

# Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen und Schaltanlagen - Möglichkeiten und Risiken

Großmann, Steffen	TU Dresden
Löbl, Helmut	TU Dresden
Bölke, Dietmar	E.ON e.dis Demmin
Schäfer, Uwe	E.ON e.dis Demmin

EnInnov 2010 Graz, 11. Februar 2010



## Gliederung

### 1. Problematik

Situation, Herausforderungen, Fragestellungen

### 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Betriebsmitteln

kritische Stellen im Elektroenergieübertragungssystem

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

Alterungsmechanismen in elektrischen Verbindungen

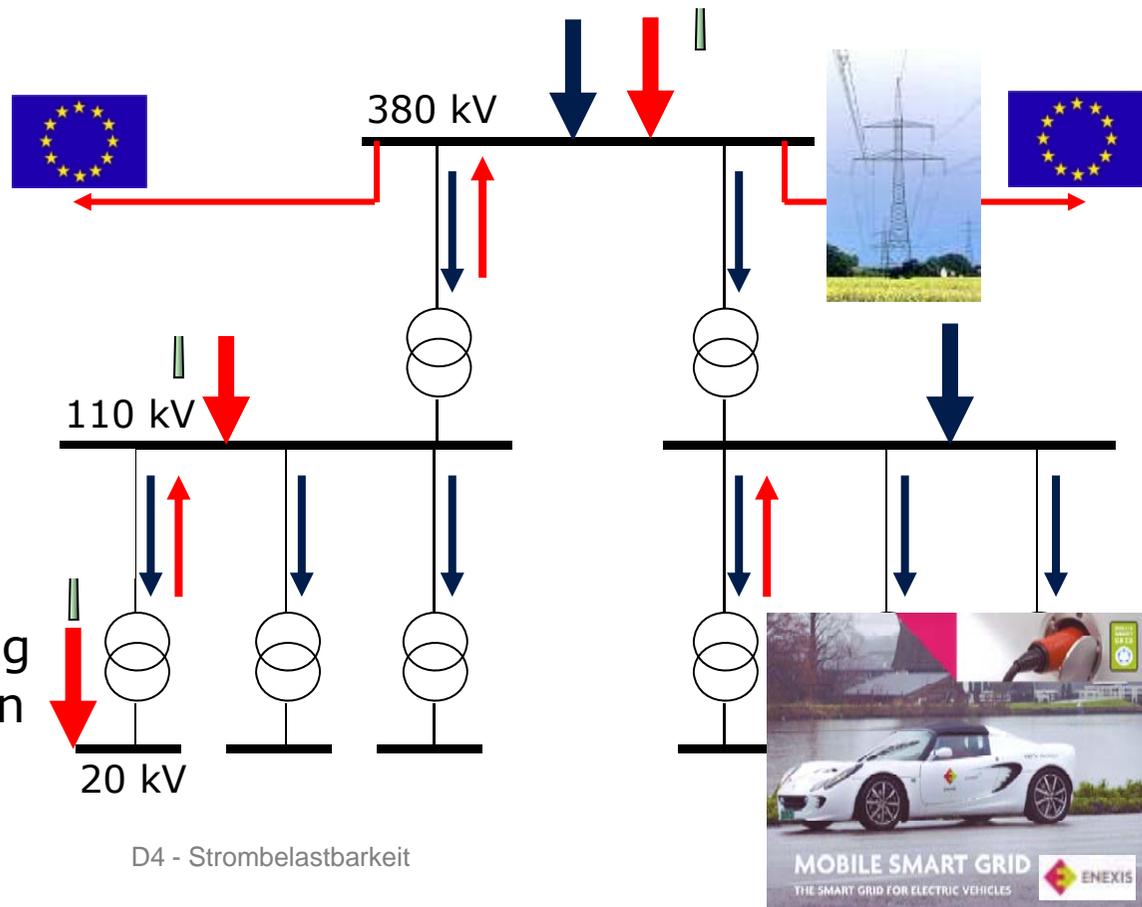
Langzeitverhalten von Verbindungen

### 4. Zusammenfassung

# 1. Problematik

## Herausforderungen

- Europaweiter Stromhandel
- Einspeisung regenerativer Energien in allen Spannungsebenen
- Energieflussrichtung kann sich umkehren



# 1. Problematik

## Herausforderungen

### Energiefrage

regenerative Energie  
räuml. und zeitliche  
Verfügbarkeit

### Globalisierung

liberalisierter Markt  
Handel mit Energie

### Ballungsgebiete

Energiedichte steigt  
Problem Trassen

⇒ Ferntransport elektrischer Energie  
⇒ Lastflüsse zeitlich unterschiedlich  
⇒ langfristig hohe Auslastung der EEÜ-/EEV-Systeme

### Netzausbau

### Stromtragfähigkeit erhöhen

- Hochtemperaturseile
- Monitoring

EnInoov 2010 Graz, 11 Februar 2



belastbarkeit

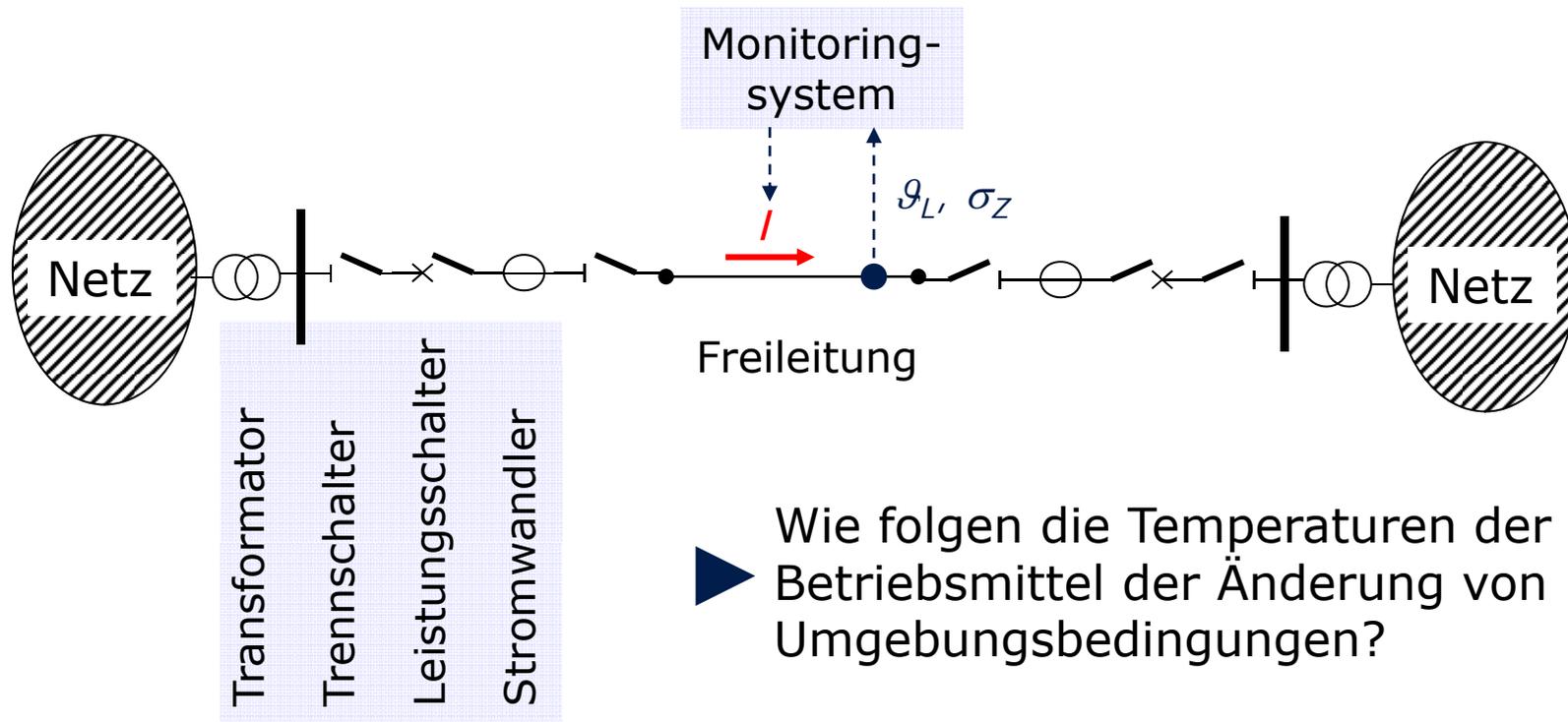


## 1. Problematik

### Fragestellungen

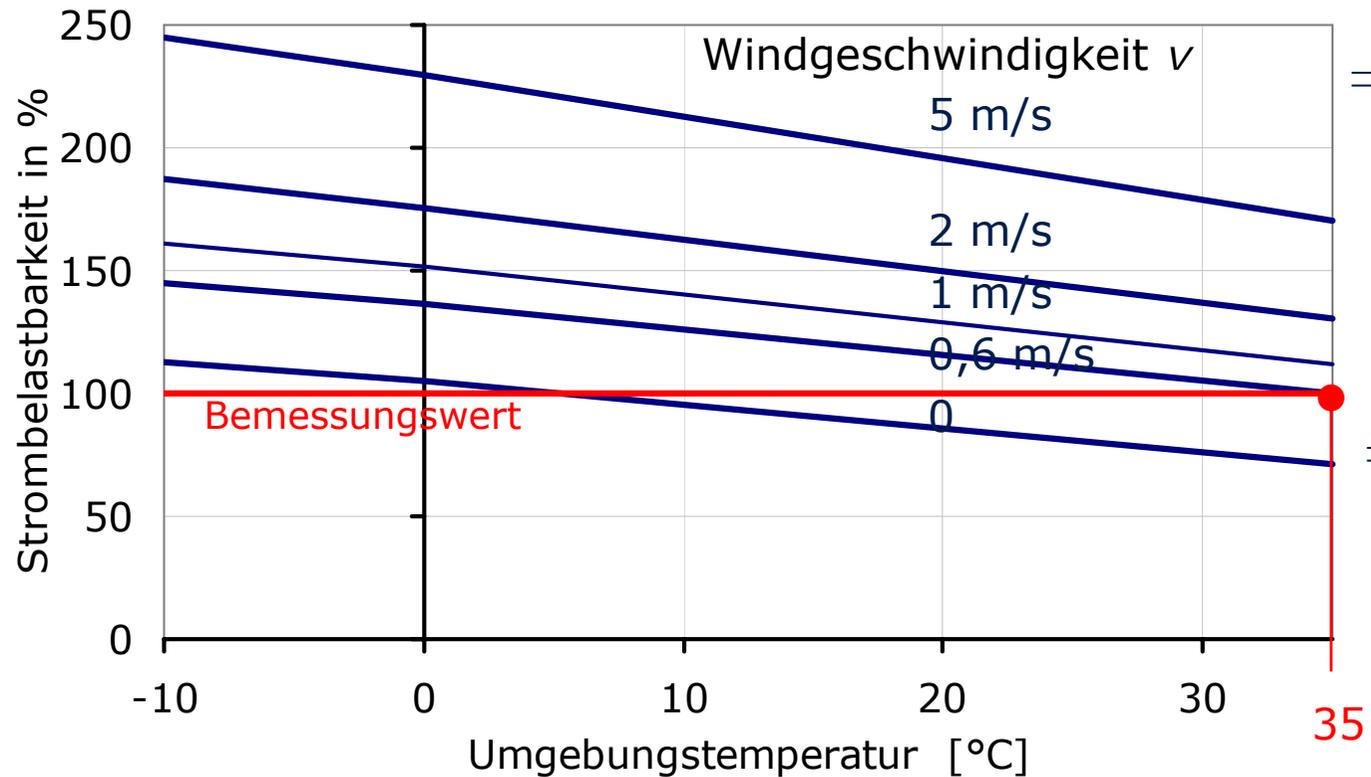
- Welche Betriebsmittel werden davon betroffen?
- Wie wirkt sich die erhöhte Stromtragfähigkeit auf die Übertemperatur dieser Betriebsmittel aus?
- Mit welchen Alterungsmechanismen müssen wir rechnen und wie beeinflussen diese die Lebensdauer des Betriebsmittels und der Anlage?
- Schlussfolgerungen für Forscher, Hersteller, Betreiber und Instandhalter und für die Investitionsplanung

## 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Betriebsmitteln Energieübertragungssystem





## 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Freileitung

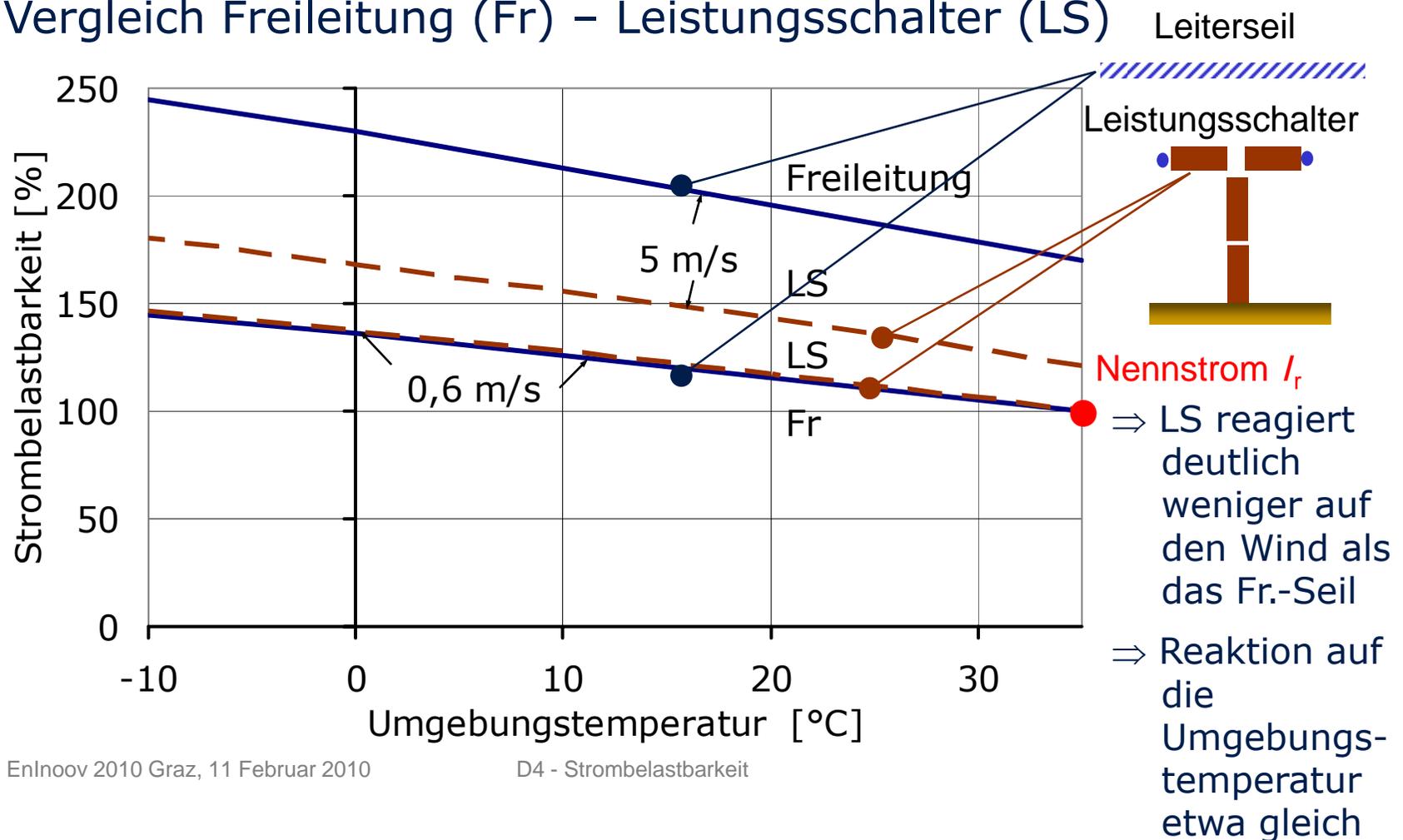


⇒ abhängig von  $\vartheta_0$  und  $v$  sind höhere Belastungsströme zulässig

⇒ aber bei  $\vartheta_0 > 35^\circ\text{C}$  Belastungsströme reduzieren!

## 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Betriebsmitteln

### Vergleich Freileitung (Fr) – Leistungsschalter (LS)



## 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Betriebsmitteln

### Alterung von Betriebsmitteln

#### Isolierungen

Transformator  
Schaltgeräte  
Stromwandler  
Kabelisolierung  
Kabelgarnituren

#### Strombahnen

Verbindungen  $\Rightarrow$  Abschnitt 3  
Befestigungen

#### ARRHENIUS-Gesetz



$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

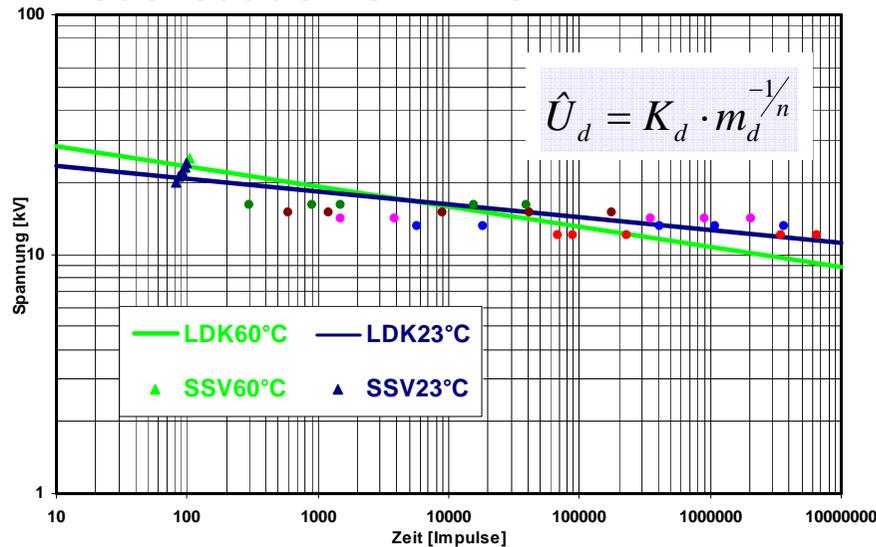
$k$  - Reaktionsgeschwindigkeit  
 $A$  - Faktor  
 $E$  - Aktivierungsenergie  
 $R$  - Boltzmann-Konstante  
 $T$  - Temperatur

## 2. Monitoring und Strombelastbarkeit von Betriebsmitteln

### Alterung von Betriebsmitteln

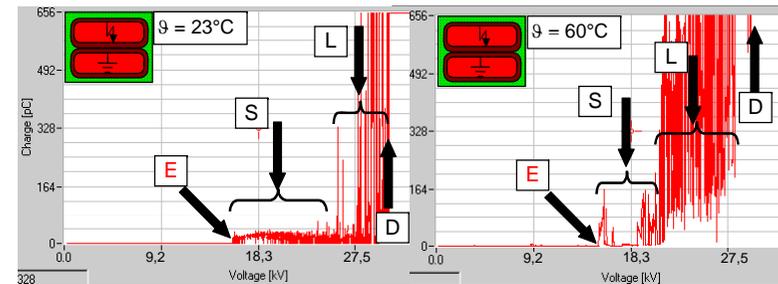
#### Isolierungen

Lebensdauerkennlinie:



Beispiel: Wicklung eines Öl-Transformators bei impulsförmiger Spannungsbelastung (Experiment an Modellordnung)

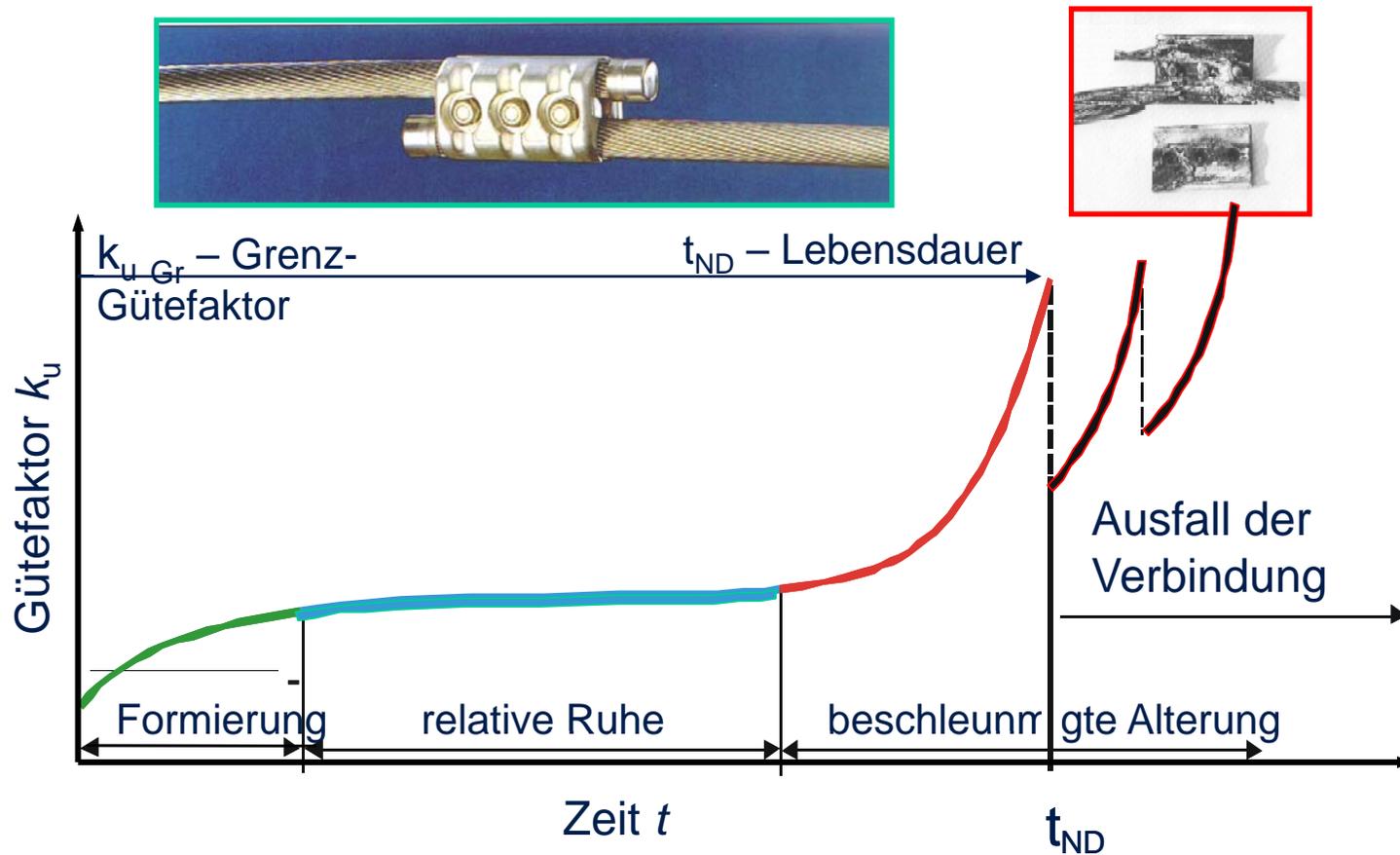
Teilentladungsmessung:



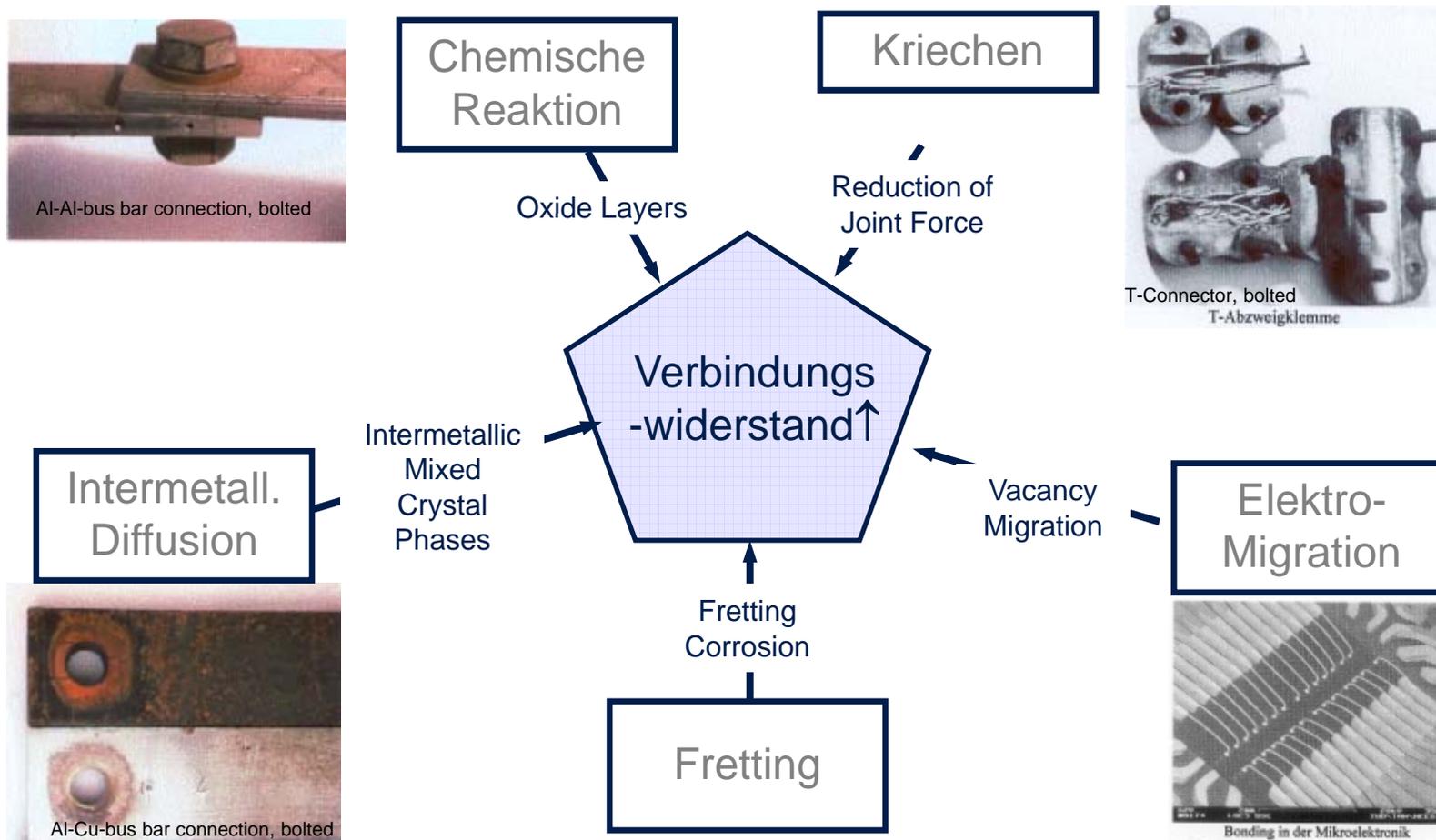
➔ höhere Temperaturen führen zu einer beschleunigten Alterung

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Prinzipieller Alterungsverlauf



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen Alterungsmechanismen



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Modell zur Beschreibung des Alterungsverhaltens

$$\dot{k}_u = \frac{(k_{ui} - k_u)d \cdot e^{-\left[\frac{b}{RT} + \frac{1}{2}\right]}}{t_o(t_o / t)^m}$$

$\dot{k}_u$  – Alterungsgeschwindigkeit

$k_u$  – Gütefaktor

$k_{ui}$  – idealer Gütefaktor (ohne Kontaktwiderstand)

$d$  – Faktor (empirisch aus Experimenten gewonnen)

$b$  – Faktor (empirisch aus Experimenten gewonnen)

$R$  – Stefan-Boltzmann-Konstante

$T$  – absolute Temperatur [K]

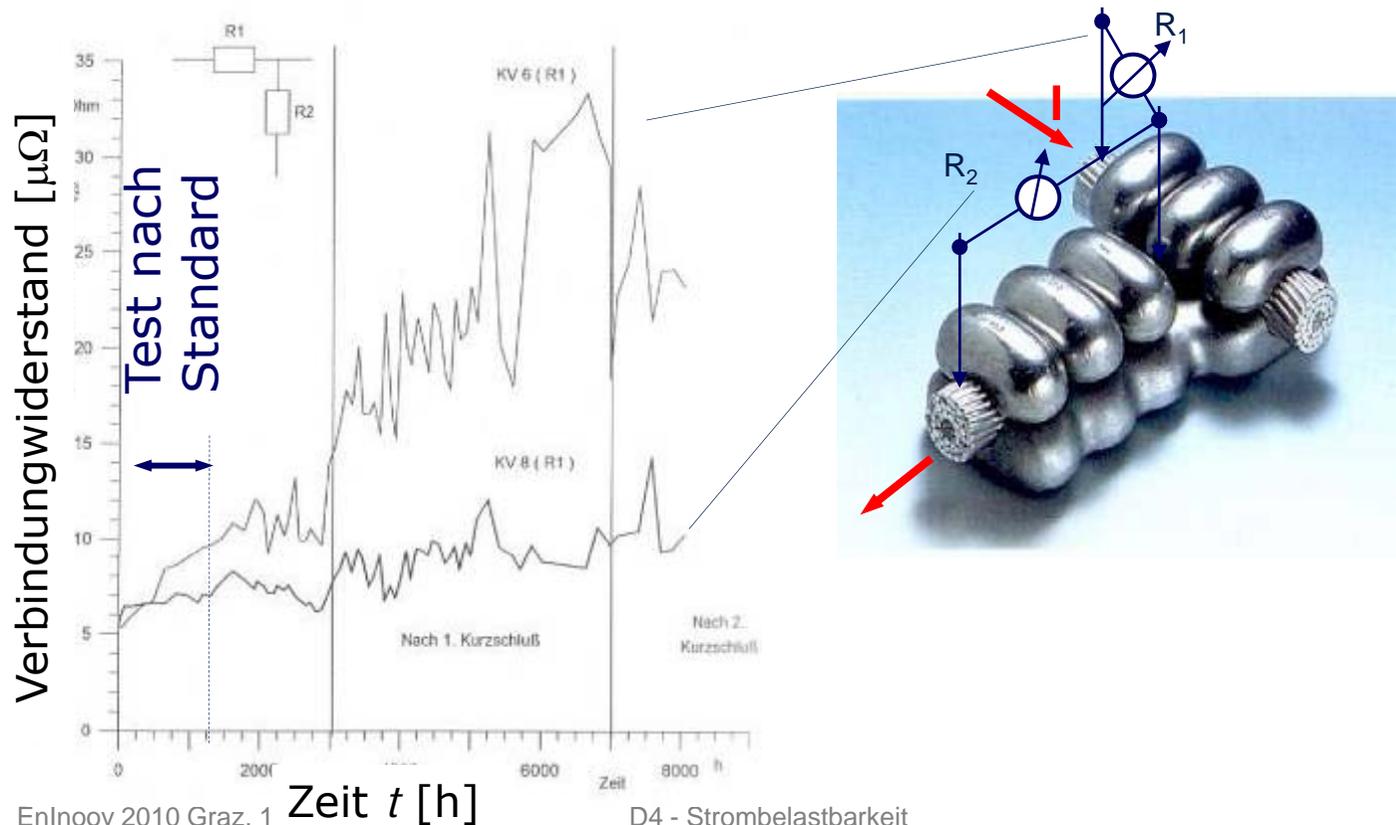
$t$  – Zeit

$m$  – Exponent (empirisch aus Experimenten gewonnen)

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

#### Kriechalterung

#### Langzeitexperiment TAI/St-Seil 150°C



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

#### Kriechalterung

Langzeitexperiment  
TAI/St-Seil 150°C



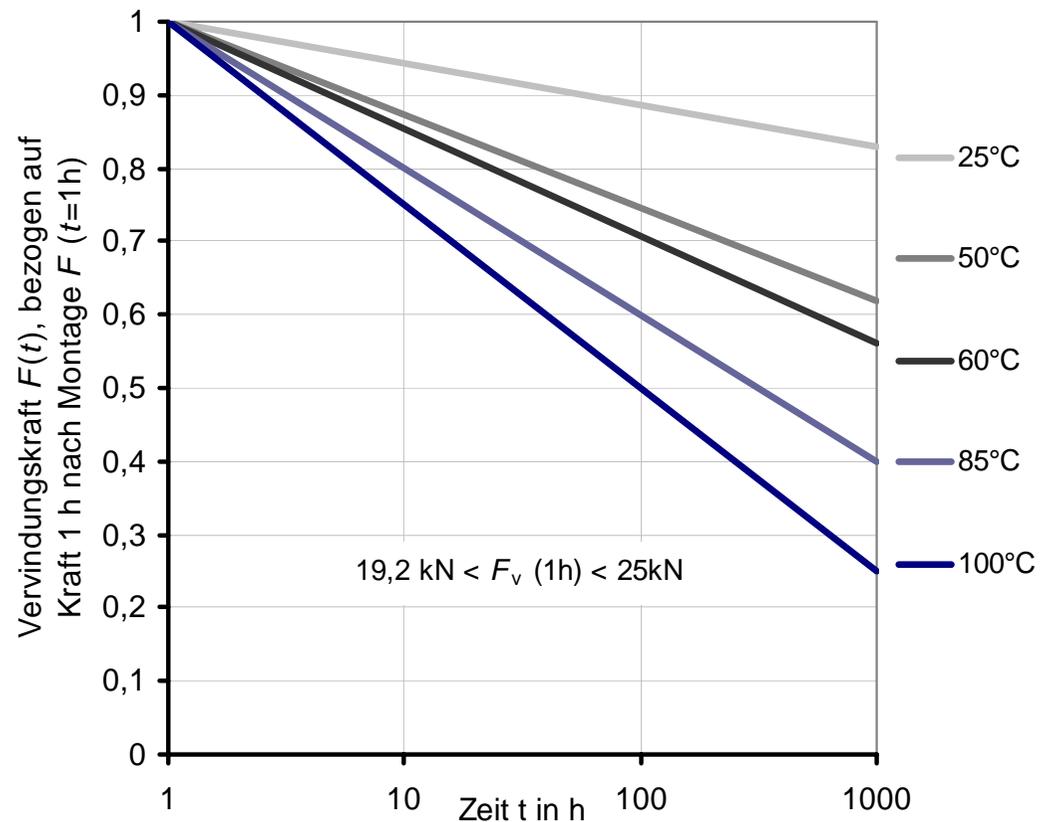
Alterungsverhalten  
hängt ab von:

➔ Leitermaterial

➔ Verbinder-  
temperatur

EnInoov 2010 Graz, 11 Februar 2010

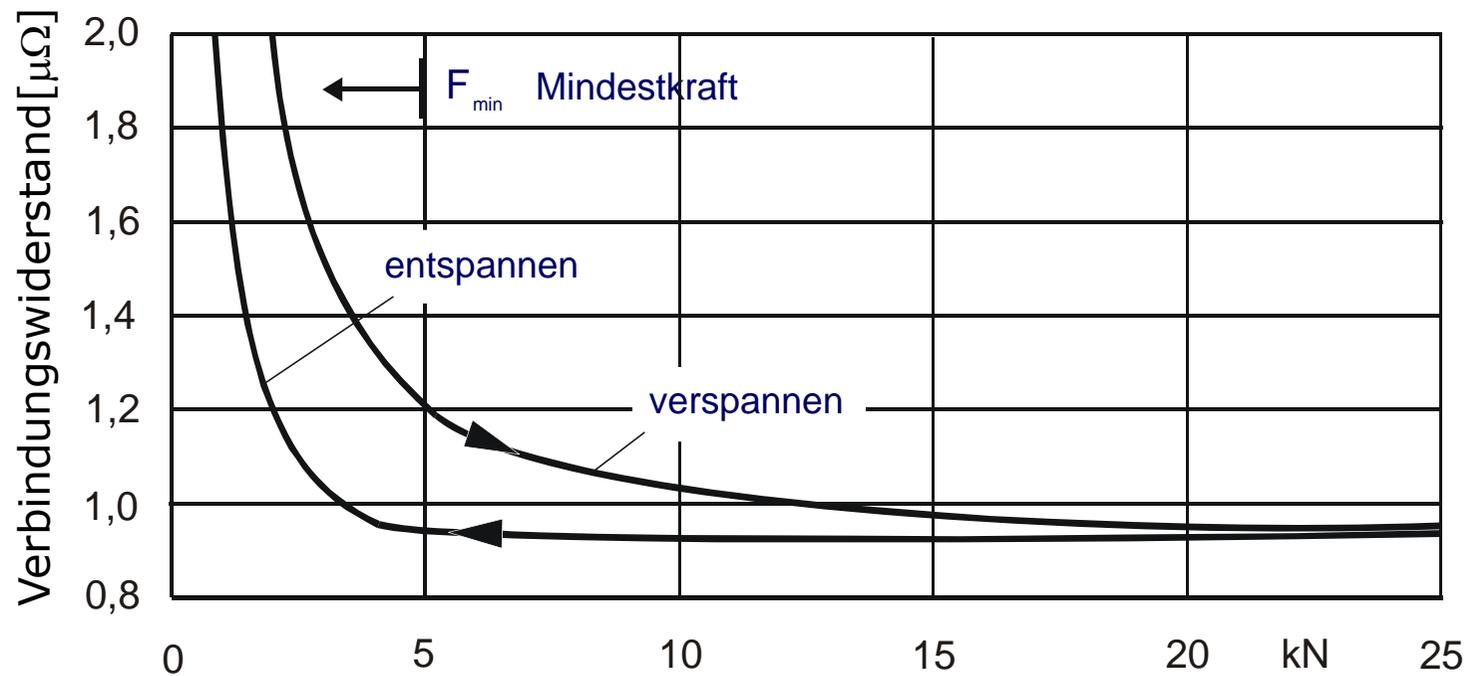
$$\dot{\varepsilon} = C \sigma^n t^{p-1} \exp\left(-\frac{Q_c}{kT}\right)$$



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Kriechalterung

### Hystereseverhalten des Verbindungswiderstandes



### 3. Zur Lebensdauer ...

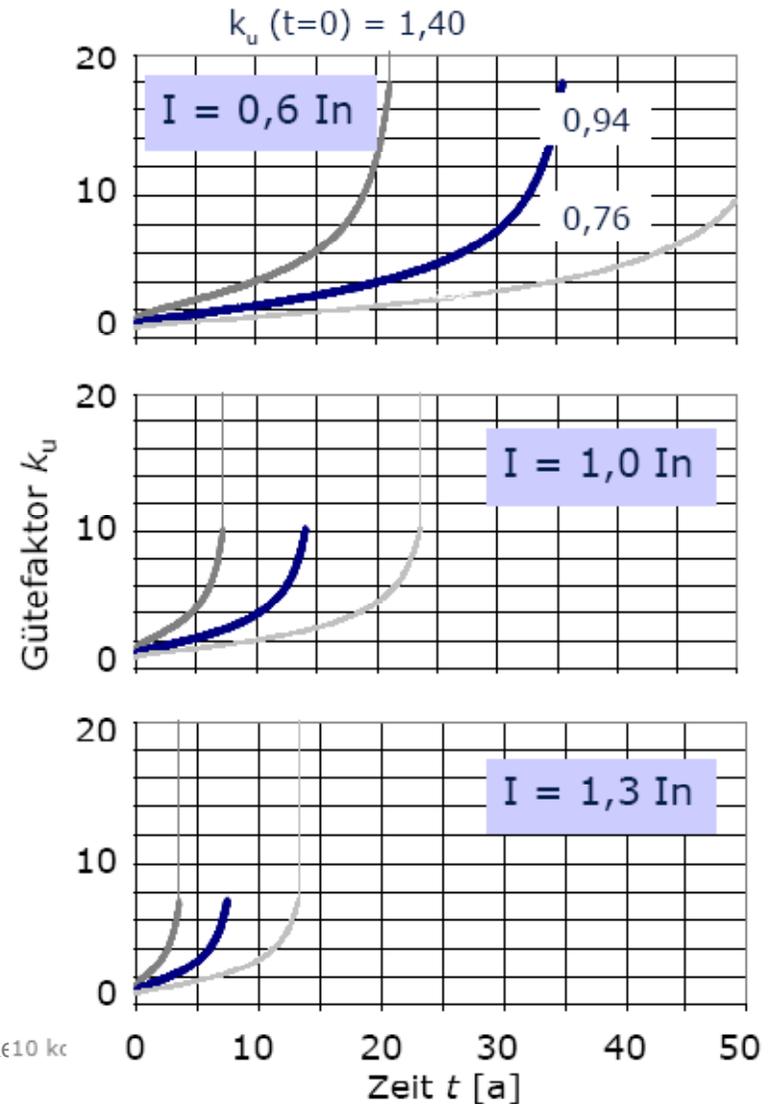
Lebensdauer  
abhängig vom  
Belastungsstrom



Al/St 185/30

Anfangsgütefaktoren  
nach Montage:

min	0,76
mittel	0,94
max	1,40

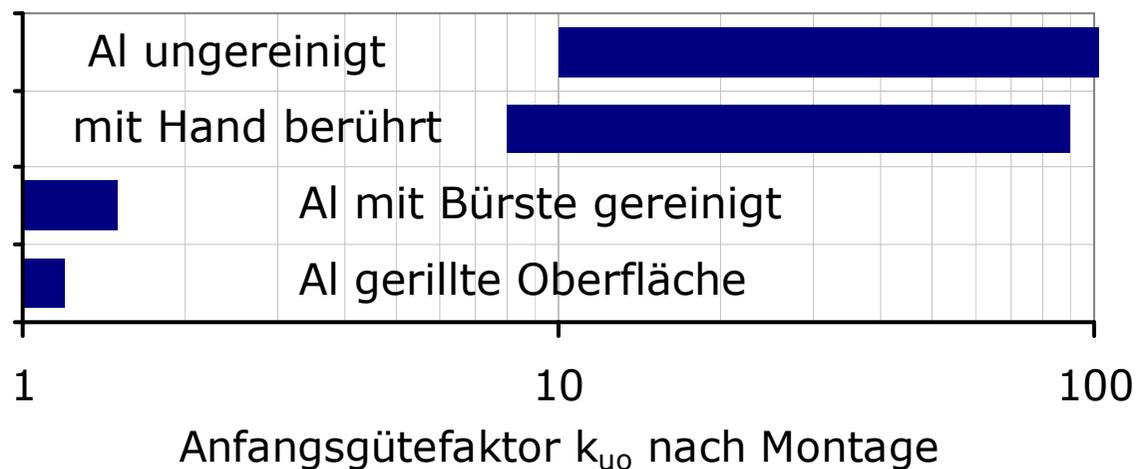


### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Möglichkeiten zu Qualitätssicherung

1. richtige Armatur auswählen (Projekt, Einkauf)
2. Kontaktflächen sorgfältig reinigen (Montage)

Bsp.: Experimente Al-Schraubenverbindung (25 x)



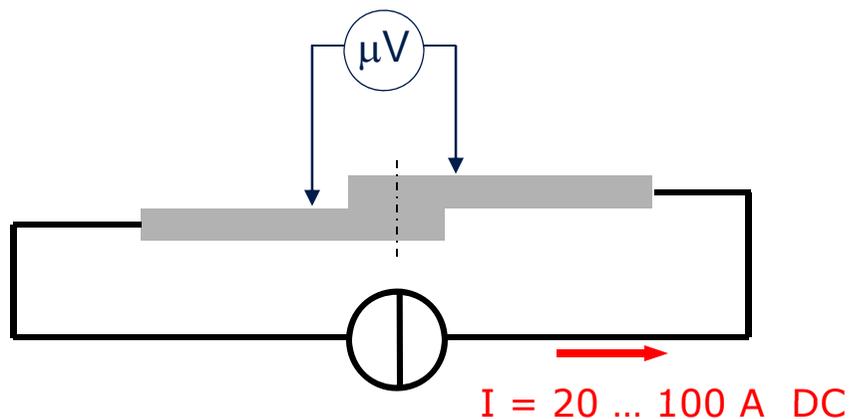
### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Möglichkeiten zu Qualitätssicherung

### 3. richtiges Werkzeug (Montage)

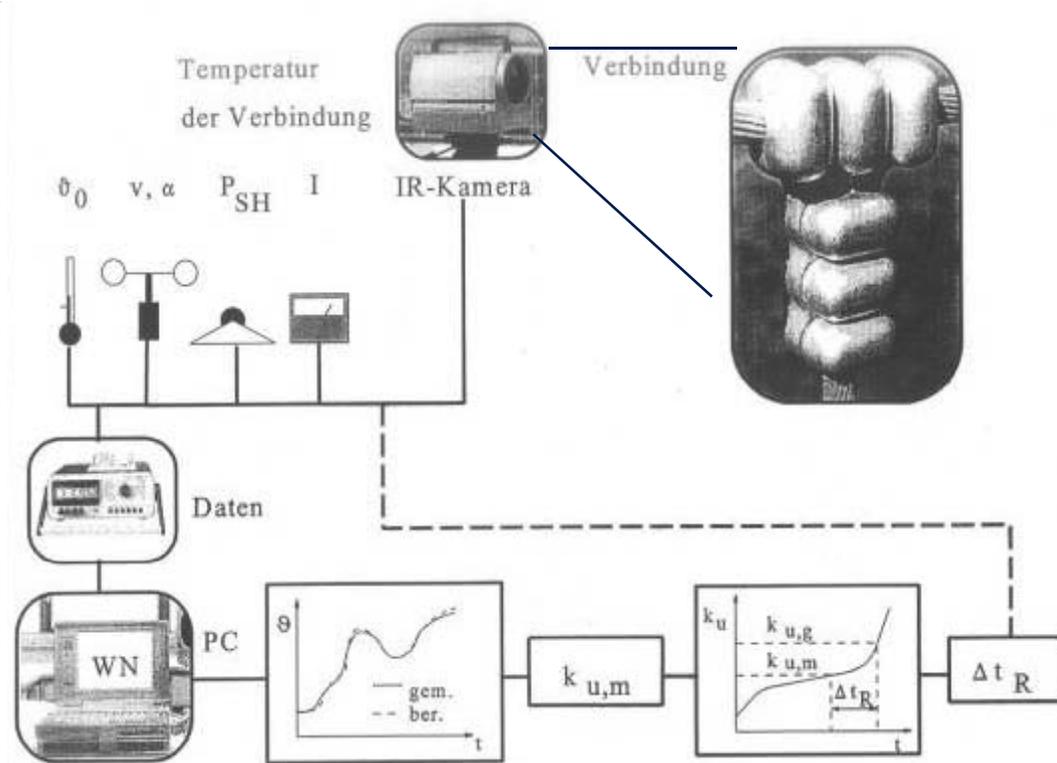
- Drehmomentschlüssel, Drehmoment einhalten
- Presswerkzeuge

### 4. Kontrolle Verbindungswiderstand (Gütekontrolle)



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

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen Infrarot-Diagnose



#### 4. Zusammenfassung - Fazit

- Eine zeitweilig höhere **Strombelastung von Leitern** ist abhängig von Umgebungsbedingungen möglich, ohne dabei zulässige Grenztemperaturen zu überschreiten.
- **Andere Betriebsmittel in der Strombahn** sind ebenfalls hinsichtlich ihrer thermischen Belastbarkeit zu betrachten.
- Langzeitig höhere Betriebstemperaturen durch eine höhere Strombelastbarkeit bedingen eine **schnellere Alterung** und mögliche frühere Ausfälle von Isolierungen und Verbindungen ⇒ **erhöhtes Ausfallrisiko, höhere Kosten für Instandhaltung.**
- Zum **Langzeitverhalten von Verbindungen** sind weitere Untersuchungen durchzuführen und Betriebserfahrungen auszuwerten; dazu sind ggf. Diagnoseverfahren einzusetzen.



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt:

Technische Universität Dresden

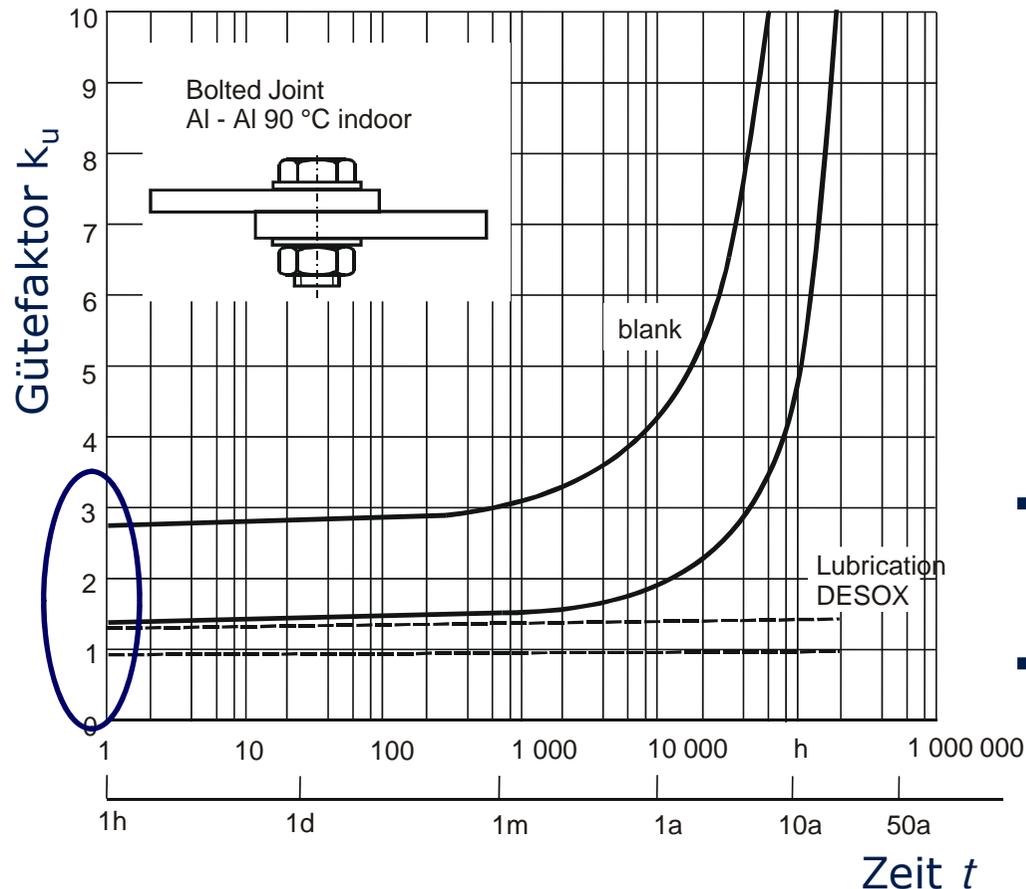
Institut für Elektrische Energieversorgung und  
Hochspannungstechnik

Professur Hochspannungs- und Hochstromtechnik  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Mommsenstraße 10, 01062 Dresden  
Telefon (0351) 463 33428  
steffen.grossmann @ tu-dresden.de

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Langzeitexperimente



Alterungsverhalten hängt ab von:

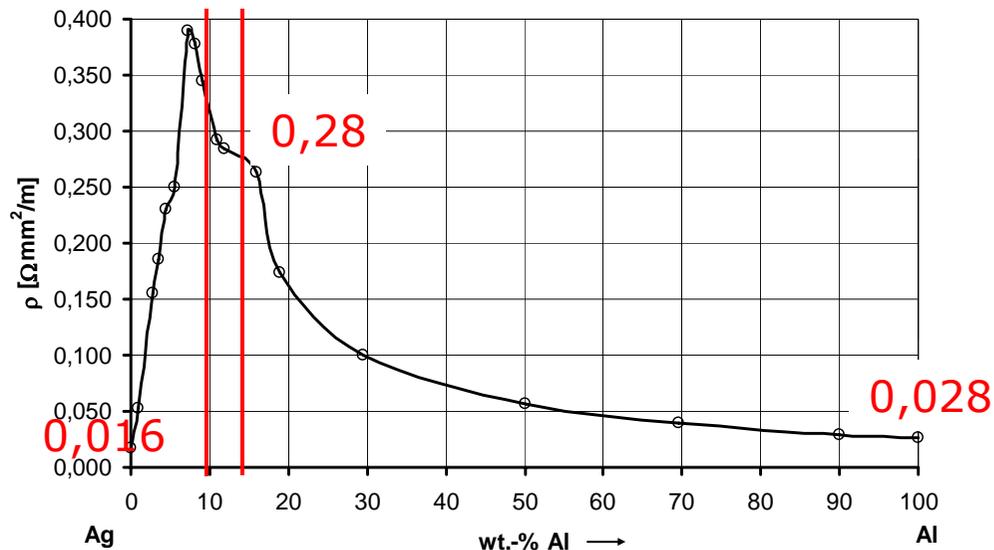
- ➔ Anfangsgütefaktor  $k_u (t = 0)$
- ➔ Reinigung der Kontaktflächen

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Intermetallische Diffusion

Al-Ag-Verbindung

spezifischer elektrischer Widerstand



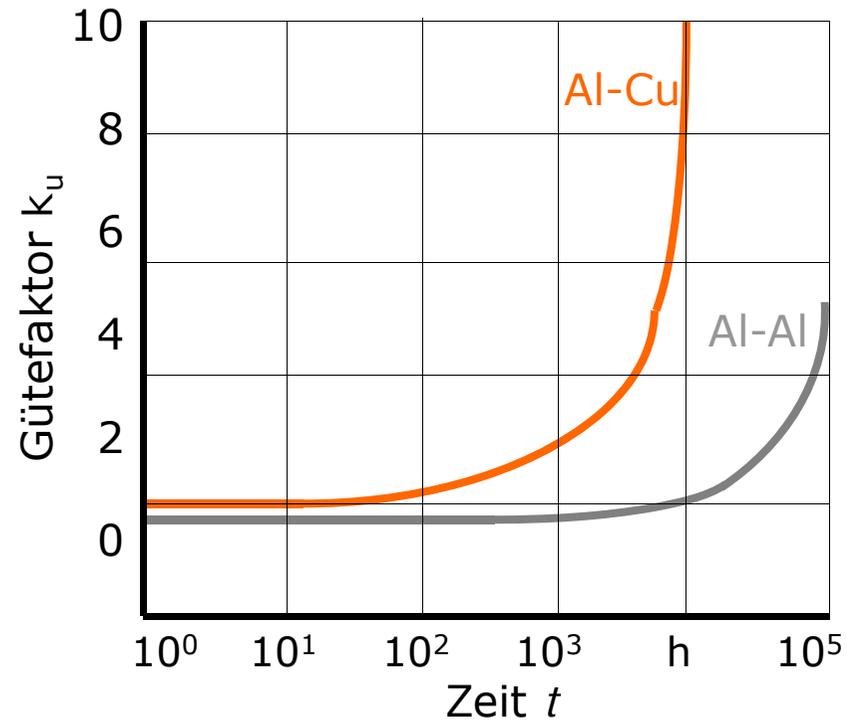
Phasendiagramm:  
 δ Phase (200°C):  
 11-15 wt.-% Al  
 32-40 At.-% Al

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Intermetallische Diffusion

### Langzeitexperimente

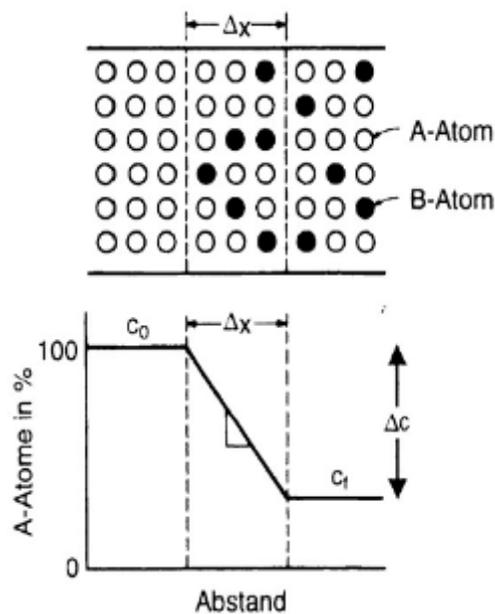
geschraubte Al-Al und  
Al-Cu-Verbindungen  
40x10 mm; 90°C;  
Innenraum



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Intermetallische Diffusion

### Modell zur Beschreibung der Diffusion: 1. Ficksches Gesetz



#### Diffusionsstromdichte:

$$j_D = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

- $j_D$  ... Diffusionsstromdichte [ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
- $D$  ... Diffusionskoeffizient [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
- $dc$  ... Konzentrationsunterschied [ $\text{m}^{-3}$ ]
- $dx$  ... Abstand [m]

#### Diffusionskoeffizient D:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{kT}}$$

- $T$  ... Temperatur [K]
- $k$  ... Boltzmann-Konstante  
 $k = 8,6173 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
- $D_0$  ... Frequenzfaktor [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ]
- $Q$  ... Aktivierungsenergie [eV]

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen

## Kriechalterung $\dot{\varepsilon}$ hängt ab von

$Q_c$  – Aktivierungs-  
energie  
 $k$  – Boltzmann-Konst.  
(=1,38 E-23 J/K)

Temperatur  $T$

$$\dot{\varepsilon} \approx \exp\left(-\frac{Q_c}{kT}\right)$$

$n$  – Norton-Exponent  
der mech. Spg.

mech. Spannung  $\sigma$

$$\dot{\varepsilon} \approx \sigma^n$$

$p$  – Zeit-Exponent

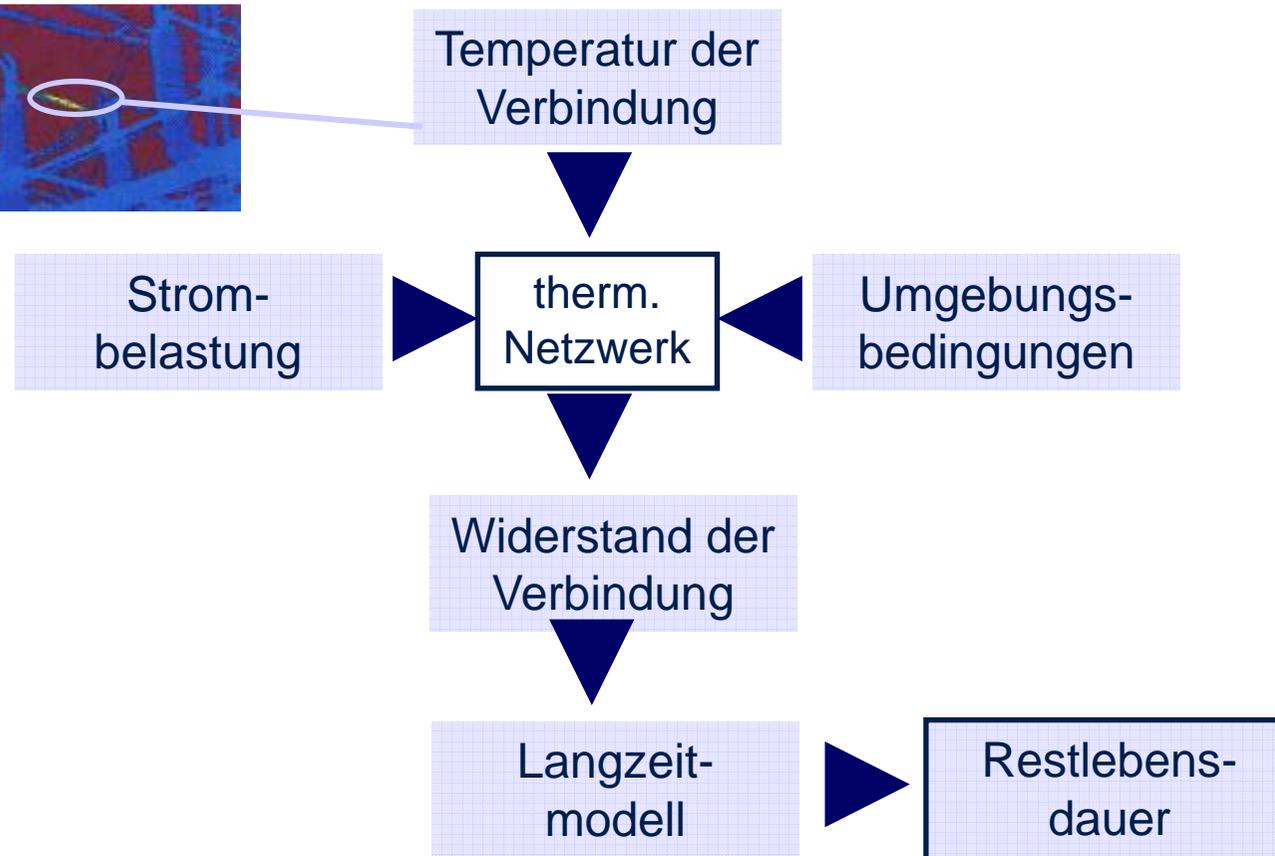
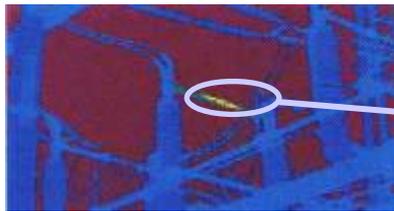
Zeit  $t$

$$\dot{\varepsilon} \approx t^{p-1}$$

$$\dot{\varepsilon} = C \sigma^n t^{p-1} \exp\left(-\frac{Q_c}{kT}\right)$$

$C$  – empirisch  
ermittelter Faktor

### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen Infrarot-Diagnose



### 3. Zur Lebensdauer von Verbindungen Infrarot-Diagnose

$$\Delta T \approx P_v = I_L^2 R_v$$



thermisches  
Netzwerk



$$R_v \longleftrightarrow \Delta T$$

thermisches  
Netzwerk

