

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen – Risiken in der Technik

Mathias Nowotnick

**Universität Rostock**

**Fakultät für Informatik und Elektrotechnik**

**Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik**

[mathias.nowotnick@uni-rostock.de](mailto:mathias.nowotnick@uni-rostock.de) | [www.igs.uni-rostock.de](http://www.igs.uni-rostock.de)

## Kleine Ursache – große Wirkung

### "Fehler der Lufthansa verursachte Merkels G20-Odyssee"



Wegen einer fehlerhaften Lötstelle fiel die Stromversorgung des A340 Konrad Adenauer mit der Bundeskanzlerin und dem Finanzminister an Board aus. Eigentlich auf dem Weg nach Argentinien musste die Maschine am 30.11.2018 nach kurzem Flug in Köln landen.

Quelle: Matthias Gebauer, Spiegel Online, 26.12.2018

## Kleine Ursache – große Wirkung

"Investigators have concluded that cracked solder joints on a circuit board were the main contributor to the fatal crash of Indonesia Air Asia flight QZ8501 on 28 December 2014."



Wesentlich dramatischer ist der Absturz eines A320 über der Java See. Ursache war eine **gebrochene Lötstelle** in der RTLU-Einheit (Ruderbegrenzungssystem), wie spätere Untersuchungen zeigten.

Quelle: Ellis Taylor, Cirium Dashboard, 01.12.2015



## Kleine Ursache – große Wirkung

*"Dialog während der Mondlandung (Apollo 11) zwischen Neil Armstrong (Eagle/ Tranquility Base) und Charles Duke (CAPCOM/Verbindungssprecher)"*

ARMSTRONG: Und, Houston, unsere Missionsuhr zeigt jetzt 902:34:47 an und steht. Die Uhr zeigt Unsinn an.

DUKE: Verstanden. Die Missionsuhr steht. Es ... oder setzt ihn zurück und versucht wieder zu starten. ...

ARMSTRONG: Okay. Wir haben beides versucht. Wenn der Sicherungsschalter drin ist und ich ihn zurücksetze, bekomme ich 902:04:40. Wenn ich jetzt loslasse, bekomme ich 902:04:49. Ich nehme die Sicherung noch mal raus und dann wieder rein.

ARMSTRONG: Ich habe die Sicherung geschaltet und bekomme alles Neunen. ...

DUKE: Tranquility, Houston. Wir werden das Problem mit dem Ereigniszeitmesser – Korrektur – der Missionsuhr untersuchen und sind sofort wieder bei euch.

*Frank O'Brien (NASA/JPL) schreibt: Das Schalten der Sicherung hat sicher deswegen funktioniert, weil die Ursache höchstwahrscheinlich eine schwache Lötverbindung war. Diese Lötverbindung hat sich aufgrund der Wärme ausgedehnt, ist gebrochen und der Stromkreis wurde unterbrochen. Durch das Ziehen der Sicherung konnte das System abkühlen, die Lötstelle zog sich zusammen und der Bruch hat sich wieder geschlossen.*

Quelle: NASA-Protokoll, 20. Juli 1969

## Begriffe:

### Qualität

Grad, in dem ein Satz inhärenter **Merkmale Anforderungen** erfüllt.  
(DIN EN ISO 9000)

### Risiko

Ein Risiko (*auch Schadens Erwartungswert*) ist eine nach Häufigkeit (*Eintrittserwartung*) und Auswirkung (*Schadenshöhe*) bewertete Bedrohung eines zielorientierten Systems.

### Gefahr

Sachlage, bei der das Risiko **größer als das Grenzkrisiko** ist, wobei unter Grenzkrisiko das größte noch vertretbare Risiko verstanden wird.

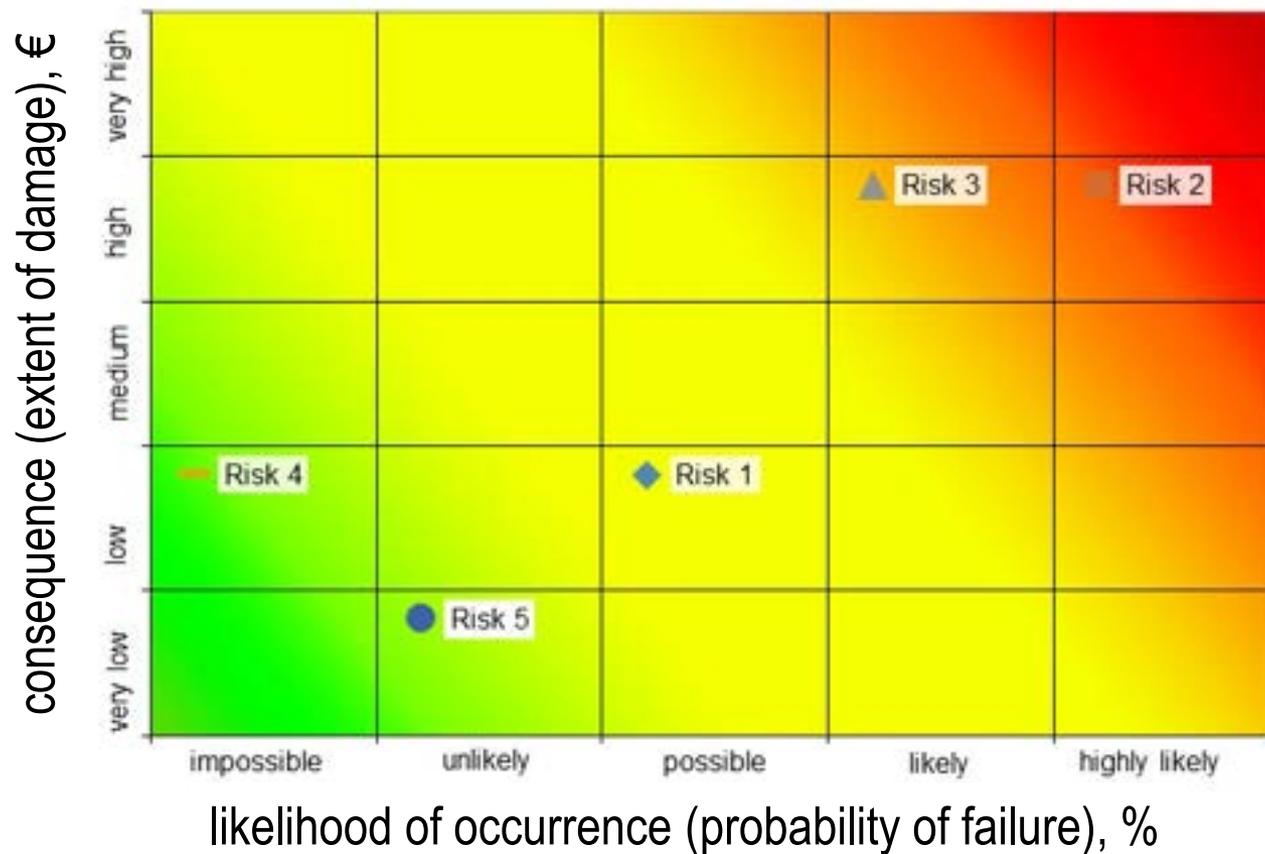
### Sicherheit

**Abwesenheit von Gefahr** (DIN VDE 31 000/2).

# Risiko

# Was ist Risiko?

$$\text{Risk} = \text{Consequence} \times \text{Likelihood}$$



# Risiken von Kraftwerkstechnologien

Atomkraft vs. Kohle



## **Fukushima 2011**

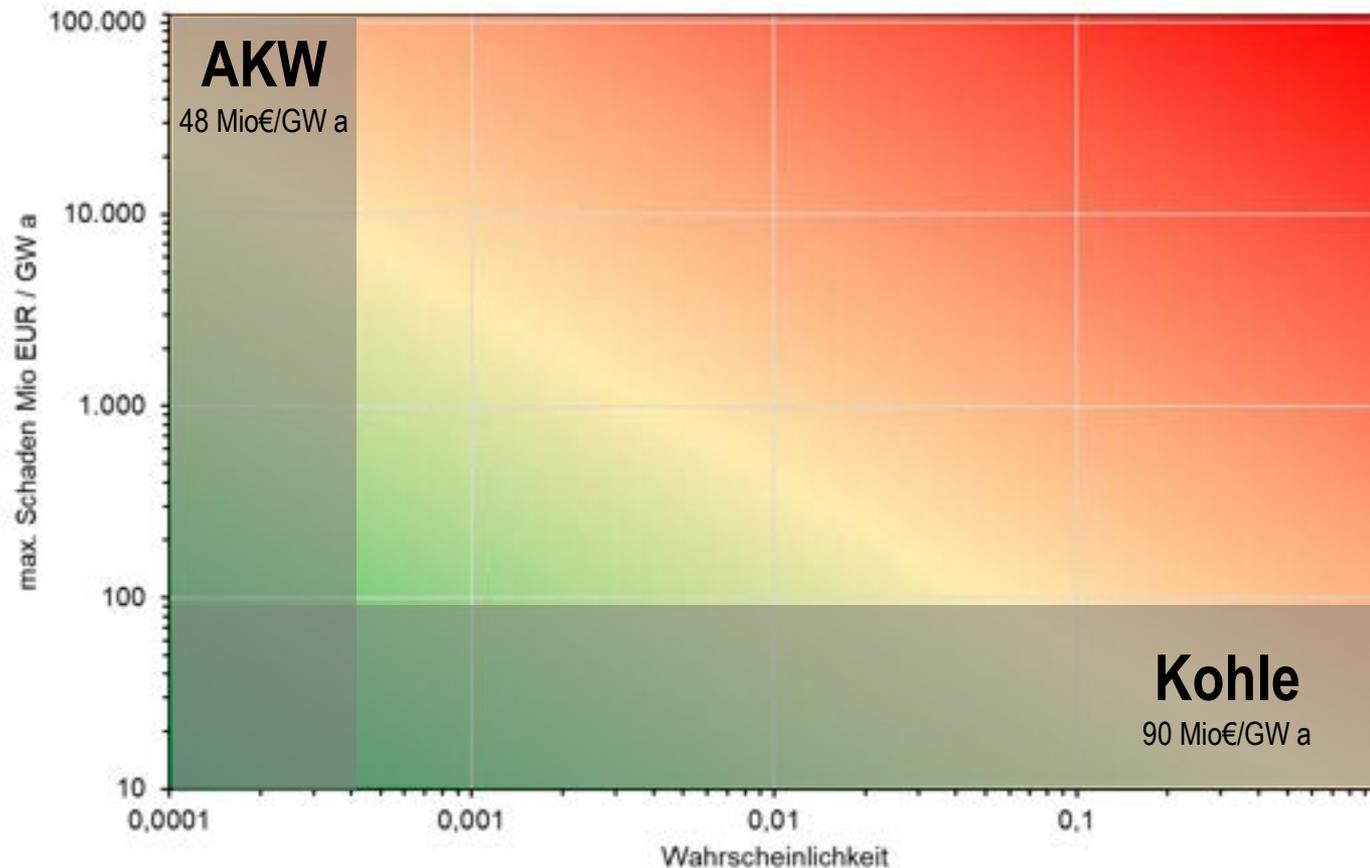
Reaktorkatastrophe in Folge eines Erdbebens und eines darauf folgenden Zunamis, Schaden ca. 100 Mrd. EUR

## **"Die wahren Kosten der Kohle"**

Greenpeace Studie von 2008  
jährliche Schaden durch Kohleverfeuerung  
ca. 360 Mrd. EUR

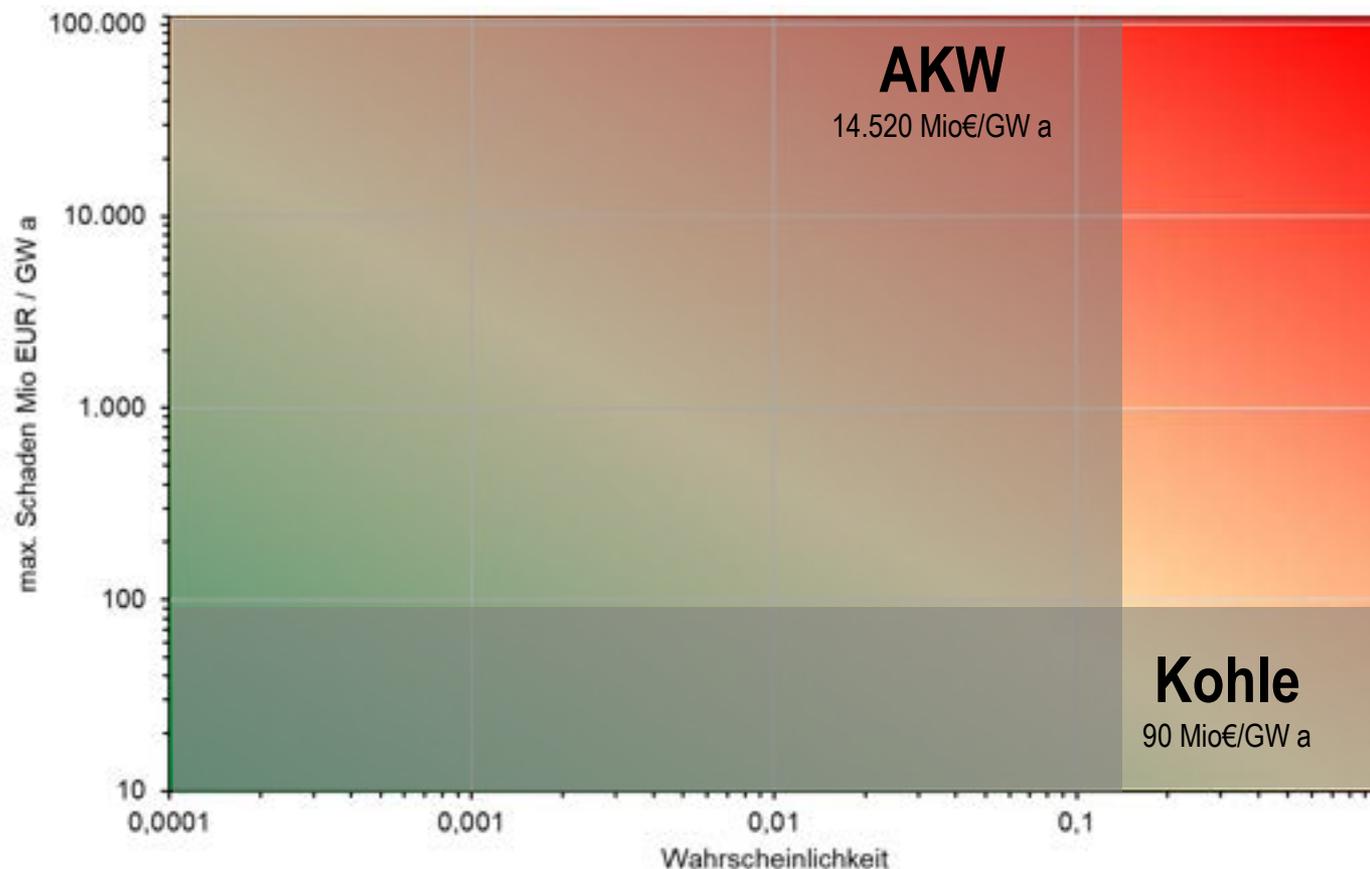
# Risiken von Kraftwerkstechnologien

Annahmen: 440 AKW, ca. 400 GW, 1GAU = 100 Mrd. EUR (ref. Fukushima), Ausfallrate =  $10^{-6}/a$   
 Kohle ca. 4000...5000 GW,  $CO_2 = 35$  Mrd. t/a, Schaden = 360 Mrd. EUR/a (ref. Greenpeace)

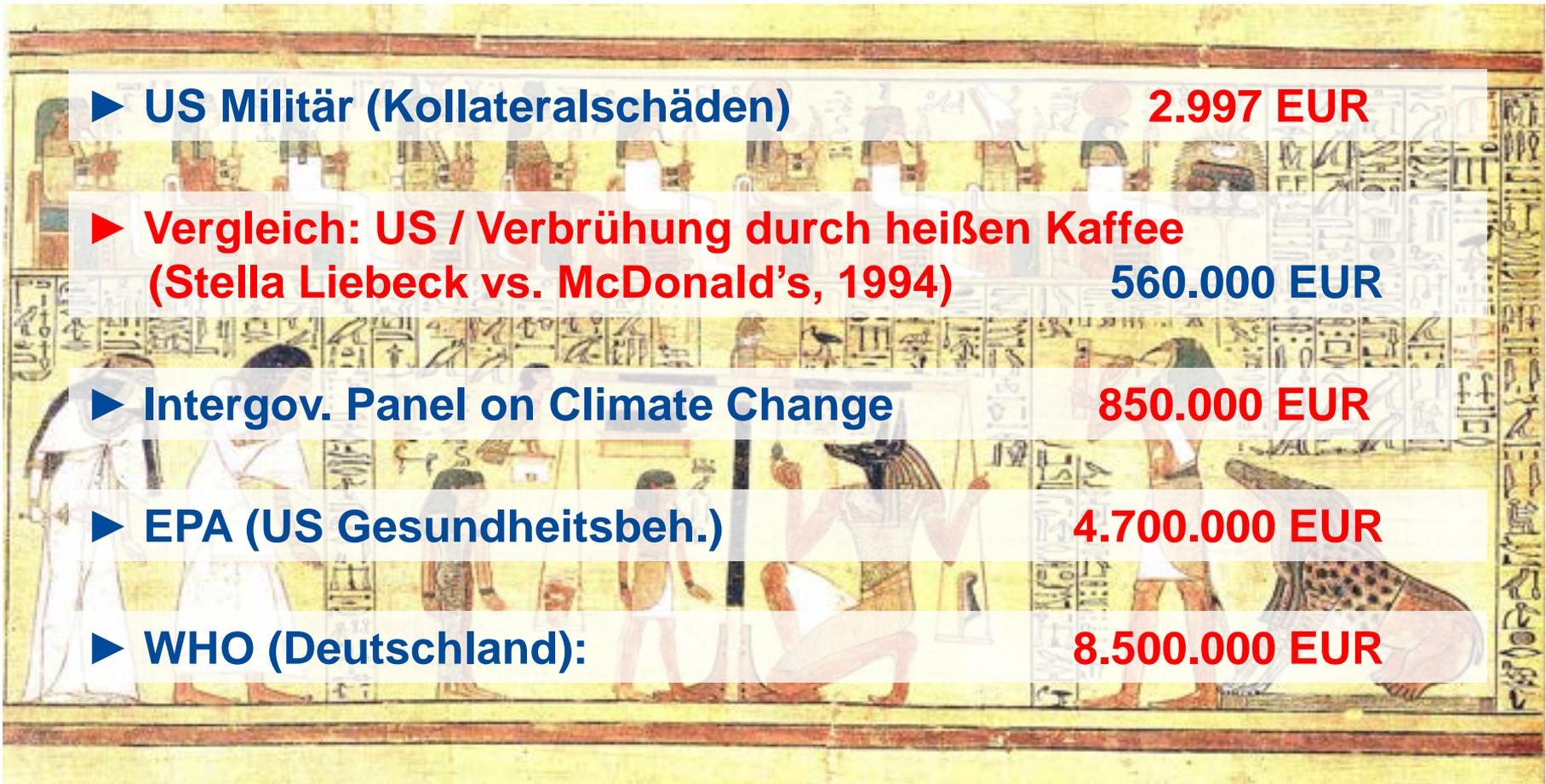


# Risiken von Kraftwerkstechnologien

Annahmen: 440 AKW, ca. 400 GW, 1GAU = 100 Mrd. EUR (ref. Fukushima), **Ausfallrate =  $3 \cdot 10^{-4}/a$**   
 Kohle ca. 4000...5000 GW, CO<sub>2</sub> = 35 Mrd. t/a, Schaden = 360 Mrd. EUR/a (ref. Greenpeace)



## Kann man den "Wert" eines Menschen beziffern? (NEIN!)

- 
- ▶ **US Militär (Kollateralschäden)** **2.997 EUR**
  - ▶ **Vergleich: US / Verbrühung durch heißen Kaffee (Stella Liebeck vs. McDonald's, 1994)** **560.000 EUR**
  - ▶ **Intergov. Panel on Climate Change** **850.000 EUR**
  - ▶ **EPA (US Gesundheitsbeh.)** **4.700.000 EUR**
  - ▶ **WHO (Deutschland):** **8.500.000 EUR**

Vorstellung vom Totengericht im alten Ägypten - Thot mit der "Waage der Gerechtigkeit"

Nicht alle Risiken lassen sich ökonomisch bewerten!

In der Medizin werden Überlebens- bzw. Sterberaten (**in der Technik - Ausfallraten**) miteinander verglichen.

## Begriffe:

### Zuverlässigkeit

Fähigkeit eines Systems, für eine gegebene Zeit korrekt zu arbeiten.

... ist einer der **zeitbezogenen Aspekte der Qualität**. (DIN EN ISO 8402)

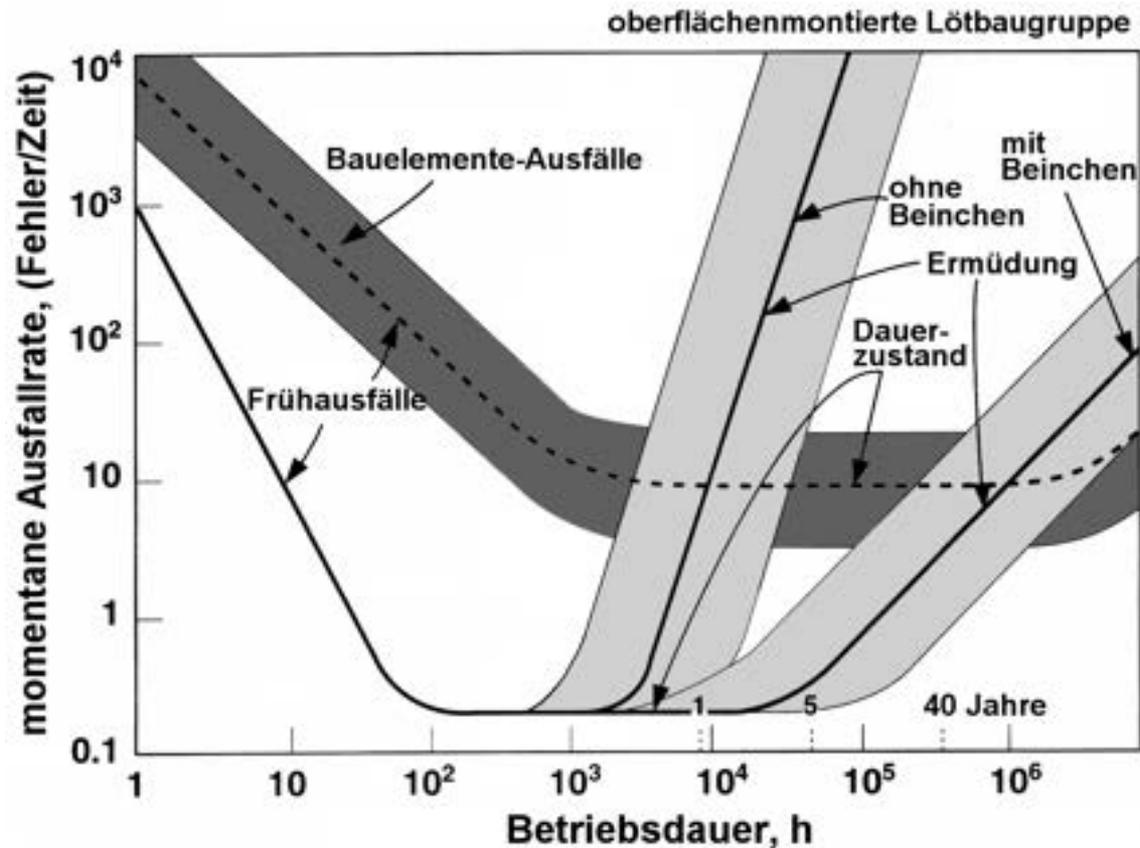
*mathematisch:* Die Funktions- oder Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  gibt die **Wahrscheinlichkeit** an, mit der eine Betrachtungseinheit erst **nach einem Zeitpunkt  $t_0 + \Delta t$  ausfällt**.

### Ausfallrate

... ist die **Anzahl von gleichen Produkten** mit dem Alter  $t$ , die im Zeitintervall  $dt$  ausfällt, bezogen auf die zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgefallenen Produkte. Damit ist die Ausfallrate die **Wahrscheinlichkeit**, dass ein Produkt, das bis zum Zeitpunkt  $t$  noch nicht ausgefallen ist, zum Zeitpunkt  $t+dt$  **ausfallen wird**.

# Zuverlässigkeit

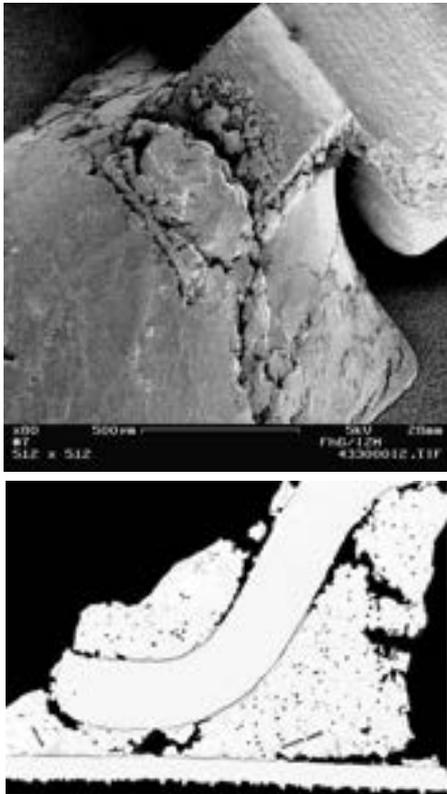
# Ausfallrate



Quelle: IPC-SM-785

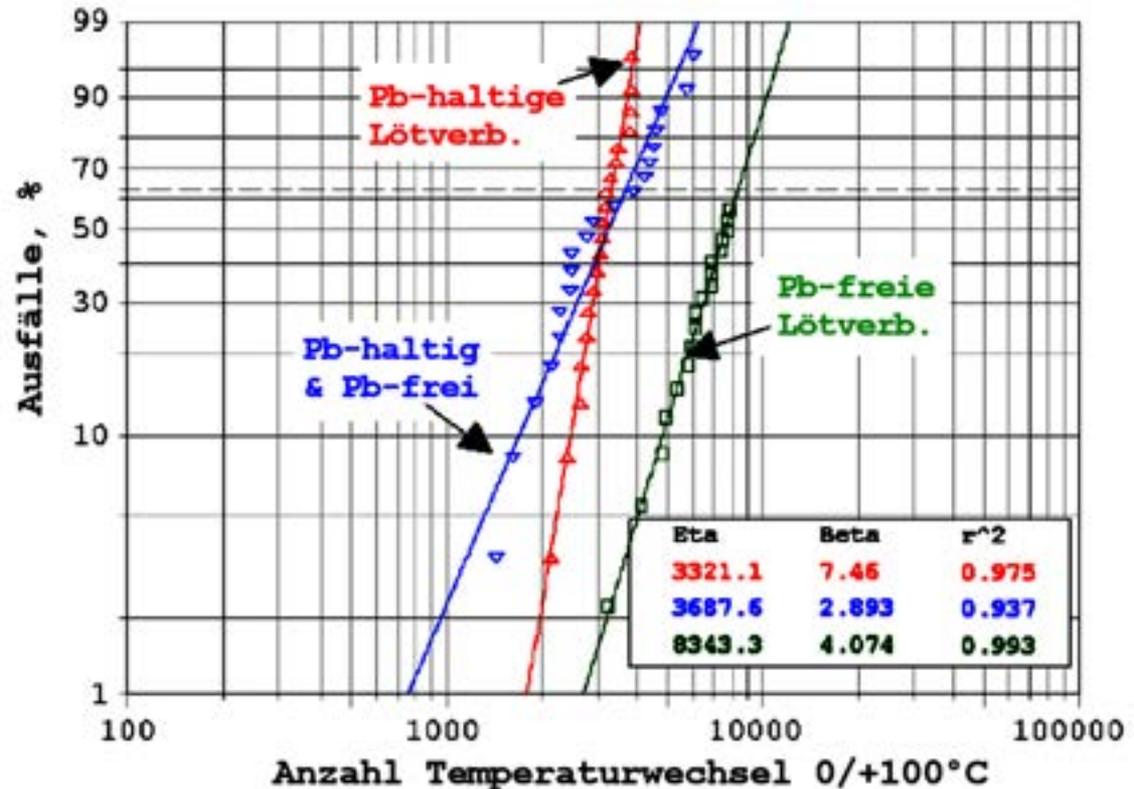
## Typischer Verlauf der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen

# Zuverlässigkeitsprüfung von Weichlötverbindungen



Lötverbindungen nach Temperaturwechseltests

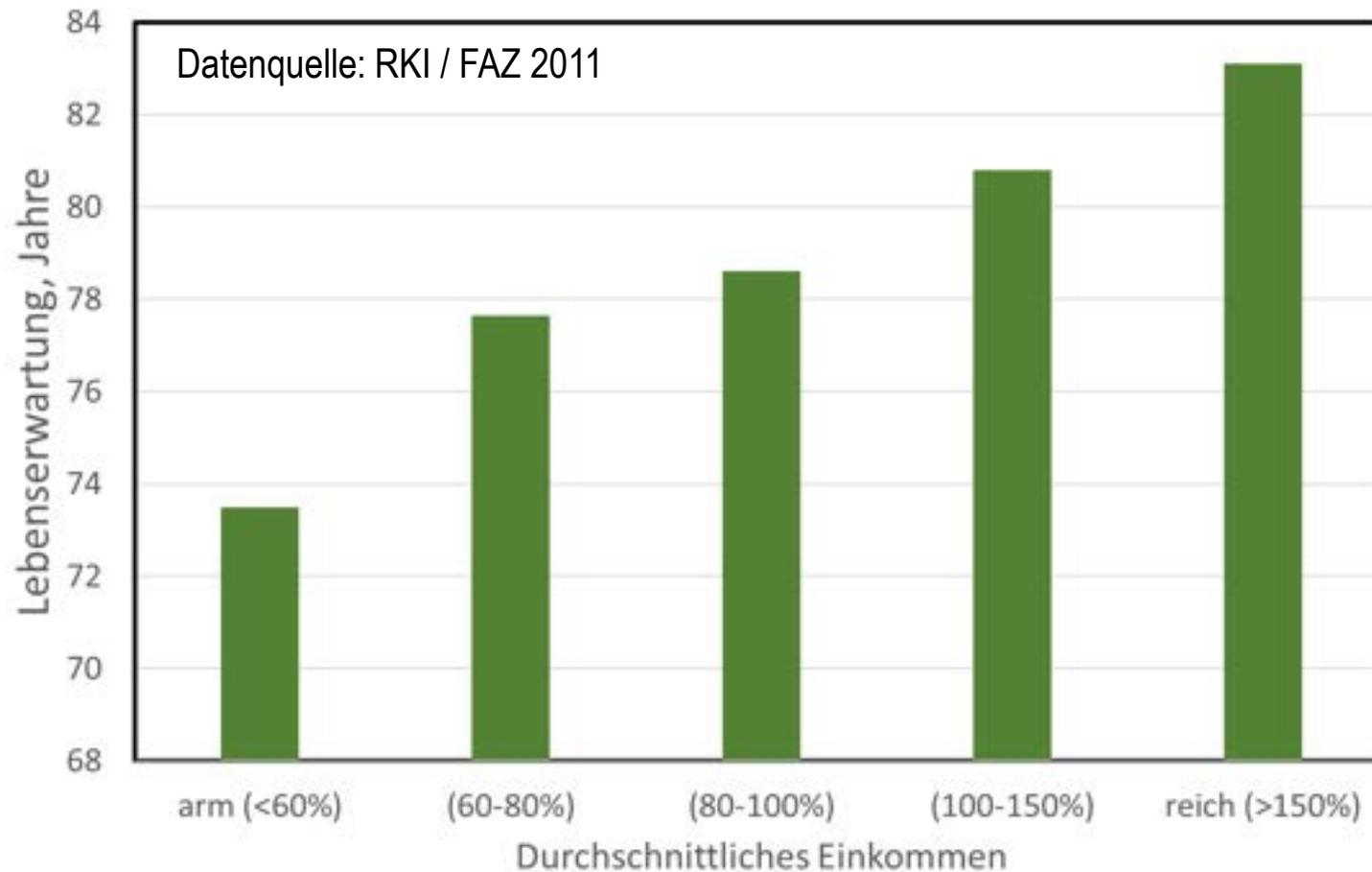
Quelle: K. Halser QPZ/IZM



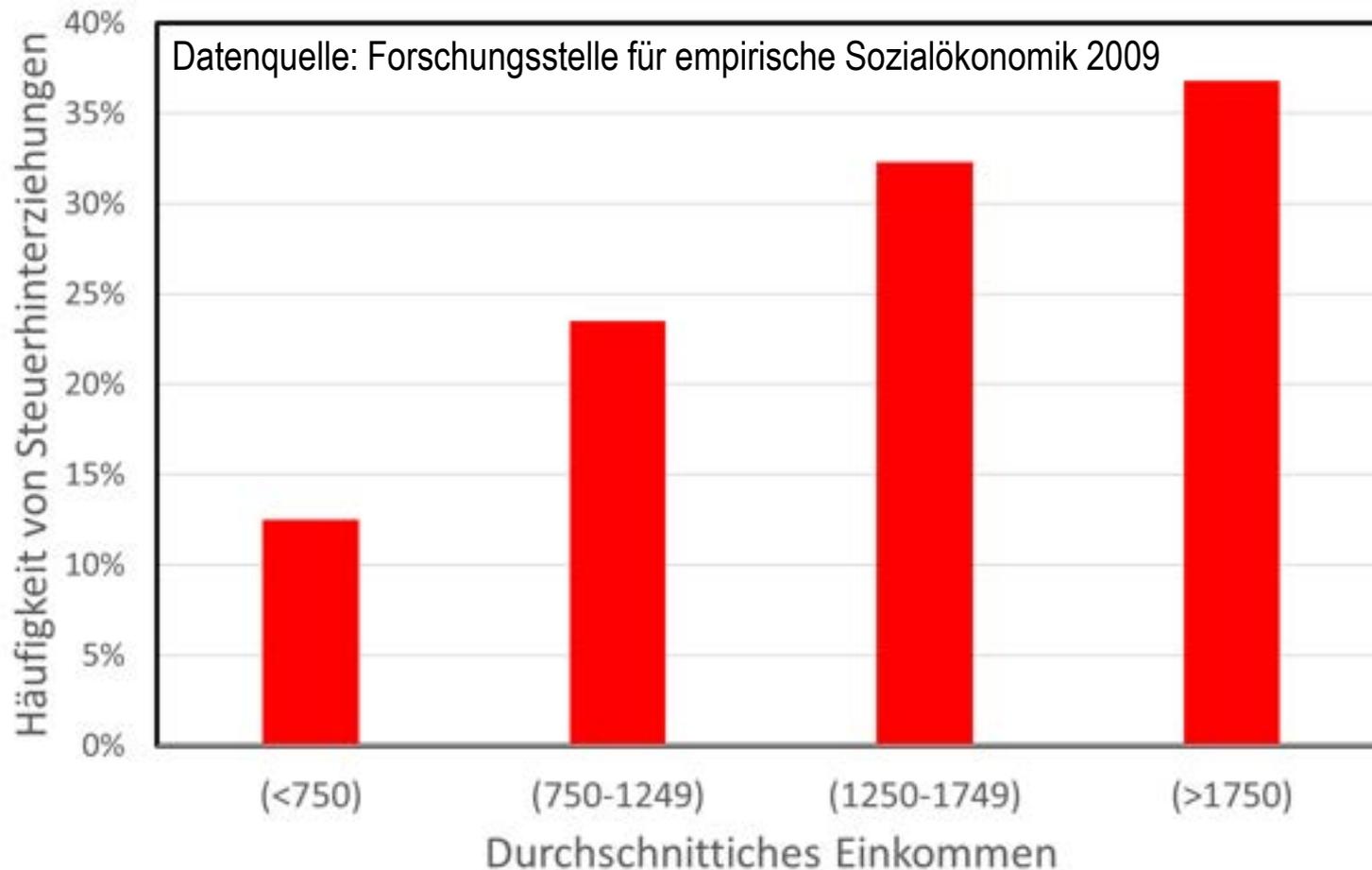
Weibull-Diagramm zur Bewertung von Ausfällen von Weichlötverbindungen

Quelle: Carol Handwerker et al. (NIST), SMTA - Chicago 2003

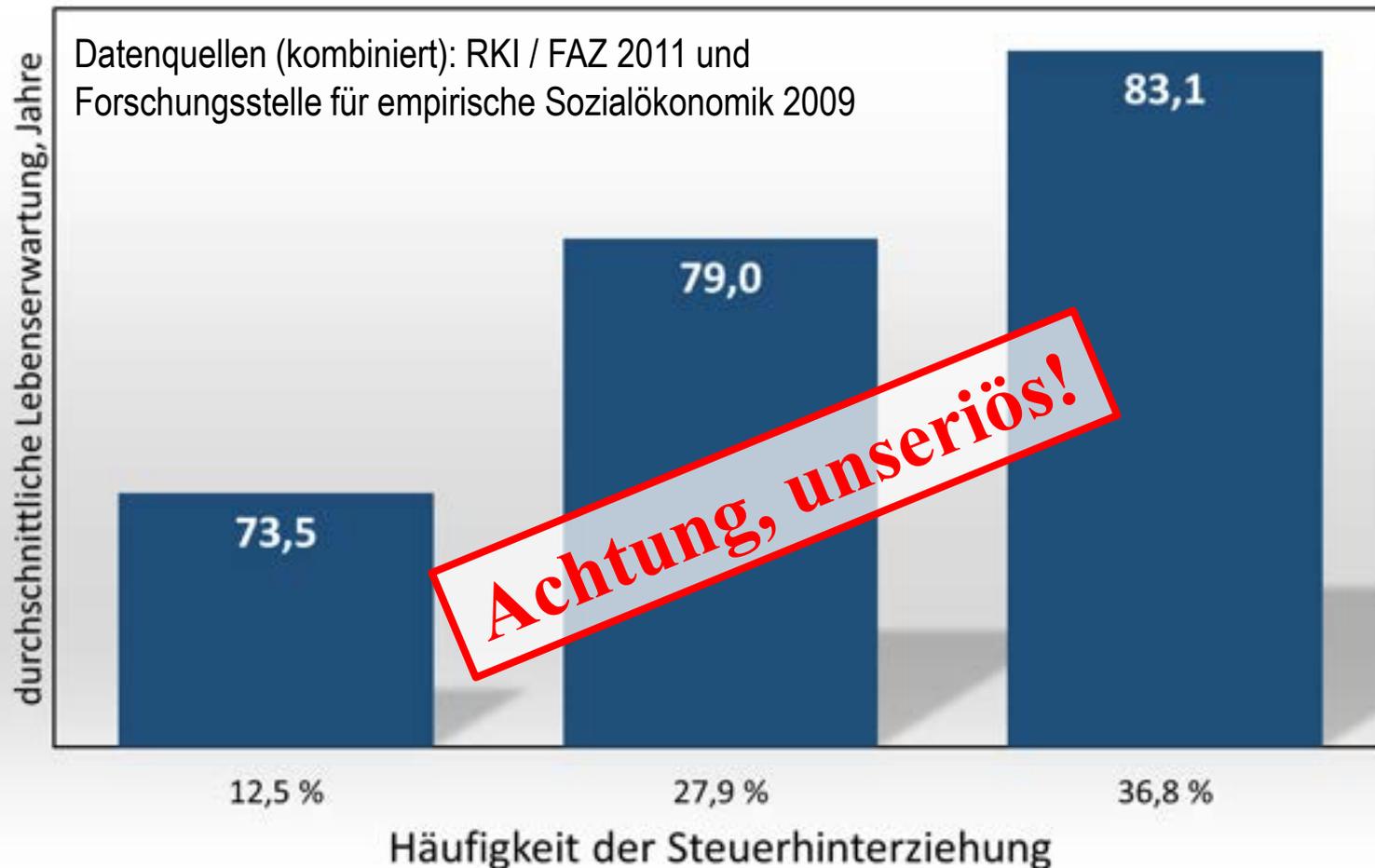
## Hängt die Lebenserwartung vom Einkommen ab?



## Steigt auch die Steuerkriminalität mit dem Einkommen?



## Ergo: Lebt man durch Steuerbetrug länger?



Eine statistische Korrelation sagt nichts  
über Ursache und Wirkung aus!

## Space Shuttle Missionen (insg. 135, von 1981 bis 2011)



28

10

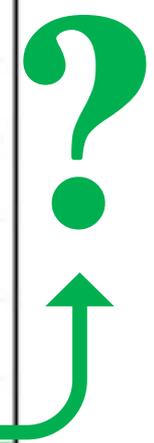
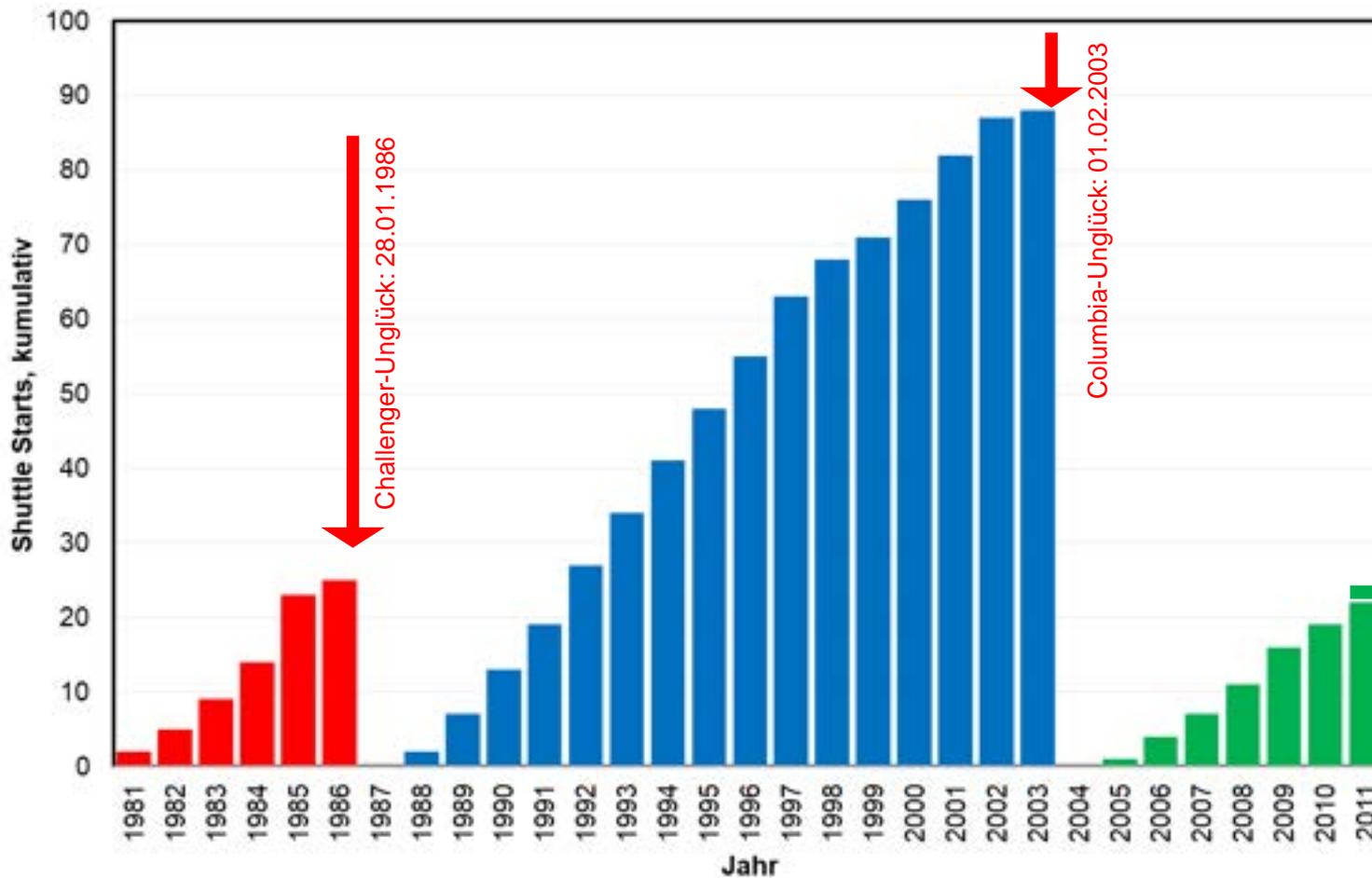
39

33

25

Ausfälle: 40% der Shuttles? 1,5% der Missionen? 0,07 pro Jahr?

## Shuttle Starts (insg. 135)



Um Ausfallraten seriös zu ermitteln, ist  
eine möglichst **große Anzahl** von  
**gleichen Produkten** zu untersuchen!

## Die "Truthahn Illusion" (nach Prof. Gigerenzer)

Laplace-Regel  $p(A) = \frac{\text{Anzahl positiver Ergebnisse}}{\text{Anzahl möglicher Ergebnisse}}$

### Überlebenswahrscheinlichkeit:

1. Tag	1/2	50%
2. Tag	2/3	66%
3. Tag	3/4	75%
4. Tag	4/5	80%

usw.

100. Tag

99% ?



(Gilt nur bei bekannter Anzahl gleich wahrscheinlicher Ereignisse!)

## Die "Truthahn Illusion" (nach Prof. Gigerenzer)

Tag Nr. 100

26. November 2020 - Thanksgiving



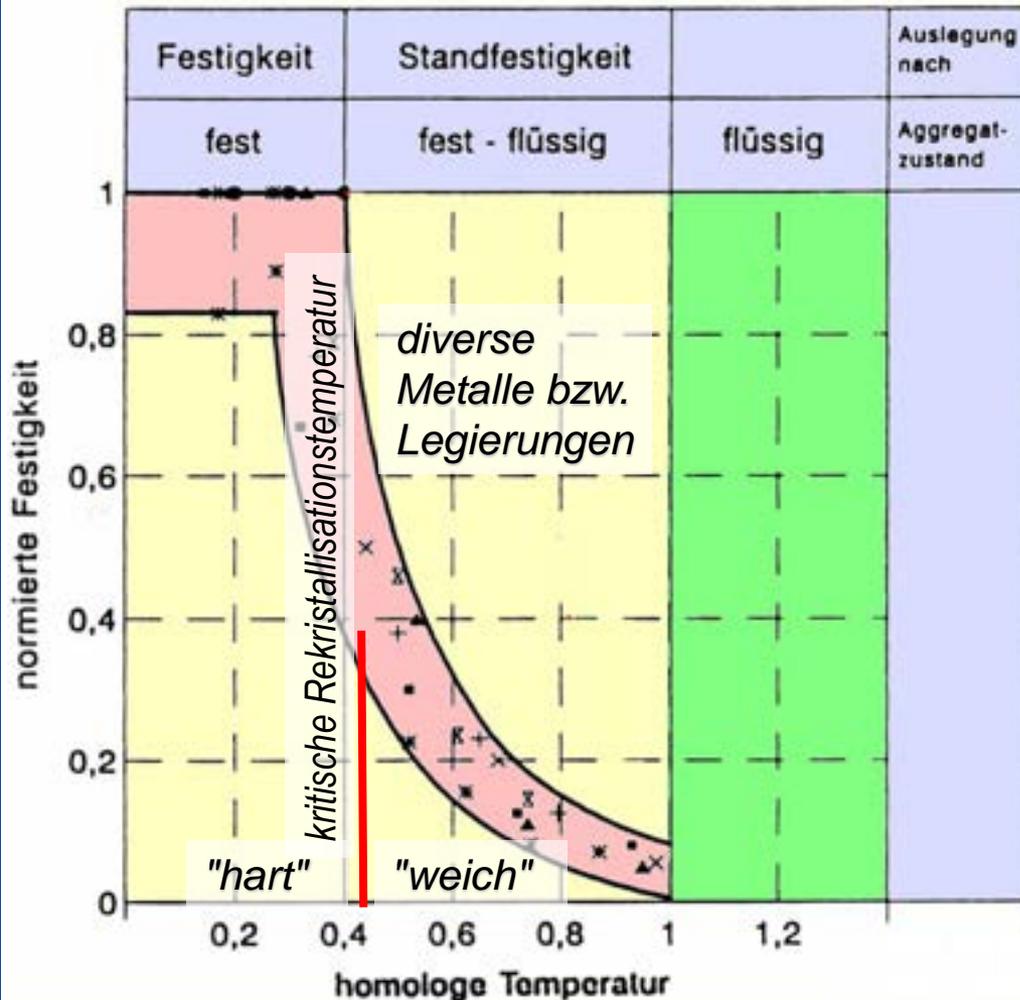
Risiken (Wahrscheinlichkeiten)  
lassen sich nur berechnen, wenn alle  
Einflussfaktoren bekannt sind!

## Anforderungen an elektronische Geräte

Parameter	Consumer	Industrial	Automotive
Temperaturbereich	0°C bis +40°C	-10°C bis +70°C	-40 bis +85 / 125 / 155 / ..°C
Betriebsdauer	1 - 3 Jahre	5 - 10 Jahre	10 - 15 Jahre
Vibration	vernachlässigbar	0 - 1000 Hz	0 - 2000 Hz
Beschleunigung	vernachlässigbar	50 m/s <sup>2</sup>	500 m/s <sup>2</sup>
Chemische Einflüsse	kaum	Umwelt	Fahrzeug und Umwelt
Feuchte	vernachlässigbar	Umwelt	0 % r. F. bis Watfähigkeit
Tolerierte Feldausfallmenge	< 10 %	< 1 %	Ziel: Null-Fehler-Rate!
Dokumentation des Ausfallverhaltens	nein	bedingt	Ja
Langzeitversorgung	nein	bedingt (bis 5 Jahre)	MobiloLife: bis 30 Jahre

Quelle: W. Kempe, Daimler

# Festigkeit in Abhängigkeit von der (homologen) Temperatur



## Homologe (normierte) Temperatur

$$\Theta = \frac{T_B}{T_S}$$

$T_B$  = Betriebstemperatur  
 $T_S$  = Schmelztemperatur

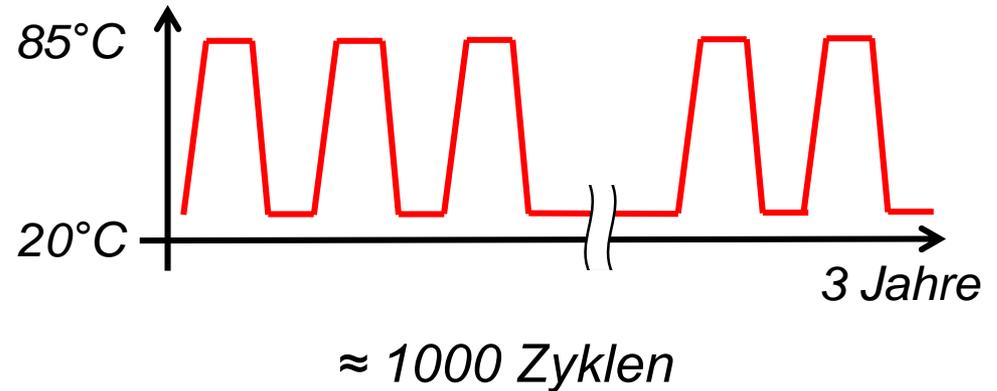
Die *normierte Festigkeit* aller Metalle und Metallegierungen hängt in gleicher Weise von der *homologen Temperatur* ab:

Bis zu einer homologen Temperatur von etwa 0,4 verändert sich die Festigkeit nur unwesentlich.

Über dieser kritischen Rekristallisationstemperatur von 0,4 nimmt die Festigkeit mit steigender Temperatur rapide ab.

nach: K. Wittke: Löten. Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, 10/1980

## Lebensdauer elektronischer Geräte - Alterung



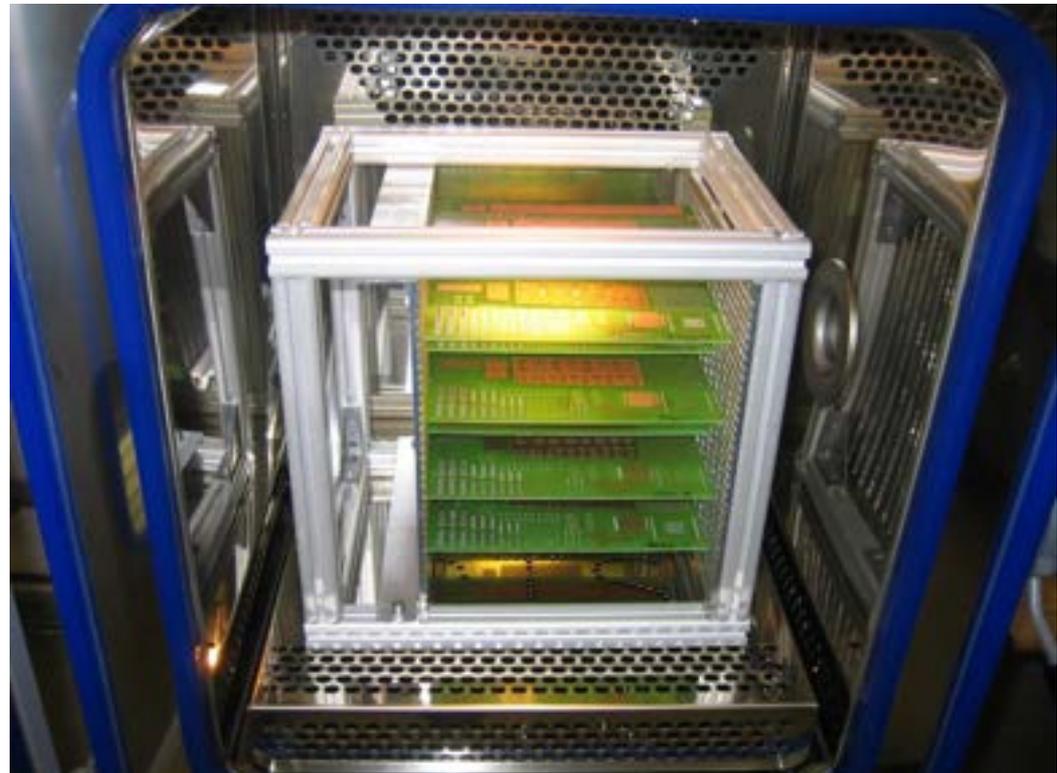
**Alterung durch Temperaturwechsel – Ein-/Aus-Schaltzyklen**

## Beschleunigte Alterung durch extreme Temperaturen?



**Veränderung der Ausfallmechanismen begrenzt Prüftemperaturen,**  
z.B. Obergrenze:  $T_g$  der Leiterplatte (FR4)  $\approx 130^\circ\text{C}$   
z.B. Untergrenze:  $T_{\text{krit}}$  des Lotes (SAC)  $\approx -75^\circ\text{C}$

## Passiver Temperaturwechseltest



### 1-Kammer (Luft)

z.B. (45 min /  $-20^{\circ}\text{C}$ ) & (45 min /  $+150^{\circ}\text{C}$ ): 1000 Zyklen = 63 Tage

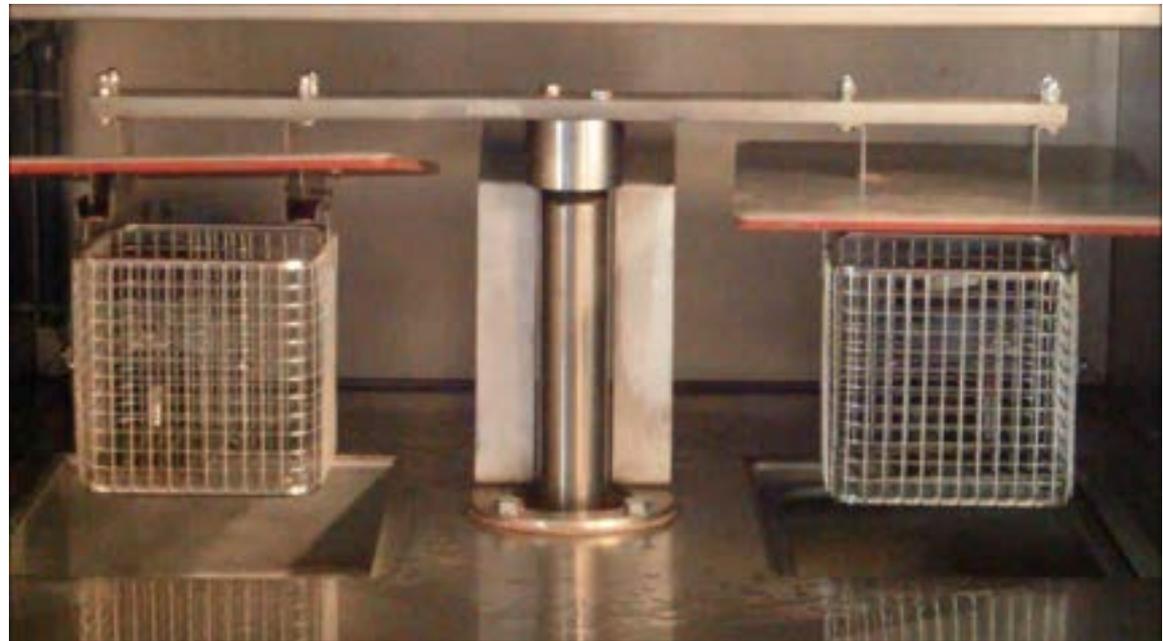
## Beschleunigte Alterung durch schnellere Temperaturwechsel?



**2-Kammer (Luft)**

z.B. (15 min /  $-40^{\circ}\text{C}$ ) & (15 min /  $+125^{\circ}\text{C}$ ): **1000 Zyklen = 21 Tage**

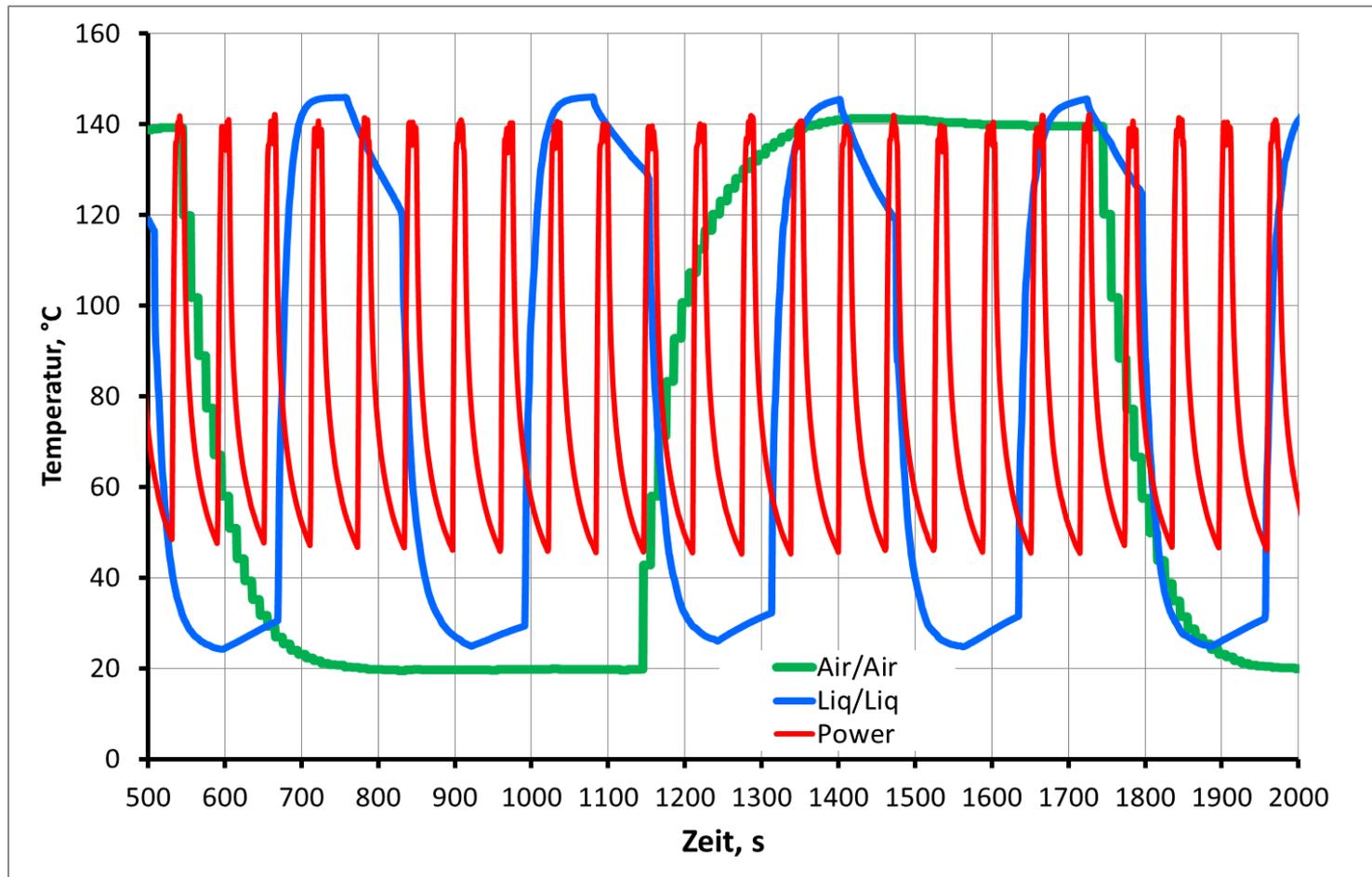
## Beschleunigte Alterung durch schnellere Temperaturwechsel?



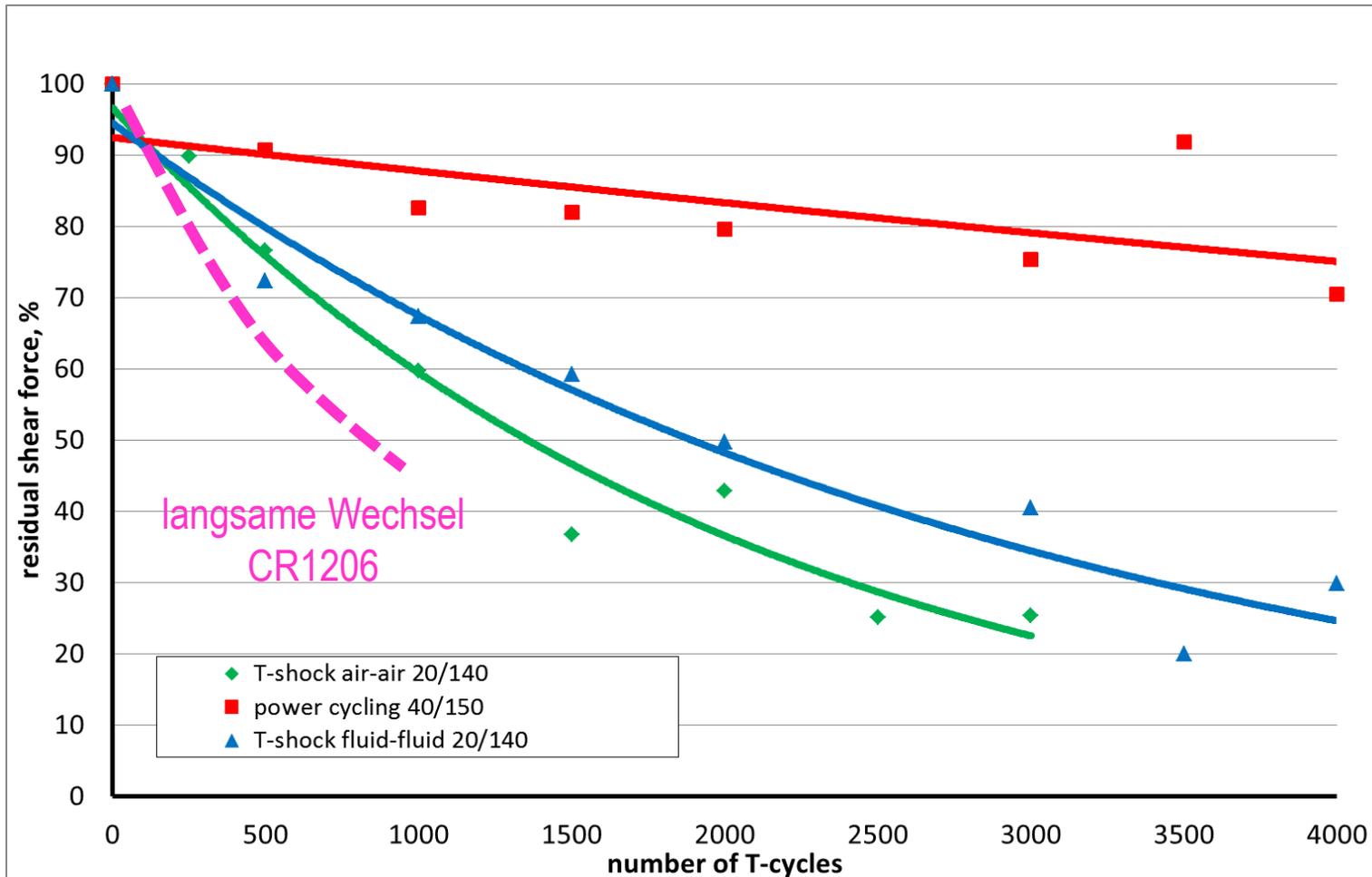
### Flüssig-flüssig Schocktest

z.B. (90s / 20°C) & (90s / 140°C) +2x70s Wechsel: **1000 Zyklen = 4 Tage**

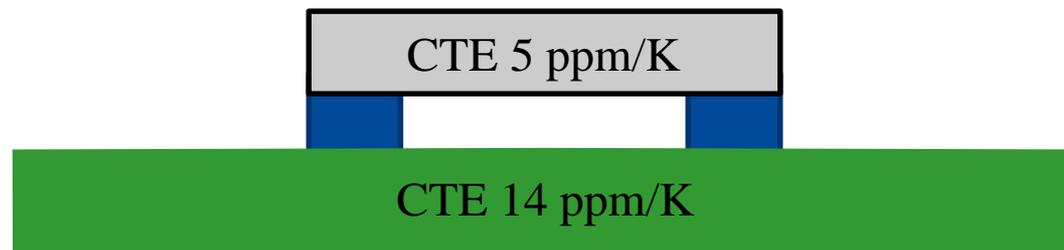
## Vergleich Temperaturwechseltest



# Schertest nach Temperaturwechseltest

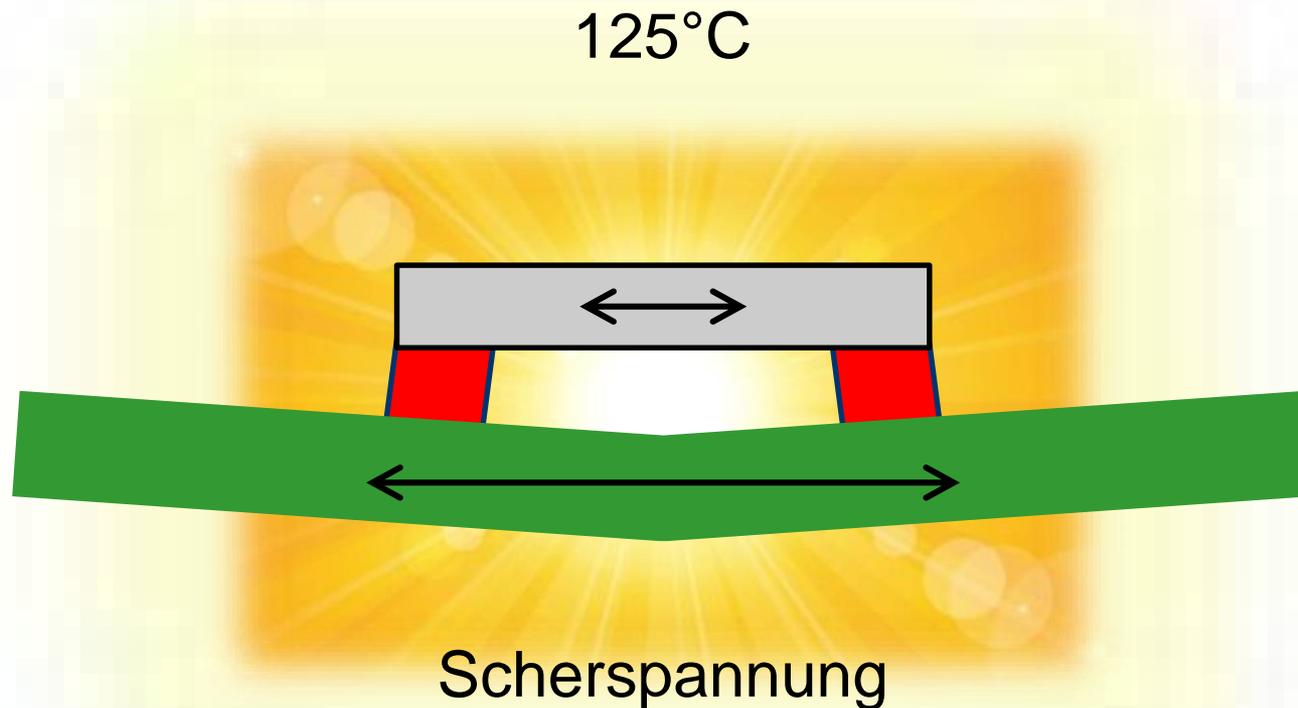


Raumtemperatur



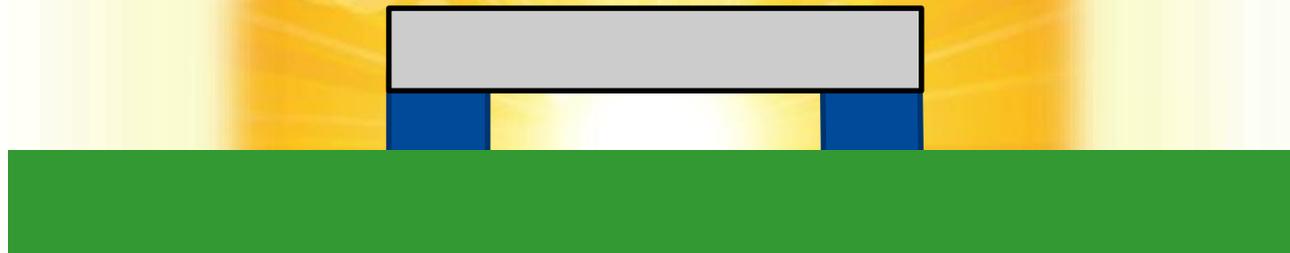
spannungsfrei

**Beanspruchung der Lötverbindungen**



## Beanspruchung der Lötverbindungen

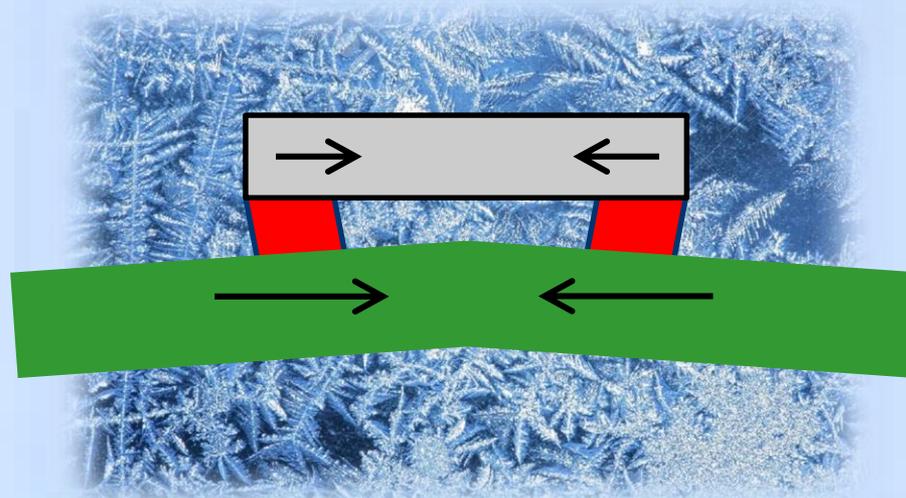
125°C



spannungsfrei - relaxiert

## Beanspruchung der Lötverbindungen

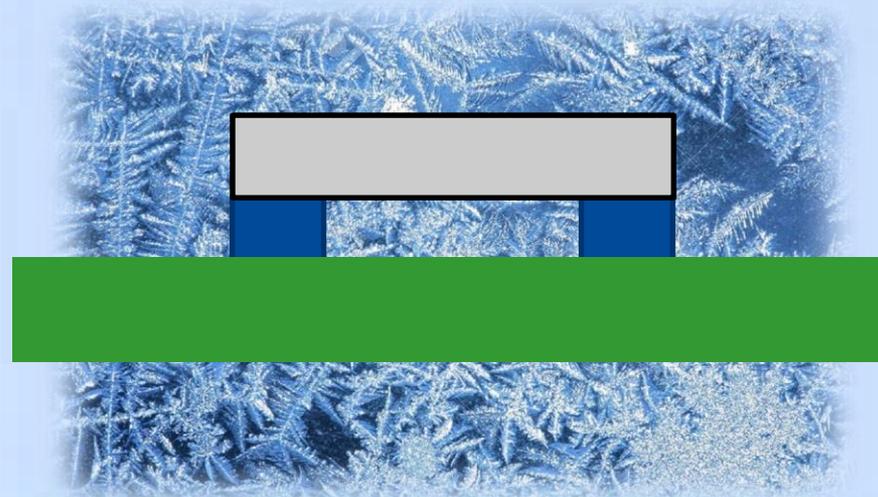
-40°C



Scherspannung

## Beanspruchung der Lötverbindungen

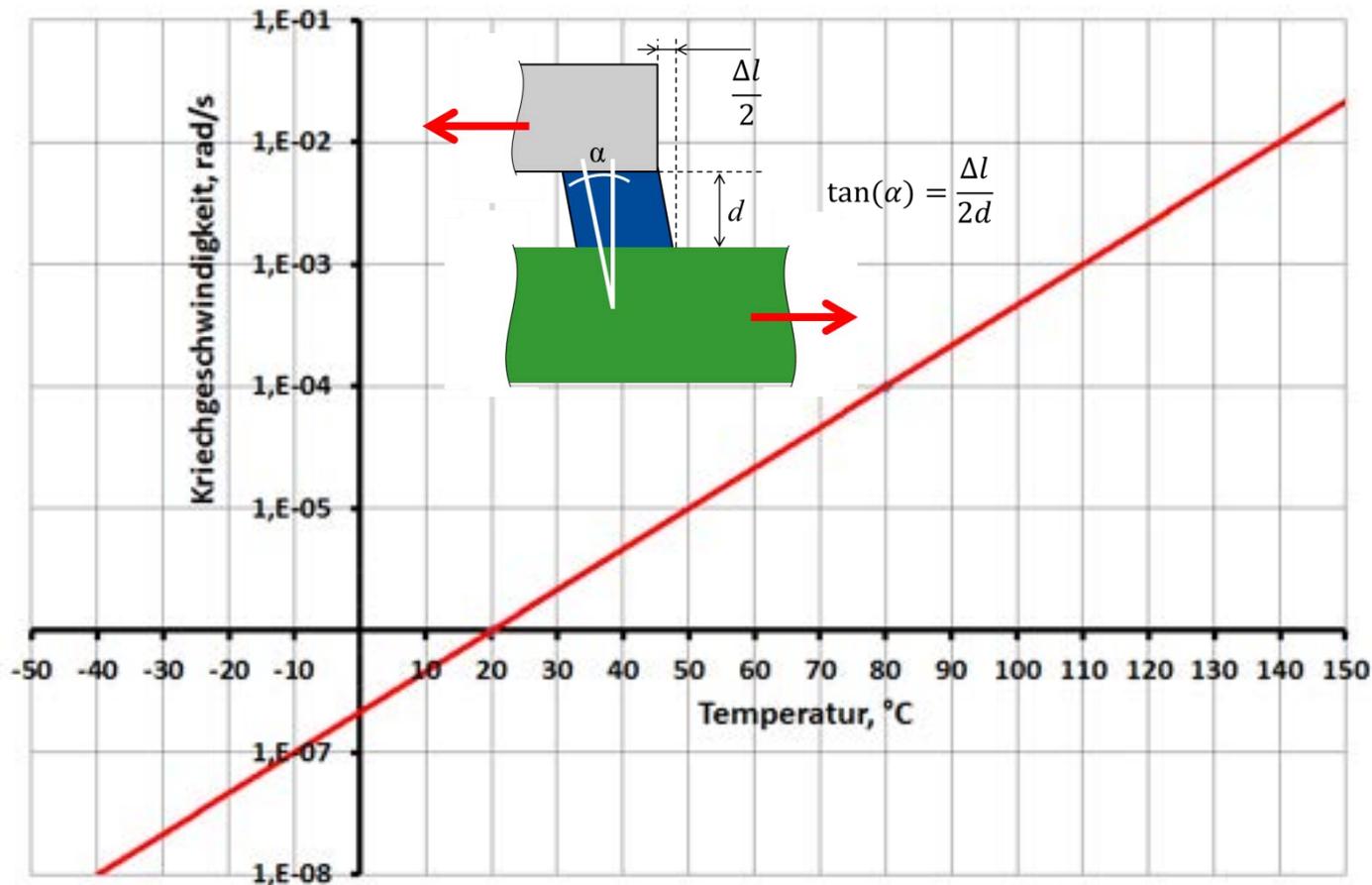
-40°C



spannungsfrei - relaxiert

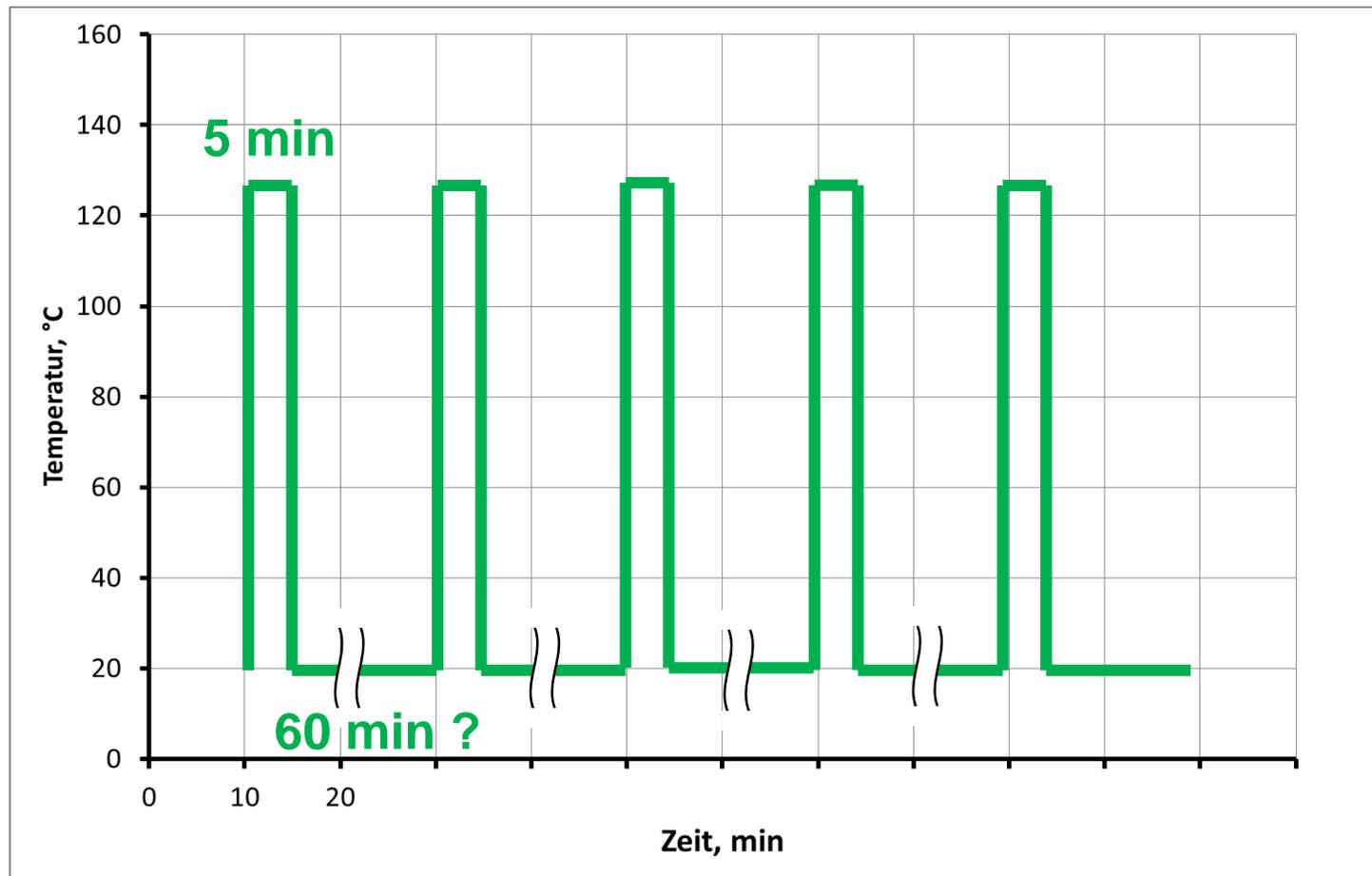
## Beanspruchung der Lötverbindungen

# Temperaturabhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit



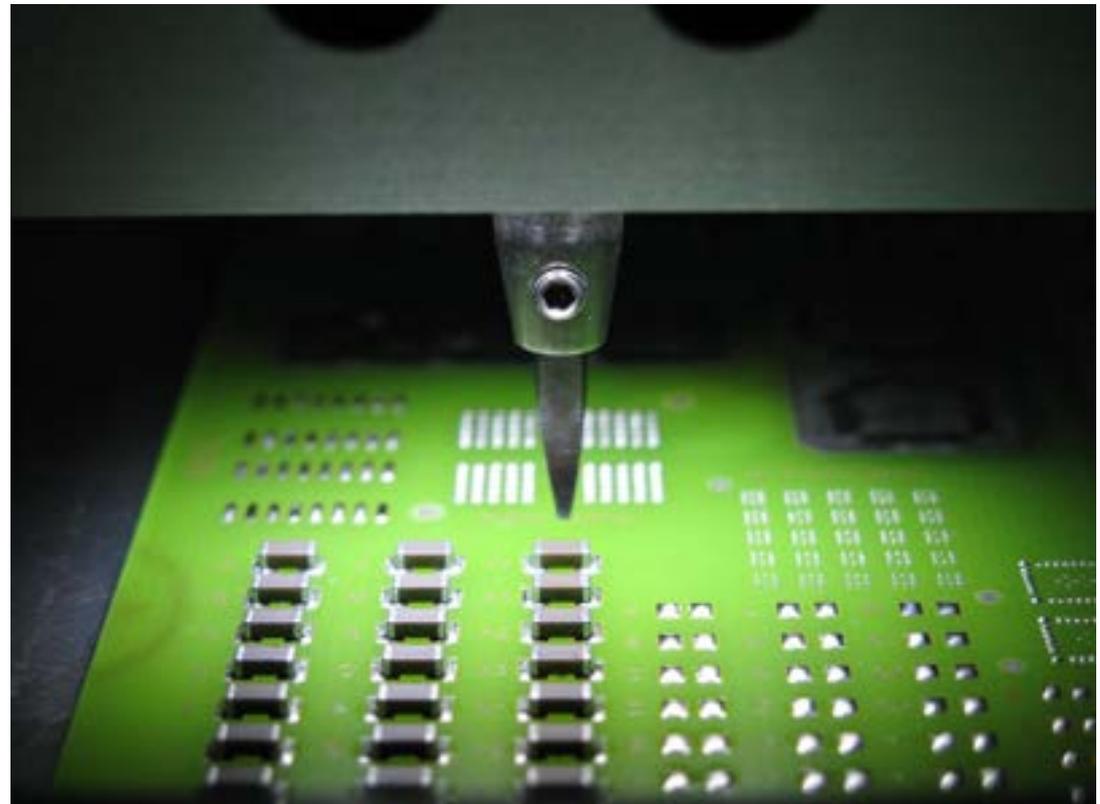
Daten aus M. Dusek / C. Hunt: NPL Report DEPC MPR 021

## Alternative: z.B. flüssig – flüssig?

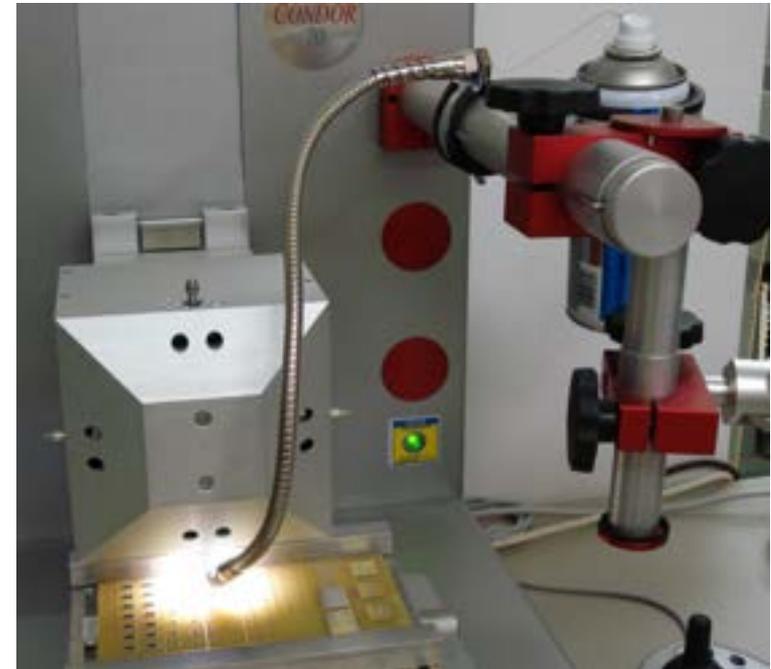


# Prüfmethoden

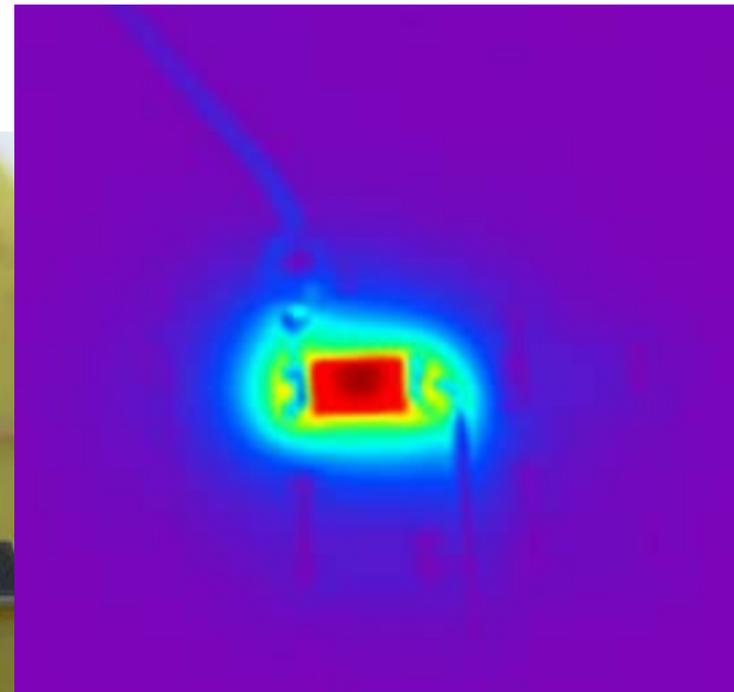
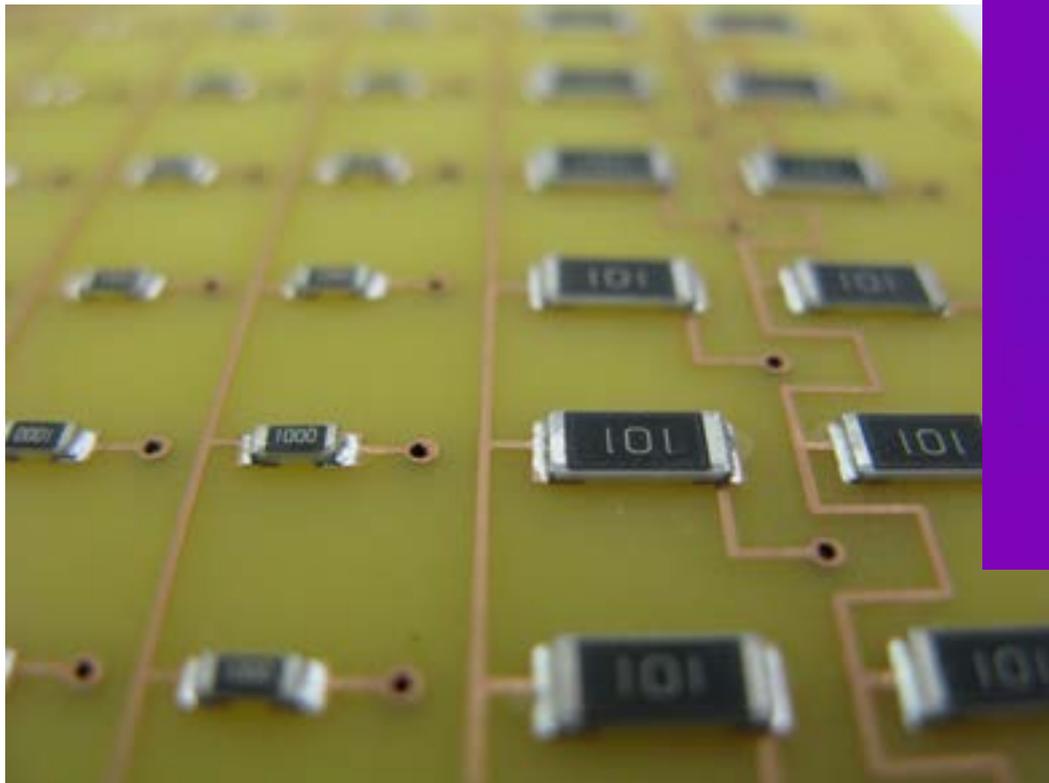
## Typischer Schertester (XYZTEC Condor) und SMD-Testbaugruppe



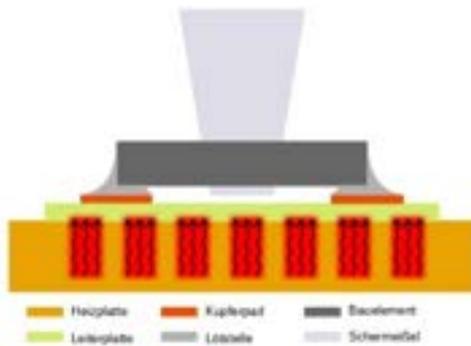
## Heiz- (Heißluftdüse) und Kühlvorrichtung (Kältespray) für den Schertest



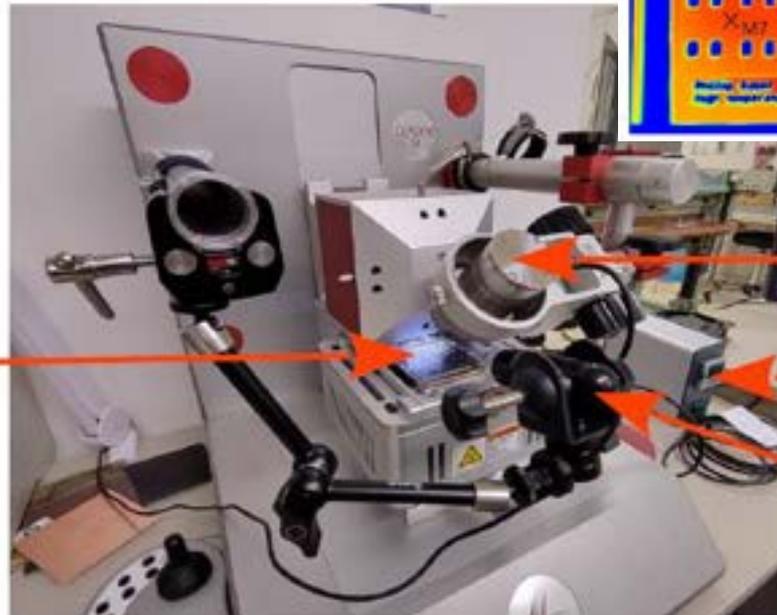
## Aktiv erwärmte SMD-Widerstände (Thermogramm CR 2512)



# Schertest mit Heiztisch



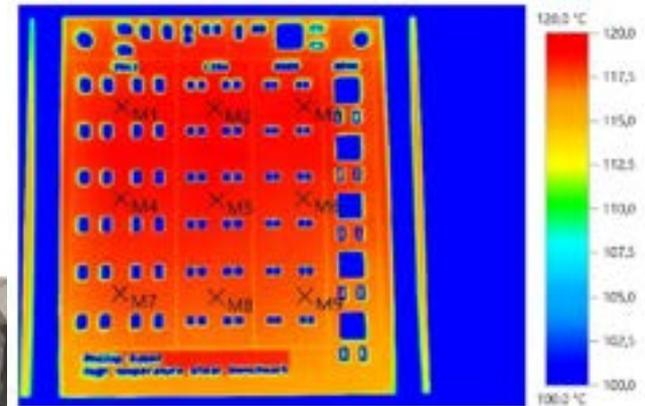
Heizplatte mit  
aufgelegtem  
Testboard



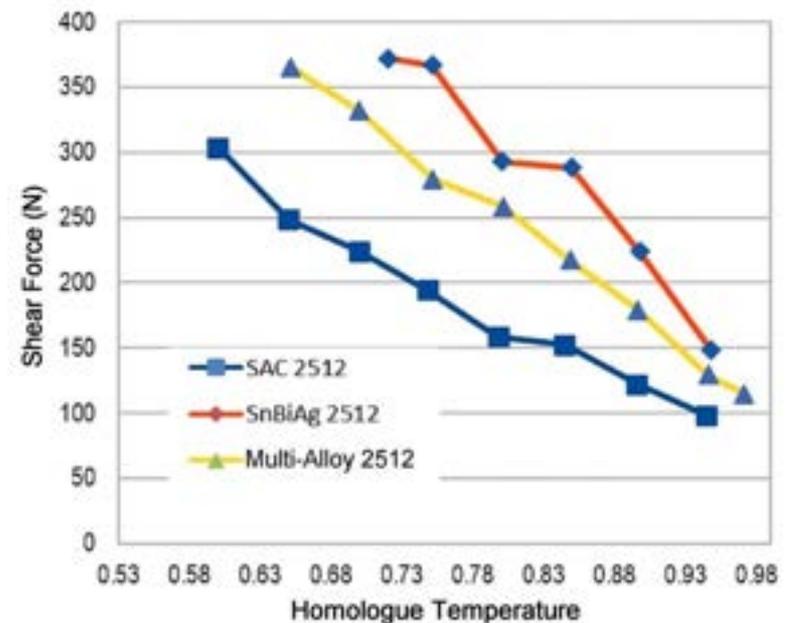
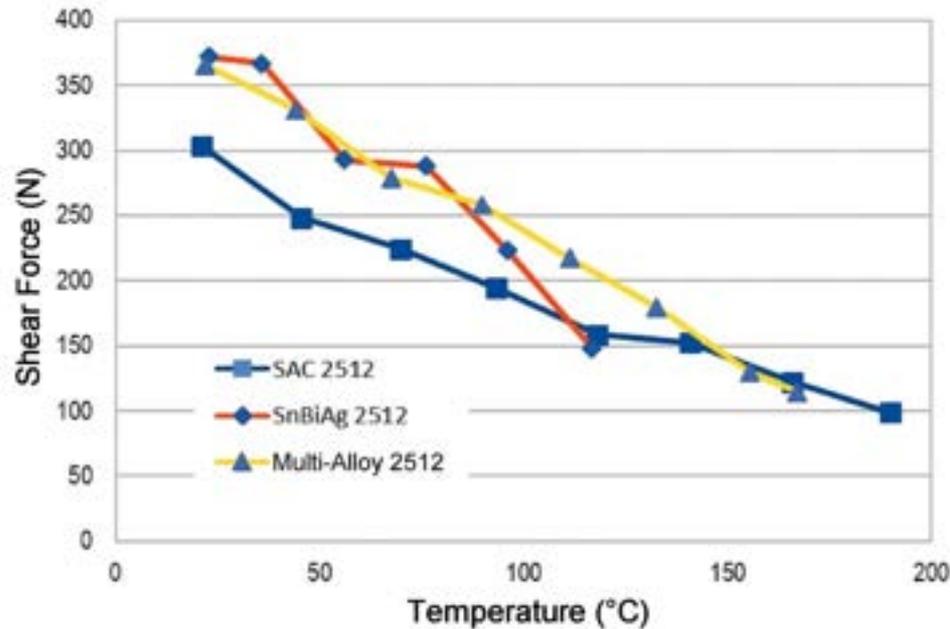
Pyrometer

Temperaturregler

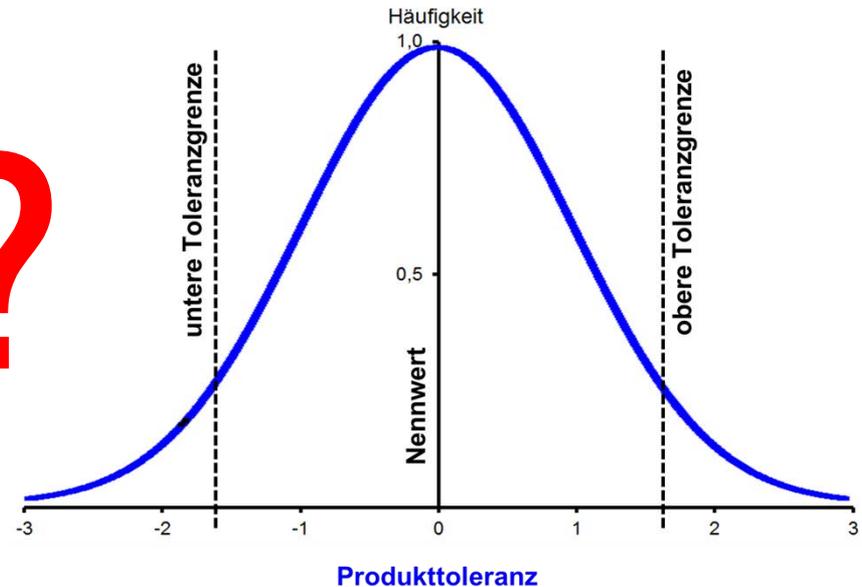
USB Kamera



# Temperaturabhängige Scherkräfte an Chipwiderständen CR2512 und verschiedene Lote



FAILURE IS NOT AN OPTION



**Failure is Always an Option!**

**Der Profi macht nur neue Fehler. Der Dummkopf wiederholt seine Fehler. Der Faule und der Feige machen keine Fehler.**

*Oscar Wilde*

GENE KRANZ

Das Motto gab der NASA-Flugdirektor während der havarierten Apollo 13 Mission aus, um die gesamte Crew lebendig zur Erde zurückzubringen – was auch gelang!

**Fehler sind unangenehm aber unvermeidbar. Manchmal hilft es, wenn man den Fehlern lustige Namen gibt.**

*M. Nowotnick*

### **Beispiele:**

*Popcorn-Effekt, Bleeding, Tombstone-Effekt, Manhattan-Effekt, Head-in-Pillow, Kissing Bond, Solder Beading, Graping, Leaching, Zinn-Whisker, Zinnpest, Lot-Krätze ....usw.*





# Fragen?