate)

Formelzeichen:  $\lambda$  (Lambda)

Ausfälle eines Bauelements, Gerätes, Systems pro Zeiteinheit.

**Achtung:** Ausfallrate ist ein statistischer Mittelwert !  
Keine Aussage über garantierte Betriebsdauer !

Einheiten:

- ➔ x Prozent pro 1000h
- ➔ Ausfälle pro 100 Millionen Stunden
- ➔ FIT - Ausfälle pro 1 Milliarden Stunden ( $10^9$ h) → für Halbleiter verwendet

Hersteller kontaktieren !

**ACHTUNG: Ohne bekannte Ausfallrate ist keine Berechnung von MTBF oder Zuverlässigkeit möglich !**

# Ausfallrate #2



www.vishay.com

ERL (Military RLR)

Vishay Dale

## Metal Film Resistors, Axial, Military/Established Reliability, MIL-PRF-39017 Qualified, Type RLR



### FEATURES

- Meets requirements of MIL-PRF-39017
- Failure rate: Verified failure rate (contact factory for current level)
- Epoxy coated construction provides superior moisture protection
- Traceability of materials and processing
- Monthly lot acceptance testing
- Very low noise (-40 dB)
- Extensive stocking program at distributors and factory in  $\pm 1\%$  and  $\pm 2\%$  tolerances
- Vishay Dale has complete capability to develop specific reliability programs designed to customer requirements

### STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS

VISHAY DALE MODEL	MIL-PRF-39017 STYLE	MIL SPEC. SHEET	POWER RATING 70 °C W	RESISTANCE RANGE <sup>(1)</sup> Ω	TOLERANCE ± %	TEMPERATURE COEFFICIENT ± ppm/°C	MAXIMUM WORKING VOLTAGE <sup>(4)</sup> V	LIFE FAILURE RATE <sup>(2)</sup>
ERL05, ERL05..19 <sup>(3)</sup>	RLR05	05	0.125	4.7 to 301K 302K to 1M	1, 2	100	200	M, P, R, S M, P, R
ERL07, ERL07..23 <sup>(3)</sup>	RLR07	01	0.25	1 to 9.76 10 to 3.01M 3.02M to 10M	1, 2	100	250	M M, P, R, S M, P, R
ERL20, ERL20..11 <sup>(3)</sup>	RLR20	02	0.50	4.3 to 3.01M	1, 2	100	350	M, P, R, S
ERL32, ERL32..1 <sup>(3)</sup>	RLR32	03	1.0	1 to 2.7M	1, 2	100	500	M, P, R

MIL-PRF-39017 ist Nachfolger von MIL-R-39017

[Vishay1]

# Ausfallrate #3



www.vishay.com

ERL (Military RLR)

Vishay Dale

GLOBAL PART NUMBER INFORMATION																	
New Global Part Numbering: RLR07C3001FRR36 (preferred part numbering format)																	
R	L	R	0	7	C	3	0	0	1	F	R	R	3	6			
MIL STYLE	LEAD MATERIAL	RESISTANCE VALUE	TOLERANCE CODE	FAILURE RATE	PACKAGING	SPECIAL											
RLR05 RLR07 RLR20 RLR32	C = solderable/ weldable	3 digit significant figure, followed by a multiplier Use "R" for values < 100 Ω 1R00 = 1 Ω 3302 = 33 kΩ 1005 = 10 MΩ	F = ± 1 % G = ± 2 %	M = 1.0 %/1000 h P = 0.1 %/1000 h R = 0.01 %/1000 h S = 0.001 %/1000 h	B14 = tin/lead, bulk BSL = tin/lead, bulk, single lot date code R36 = tin/lead, T/R (full, except 32's) R64 = tin/lead, T/R (full; 32's only) RE6 = tin/lead, T/R (1000 pieces) RSL = tin/lead, T/R, single lot date code	Blank = standard (Dash number) (Up to 3 digits) From 1 to 999 as applicable 1 = hot solder dip (32's) 11 = hot solder dip (20's) 19 = hot solder dip (05's) 23 = hot solder dip (07's)											

M = 10 Ausfälle / 1 Mio h  
S = 0,01 Ausfälle / 1 Mio h

[Vishay1]

# Ausfallrate #2



[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

## CMF (Military RN and RL)

Vishay Dale

Metal Film Resistors, Axial, Military **MIL-R-10509** Qualified, Precision, Type RN and MIL-PRF-22684 Qualified, Type RL



### FEATURES

- Very low noise (-40 dB)
- Very low voltage coefficient (5 ppm/V)
- Controlled temperature coefficient
- Flame retardant epoxy coating
- Commercial alternatives to military styles are available with higher power ratings. See CMF Industrial data sheet: ([www.vishay.com/doc?31018](http://www.vishay.com/doc?31018))



[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

## E/H (Military M/D55342)

Vishay Dale Thin Film

QPL **MIL-PRF-55342** Qualified Thin Film Resistor, Surface-Mount Chip



### FEATURES

- Established reliability, "S" and "V" failure rate level (10 ppm), C = 2
- High purity alumina substrate
- Wraparound termination featuring a tenacious adhesion layer covered with an electroplated nickel barrier layer for +150 °C operating conditions
- Very low noise and voltage coefficient

MIL-PRF-55342 ist Nachfolger von MIL-C-55342

[Vishay1]

# Ausfallrate #3



Resistor Style	Specification MIL-R-	Description	$\lambda_b$	$\pi_T$ Table Use Column:	$\pi_S$ Table Use Column:
RC	11	Resistor, Fixed, Composition (Insulated)	.0017	1	2
RCR	39008	Resistor, Fixed, Composition (Insulated) Est. Rel.	.0017	1	2
RL	22684	Resistor, Fixed, Film, Insulated	.0037	2	1
RLR	39017	Resistor, Fixed, Film (Insulated), Est. Rel.	.0037	2	1
RN (R, C or N)	55182	Resistor, Fixed, Film, Established Reliability	.0037	2	1
RM	55342	Resistor, Fixed, Film, Chip, Established Reliability	.0037	2	1
RN	10509	Resistor, Fixed Film (High Stability)	.0037	2	1
RD	11884	Resistor, Fixed, Film (Power Type)	.0037	N/A, $\pi_T = 1$	1
RZ	83401	Resistor Networks, Fixed, Film	.0019	1	N/A, $\pi_S = 1$
RB	93	Resistor, Fixed, Wirewound (Accurate)	.0024	2	1
RBR	39005	Resistor, Fixed, Wirewound (Accurate) Est. Rel.	.0024	2	1

[MIL, 95]

Basisfehlerrate gilt für 25°C Gehäusetemperatur, 1/3 Nennleistung, „Normalumgebung“ (Benign). Siehe MIL-HDBK-217F Notice 2 Seite 3-4 und 9-3.

# Ausfallrate #4



Presumed failure rate based on MIL std. (MIL-HDBK-217F)

Resistors

Datasheet

## ● Equation

Failure rate  $\lambda_P = \lambda_b \times \pi_T \times \pi_P \times \pi_S \times \pi_Q \times \pi_E$  ( $/ 10^6$ )

$\lambda_b$  = Based Failure Rate

$\pi_T$  = Temperature Factor

$\pi_P$  = Power Factor (von Betriebslast abhängig)

$\pi_S$  = Power Stress Factor (Betriebslast/Nennbelastbarkeit)

$\pi_Q$  = Quality Factor

$\pi_E$  = Environment Factor

Resistor style : RM(Resistor,Fixed,Film,Chip,Established Reliability) is applicable.

$$\lambda_b = 0.0037$$

$\pi_Q = 3$  (According to result of test for MIL std.)

$$\pi_E = 1$$

[Rohm, 1]

Basisfehlerrate gilt für 25°C Umgebungstemperatur, 1/3 Nennleistung, „Normalumgebung“ (Benign). Siehe MIL-HDBK-217F Notice 2 Seite 3-4 und 9-3.

# Ausfallrate #5



$\pi_T$

T (°C)	$\pi_T$
20	0.95
30	1.1
40	1.2
50	1.3
60	1.4
70	1.5
80	1.6
90	1.7
100	1.9
110	2.0
120	2.1
130	2.3
140	2.4
150	2.5

T (°C) : Atmosphere  
Temperature

$\pi_P$

Loaded Wattage(W)	$\pi_P$
0.001	0.068
0.01	0.17
0.13	0.44
0.25	0.58
0.50	0.76
0.75	0.89
1.0	1.0
2.0	1.3
3.0	1.5
4.0	1.7
5.0	1.9
10	2.5
25	3.5
50	4.6
100	6.0
150	7.1

$\pi_S$

Wattage Stress	$\pi_S$
0.1	0.79
0.2	0.88
0.3	0.99
0.4	1.1
0.5	1.2
0.6	1.4
0.7	1.5
0.8	1.7
0.9	1.9

[Rohm, 1]

(Betriebslast)

$$\text{Wattage Stress} = \frac{\text{Loaded Wattage}}{\text{Rated Wattage}}$$

(Streßfaktor) (Nennbelastbarkeit)

Basisfehlerrate gilt für 25°C Umgebungstemperatur, 1/3 Nennleistung, „Normalumgebung“ (Benign). Siehe MIL-HDBK-217F Notice 2 Seite 3-4 und 9-3.

# Ausfallrate #6



[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

**CDR-MIL-PRF-55681**

Vishay Vitramon

## Surface Mount Multilayer Ceramic Chip Capacitors MIL Qualified, Type CDR



### FEATURES

- Military qualified products
- Federal stock control number, CAGE CODE 2770A
- High reliability tested per MIL-PRF-55681
- Tin / lead termination codes "W", "Z", and "U"
- Lead (Pb)-free termination codes "Y" and "M"
- Wet build process
- Reliable Noble Metal Electrode (NME) system
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



### Note

\* This datasheet provides information about parts that are

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_b \cdot \pi_{\text{temp}} \cdot \pi_{\text{capacity}} \cdot \pi_{\text{voltage}} \cdot \pi_{(\text{series resistance})} \cdot \pi_{\text{quality}} \cdot \pi_{\text{environment}}$$

Basisfehlerrate gilt für 25°C Umgebungstemperatur, 1/5 Nennspannung, „Normalumgebung“ (Benign). Siehe MIL-HDBK-217F Notice 2 Seite 3-4 und 9-3.

# Ausfallrate #7



## 10.1 CAPACITORS

Capacitor Style	Spec. MIL-C-	Description	$\lambda_b$	$\pi_T$ Table - Use Column:	$\pi_C$ Table - Use Column:	$\pi_V$ Table - Use Column:	$\pi_{SR}$
CK	11015	Capacitor, Fixed, Ceramic Dielectric (General Purpose)	.00099	2	1	3	1
CKR	39014	Capacitor, Fixed, Ceramic Dielectric (General Purpose), Established Reliability	.00099	2	1	3	1
CC, CCR	20	Capacitor, Fixed, Ceramic Dielectric (Temperature Compensating), Established and Nonestablished Reliability	.00099	2	1	3	1
CDR	55681	Capacitor, Chip, Multiple Layer, Fixed, Ceramic Dielectric, Established Reliability	.0020	2	1	3	1
CSR	39003	Capacitor, Fixed, Electrolytic (Solid Electrolyte), Tantalum, Established Reliability	.00040	1	2	4	See $\pi_{SR}$ Table

[MIL, 95]

Basisfehlerrate gilt für 25°C Umgebungstemperatur, 1/5 Nennspannung, „Normalumgebung“ (Benign). Siehe MIL-HDBK-217F Notice 2 Seite 3-4 und 10-2.

# Ausfallrate Umrechnungen



## Umrechnungen

von %/1000h nach Ausfälle/h:

$$\% / 1000 h \cdot 10^{-5}$$

von Ausfälle/h nach %/1000h:

$$\text{Ausfälle} / 1000 h \cdot 10^5$$

von %/1000h nach Ausfälle/1 Mio h:

$$\% / 1000 h \cdot 10$$

von Ausfälle/1 Mio h nach %/1000h:

$$\text{Ausfälle} / 1000 h \cdot 0,1$$

von %/1000h nach FIT (Ausfälle/1 Mrd h):

$$\% / 1000 h \cdot 10^4$$

von FIT nach %/1000h:

$$FIT \cdot 10^{-4}$$

# Ausfallrate Beispiele



Beispiel 1:

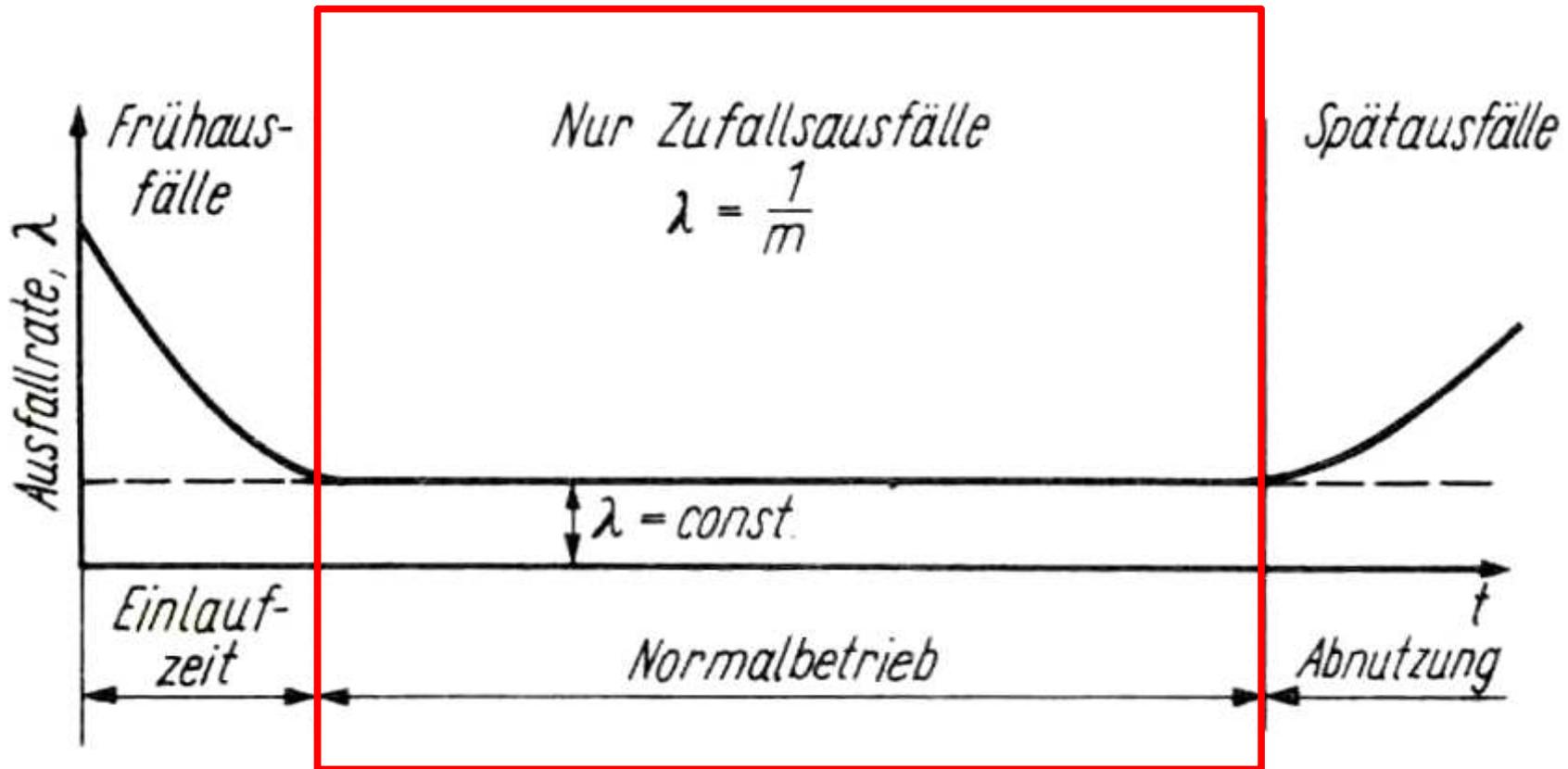
Ein Widerstand hat eine Fehlerrate von:

$$\lambda = \frac{0,0104}{1 \text{ Millionen Stunden}} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{96 \text{ Millionen Stunden}}$$

# Ausfallrate Badewannenkurve #1

Die Ausfallrate wird vom Hersteller für eine große Menge eines Produktes für den **Normalbetrieb** angegeben !

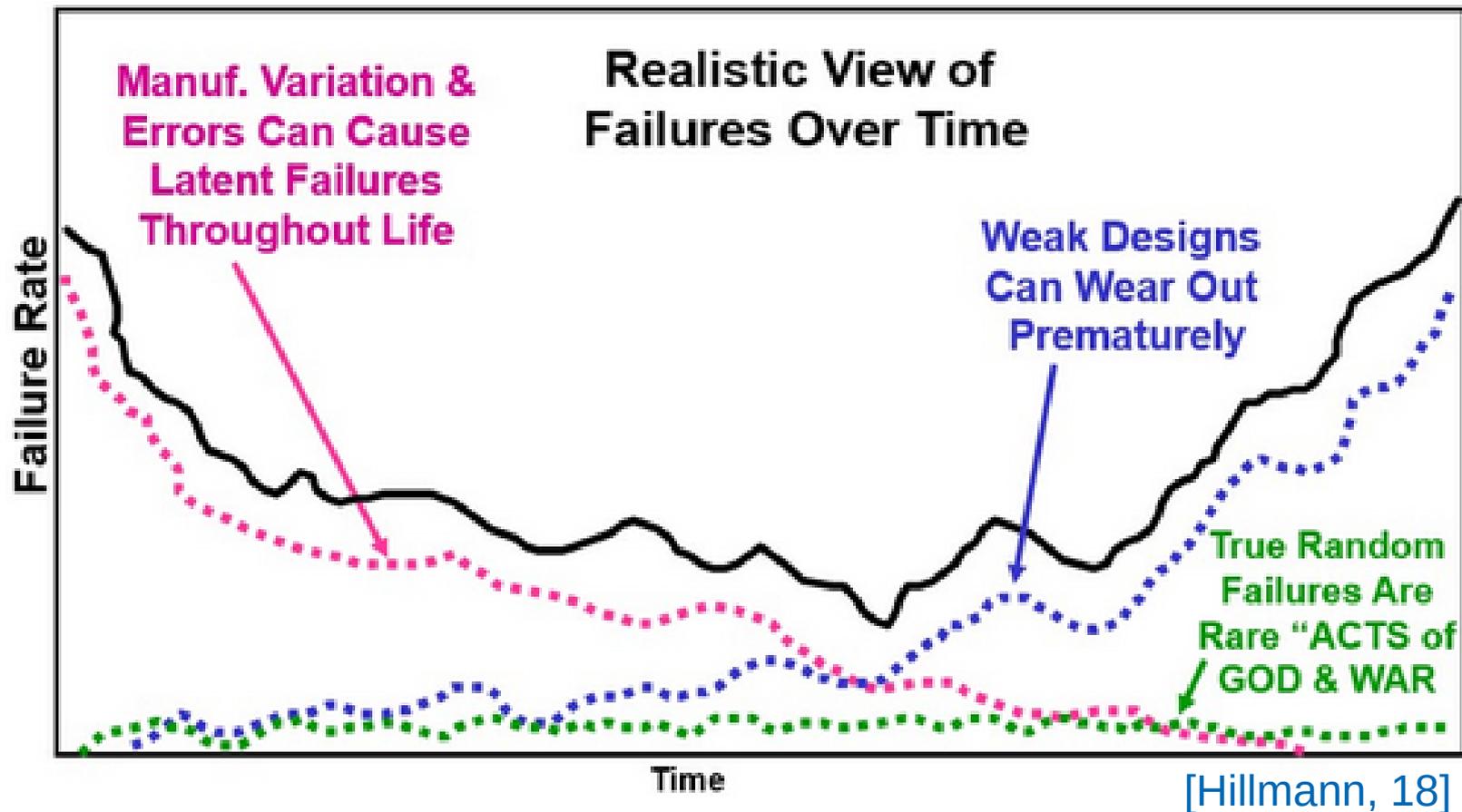
gilt also **nicht** für Frühausfälle und Verschleiß/Alterung



Badewannenkurve (engl. bathtub curve) nach [Du/Gr, 68]

# Ausfallrate Badewannenkurve #2

*Realität gegenüber Theorie !*



# Badewannenkurve #3

## Bereich A: Frühausfälle / Einlaufzeit

systematische Fehler durch

- Fehldimensionierung
- Fertigungs- und Montagefehler
- unzuverlässige Bauteile

Übergang A → B: funktionelle Reife

## Bereich B: praktische Lebensdauer

(Normalbetrieb, Brauchbarkeitsdauer)

zeitlich zufällige Fehler aufgrund:

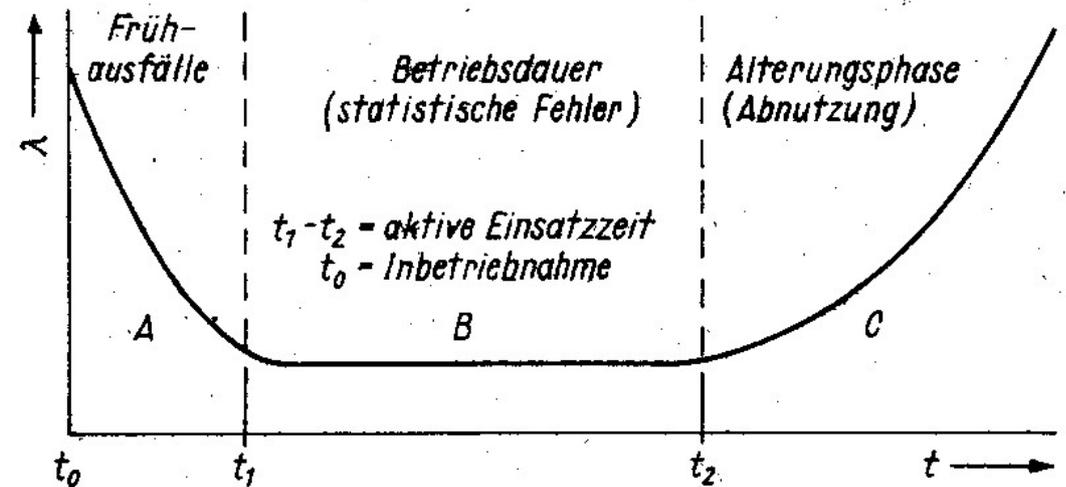
- normaler Basisausfallrate
- Gewichtsfaktoren

Übergang B → C: Lebensende

## Bereich C: Spätausfälle

Alterung / Ermüdung / Abnutzung / Verschleiß

- z.B. galvanische Elemente (Akkus)
- Besonderheit mechanische BE: Alterung beginnt bei  $t_0$



A → Versuchs- und Voralterungsphase

B → Risikobehafteter Einsatzbereich  
( $t \geq$  vorgesehene Dauer der Arbeitsfähigkeit)

C → operationeller Ausfall

[Fi/Sch, 88]

# Frühausfälle

## Bereich A: Frühausfälle / Einlaufzeit

Ursachen:

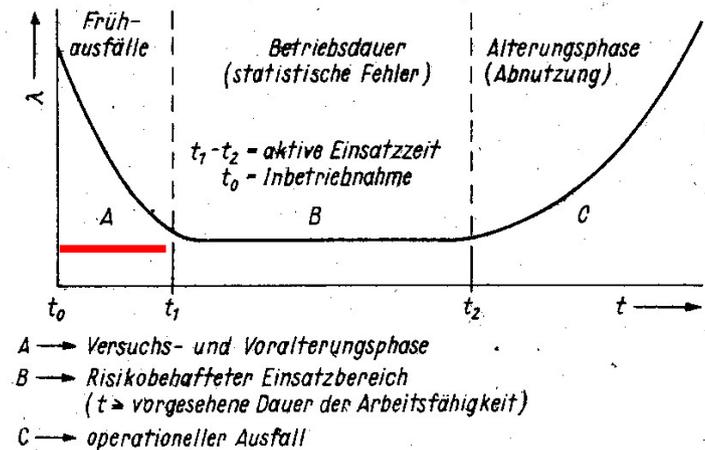
- mangelhaft beherrschte Fertigung
- ungenügende Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle
- noch nicht ausgereifter Stand der Technik

Typen von Frühausfällen bei Geräten und Systemen:

- Ausfälle durch Bauteile, die noch nicht vorgealtert wurden
- Ausfälle durch zu enge Toleranzen in Schaltung (oder im Prüfprogramm)
- Fehler in Montage

Kennzeichen:

- zu schneller Verbrauch einer Vorratssubstanz (Beschichtungen, Schmiermittel, ...)
- zu schnelle Alterung oder Abnutzung infolge Fehles einer Qualitätseigenschaft (z.B. zu geringe Härte eines Metallteiles)
- erhöhte Beanspruchung infolge Mängeln in Montage (z.B. mechanische Verspannung einer Welle in den Lagern; zerkratzte Beschichtungen; Lufteinschlüsse in Wärmeleitpaste)



[Fi/Sch, 88]

siehe [Kr, 87]

# Normalausfälle während Betriebsdauer

## Bereich B: praktische Lebensdauer

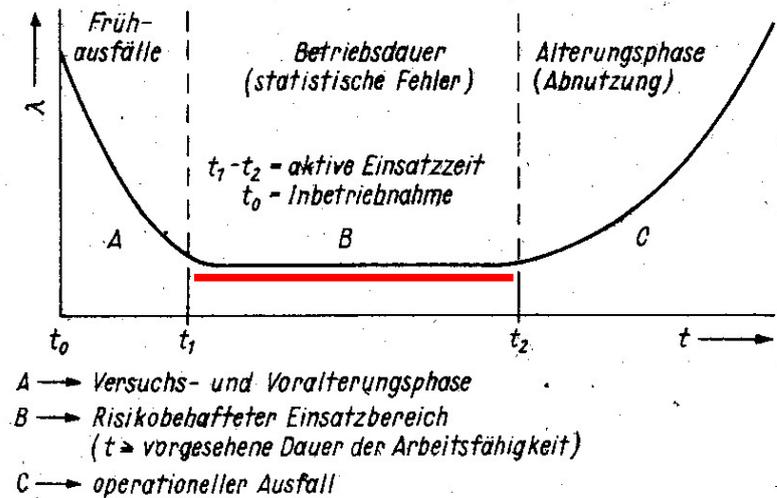
Begriff „zufällige Ausfälle“ irreführend, denn ein Ausfall hat grundsätzlich einen Grund (kausal).  
Einzig der Zeitpunkt ist zufällig !

Ursachen sind Spitzen in der Beanspruchung:

- unerwartet
- nicht sofort erkennbar
- zeitweise oder selten

Beispiele [He, 73]:

- Stöße/Erschütterungen beim Transport
- mechanische Resonanzstellen an Bauteilen, die im Betrieb schlecht beobachtbar sind
- lokale Temperaturspitzen in Leistungstransistoren
- innere mechanische Spannungen, die sich zu äußeren addieren
- elektrische Spannungsspitzen infolge Induktivitäten, Blitzschlag, ESD
- Kabelschäden durch Nagetiere
- mehrere Belastungsfaktoren erreichen gleichzeitig kritische Werte (worst-case)



[Fi/Sch, 88]

# Spätausfälle

## Bereich C: Spätausfälle

Konstanz der Ausfallrate bedeutet nicht unbedingt das Fehlen von Ermüdung/Abnutzung/Alterung !

- Verschleiß, Driftausfälle, Totalausfälle

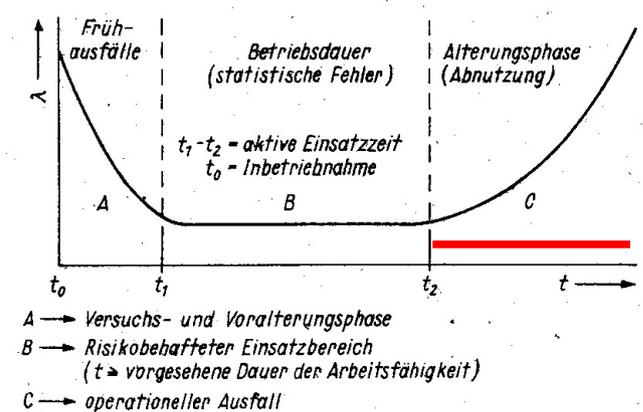
„Badewannenkurve“ ist bei Geräten und Systemen idealisiert.

Bereich C kann konstante Ausfallrate aufweisen, weil:

- Bauteile vieler Hersteller, Typen und Größen verwendet werden
- Beanspruchungen der Teile in Art und Größe verschieden sind
- Bauteile durch Reparaturen gegen neue Teile ersetzt werden

Beispiele:

■ ....



[Fi/Sch, 88]

siehe [Pr, 77] Seite 83ff  
[He, 73] Seite 62

# Ausfallrate Beispiel #1



Der Kehrwert der Ausfallrate ist die mittlere Zeit bis zu einem Ausfall (MTBF):

$$m = MTBF = \frac{1}{\text{Ausfallrate}} = \frac{1}{\lambda}$$

Beispiel 1:

Ein Widerstand hat eine Fehlerrate von 0,0104 Ausfällen pro 1 Mio Stunden.  
Wie groß ist die MTBF ?

$$\lambda = \frac{0,0104}{1 \text{ Millionen Stunden}}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1 \text{ Millionen Stunden}}{0,0104} = 96 \text{ Millionen Stunden}$$

# Ausfallrate Beispiel #2



Beispiel 2:

Ein Gerät hat eine Fehlerrate (oder Ausfallrate)  $\lambda$  von 5 Ausfällen innerhalb 10.000 Stunden.

Gesucht ist die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF) ?

$$\lambda = \frac{5}{10000 \text{ h}}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = 2000 \text{ h}$$

bedeutet **NICHT**:

- Ausfall nach exakt 2000h (Das Gerät kann auch 10.000h funktionieren !)
- minimale garantierte Lebensdauer (Das Gerät kann schon nach 1h ausfallen !)

# Ausfallrate Beispiel #3



Beispiel 3:

Ein Gerät hat eine Fehlerrate (oder Ausfallrate)  $\lambda$  von 0,2% Ausfällen innerhalb 1.000 Stunden.

Gesucht ist die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF) ?

$$\lambda = \frac{0,2 \%}{1000 h} \longrightarrow \text{in Ausfälle pro h umrechnen} \longrightarrow \lambda = \frac{2 \text{ Ausfälle}}{10^6 h}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = 500.000 h$$

bedeutet **NICHT**:

- Ausfall nach exakt 500.000h (Das Gerät kann auch 1.000.000h funktionieren !)
- minimale garantierte Lebensdauer (Das Gerät kann schon nach 1h ausfallen !)

# Zuverlässigkeit #1

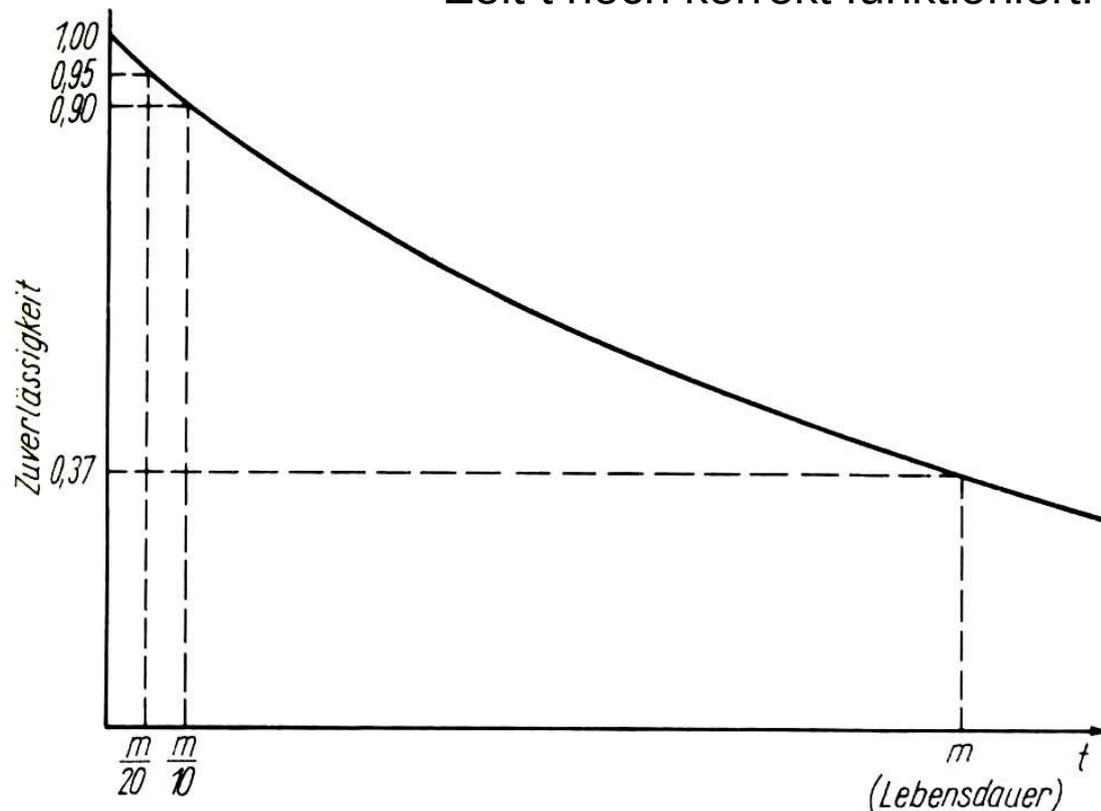


zentrale Größe: **Zuverlässigkeit** (engl. reliability)

Formelzeichen: R

Einheit: einheitslos im Bereich 0..1 oder 0..100%

Bedeutung: Wahrscheinlichkeit, mit der ein Bauteil/Gerät/System nach Zeit t noch korrekt funktioniert.



- gilt für Phase des Normalbetriebes (Bereich B) d.h. Annahme **konstanter** Ausfallrate

- Basiert auf natürlichen Wachstums/Zerfallprozessen, der sogenannten Exponentialverteilung (engl. exponential distribution)

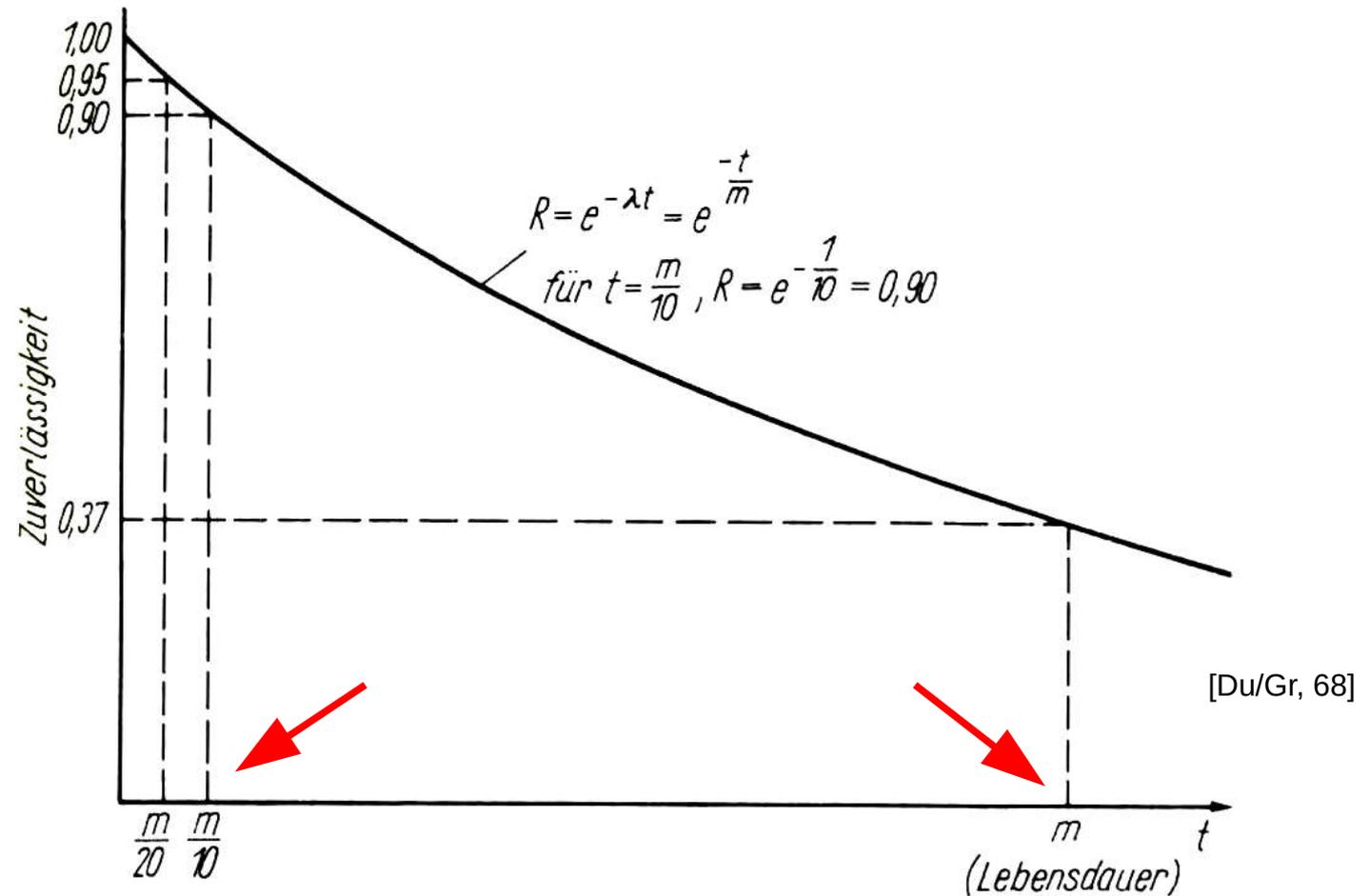
# Zuverlässigkeit #2



Die Zuverlässigkeit R bringt MTBF und Ausfallrate  $\lambda$  zusammen in:

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

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



Für eine große Menge von Bauteilen/Geräten/Systemen bedeutet das: Zum Zeitpunkt  $m$  (MTBF) sind 37% noch in Ordnung. 63% sind mindestens einmal ausgefallen.

# (Un)zuverlässigkeit #3



Die Zuverlässigkeit R gegen Unzuverlässigkeit Q

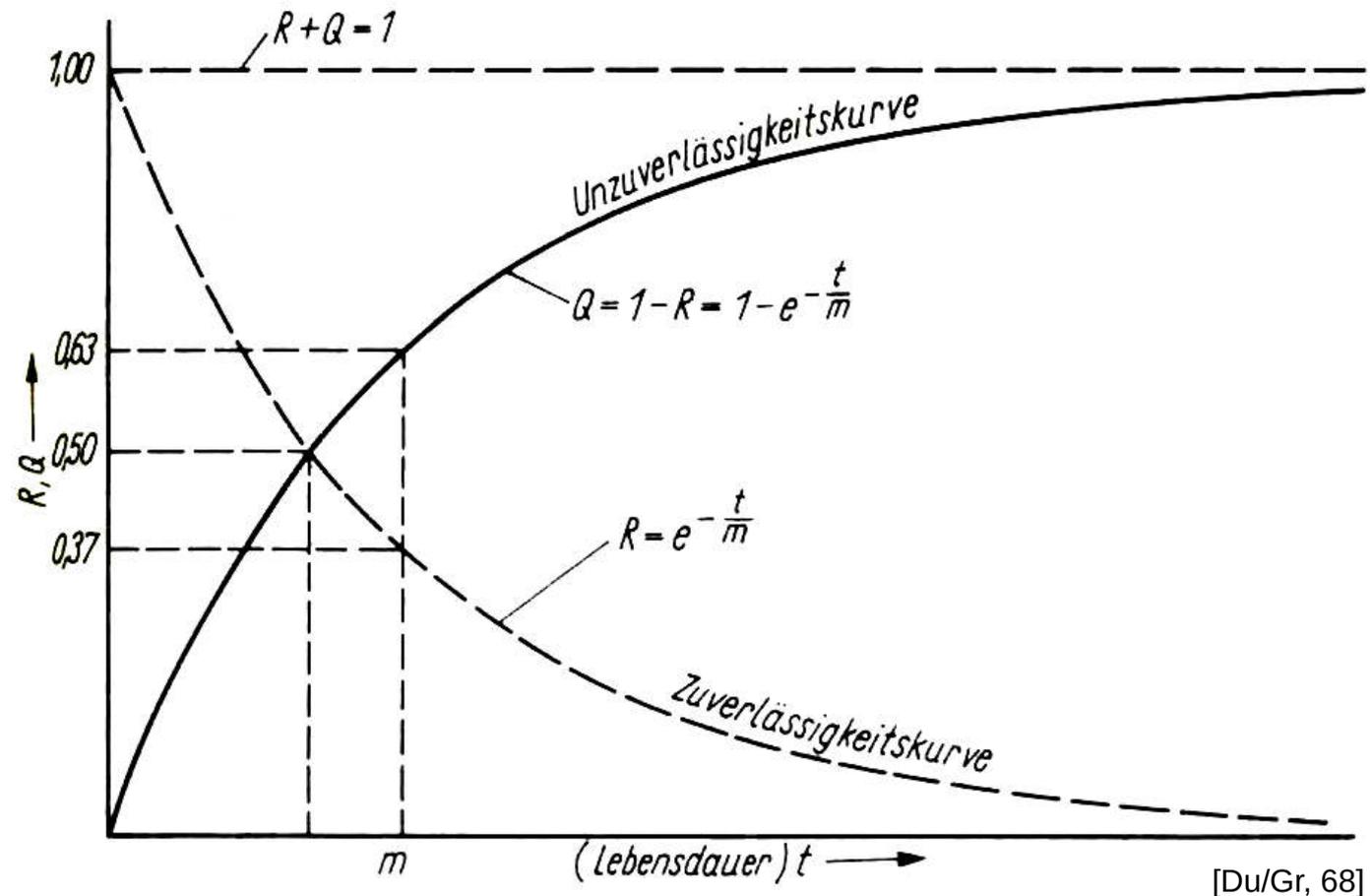
$$R(t) + Q(t) = 1$$

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

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

Wird für Blockdiagramme der Systemzuverlässigkeit und Fehlerbaum-Analyse (FTA) verwendet.



Beispiel: Wenn zum Zeitpunkt  $t$  die Zuverlässigkeit eines Gerätes 90% beträgt, ist die Unzuverlässigkeit zu selben Zeit 10%.

# Zuverlässigkeit Beispiel #1



Beispiel 1:

Ein elektronisches System in einem Flugzeug hat eine MTBF von 25 Stunden. Die Zeit bis zum Ziel beträgt 6 Stunden.

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Mission ?

gegeben:  $t = 6\text{h}$   
 $m = 25\text{h}$

Lösung:

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

$$R(t) = e^{-\frac{6\text{ h}}{25\text{ h}}}$$

$$R(t) = 0,7866 \text{ (oder } 78,6 \text{ \%)}$$

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 78,6 % wird der Auftrag erfolgreich ausgeführt.

# Zuverlässigkeit Beispiel #2



Beispiel 2:

Für ein Gerät ist eine Ausfallrate von 35% je 1000 Stunden angegeben.  
Wie groß ist die Zuverlässigkeit nach einem Monat (etwa 720h) ?

gegeben:  $t = 720\text{h}$        $\lambda = 35\%/1000\text{h} = 0,00035/\text{h}$

gesucht:  $R(720\text{h})$

Lösung:

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

$$R(t) = e^{-720 \text{ h} \cdot 0,00035 / \text{h}}$$

$$R(t) = 0,777 \text{ (oder } 77,7 \text{ \%)}$$

Die Wahrscheinlichkeit der korrekten Funktion nach einem Monat beträgt 78%.

# Zuverlässigkeit Beispiel #3



Beispiel 3:

Für ein Radargerät besteht eine Ausfallrate von 5 Ausfällen je 1000 Stunden. Die MTBF beträgt also 200h.

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens innerhalb der MTBF ?

gegeben:  $t = 200\text{h}$

Lösung:

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

$$R(t) = e^{-\frac{200\text{ h}}{200\text{ h}}}$$

$$R(t) = 0,368 \text{ (oder } 36,8 \text{ \%)}$$

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 37 % wird das Radargerät innerhalb der MTBF fehlerfrei arbeiten.

# Ausfallrate eines Systems #1



Die Ausfallrate eines Gerätes oder Systems ist die Summe der Ausfallraten aller seiner Bauteile:

$$\lambda_{\text{system}} = \lambda_1 + \lambda_2 , \dots , + \lambda_n$$

Voraussetzung: betroffene Bauteile wirken in **Reihe** (Serienstruktur) → ein Bauteil fällt aus → Gerät/System fällt aus

Beispiel 1:

Ein Nachrichtensystem besteht aus Sender, Empfänger und De/Kodierer. Die System-Ausfallrate beträgt somit:

$$\lambda_{\text{system}} = \lambda_{\text{sender}} + \lambda_{\text{empfänger}} + \lambda_{\text{deko}}$$

$$\lambda_{\text{system}} = \frac{0,03}{1000 \text{ h}} + \frac{0,001}{1000 \text{ h}} + \frac{0,015}{1000 \text{ h}}$$

$$\lambda_{\text{system}} = \frac{0,046}{1000 \text{ h}}$$

# ***Ausfallrate eines Systems #2***



Es wird Serienstruktur angenommen. Das heißt:

Ausfälle sind voneinander nicht abhängig:

- bedingen sich nicht (Beispiel RC-Glied)
- schließen einander nicht aus (Beispiel gestaffelte Sicherungen)
- hängen nicht von einer gemeinsamen Ursache ab (z.B. Umgebungstemperatur)

[He, 73] S.52

# Ausfallrate eines Systems #3



Beispiel 2:

Auf einer Leiterplatte sind Bauteile laut Tabelle bestückt (PCBA). Wie groß ist die Gesamt-Ausfallrate der Baugruppe ?

Bauelement	Anzahl n	Ausfallrate $\lambda$ (F/1 Mio h)	n x $\lambda$
Transistor	5	0,98	4,9
Widerstand	20	0,023	0,46
Schalter	3	0,11	0,33
Diode	2	0,68	1,36

[An, 76]

$$\lambda_{system} = \lambda_{Tra} \times N_{Tra} + \lambda_{Wid} \times N_{Wid} + \lambda_{Sch} \times N_{Sch} + \lambda_{Diode} \times N_{Diode}$$

$$\lambda_{system} = 4,9 + 0,46 + 0,33 + 1,36 = 7,05 / 1 \text{ Mio } h$$

# MTBF eines Systems #1



Die MTBF eines Gerätes oder Systems ist der Kehrwert seiner Gesamt-Ausfallrate:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_{system}} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2, \dots, + \lambda_n}$$

Beispiel:

Ein Nachrichtensystem besteht aus Sender, Empfänger und De/Kodierer mit jeweils bekannten Ausfallraten. Die MTBF des gesamten Systems beträgt:

$$\lambda_{system} = \lambda_{sender} + \lambda_{empfänger} + \lambda_{deko}$$

$$\lambda_{system} = \frac{0,03}{1000 \text{ h}} + \frac{0,001}{1000 \text{ h}} + \frac{0,015}{1000 \text{ h}}$$

$$\lambda_{system} = \frac{0,046}{1000 \text{ h}}$$

$$m_{system} = MTBF_{system} = \frac{1}{\frac{0,046}{1000 \text{ h}}} \approx 21.700 \text{ h} \approx 2,5 \text{ Jahre}$$

# MTBF eines Systems #2



Abschätzung mittlere maximale Ausfallrate der Bauteile eines Gerätes oder Systems bei gegebener Gesamt-MTBF:

Ausfallrate: 
$$\lambda_{\text{mittel}} = \frac{1}{MTBF_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{1}{\text{Anzahl Bauelemente}}$$

Beispiel:

Für ein Gerät ist eine MTBF von 10.000h (etwa 1 Jahr) gefordert. Es wird etwa 1500 Bauteile enthalten. Wie groß darf die mittlere Ausfallrate der Bauteile sein ?

$$\lambda_{\text{mittel}} = \frac{1}{10000 \text{ h}} \cdot \frac{1}{1500} = 6,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ausfälle}}{\text{h}}$$

$$\lambda_{\text{mittel}} = 6,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ausfälle}}{1 \text{ Mio h}}$$

# MTBF eines Systems #3



Beispiel:

Auf einer Leiterplatte sind Bauteile laut Tabelle bestückt (PCBA). Wie groß ist die MTBF der Baugruppe ?

Bauelement	Anzahl n	Ausfallrate $\lambda$ (F/1 Mio h)	n x $\lambda$
Transistor	5	0,98	4,9
Widerstand	20	0,023	0,46
Schalter	3	0,11	0,33
Diode	2	0,68	1,36

[An, 76]

$$\lambda_{\text{system}} = \lambda_{\text{Tra}} \times N_{\text{Tra}} + \lambda_{\text{Wid}} \times N_{\text{Wid}} + \lambda_{\text{Sch}} \times N_{\text{Sch}} + \lambda_{\text{Diode}} \times N_{\text{Diode}}$$

$$\lambda_{\text{system}} = 4,9 + 0,46 + 0,33 + 1,36 = 7,05 / 1 \text{ Mio h}$$

$$MTBF_{\text{system}} = \frac{1}{7,05 \times 10^{-6}} = 141.844 \text{ h}$$

Ausfälle pro h

Zuverlässigkeit des Systems  
berechnen nach

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

# Weitere Kenngrößen der Zuverlässigkeit #1

MTBF (oder  $m$ ) und  $R$  sind nicht allein ökonomisch entscheidend !



Es gibt noch:

- mittlere Zeit für eine Reparatur: MTTR (engl. Mean Time To Repair) und damit verbundene Kosten

$$MTTR = \frac{t_{r1} + t_{r2} + t_{rn}}{N}$$

- mittlere Lebensdauer vom Ende einer Reparatur bis zum nächsten Ausfall: MTTF (engl. Mean Time To Failure)

- für reparierbare Systeme:  $MTBF = MTTF + MTTR$

- für **nicht** reparierbare Systeme (z.B. vergossene Baugruppen):  $MTBF = MTTF$

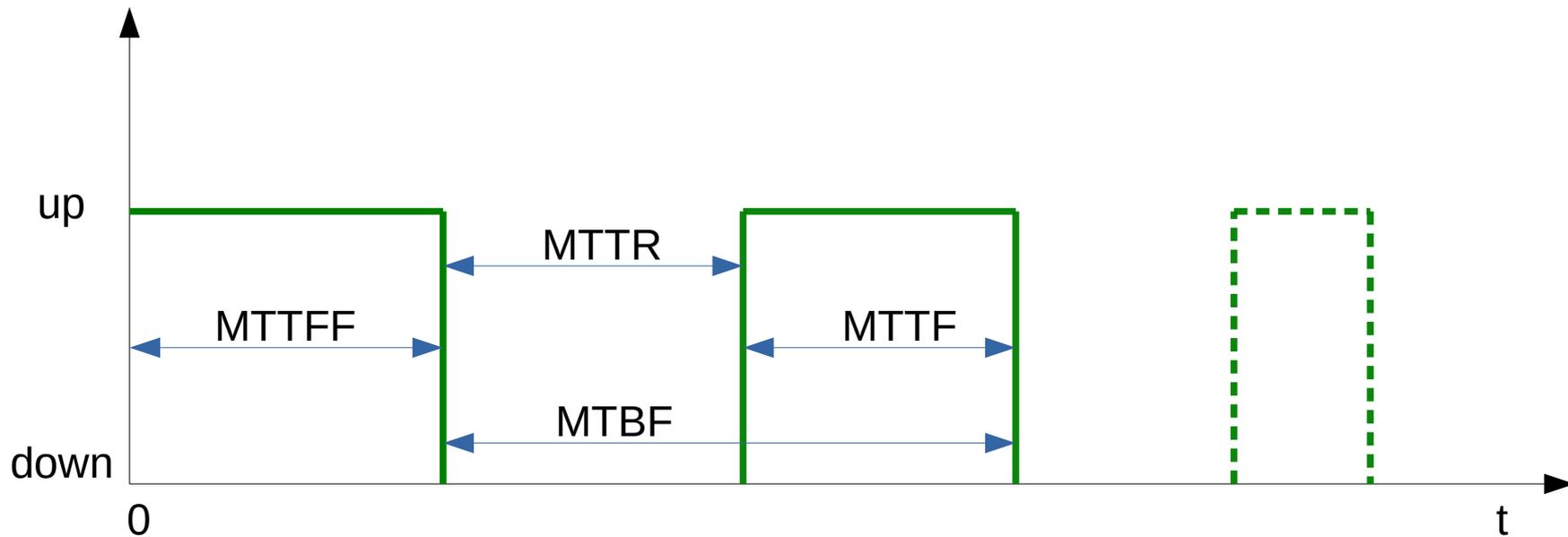
# Weitere Kenngrößen der Zuverlässigkeit #2



reparierbares System

MTTFF: Mean Time To First Failure

$$MTBF = MTTR + MTTF$$



# Weitere Kenngrößen der Zuverlässigkeit #3

MTBF (oder  $m$ ) und R sind nicht allein ökonomisch entscheidend !



- Verfügbarkeit  $V$  oder  $P_a$  (engl. availability) ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein System zu einem beliebigen Zeitpunkt seine Funktion ausführen kann:

$$P_a = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \cdot 100 \%$$

$$P_a = \frac{uptime}{uptime + downtime} \cdot 100 \%$$

# Part Count Analysis (PCA) #1



Anwendung: Vorab-Schätzung einer Entwicklung

Merkmale:

- ▶ basiert auf Anzahl der Bauelemente
- ▶ Streßfaktoren der Bauelemente **nicht** berücksichtigt („normale“ Bedingungen)
- ▶ nur Basis-Fehlerrate  $\lambda$  verwendet  
(evtl. Umgebung bekannt, siehe Beispiel in MIL-HDBK-217F Anhang A)

$$MTBF_{system} = \frac{1}{\sum_{1}^n \lambda_{base}}$$

←  $\lambda$  in Ausfälle pro h

Zuverlässigkeit des Systems berechnen nach

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

# Part Count Analysis (PCA) #2



Beispiel:

Auf einer Leiterplatte sind Bauteile laut Tabelle bestückt (PCBA). Wie groß wird die MTBF der Baugruppe sein ?

Bauelement	Anzahl n	Basis-Ausfallrate $\lambda$ (F/1 Mio h)	n x $\lambda$ (F/1 Mio h)
Transistor	5	0,98	4,9
Widerstand	20	0,023	0,46
Schalter	3	0,11	0,33
Diode	2	0,68	1,36
System-Ausfallrate			7,05
MTBF [h]			141.844

$$MTBF_{system} = \frac{1}{\sum_{1}^{n} \lambda_{base}}$$

 in Ausfälle pro h umrechnen !

Zuverlässigkeit des Systems berechnen nach

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

# ***Part Stress Analysis (PSA) #1***



Anwendung: Berechnung der Zuverlässigkeit eines Gerätes/Systems

Merkmale:

- ▶ genauere Berechnung als PCA
- ▶ aufwändiger als PCA
- ▶ verschiedene Standards (MIL-HDBK-217F, 217+, ANSI/VITA 51.1, Siemens SN29500, CNET, Telcordia/Bellcore, HRD, PRISM, IEC 62380, IEC 61709, ...) mit verschiedenen Ergebnissen
- ▶ basiert auf Stress per Bauelement
- ▶ Temperatur-Zyklen
- ▶ Dauer von Ein/Aus-Zuständen
- ▶ ...

# Part Stress Analysis (PSA) #2



Die Basis- oder Grundfehlerrate (engl. generic base failure rate) wird durch Gewichtungsfaktoren (auch  $\pi$ -Faktoren genannt) modifiziert:

- ➔ Qualität
- ➔ Streß (Spannung, Wirkleistung)
- ➔ Temperatur
- ➔ Umgebung (engl. environment)
- ➔ Anwendung (engl. application)
- ➔ ...

$$\lambda_{eff} = F \left( \lambda_{base} , \pi_{qual} , \pi_{stress} , \pi_{temp} , \pi_{env} , \dots \right)$$

vom angewendeten Standard abhängig

$$MTBF_{system} = \frac{1}{\sum_1^n \lambda_{eff}}$$

Zuverlässigkeit des Systems berechnen nach

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

siehe [MIL, 91] / [AN, 76]

# Part Stress Analysis (PSA) #3



**SPECIFICATION**  
MIL-R-11804

**STYLE**  
RD

**DESCRIPTION**  
Fixed, Film, Power Type

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_R \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

Base Failure Rate -  $\lambda_b$

$T_A$ (°C)	Stress				
	.1	.3	.5	.7	.9
0	.0089	.0098	.011	.013	.015
10	.0090	.010	.011	.013	.015
20	.0092	.010	.012	.014	.016
30	.0094	.010	.012	.014	.017
40	.0096	.011	.012	.015	.017
50	.0098	.011	.013	.015	
60	.010	.011	.013	.016	
70	.010	.012	.014	.016	
80	.010	.012	.014	.017	
90	.011	.012	.015		
100	.011	.013	.015		
110	.011	.013	.016		
120	.012	.014	.016		
130	.012	.014	.017		
140	.012	.014			
150	.013	.015			
160	.013	.016			
170	.014	.016			
180	.014				
190	.015				
200	.015				
210	.016				

Quality Factor -  $\pi_Q$

Quality	$\pi_Q$
MIL-SPEC	1.0
Lower	3.0

Environment Factor -  $\pi_E$

Environment	$\pi_E$
$G_B$	1.0
$G_F$	2.0
$G_M$	10
$N_S$	5.0
$N_U$	17
$A_{IC}$	6.0
$A_{IF}$	8.0
$A_{UC}$	14
$A_{UF}$	18
$A_{RW}$	25
$S_F$	.50
$M_F$	14
$M_L$	36
$C_L$	660

Resistance Factor -  $\pi_R$

Resistance Range (ohms)	$\pi_R$
10 to 100	1.0
> 100 to 100K	1.2
> 100K to 1M	1.3
> 1M	3.5

$$\lambda_b = 7.33 \times 10^{-3} \exp\left(.202 \left(\frac{T+273}{298}\right)^{2.6}\right) \times \exp\left(\left(\frac{S}{1.45}\right) \left(\frac{T+273}{273}\right)^{.89}\right)^{1.3}$$

T = Ambient Temperature (°C)

S = Ratio of Operating Power to Rated Power

# Part Stress Analysis (PSA) #4



Beispiele:

- ➔ Qualität - Grad der Prozesskontrolle des Herstellers
  - Beispiele [An, 76] Seite 36
  
- ➔ Streß
  - 1/10, 1/2, 1/1 der Nennspannung, Nennleistung, ...siehe [Fi/Sch, 88] Seite 315
  
- ➔ Temperatur
  - 0..+10°C , +10..+20°C, +20..30°C ... siehe [Fi/Sch, 88] Seite 315
  
- ➔ Umgebung / Anwendung
  - Labor, Büro, tragbares Feldgerät, Fahrzeug, Flugzeug, Weltraum
  - Feuchtigkeit, Vibration, Lärm, Staub, (Luft)Druck, Stoß, ...
  - Beispiele [An, 76] Seite 35, [Fi/Sch, 88] Seite 315
  
- ➔ ...

Kategorien verschieden nach Standard (MIL, Medical, Automotive, Railway, ... )

# Part Stress Analysis (PSA) #5



Beispiel aus [An, 76]

STRESS ANALYSIS - RELIABILITY PREDICTION WORKSHEET																										
ENGINEERING DATA										RELIABILITY ANALYSIS																
1 LINE	2 REF. DES.	3 PART DESCRIPTION	4 LOAD, VOLTAGE, DISSIPATION			6 Stress Ratio Or Tj	7 Appl Or Hot Spot Value Or Cap Freq. Or Wave F.M.	8 Const. Or Wire Or Cmply (Note 1)	9 Cycles Or Service Grade	10 Contact Qty Or Form Or Z CKT	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
			ACTUAL								RATED			$\lambda_b \times 10^{-6}$	$\Pi_V$	$\Pi_{RW}$	$\Pi_E$	$\Sigma E$	$\Pi_{ER}$	$\Pi_{OR}$	$\Pi_{CS}$	$\Pi_C$	$\Pi_N$	$N \Sigma$	$\Pi$	$\lambda_{PART}$
			I	V	W						I	V	W	Hrs.	$\Pi_L$	$\Pi_{SR}$	$\Pi_{EG}$			$\Pi_A$	$\Pi_P$	$\Pi_T$	$\Pi_P$	$\Pi_{TAP}$	CYC	CYC
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										

ENG	NAME	DATE	PROJECT	ASSEMBLY	ENVIRONMENT	NOTES: LIST CONNECTOR BODY MATERIAL HERE	SUM $\lambda_{eff}$
REL	NAME	DATE	UNIT	ASSEMBLY PART NO.	ASSEMBLY FPMH		

# Umgebung #1



**Table 3-2: Environmental Symbol and Description**

Environment	$\pi_E$ Symbol	Equivalent MIL-HDBK-217E, Notice 1 $\pi_E$ Symbol	Description
Ground, Benign	$G_B$	$G_B$ $G_{MS}$	Nonmobile, temperature and humidity controlled environments readily accessible to maintenance; includes laboratory instruments and test equipment, medical electronic equipment, business and scientific computer complexes, and missiles and support equipment in ground silos.
Ground, Fixed	$G_F$	$G_F$	Moderately controlled environments such as installation in permanent racks with adequate cooling air and possible installation in unheated buildings; includes permanent installation of air traffic control radar and communications facilities.
Ground, Mobile	$G_M$	$G_M$ $M_P$	Equipment installed on wheeled or tracked vehicles and equipment manually transported; includes tactical missile ground support equipment, mobile communication equipment, tactical fire direction systems, handheld communications equipment, laser designations and range finders.
Naval, Sheltered	$N_S$	$N_S$ $N_{SB}$	Includes sheltered or below deck conditions on surface ships and equipment installed in submarines.
Naval, Unsheltered	$N_U$	$N_U$ $N_{UU}$ $N_H$	Unprotected surface shipborne equipment exposed to weather conditions and equipment immersed in salt water. Includes sonar equipment and equipment installed on hydrofoil vessels.

# Umgebung #2



Table 3-2: Environmental Symbol and Description (cont'd)

Environment	$\pi_E$ Symbol	Equivalent MIL-HDBK-217E, Notice 1 $\pi_E$ Symbol	Description
Airborne, Inhabited, Cargo	A <sub>IC</sub>	A <sub>IC</sub> A <sub>IT</sub> A <sub>IB</sub>	Typical conditions in cargo compartments which can be occupied by an aircrew. Environment extremes of pressure, temperature, shock and vibration are minimal. Examples include long mission aircraft such as the C130, C5, B52, and C141. This category also applies to inhabited areas in lower performance smaller aircraft such as the T38.
Airborne, Inhabited, Fighter	A <sub>IF</sub>	A <sub>IF</sub> A <sub>IA</sub>	Same as A <sub>IC</sub> but installed on high performance aircraft such as fighters and interceptors. Examples include the F15, F16, F111, F/A 18 and A10 aircraft.
Airborne, Uninhabited, Cargo	A <sub>UC</sub>	A <sub>UC</sub> A <sub>UT</sub> A <sub>UB</sub>	Environmentally uncontrolled areas which cannot be inhabited by an aircrew during flight. Environmental extremes of pressure, temperature and shock may be severe. Examples include uninhabited areas of long mission aircraft such as the C130, C5, B52 and C141. This category also applies to uninhabited area of lower performance smaller aircraft such as the T38.
Airborne, Uninhabited, Fighter	A <sub>UF</sub>	A <sub>UF</sub> A <sub>UA</sub>	Same as A <sub>UC</sub> but installed on high performance aircraft such as fighters and interceptors. Examples include the F15, F16, F111 and A10 aircraft.
Airborne, Rotary Winged	A <sub>FW</sub>	A <sub>FW</sub>	Equipment installed on helicopters. Applies to both internally and externally mounted equipment such as laser designators, fire control systems, and communications equipment.
Space, Flight	S <sub>F</sub>	S <sub>F</sub>	Earth orbital. Approaches benign ground conditions. Vehicle neither under powered flight nor in atmospheric reentry; includes satellites and shuttles.

# Umgebung #3



**Table 3-2: Environmental Symbol and Description (cont'd)**

Environment	$\pi_E$ Symbol	Equivalent MIL-HDBK-217E, Notice 1 $\pi_E$ Symbol	Description
Missile, Flight	$M_F$	$M_{FF}$ $M_{FA}$	Conditions related to powered flight of air breathing missiles, cruise missiles, and missiles in unpowered free flight.
Missile, Launch	$M_L$	$M_L$ $U_{SL}$	Severe conditions related to missile launch (air, ground and sea), space vehicle boost into orbit, and vehicle re-entry and landing by parachute. Also applies to solid rocket motor propulsion powered flight, and torpedo and missile launch from submarines.
Cannon, Launch	$C_L$	$C_L$	Extremely severe conditions related to cannon launching of 155 mm. and 5 inch guided projectiles. Conditions apply to the projectile from launch to target impact.

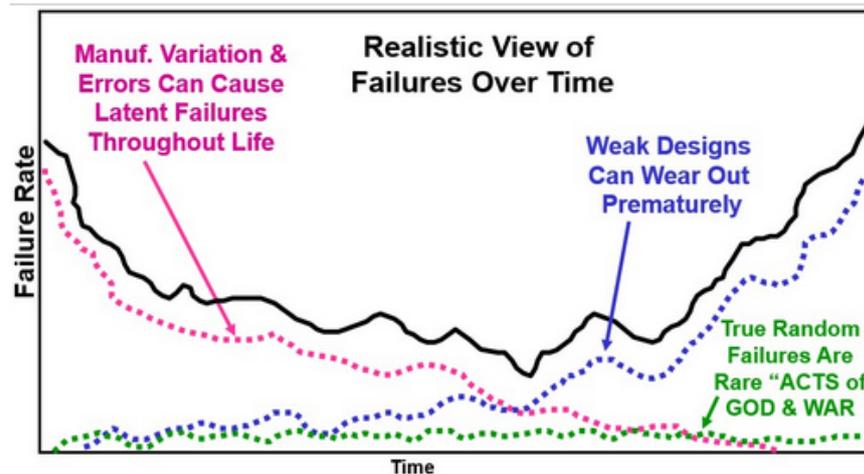
[MIL,95]

# Einschränkungen MIL-HDBK-217 und dessen Ableitungen #1



1. Aktualität. Letzte Revision 1995, weiterführend mit aktualisierten  $\pi$ -Faktoren ANSI/VITA 51.1 (siehe [VITA,18])

2. Annahme konstanter Fehlerrate (siehe [Hillmann, 18])



[Hillmann,18]

3. Annahme Serienstruktur d.h.

- ein Bauteil fällt aus, gesamtes Gerät gilt als ausgefallen
- Ausfälle der Bauteile unabhängig voneinander [He, 73] S.57

# ***Einschränkungen MIL-HDBK-217 und dessen Ableitungen #2***



4. Annahme korrekten Designs
5. Sind Umgebungen aus MIL-HDBK-217F auf nicht militärische Produkte übertragbar ?
6. Lagerung und nicht-operativer Zustand [Pecht, 95]
7. Alterung beginnt aufgrund kleiner Strukturen in gegenwärtigen integrierten Schaltungen sehr früh. Gibt es den „Normalbetrieb“ mit konstanter Ausfallrate überhaupt noch ?

**PCA und PSA setzen korrektes Design voraus !**

[Jais/Werner/Das]  
[Jones/Hayes]

<https://www.vita.com/page-1855234>

# Vergleich Standards #1

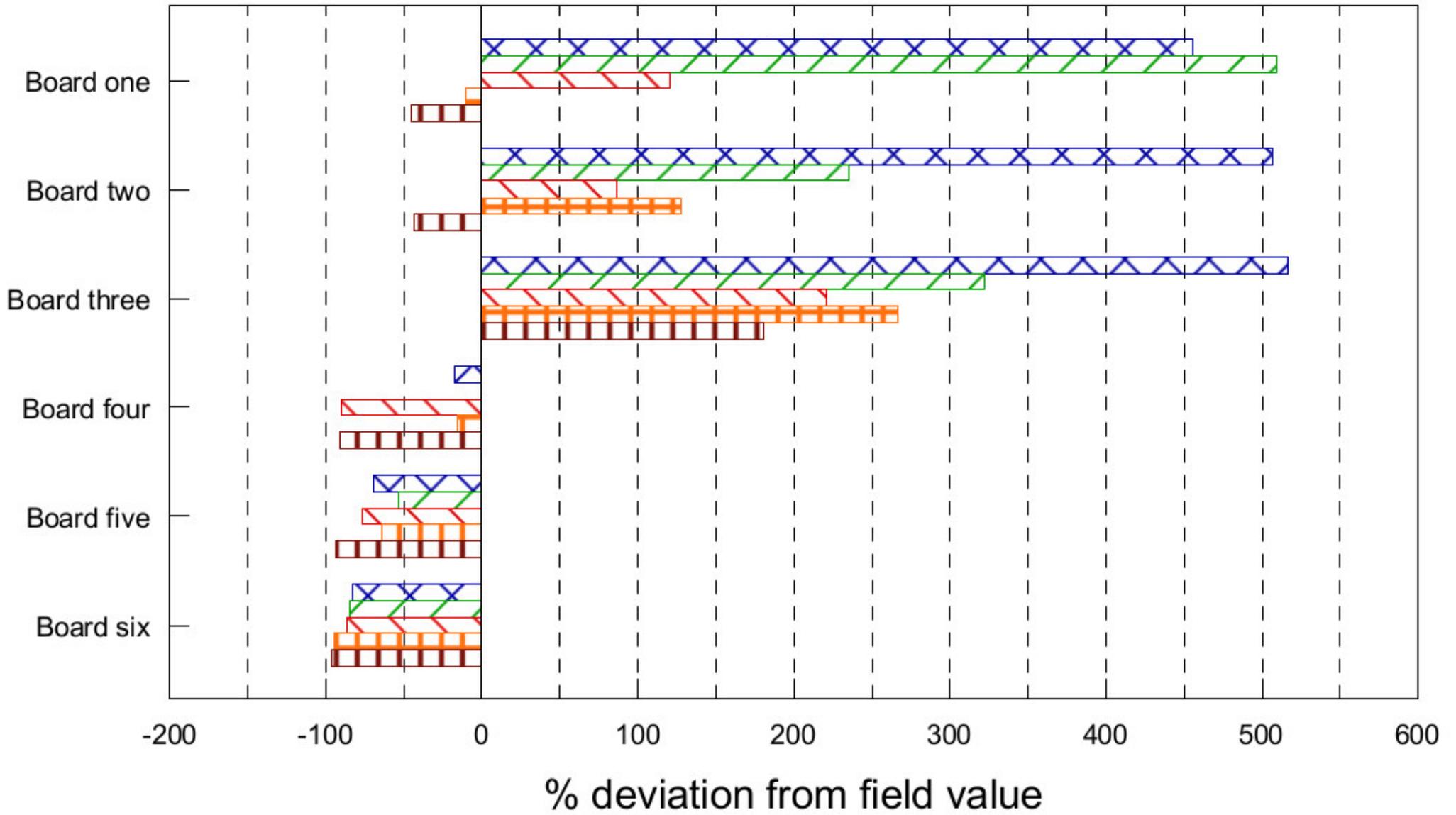


Verschiedene Standards/Modelle → verschiedene Schwerpunkte !

Prediction Model	Greatest sensitivity
Bellcore	Electrical Stress
CNET(Simplified)	Quality
HRD4	Quality
MIL-217E	Environment, Quality
Siemens	Temperature

[Jones/Hayes]

# Vergleich Standards #2



 BellCore     CNET     HRD4     MIL-217E     Siemens    [\[Jones/Hayes\]](#)

# Unterlastung / Derating #1



*Unterlastung* bedeutet, ein Bauteil (weit) unterhalb der vom Hersteller angegebenen Nenn- oder Maximalbelastung zu betreiben. Auf diese Weise altert das Bauteil langsamer - die Lebensdauer und somit die Zuverlässigkeit steigt.

Lebensdauer wird erhöht durch:

- niedrigere Betriebstemperatur  
- z.B. Halbleiter, Kondensatoren
- Überdimensionierung → niedrigere Betriebs- oder Schaltspannung → dielektrische Belastung  
- z.B. Kondensatoren, Leistungstreiber
- Überdimensionierung → niedrige Verlustleistung → Temperatur

## Arrhenius

10K Erhöhung der Temperatur → chemische Reaktionen doppelt so schnell

## „Gesetz der fünften Potenz“

$1,2 U_{\text{nenn}}$  → Lebensdauer sinkt um  $1/3$

- statische und dynamische Belastungen unterscheiden
- minimale Last beachten

# Unterlastung / Derating #2



**Unterlastung** bedeutet, ein Bauteil (weit) unterhalb der vom Hersteller angegebenen Nenn- oder Maximalbelastung zu betreiben. Auf diese Weise altert das Bauteil langsamer - die Lebensdauer und somit die Zuverlässigkeit steigt.

Lebensdauer wird erhöht durch:

- niedrigere Betriebströme (Elektromigration bei Leistungselektronik)
- Reduzierung Strahlungsbelastung (Teilchen, Gamma, Röntgen, ...)

$$\text{Derating Factor} = \frac{P_{\text{Betrieb}}}{P_{\text{nom}}}$$

$$\text{Derating Factor} = \frac{U_{\text{Betrieb}}}{U_{\text{nom}}}$$

$$\text{Derating Factor} = \frac{I_{\text{Betrieb}}}{I_{\text{nom}}}$$

Siehe [Wo, 12] Kap. 7 , [An, 76] Abschn. 4.1.3

# Unterlastung / Derating #3



Component Type	Parameter Derated	Derating Factor (%)
Resistor	Power	80%
Resistor Variable	Power	75%
Transistor	Power	75%
Diode	Voltage	50%
Diode Signal	Voltage	85%
IC Linear	Current	85%
IC Digital	Fan-out	80%
Thermistor	Power	50%
Capacitor	Voltage	75%
Transformer	Power	80%
Relays	Contact Current	50%
Switches	Contact Current	50%

[Wo, 12]

# Fehlermechanismen / Fehlerarten



**Fehlermechanismus** (engl. *failure mechanism*):

Der Vorgang oder ein Zustand, der zu einem Fehler führt.

**Fehlerart** (engl. *failure mode*):

Das Resultat eines Fehlermechanismus.

Beispiele:

- Feuchtigkeit oder Salznebel verändern den ohmschen Widerstand eines Bauteiles  
→ Resultat: DRIFT oder SHORT
- mechanische Beschädigung (Kratzer) führt zu einer Unterbrechung → Resultat: OPEN

- Siehe [An, 76] Seite 95, 101 ff, [NRC, 81] Seite 47
- Zu Langzeitausfällen siehe [Brennecke, 1]

# ***Fehlerbaum-Analyse #1***



engl. Fault Tree Analysis (FTA)

Ursprung: Start-Kontroll-System Interkontinental-Raketen  
Regulatorien zur Sicherheit von Atomkraftwerken

Anwendung: Erkennung der Kombinationen von Ausfällen, die zu einem unerwünschten Ereigniss führen

- Konzept des „unerwünschten Ereignisses“ wie „Riss im Druckbehälter“, „Motor springt nicht an“, ...
- es wird mit Unzuverlässigkeiten, Unverfügbarkeit umgegangen (z.B. „Relais klemmt“, „falsche Einstellung“, „Motor läuft zu lange“ , ...)
- Vom „unerwünschten Ereignis“ ausgehend werden Fehlerursachen gesucht.
- Top-Down- oder Rückwärts-Analyse
- Basis-Schriftwerk „The Fault Tree Handbook“ und DIN 25424

siehe [NRC, 81] Beispiel Seite 99ff , [Bö, 15] Seite 107ff

# Fehlerbaum-Analyse #2



Unzuverlässigkeit = 1 - Zuverlässigkeit

$$Q = 1 - R$$

Ausfallwahrscheinlichkeit = 1 - Zuverlässigkeit

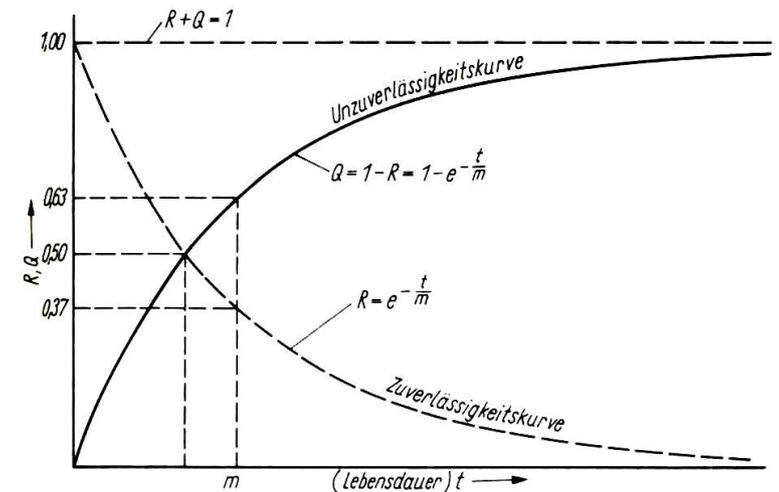
$$F = 1 - R$$

Unverfügbarkeit = 1 - Verfügbarkeit

$$U = 1 - V$$

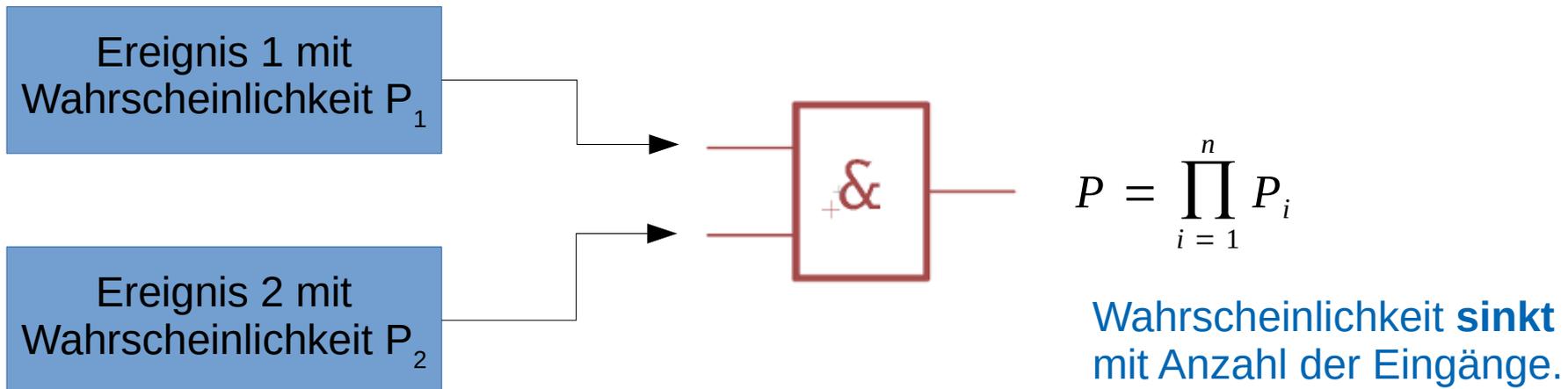
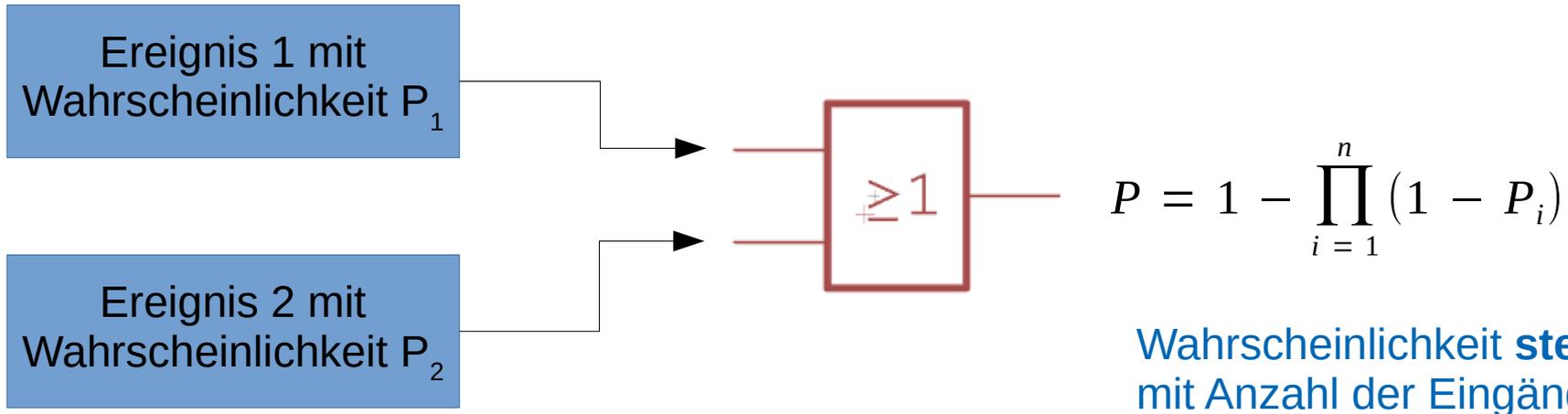
Unwahrscheinlichkeit = 1 - Wahrscheinlichkeit

$$U = 1 - P$$



[Du/Gr, 68]

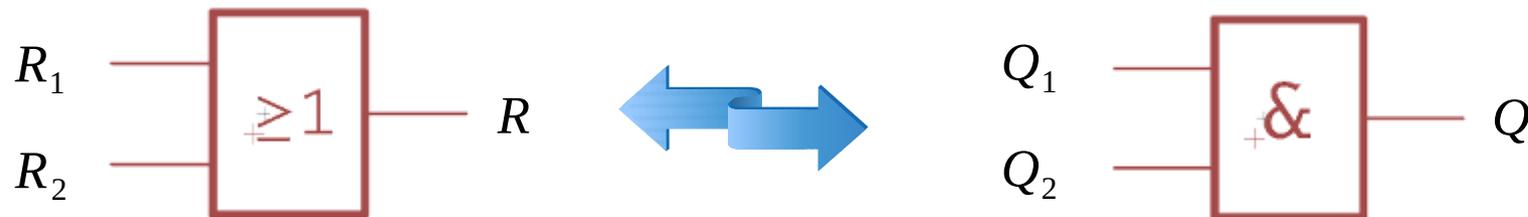
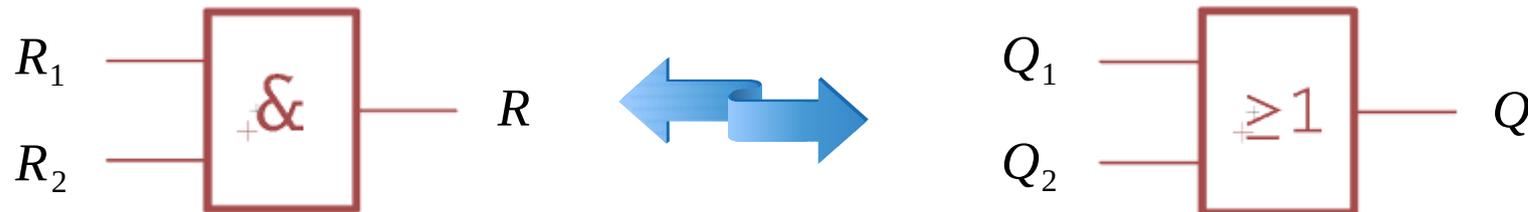
# Fehlerbaum-Analyse #3





# Fehlerbaum-Analyse #4

Operationen zur „Umrechnung“ Zuverlässigkeit  $\leftrightarrow$  Unzuverlässigkeit

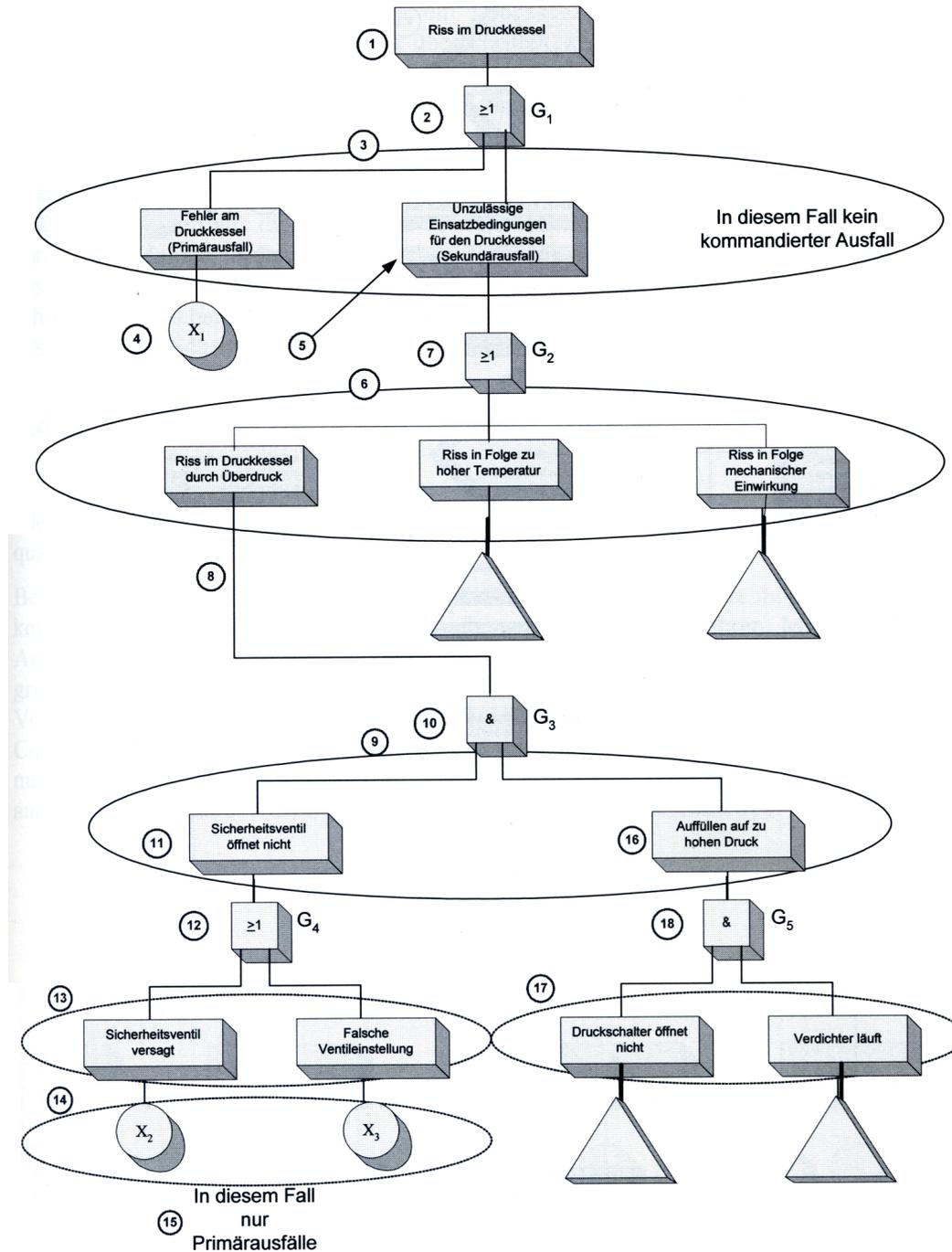


gilt auch für Verfügbarkeit  $\leftrightarrow$  Unverfügbarkeit  
Wahrscheinlichkeit  $\leftrightarrow$  Unwahrscheinlichkeit ...

# Fehlerbaum-Analyse #5



Beispiel aus [Bö, 15] S. 115:



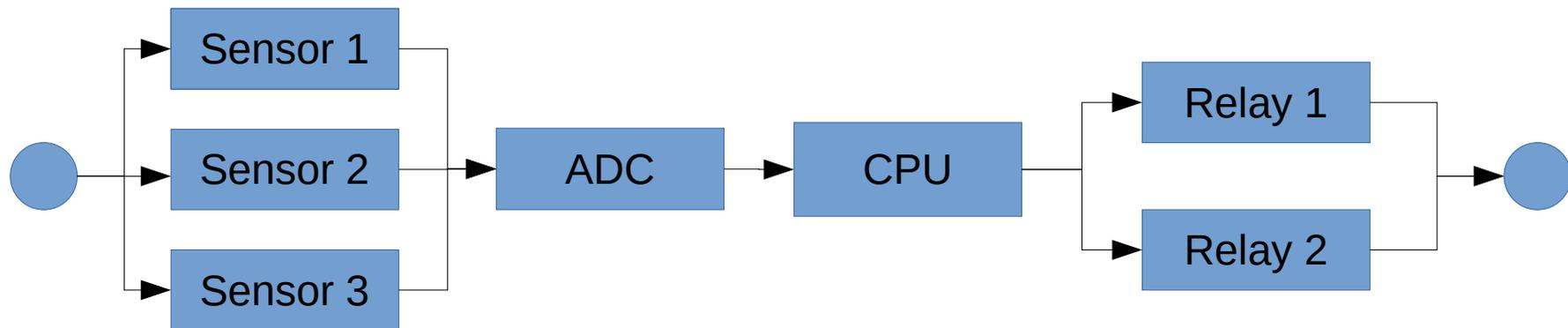
# Zuverlässigkeits-Block-Analyse #1



Anwendung: Untersuchung komplexer Systeme

- Zuverlässigkeit ist die Kombination der Zuverlässigkeiten der Subsysteme, Module, Einzelteile ...
- parallele, serielle, gemischte Strukturen
- Unterscheidung „wichtiger“ und „unwichtiger“ Funktionen

Zuverlässigkeits-Block-Diagramm (ZBD) (engl. Reliability Block Diagram)

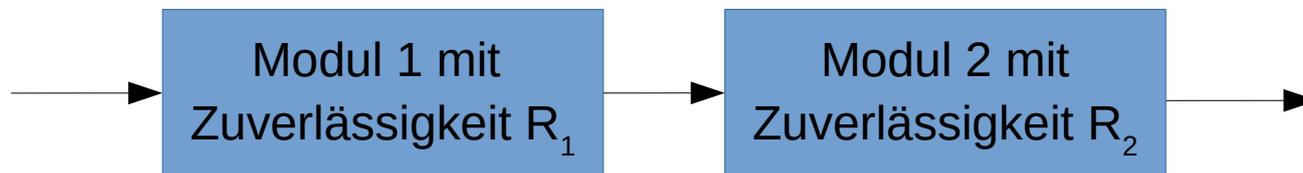


# Zuverlässigkeits-Block-Analyse #2



Module wirken in Serie

Ausfall eines Moduls → **gesamtes System fällt aus**



$$R_{ser} = R_1 \cdot R_2$$

$$R_{ser} = \prod_{i=1}^n R_i$$

Gesamt-Zuverlässigkeit **sinkt** mit jedem weiteren Modul !

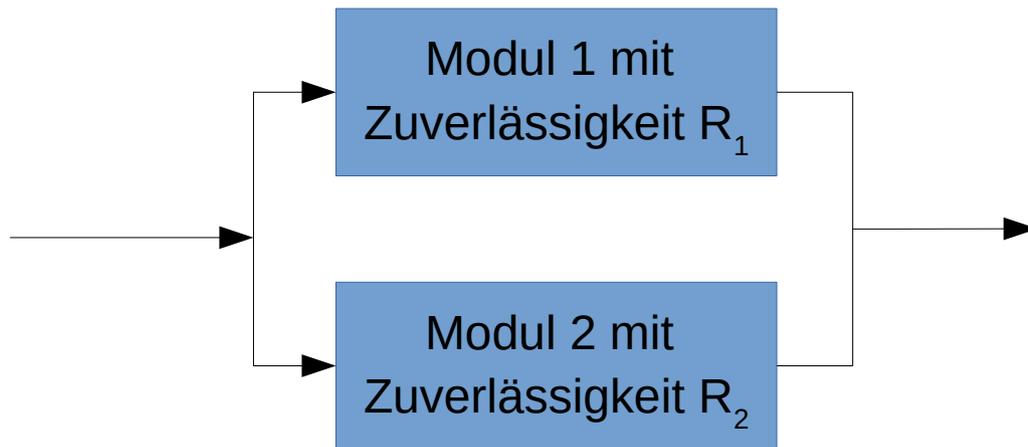
Bedingung für Serienstruktur: Ausfälle sind voneinander nicht abhängig:

- bedingen sich nicht
- schließen einander nicht aus
- hängen nicht von einer gemeinsamen Ursache ab [He, 73] S.52

# Zuverlässigkeits-Block-Analyse #3



Module wirken parallel



$$R_{par} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Gesamt-Zuverlässigkeit steigt mit jedem weiteren Modul !

# Redundanz #1



**Redundanz** (von lateinisch *redundare*, überlaufen, sich reichlich ergießen) ist das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Ressourcen eines technischen Systems, wenn diese bei einem störungsfreien Betrieb im Normalfall nicht benötigt werden. Ressourcen können z. B. redundante Informationen, Motoren, Baugruppen, komplette Geräte, Steuerleitungen und Leistungsreserven sein. In der Regel dienen diese zusätzlichen Ressourcen zur Erhöhung der Ausfall-, Funktions- und Betriebssicherheit. [[https://de.wikipedia.org/wiki/Redundanz\\_\(Technik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Redundanz_(Technik))]

Unterteilung nach [Bö, 15]:

- heiße R. (auch aktive oder parallele R.)
  - alle Elemente gleicher Belastung ausgesetzt
  - für sicherheitsrelevante Anwendungen
- warme R. (auch leicht belastete R.)
  - redundantes Element bis zum Ausfall des Primärelements gering belastet
- kalte R.
  - redundantes Element bis zum Ausfall des Primärelements nicht belastet

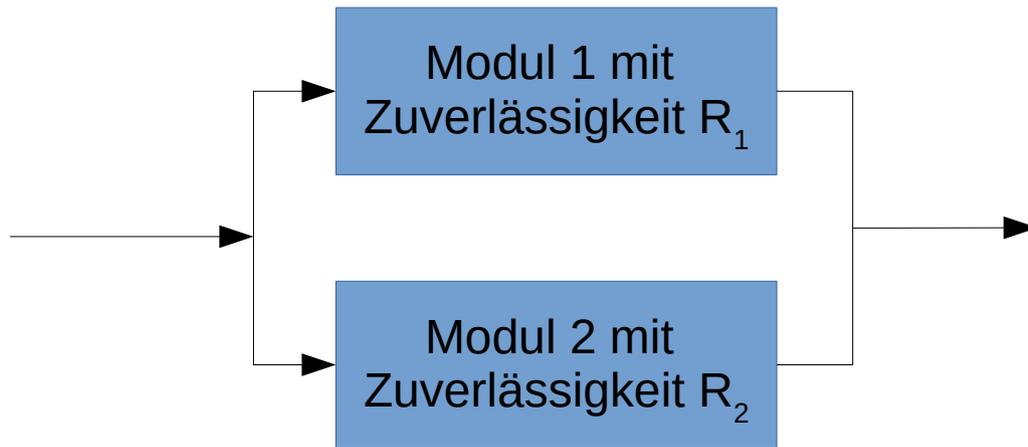
siehe auch [Du/Gr, 68] Kap 3, [Bö, 15] Kap 12

# Redundanz #2



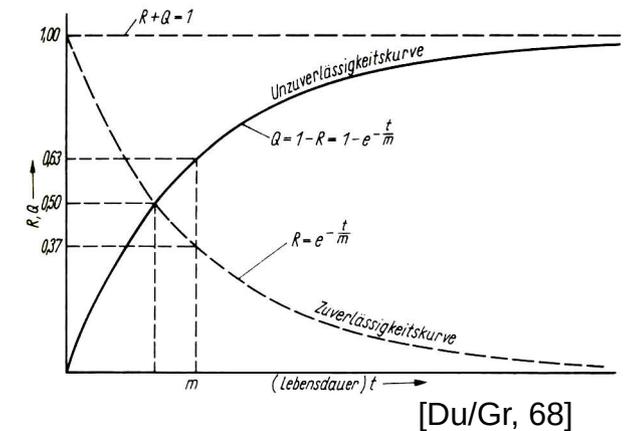
Blöcke parallel → Redundanz → Produkt der Unzuverlässigkeiten

Ausfall eines Moduls → Gesamtes System fällt nicht aus



Annahme :  $R_1 = R_2$  und  $Q_1 = Q_2$

$$R_{par} = 1 - (1 - R)^n$$



Herleitung siehe [An, 76] Seite 28ff

# Zuverlässigkeit und SIL #1



Norm: IEC 61508

SIL: Safety Integrity Level (1..4)

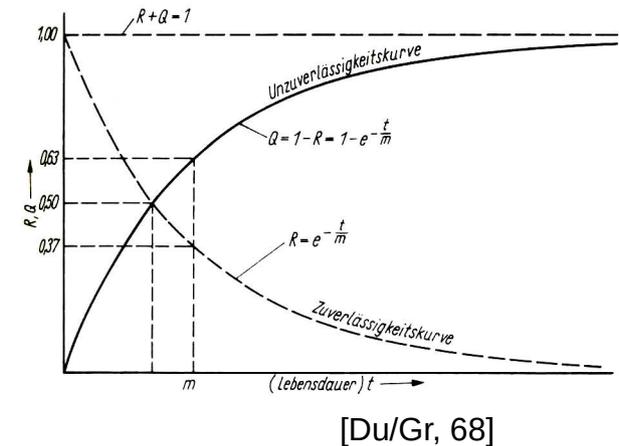
Unzuverlässigkeit = 1 – Zuverlässigkeit

$$Q = 1 - R$$

R → Q → PFD / PFH → SIL

PFH: - Probability of Failure per Hour  
- Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles bei Anforderung  
- einmal pro Jahr

PFD: - Probability of Failure on Demand  
- Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles pro Stunde  
- Beispiel: ABS der Bremsen eines Fahrzeuges



# Zuverlässigkeit und SIL #2



Norm: IEC 61508

- PFD:
- Probability of Failure on Demand
  - Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles bei Anforderung
  - einmal pro Jahr

Sicherheits-Integritätslevel	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit der Ausfälle bei der Ausführung der Funktion nach einer Anforderung (Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate) $PFD_{avg}$
4	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$

[Bö, 15] S. 196

# Zuverlässigkeit und FMEA #1



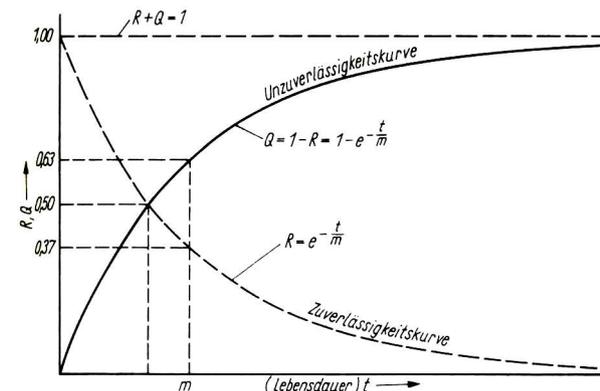
FMEA (englisch *Failure Mode and Effects Analysis*, deutsch Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse[1][2][3] oder kurz Auswirkungsanalyse) sowie FMECA (engl. *Failure Mode and Effects and Criticality Analysis*) sind analytische Methoden der Zuverlässigkeitstechnik. Dabei werden mögliche Produktfehler nach ihrer Bedeutung für den Kunden, ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrer Entdeckungswahrscheinlichkeit mit jeweils einer Kennzahl bewertet.

Im Rahmen des Qualitätsmanagements bzw. Sicherheitsmanagements wird die FMEA zur Fehlervermeidung und Erhöhung der technischen Zuverlässigkeit vorbeugend eingesetzt. Die FMEA wird insbesondere in der Design- bzw. Entwicklungsphase neuer Produkte oder Prozesse angewandt. Weit verbreitet ist diese Methode in der Automobilindustrie sowie der Luft- und Raumfahrt, aber auch in anderen Industriezweigen ist eine sachgemäß durchgeführte FMEA häufig gefordert.

[\[https://de.wikipedia.org/wiki/FMEA\]](https://de.wikipedia.org/wiki/FMEA)

*Unzuverlässigkeit = 1 – Zuverlässigkeit*

$$Q = 1 - R$$



[Du/Gr, 68]

# Zuverlässigkeit und FEMA #2



1	Unlikely	$\leq 1$ in 1.5 million ( $\leq .0001\%$ )
2	Low (few failures)	1 in 150,000 ( $\leq .001\%$ )
3		1 in 15,000 ( $\leq .01\%$ )
4	Moderate (occasional failures)	1 in 2,000 (0.05%)
5		1 in 400 (0.25%)
6		1 in 80 (1.25%)
7	High (repeated failure)	1 in 20 (5%)
8		1 in 8 (12.5%)
9	Very high (relatively consistent failure)	1 in 3 (33%)
10		$\geq 1$ in 2 (50%)

# Zuverlässigkeit und FEMA #3



## FMEA Form

### Failure Modes & Effect Analysis

Product: \_\_\_\_\_

Completed by: \_\_\_\_\_

Date Completed: \_\_\_\_\_

Revision No.: \_\_\_\_\_

Item/Part No.	Part Description	Part Function	Failure Mode	Failure Effects	Severity	Causes	Prob. of Occurrence	Current Controls	Control Effectiveness	RPN	Recommended Actions
	Step 1		Step 2	Step 3	S4	Step 5	S6	Step 7	S8	S9	Step 10

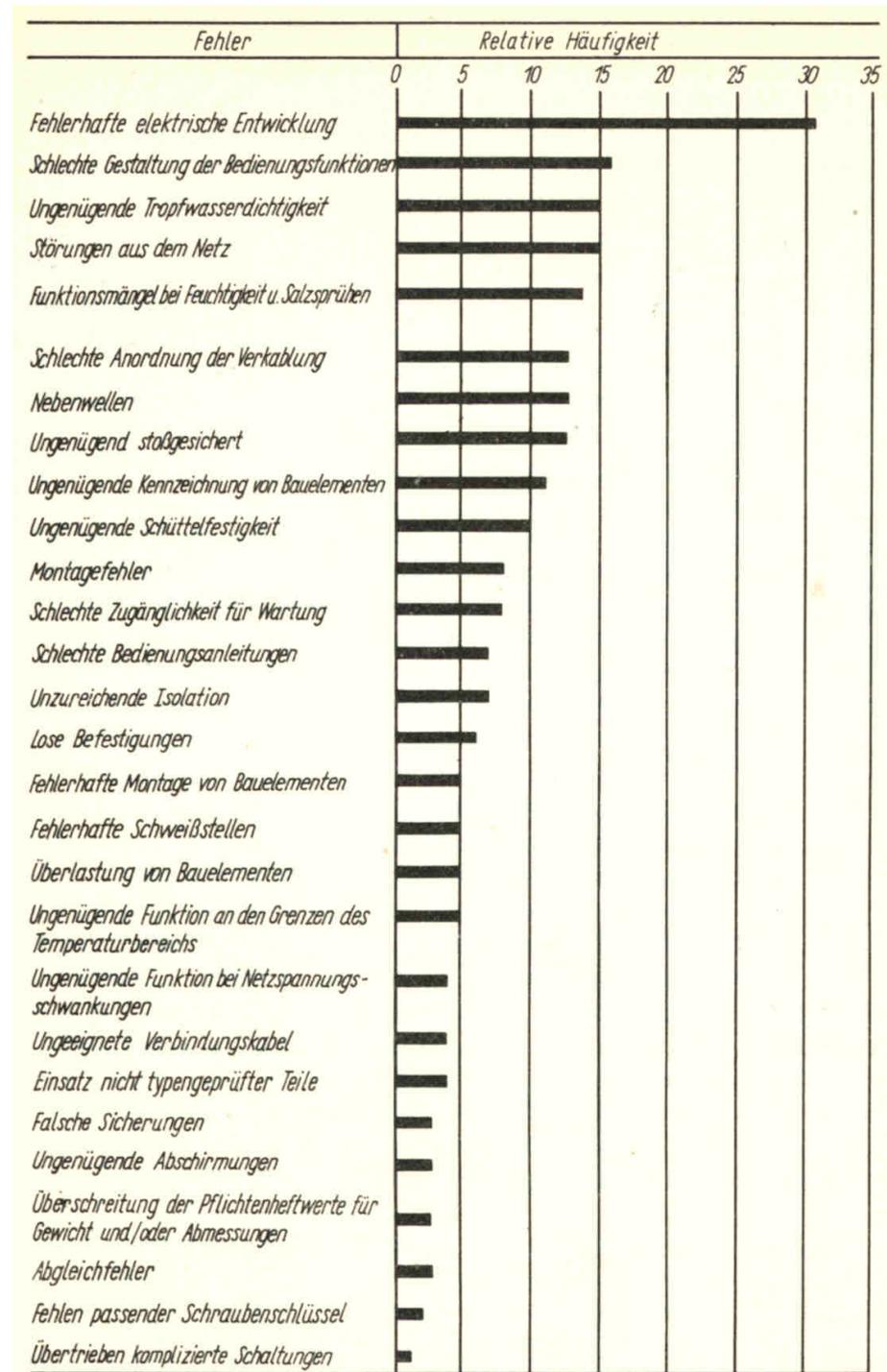
# ***Konstruktion #1***



## Top 10 der Fehler nach [Du/Gr 68]

- 1) fehlerhafte elektrische/elektronische Entwicklung
- 2) Ungünstige Anordnung und Dimensionierung der Bedienelemente
- 3) Dichtes Verschließen von Geräten
- 4) Ungenügende Widerstandsfähigkeit von Metallen unter Einfluß von Feuchtigkeit und Salzsprühnebel
- 5) Mängel in der Verdrahtung und Verkabelung
- 6) Ungenügende Widerstandsfähigkeit gegen Stoßen
- 7) Ungenügender Schutz gegen Schütteln
- 8) Ungenügende Befestigung von Bauelementen
- 9) Ungeeignete Isolation
- 10) Versagen bei hohen Temperaturen

# Konstruktion #2



# Wärme #1

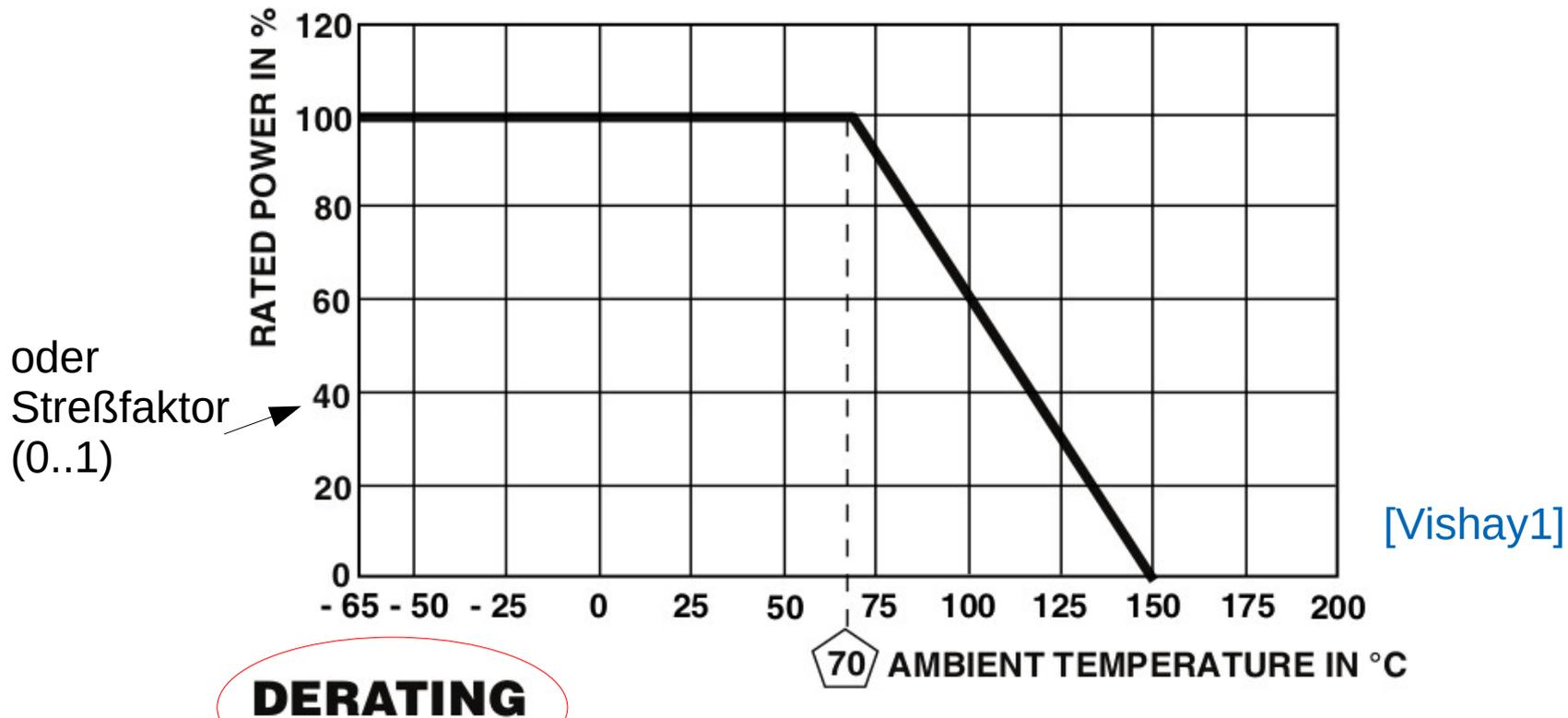


- 1) Mit steigender Temperatur sinkt die Lebensdauer eines Bauelements, steigt seine Ausfallrate ( $\lambda$ )
- 2) Ziel: Reduzierung der Umgebungstemperatur (Fremderwärmung)
- 3) Ziel: Reduzierung der Eigenerwärmung
- 4) Eigenerwärmung ist proportional zur (Wirk)Verlustleistung ( $U \times I$ )
- 5) Grenzwert bei Widerständen: Verlustleistung vs. Umgebungstemperatur (engl. ambient temperature).
- 6) Grenzwert bei Halbleitern ist die Sperrschicht-Temperatur (engl. junction temperature)
- 7) Derating Standards: MIL-STD-975, MIL-STD-1547, AS4613, NAVSEA TE000-AB-GTP-010, ECSS-Q-30-11A, MSFC-STD-3012
- 8) <https://weibull.com/hotwire/issue92/relbasics92.htm>

# Wärme #2



## Belastbarkeit eines Widerstandes



hat mit Unterlastung nichts zu tun !

Beispiel: **Der Widerstand darf bei 100°C Umgebungstemperatur nur mit 60% seiner Nennlast belastet werden.**

# Wärme #3



## Fehlerrate eines Widerstandes

**SPECIFICATION**  
MIL-R-11804

**STYLE**  
RD

**DESCRIPTION**  
Fixed, Film, Power Type

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_R \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

Base Failure Rate - $\lambda_b$					
$T_A$ (°C)	Stress				
	.1	.3	.5	.7	.9
0	.0089	.0098	.011	.013	.015
10	.0090	.010	.011	.013	.015
20	.0092	.010	.012	.014	.016
30	.0094	.010	.012	.014	.017
40	.0096	.011	.012	.015	.017
50	.0098	.011	.013	.015	
60	.010	.011	.013	.016	
70	.010	.012	.014	.016	
80	.010	.012	.014	.017	
90	.011	.012	.015		
100	.011	.013	.015		
110	.011	.013	.016		
120	.012	.014	.016		
130	.012	.014	.017		
140	.012	.014			
150	.013	.015			
160	.013	.016			
170	.014	.016			
180	.014				
190	.015				
200	.015				
210	.016				

Quality Factor - $\pi_Q$	
Quality	$\pi_Q$
MIL-SPEC	1.0
Lower	3.0

Beispiel: **Der Widerstand hat bei 50°C Umgebungstemperatur und Streßfaktor 0,7 eine Basisfehlerrate von 0,015/1 Mio h.**

**Wird er mit 10% seiner Nennlast belastet, geht die Fehlerrate um ein Drittel zurück.**

**Bei 90% Streß und 50°C ist der Widerstand überlastet.**

$$\lambda_b = 7.33 \times 10^{-3} \exp\left(0.202 \left(\frac{T+273}{298}\right)^{2.6}\right) \times \exp\left(\left(\frac{S}{1.45}\right) \left(\frac{T+273}{273}\right)^{.89}\right)^{1.3}$$

T = Ambient Temperature (°C)

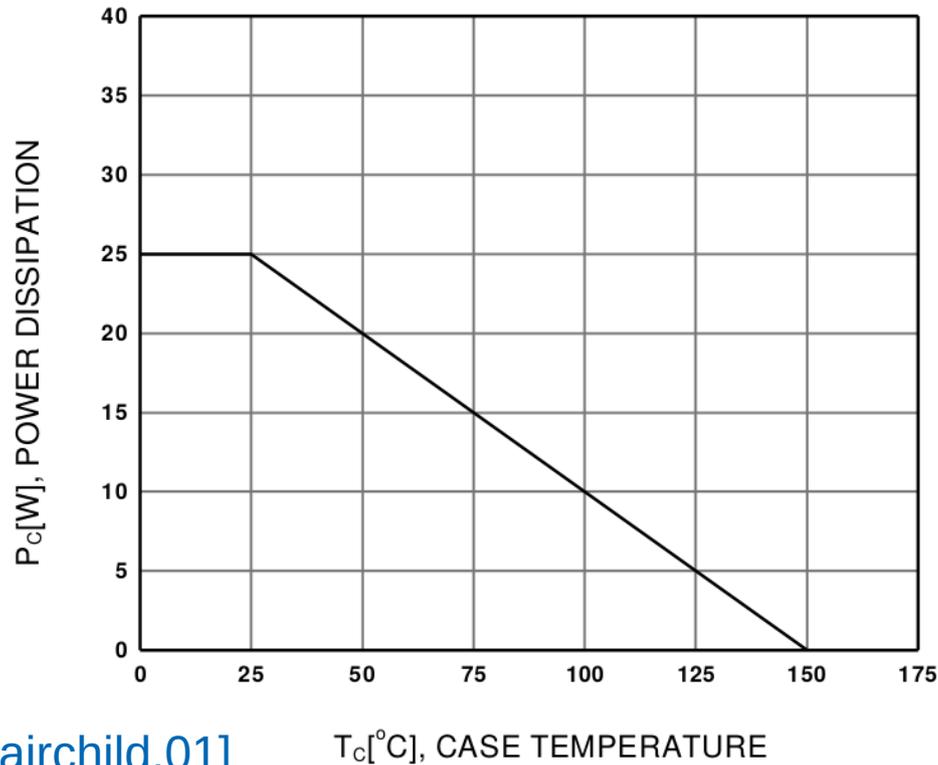
S = Ratio of Operating Power to Rated Power

[MIL, 91]

# Wärme #4



## Belastbarkeit eines Transistors



[Fairchild,01]

T<sub>c</sub>[°C], CASE TEMPERATURE

Beispiel: **Der Transistor kann bei 100°C Gehäusetemperatur nur max. 10W Wärmeleistung abgeben.**

**Bei einer Verlustleistung von 15W und 100°C Umgebung ist er überlastet.**

# Wärme #5



## Ausfallrate eines Transistors

**SPECIFICATION**  
MIL-S-19500

**DESCRIPTION**  
NPN (Frequency < 200 MHz)  
PNP (Frequency < 200 MHz)

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E \quad \text{Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

Base Failure Rate -  $\lambda_b$

Type	$\lambda_b$
NPN and PNP	.00074

Application Factor -  $\pi_A$

Application	$\pi_A$
Linear Amplification	1.5
Switching	.70

Temperature Factor -  $\pi_T$

$T_J$ (°C)	$\pi_T$	$T_J$ (°C)	$\pi_T$
25	1.0	105	4.5
30	1.1	110	4.8
35	1.3	115	5.2
40	1.4	120	5.6
45	1.6	125	5.9
50	1.7	130	6.3
55	1.9	135	6.8
60	2.1	140	7.2
65	2.3	145	7.7
70	2.5	150	8.1
75	2.8	155	8.6
80	3.0	160	9.1
85	3.3	165	9.7
90	3.6	170	10
95	3.9	175	11
100	4.2		

$$\pi_T = \exp\left(-2114 \left(\frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

$T_J$  = Junction Temperature (°C)

Power Rating Factor -  $\pi_R$

Rated Power ( $P_r$ , Watts)	$\pi_R$
$P_r \leq .1$	.43
$P_r = .5$	.77
$P_r = 1.0$	1.0
$P_r = 5.0$	1.8
$P_r = 10.0$	2.3
$P_r = 50.0$	4.3
$P_r = 100.0$	5.5
$P_r = 500.0$	10

$\pi_R = .43$       Rated Power  $\leq .1W$

$\pi_R = (P_r)^{-.37}$       Rated Power  $> .1W$

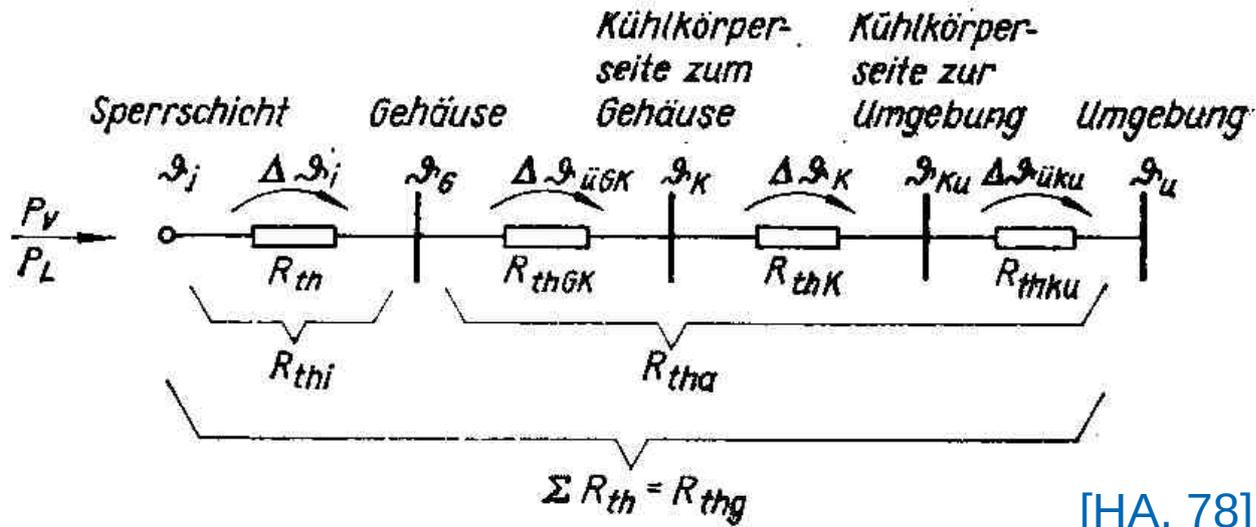
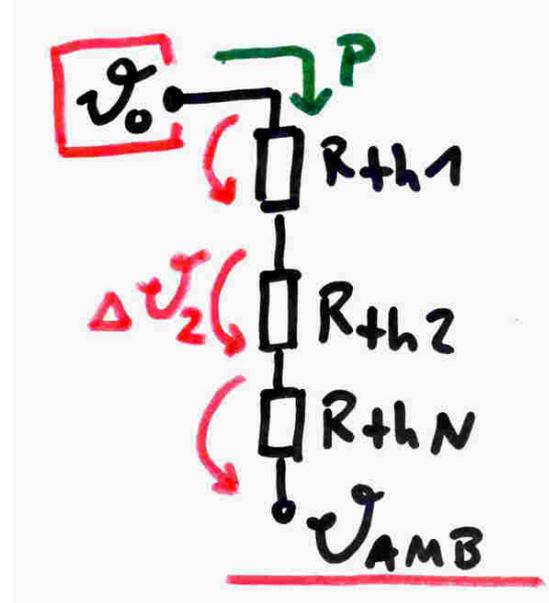
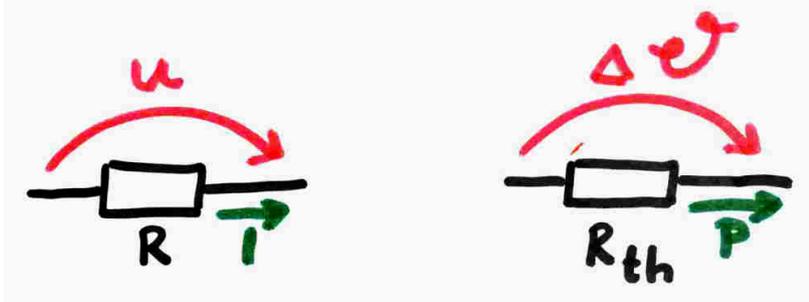
Beispiel:  
Bezogen auf  
25°C  
Sperrschicht-  
temperatur steigt  
die Fehlerrate bei  
100°C um Faktor  
4,2.

[MIL, 91]

# Wärme #6



## Wärmewiderstand und Temperatur



[HA, 78]

# Wärme #7



## Ermittlung der Temperatur der Sperrschicht

Gegeben:

- Verlustleistung 6W
- Temperatur des Gehäuses 70°C
- Wärmewiderstand (von Sperrschicht nach Gehäuse) 5K/W

Gesucht Temperatur der Sperrschicht.

Lösung:

$$T_{junction} = T_{case} + R_{thjc} \cdot P_v$$

$$T_{junction} = 70 \text{ °C} + 5 \text{ K/W} \cdot 6 \text{ W}$$

$$T_{junction} = 100 \text{ °C}$$

**Bezogen auf 25°C Sperrschicht-Temperatur steigt die Fehlerrate bei 70°C Gehäusetemperatur und 6W Verlustleistung um Faktor 4,2.**

Siehe auch MIL-HDBK-217F [MIL, 91]  
Abschnitt 6.14

# Zuverlässigkeits-Tests



## Beweggründe:

1. Bestätigung theoretischer Vorbetrachtungen
2. Erstellung von Prognosen
3. Erhöhung der Zuverlässigkeit (je nach Anwendung des Produktes)
4. gezielte Auswahl von Bauelementen
5. Ermittlung des Einflusses der Umweltbedingungen
6. Schätzung der Zuverlässigkeit von Neuentwicklungen
7. Schätzung des Aufwandes an Redundanz
8. Optimierung des Produktes hinsichtlich Betriebsverhalten, Wartung, ...
9. Einsparen von Material, Zeit, Geld

***Zuverlässigkeit läßt sich nicht in ein Gerät hineinprüfen !***

Zuverlässigkeit entsteht durch sorgfältige  
Schaltungsdimensionierung, Auswahl zuverlässiger Bauelemente und  
sorgfältige Montage.

# *Gewinnung der Daten #1*



## Ableitung aus Qualitätsmerkmalen

- ▶ geringste „Totzeit“
- ▶ erspart Zeitaufwand für Zuverlässigkeitstests

siehe [He, 73] Seite 72

## praktischer Einsatz

- ▶ Rückmeldung aus dem Feld (Vorläufer, eigenes Personal, Mitbewerber)
- ▶ alle Produkte werden erfaßt → Vorteil
- ▶ Zeitaufwendig, Verwaltung (dem Kunden kaum zumutbar)
- ▶ Umstände und Ursache von Fehlern schwierig erfassbar
- ▶ Beanspruchung und Umweltbedingungen schwierig rekonstruierbar
- ▶ Verfolgung der Drift von Parametern schwierig
- ▶ Erfassung über Zeitraum der Garantie hinaus schwierig

siehe [He, 73] Seite 27ff

siehe [Pr, 77] Seite 128

# Gewinnung der Daten #2



Anhand gesamter Betriebsstunden und Exemplare

Ermittlung der realen MTBF (inkl. mechanischer Fehler, Software-Fehler)

$$MTBF = \frac{\text{Größe der Population} \cdot \text{Laufzeit der Population}}{\text{Gesamtzahl der Ausfälle}}$$

Beispiel:

**Es wurden 20 Jahre lang 60 erdvergrabene Verstärker betrieben. Pro Jahr fielen 2 Verstärker aus. Es gab also insgesamt 40 Ausfälle. Der Hersteller gab eine MTBF von 28 Jahren an. Die reale MTBF eines Verstärkers ergibt sich nach:**

$$MTBF = \frac{60 \text{ Stück} \cdot 20 \text{ Jahre}}{2 \cdot 20 \text{ Ausfälle}}$$

$$MTBF = 30 \text{ Jahre}$$

# Gewinnung der Daten #3



Anhand gesamter Betriebsstunden und Exemplare

Ermittlung der realen Ausfallrate eines Exemplars:

$$\lambda = \frac{\text{Gesamtzahl der Ausfälle}}{\text{Größe der Population} \cdot \text{Laufzeit der Population}}$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 20 \text{ Ausfälle}}{60 \text{ Stück} \cdot 20 \text{ Jahre}}$$

$$\lambda = \frac{0,033 \text{ Ausfälle}}{1 \text{ Jahr}}$$

$$\lambda = \frac{0,033 \text{ Ausfälle}}{8760 \text{h}}$$

$$\lambda = \frac{3762 \text{ Ausfälle}}{10^6 \text{h}}$$

# Gewinnung der Daten #4



## Normal- und Umwelt/Klima-Tests in Labor oder Fertigung

- Nachbildung der realen Umgebung
  - nur wirtschaftlich vertretbare Menge wird erfaßt → höhere statistische Unsicherheit
  - automatisierte Fehlererkennung → spart Zeit
  - Alterung und Abnutzung von Bauteilen nicht feststellbar  
siehe [Pr, 77] Seite 129, elektrische Tests [Bl, 18], [Kr, 87]
- 
- meteorologische Bedingungen: Temperatur, Feuchtigkeit, Druck (statisch, dynamisch)
  - Schütteln, Schlagen, Beschleunigen (Transport !)
  - Staub (in Kombination mit Feuchtigkeit)
  - Korrosion (Salz, Gase, chem. Substanzen)
  - biologische Einflüsse (Schimmel, Bakterien, Insekten, ...)
  - Lärm
  - Strahlung (Teilchen, Gamma, EM, UV, ...)

siehe [Du/Gr, 68] Kap 5

# Gewinnung der Daten #5



## Forcierte Tests (höher als nötige Belastung)

- ▶ Differenz zwischen simulierten Umweltbedingungen und realen Einflüssen → nachteilig
- ▶ kaum Aussage über Kosten für Reparatur & Wartung

## Raffungs-, Beschleunigungstest

- ▶ Zeitersparnis
- ▶ unter verschärften Umweltbedingungen oder überdurchschnittlicher Nutzung
- ▶ für beschleunigte Alterung von Bauteilen und Geräten
- ▶ kann bei Geräte-Tests unnötige Alterung von Bauteilen verursachen → nachteilig
- ▶ „Zu-Tode-Prüfen“ bei Geräte-Tests mathematisch nicht faßbar (Mischung von Bauteilen)

siehe [Pr, 77] Seite 130

# Raffungs-Tests #1



„Wenn die Zeit schneller vergehen soll“

beschleunigte Fehlermechanismen → frühere Bewertung der Zuverlässigkeit

$$\text{Beschleunigungsfaktor} = \frac{\text{Lebensdauer unter Normalbedingungen}}{\text{Lebensdauer unter unter Streß}}$$

$$\text{Beschleunigungsfaktor} = \frac{\text{Fehlerrate unter Streß}}{\text{Fehlerrate unter Normalbedingungen}}$$

$$A = \frac{t_{nom}}{t_{stress}} = \frac{\lambda_{streß}}{\lambda_{nom}}$$

**Lebensdauer unter Streß sinkt → Beschleunigung steigt**

# ***Raffungs-Tests #2***



**häufigere Benutzung** → mechanischer Verschleiß beschleunigt

Anwendung: elektromechanische Bauteile und Geräte

Beispiel 1:

Ein Relais wird über 1000h im Takt von 10 Hz (unter Last) ein- und aus geschaltet.

Beispiel 2:

Ein Toaster wird 1000h betrieben. Zyklus: Brotkorb nach unten. Heizen. Brotkorb automatisch nach oben.

weitere Methoden:

- Vibration Model (MIL-STD 810E)

# ***Raffungs-Tests #3***



Methoden:

- Temperatur (statisch) → chemische Reaktionen verlaufen schneller → Arrhenius / Eyring
- Temperatur (dynamisch) → beruht auf Ausdehnung und Kontraktion von Materialien → Coffin-Manson
- Feuchtigkeit → beschleunigte Korrosion → Hallberg / Peck / Lawson
- Strahlung (Gamma, Teilchen, UV, ...)
- Elektromigration → Materialwanderung im Leiter
- Spannung → dielektrische Belastung (insb. Isolationen)

siehe [DS, 18], [Es/Me, 06], [Ha/Pe, 91]

# Raffungs-Tests #4



Beschleunigung durch Wärme nach Arrhenius

Anwendung: Halbleiter

$$A = \frac{\lambda_{\text{Streß}}}{\lambda_{\text{nom}}} = e^{\frac{E_a}{B} \left( \frac{1}{T_{\text{nom}}} - \frac{1}{T_{\text{streß}}} \right)}$$

A = Beschleunigungsfaktor

T<sub>nom</sub> = Absolut-Temperatur in Kelvin im Normalbetrieb

T<sub>streß</sub> = Absolut-Temperatur in Kelvin im Test

E<sub>a</sub> = Aktivierungsenergie in eV (typ. 0.7eV)

B = Boltzmannkonstante  $\frac{8,6173 \cdot 10^{-5}}{^\circ K}$

# Raffungs-Tests #5



Beschleunigung durch Temperaturwechsel (dynamisch) nach Coffin-Manson

Anwendung: Metalle, Lötverbindungen, Kunststoffe

$$A = \frac{N_{nom}}{N_{stress}} = \left( \frac{\Delta T_{stress}}{\Delta T_{nom}} \right)^K$$

A = Beschleunigungsfaktor

$\Delta T_{nom}$  = Temperaturbereich im Normalbetrieb

$\Delta T_{stess}$  = Temperaturbereich im Test

$N_{nom}$  = Anzahl der Zyklen im Normalbetrieb

$N_{sress}$  = Anzahl der Zyklen im Test

K = Konstante (Materialeigenschaften, Testaufbau)

siehe [DS, 18] und [Es/Me, 06]

# Raffungs-Tests #6



## Beschleunigung durch Feuchtigkeit nach Peck

Anwendung: Halbleiter

$$A = \left( \frac{RH_{stress}}{RH_{nom}} \right)^m \cdot e^{\frac{E_a}{B} \left( \frac{1}{T_{nom}} - \frac{1}{T_{streß}} \right)}$$

siehe Modell nach Arrhenius

A = Beschleunigungsfaktor

$RH_{stress}$  = relative Luftfeuchtigkeit im Test

$RH_{nom}$  = relative Luftfeuchtigkeit im Normalbetrieb

m = Feuchtigkeits-Konstante typ. 2,66

# ***Richtlinien für Entwicklung #1***



## Möglichkeiten zur Verbesserung der Ausfallrate nach [He, 73]

- a) Vermeidung von Elementen mit großer Ausfallrate, sofern andere Wege zur Erfüllung der geforderten technischen Daten realisierbar sind,
- b) Verwendung der geringstmöglichen Anzahl von Elementen bzw. auch Änderungen der Systemstruktur zwecks „Entfeinerung“,
- c) bei Bezugsmöglichkeit gleicher Elemente von verschiedenen Herstellern, Auswahl desjenigen mit der niedrigsten Ausfallrate,
- d) reparaturgünstige Anordnung von Elementen mit hoher Ausfallrate, um wenigstens die Ausfalldauer zu verkürzen,
- e) Anwendung von Unterlastung (Derating) und von Redundanz bei Elementen mit hoher Ausfallrate, sofern es lohnend und technisch realisierbar ist,
- f) Toleranzoptimierung bzw. Verwendung weniger kritischer Anordnungen, wenn Driftausfälle von Elementen die Hauptursache von Systemausfällen sind,
- g) Nachweis, ob die geforderte Ausfallrate des Systems unter Berücksichtigung der Möglichkeiten a) bis f) erreichbar ist oder nicht. Wenn nicht, muß die Systemstruktur, Ausfalltypen (Drift- oder Totalausfälle, Kurzschluß, Unterbrechung ...) oder Beanspruchungen durch Umgebung geändert werden.

# ***Richtlinien für Entwicklung #2***



Grundregeln für die Auswahl von Bauteilen nach [An, 76] (Seite 88)

- a) Bestimmung der Umgebung/Umwelt, in der das Bauteil betrieben wird.
- b) Wie kritisch ist das Bauteil ?
  - Mission, Patient, Betriebssicherheit, ...
  - Lebensdauer des Bauteils
  - Preis
  - besondere Qualifikation nötig ?
- c) Verfügbarkeit des Bauteils
  - auf Liste bevorzugter Bauteile ?
  - qualifizierter Lieferant ? Alternative Lieferanten ?
  - Beschaffungszeit (engl. lead time)
  - Bauteil über gesamte Betriebszeit des Gerätes verfügbar ?
- d) Abschätzung des zu erwartenden Stresses im Gerät/Anwendung
- e) Bestimmung des Zuverlässigkeits-Levels des Bauteiles im Gerät/Anwendung
- f) Bestimmung der Wirksamkeit von Alterungs- und Auslesemethoden
- g) Anwendung von Unterlastung/Derating/Überdimensionierung



# ***Richtlinien für Entwicklung #3***

## Weitere Hilfsmittel:

- Entwurfsrichtlinien
- Meßvorschriften
- Prüflisten
  
- Checklisten und Style Guides siehe  
[http://www.blunk-electronic.de/pdf/Design\\_Checklist\\_en.pdf](http://www.blunk-electronic.de/pdf/Design_Checklist_en.pdf)
  
- Agile Hardware-Entwicklung siehe  
[http://www.blunk-electronic.de/pdf/agile\\_HW/agile\\_HW\\_development.pdf](http://www.blunk-electronic.de/pdf/agile_HW/agile_HW_development.pdf)
  
- Prüfungsgerechtigkeit, Design For Test (DFT) siehe  
[http://www.blunk-electronic.de/pdf/testverfahren\\_der\\_elektronik.pdf](http://www.blunk-electronic.de/pdf/testverfahren_der_elektronik.pdf)

# ***Normen, Standards***

- ★ IEEE 1332 - Standard Reliability Program for the Development and Production of Electronic Products
- ★ IEC 62380 / IEC 61709 - Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion
- ★ SR-332 / SR-1171 Bellcore (Telcordia) (telekommunikation industry)
- ★ AIAG (Automotive)
- ★ <http://www.aecouncil.com/>
- ★ MIL-HDBK-217F Notice 2 – Military Handbook, “Reliability Prediction of Electronic Equipment“
- ★ ANSI/VITA 51.1 – [www.vita.com](http://www.vita.com) / <https://www.vita.com/page-1855234>

# *Software / Werkzeuge*



1. <http://www.barringer1.com/raptor.htm>
2. [www.arinc.com/downloads/raptor\\_papers/Raptor70-01Ed.pdf](http://www.arinc.com/downloads/raptor_papers/Raptor70-01Ed.pdf)
3. <http://src.alionscience.com/src/softtools.do?action=search&name=Availability&cats=1906>
4. <https://www.isograph.com>
5. <https://www.quanterion.com/reliability-predictions-parts-count-part-stress-pseudo-stress-and-dormant/>
6. <https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/blocksim>
7. <https://accendoreliability.com/>
8. [http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/mil\\_hdbk\\_217F\\_parts\\_count](http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/mil_hdbk_217F_parts_count)
9. <http://predict.reliasoft.com/>
10. <https://weibull.com>

# Quellen #1



- [Du/Gr, 68] Dummer / Griffin, "Zuverlässigkeit in der Elektronik", Verlag Technik Berlin  
Original: „Electronics Reliability – Calculation and Design“, Pergamon Press Ltd, England
- [Ki, 01] Prajwal Kini, „A reliability estimation for electronic designs“  
[http://www.iwavesystems.com/skin/frontend/default/electronicstore/pdf/Reliability\\_estimation\\_for\\_electronic\\_design.pdf](http://www.iwavesystems.com/skin/frontend/default/electronicstore/pdf/Reliability_estimation_for_electronic_design.pdf)
- [Fi/Sch, 88] Fischer / Schlegel „Transistor- und Schaltkreistechnik“, Militärverlag
- [Bö, 15] Börcsök, „Funktionelle Sicherheit, Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme“, VDE Verlag GmbH
- [Pr, 76] Preuß, „Zuverlässigkeit elektronischer Einrichtungen“, Verlag Technik Berlin
- [He, 73] Hesse, „Praktische Erfahrungen der Zuverlässigkeitsarbeit“, Verlag Technik Berlin
- [Kr, 68] Kronjäger, „Amateurtechnik und Betriebszuverlässigkeit“, Deutscher Militärverlag Berlin
- [Kr, 87] Kronjäger, „Frühausfallphase elektronischer Erzeugnisse“, Verlag Technik Berlin
- [An, 76] Anderson, „RELIABILITY DESIGN HANDBOOK“, IIT Research Institute
- [MIL, 91] US DoD, „MIL-HDBK-217F“
- [MIL, 95] US DoD, „MIL-HDBK-217F Notice 2“
- [Wo, 12] Wood, „Applied R&M Manual for Defence Systems (GR-77 Issue 2012)“, <http://www.sars.org.uk/>
- [Bl, 18] Blunk, „Testverfahren der Elektronik“, [http://www.blunk-electronic.de/pdf/testverfahren\\_der\\_elektronik.pdf](http://www.blunk-electronic.de/pdf/testverfahren_der_elektronik.pdf)
- [Bl, 14] Blunk, „Design Checklist for Schematics“, [http://www.blunk-electronic.de/pdf/Design\\_Checklist\\_en.pdf](http://www.blunk-electronic.de/pdf/Design_Checklist_en.pdf)
- [Es/Me, 06] Escobar / Meeker „A Review of Accelerated Test Models“, Institute of Mathematical Statistics in Statistical Science  
[https://projecteuclid.org/download/pdfview\\_1/euclid.ss/1177334529](https://projecteuclid.org/download/pdfview_1/euclid.ss/1177334529)
- [DS, 18] DfRSoft.com, "CONCEPTS IN ACCELERATED TESTING" <http://www.dfrsoft.com/DfRSoft%20Accel%20Testing.pdf>
- [Ha/Pe, 91] Hallberg / Peck, „RECENT HUMIDITY ACCELERATIONS, A BASE FOR TESTING STANDARDS“
- [NRC, 81] "Fault Tree Handbook", U.S. Nuclear Regulatory Commission“, <https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf>

# Quellen #2



- [Ha, 78] Hantzsch "Wärmeableitung bei Halbleitern", Militärverlag
- [Jais/Werner/Das] Reliability Predictions – Continued Reliance on a Misleading Approach, US Army Material Systems Analysis Activity & Center for Advanced Life Cycle Engineering, University of Maryland
- [Jones/Hayes] A Comparison of Electronic Reliability Prediction Methodologies  
International Electronics Reliability Institute /  
Department of Electronic and Electrical Engineering /  
Loughborough University of Technology Leicestershire, United Kingdom
- [Vishay,1] Metal Film Resistors, Axial, Military/Established Reliability, MIL-PRF-39017 Qualified, Type RLR
- [Fairchild,1] Transistors BD234/236/238 Medium Power Linear and Switching
- [Rohm, 1] Rohm Semiconductor (www.rohm.com)
- [Brennecke,1] <https://www.youtube.com/watch?v=ryXSDVXQ9IE>
- [Cas/Jo] Caswell, Johnston, „Failure Modes & Effects Analysis“, University of Calgary  
<http://people.ucalgary.ca/~design/engg251/contactinfo.htm>  
<http://people.ucalgary.ca/~design/engg251/First%20Year%20Files/fmea.pdf>
- [Pearson,1] <https://www.slideshare.net/amibitayes/17maintenance-and-reliability>
- [Hillmann,18] <https://www.designnews.com/electronics-test/end-near-mil-hdbk-217-and-other-outdated-handbooks>
- [VITA, 18] ANSI/VITA 51.0 – 51.2, Approved ANSI Standards for Reliability Prediction
- [Pecht, 95] J. Pecht und M. Pecht, Long-Term Non-Operating Reliability of Electronic Products
- [Würth, 23] Würth Elektronik, Toby Kangas, WES\_FIT-Reliability Data

***Danke für Ihre Aufmerksamkeit !***