

TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Willkommen

Zuverlässigkeitsanalysen von
differentiellen Baugruppen aus
elektrischen Steckverbindern mit
bestückten Leitungen

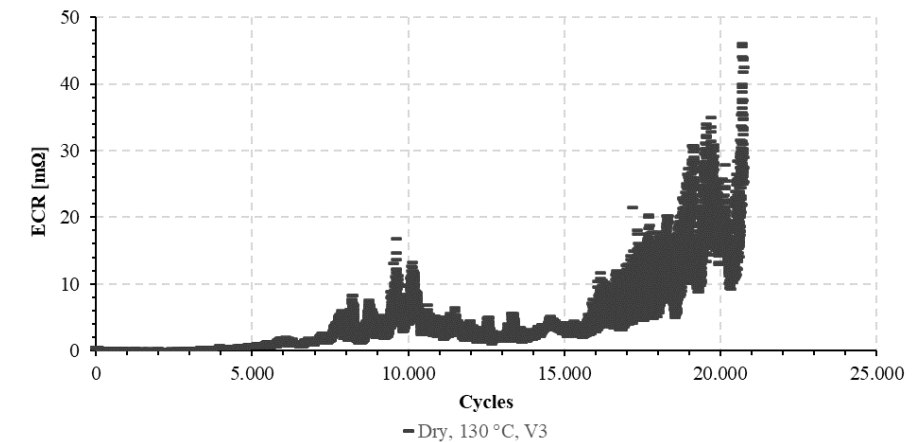
**8. Trendausblick: Transformations-Hub
Leitungssatz**

Fachgebiet Feinsystemtechnik
Prof. Dr.-Ing. Michael Blauth

Prof. Dr.-Ing. Michael Blauth | TH OWL | 27.01.2026

Agenda

- Fachgebiet Feinsystemtechnik
- Einleitung Steckverbinder und Verschleiß
- Allgemeine Trends im Bereich elektrischer Steckverbinder
- Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel elektrischer Steckverbinder
- Zusammenfassung und Ausblick



Zur Person

Prof. Dr.-Ing. Michael Blauth

- Seit 01.03.2024: Leitung des Fachgebiets Feinsystemtechnik und Vorstandsmitglied im Institut für Energieforschung (iFE) an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe (TH OWL)



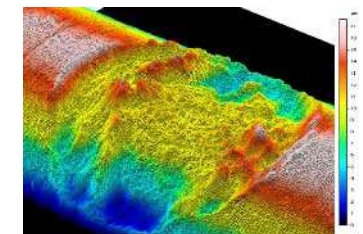
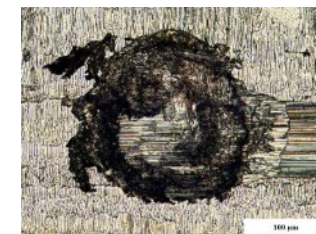
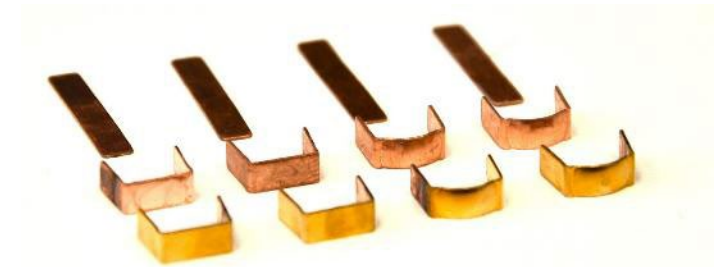
Fachgebiet Feinsystemtechnik

Fachgebiet Feinsystemtechnik

- Fokus: Grundlagen und Technologien der elektrischen Verbindungstechnik
- Kompetenzen: Herstellung, Galvanisierung (Ag, Au, Ni, Sn), Prüfung, Analyse und Modellbildung elektrischer Kontakte
- Laborgröße (2026): 18 Mitarbeitende

Forschungsschwerpunkte

- Modifikation und Optimierung von Kontaktflächen
- Untersuchung von Verschleiß- und Oxidationsprozessen an Kontaktflächen
- Schadensanalyse und Lebensdauervorhersage elektrischer Steckverbinder
- Bewertung und Prüfung von Schmierstoffen für elektrische Kontakte
- Parametrische Konstruktion und Simulation





TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

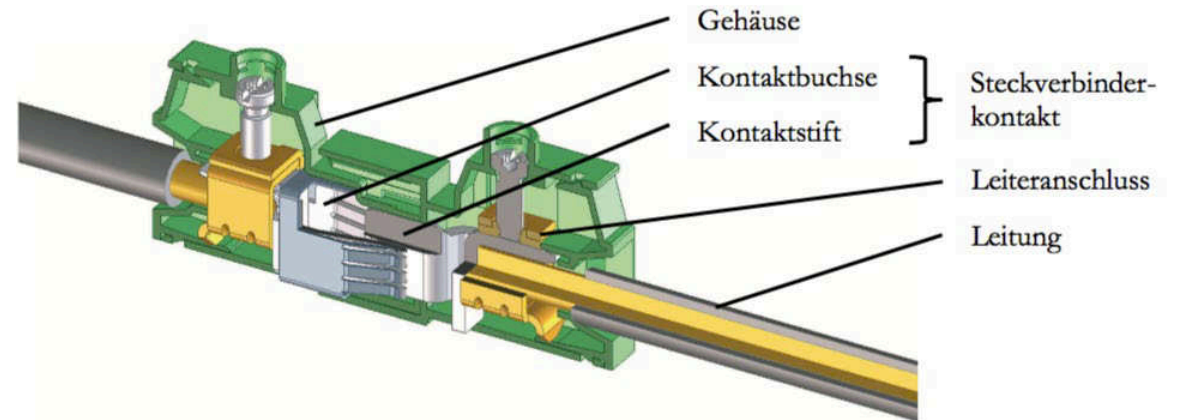
Einleitung Steckverbinder und Verschleiß

Elektrische Steckverbinder

- Definition: Lösbare elektromechanische Verbindungselemente

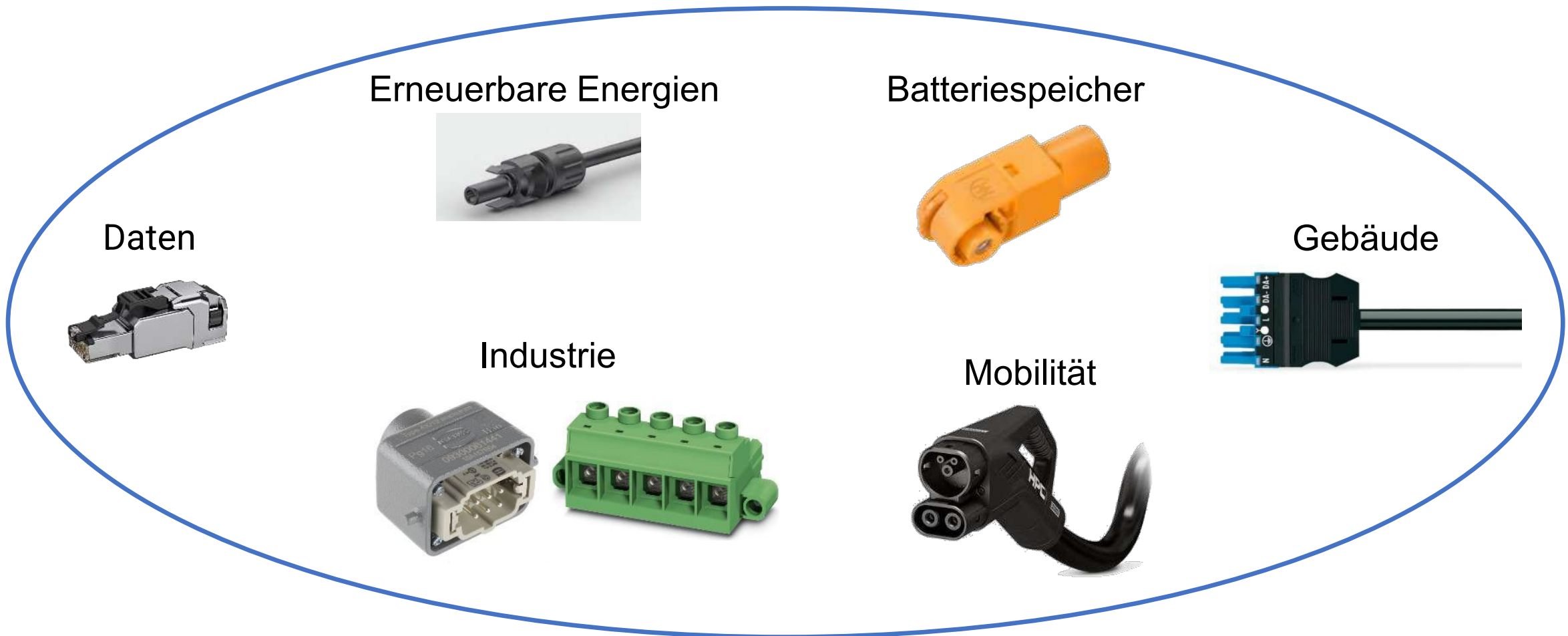
Quelle: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren, 2016

- Aufgabe: Bauelemente oder Baugruppen elektrisch und mechanisch voneinander trennen bzw. diese zu Funktionseinheiten zusammenzufügen



Quelle: Michael Blauth (2017)

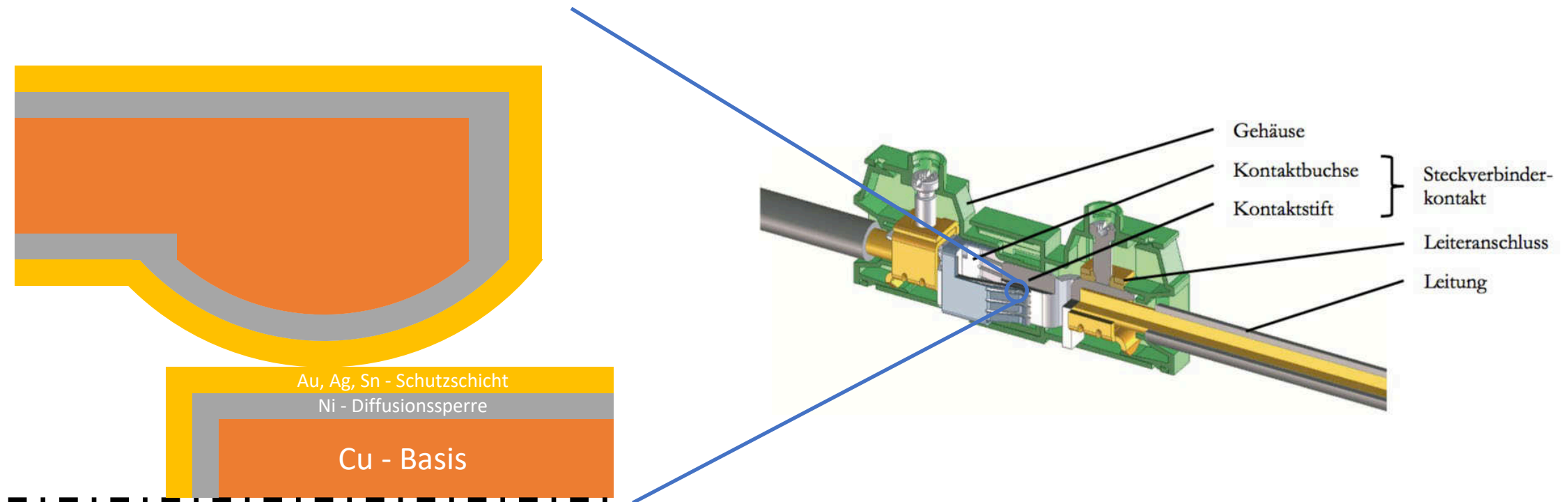
Elektrische Steckverbinder: Vielfalt



Quelle: Diverse Steckverbinderhersteller

Elektrische Steckverbinder: Elektrischer Kontakt

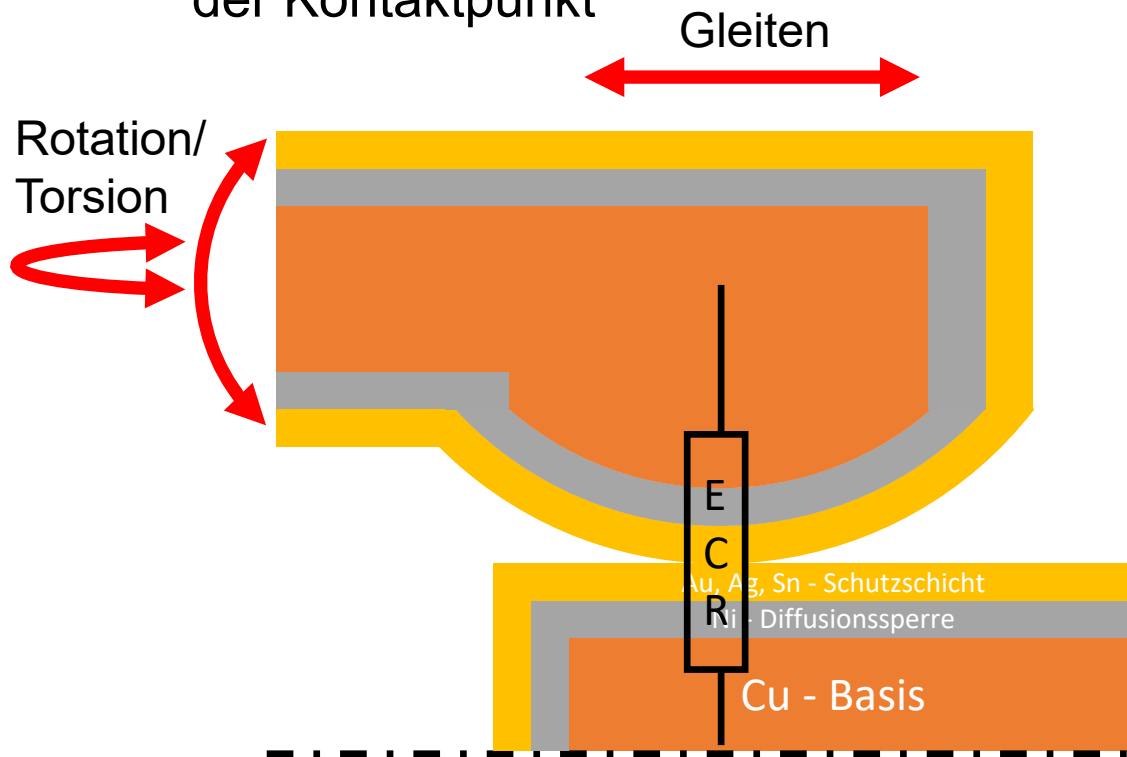
- Ausschlaggebend für die Zuverlässigkeit:
der Kontaktpunkt



Quelle: Michael Blauth (2017)

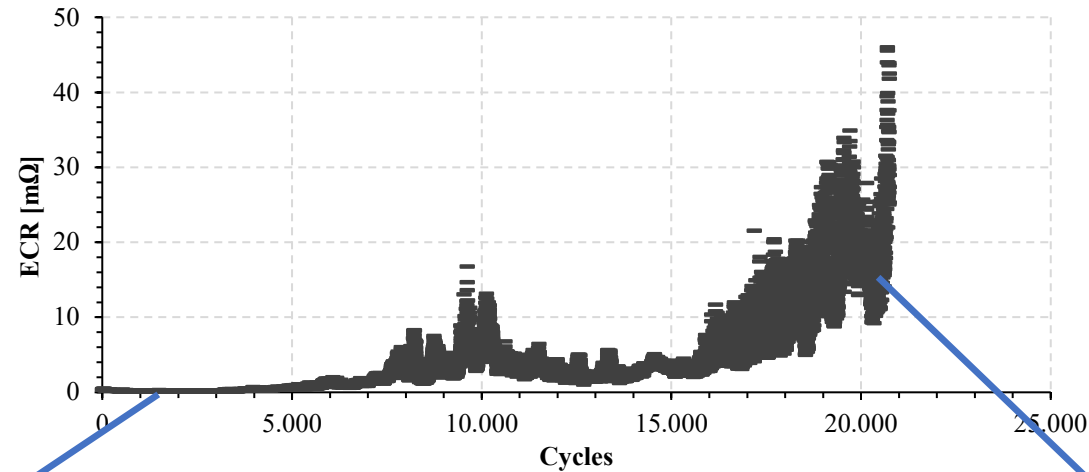
Elektrische Steckverbinder: Schädigung

- Ausschlaggebend für die Zuverlässigkeit: der Kontaktpunkt

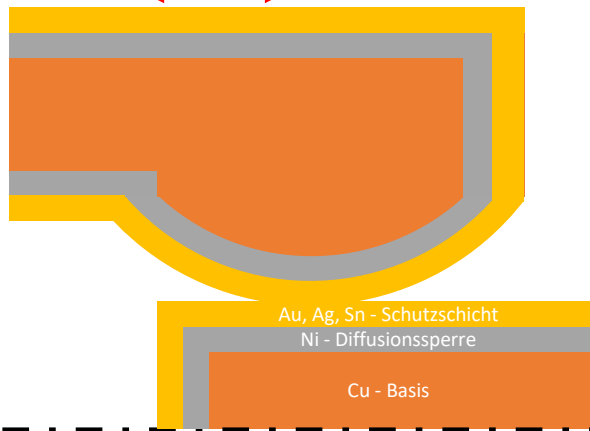


- **Makrobewegung (mm)**
 - Anzahl Steckzyklen im Feld
- **Mikrobewegung (μm)**
 - Temperaturdifferenzen im Feld
 - Frequenz des Temperaturwechsels im Feld
 - Vibration im Feld
 - Leiterbewegung
- **Oxidation / Diffusion**
 - Umgebungstemperatur im Feld
 - Schadgase im Feld
 - Feuchte im Feld
- **Mechanische Spannungsrelaxation**
 - Erwärmung im Feld

Elektrische Steckverbinder: Bewertung der Schädigung über den Kontaktwiderstand (ECR)



Verschleiß



Fehlermechanismus

- Bei Zinn: Reiboxidation
- Bei Gold und Silber: Verschleiß der Schutzschicht mit anschließender Reiboxidation von Ni und/oder Cu



TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Allgemeine Trends im Bereich elektrischer Steckverbinder

Übersicht

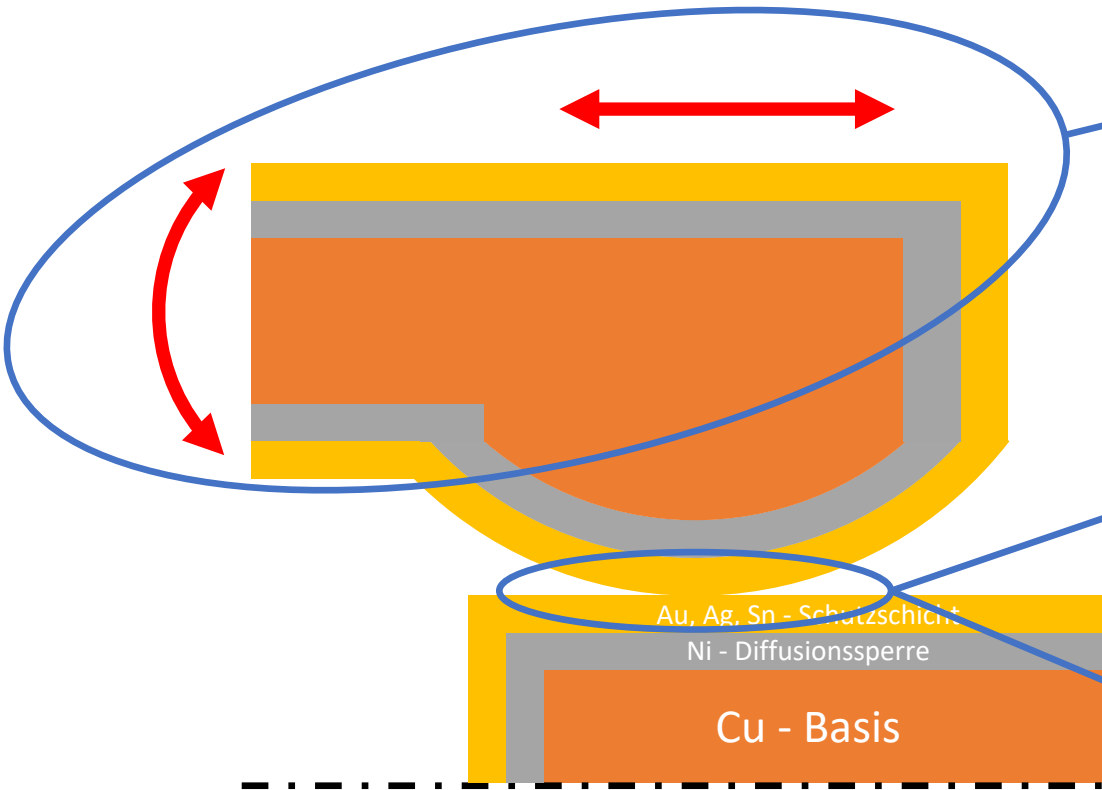
- Gesetzliche Vorgaben
 - RoHS – Direktive: Kein Blei und andere Gefahrstoffe verwenden
 - WEEE – Richtlinie: Ziel zur Reduzierung von Elektronikschrott
 - PFAS: Fluor-freie Schmierstoffe, Kunststoffe etc.
- Normenkonformität
 - Neue Anwendungsfälle mit kunden- oder branchenspezifischen Prüfungen (z.B. DC-Technik)
- Miniaturisierung
 - Erhöhter Integrationsdichte
- Steigende Leistungsfähigkeit
 - Höhere Temperaturanforderungen (z.B. Automobil)
 - Steigenden Datenübertragungsraten (z.B. IT)
 - Hochvolt- und Hochstromlösungen
 - Höhere Anzahl an Steckzyklen
 - Extreme Schwingungs- und Schockbelastung (z.B. Automobil- und Bahntechnik)
 - Neue Anwendungsfelder (z.B. Photovoltaik) bringen neue Umweltbelastungen (z.B. Ozon, UV-Strahlung, Ammoniak)
- Zuverlässigkeit
 - Erhöhte Zuverlässigkeitsanforderungen (FIT-Rate)
 - Ermittlung der Zuverlässigkeit von Komponenten
- Wirtschaftlichkeit
 - Automatisierte Herstellungsprozesse von Steckverbindern
 - Neue Fertigungsprozesse
 - Automatisierte Montageprozesse der Steckverbinder
 - Komfortable Leiteranschlusssysteme bei gleicher Kontaktsicherheit
- Werkstoffe mit neuen Eigenschaften
 - Kupferlegierungen mit neuen Eigenschaften
 - Oberflächenbeschichtungen mit speziellen Eigenschaften
 - Schmierstoffe
- Nachhaltigkeit
 - CO₂-Fußabdruck
 - Recycling, Regranulat
- Produktentwicklung und Wissen
 - Simulation von Eigenschaften
 - KI-gestütztes Design
 - Wissen um Kontaktphysik
- Smarte Steckverbinder
 - Integration zusätzlicher Funktionen wie Sensorik
- ...

Aktuelle Forschungsprojekte im Fachgebiet Feinsystemtechnik

- Aktuelle Forschungsprojekte

- Virtuelle Simulation von Vibrationsbelastungen an Steckverbinder-Leitungssystemen (**Projekt ViSVib**). Vortrag von **Prof. Dr.-Ing. Jian Song**, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, am **28. Januar 2025 im Rahmen des 5. Trendausblicks**

- Entwicklung von neuartigen Silber-Beschichtung mit TiO_2 – Nanopartikeln (**Projekt HighPerformanceSilver**) und integrierten Nanocontainern mit Schmiermittelfüllung (**Projekt NanoSurface**) zur Erhöhung der Standzeit der Kontaktflächen von Steckverbindungen
- Auswirkung von fluor-freien Schmierstoffen





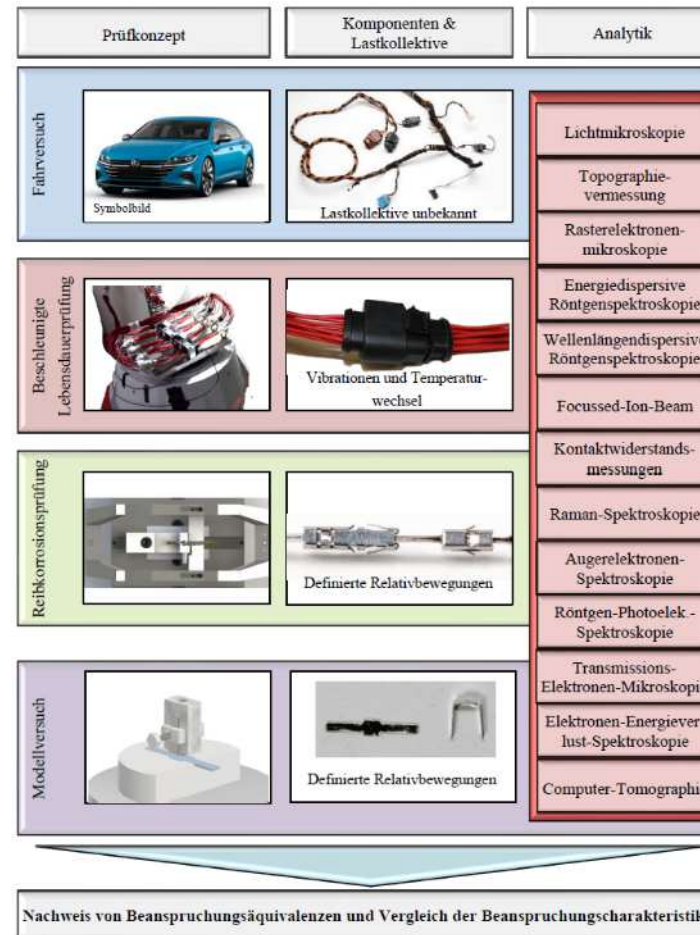
TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Zuverlässigkeitsanalyse am Beispiel elektrischer Steckverbinder

Prüfung und Analyse von elektrischen Steckkontakten

- Abstraktion des Systems

Aufwand,
Aussagefähigkeit,
Multifaktorielle Einflüsse



Baugruppen aus elektrischen Steckverbindern mit bestückten Leitungen

Steckverbinderkontakte

Standardgeometrien

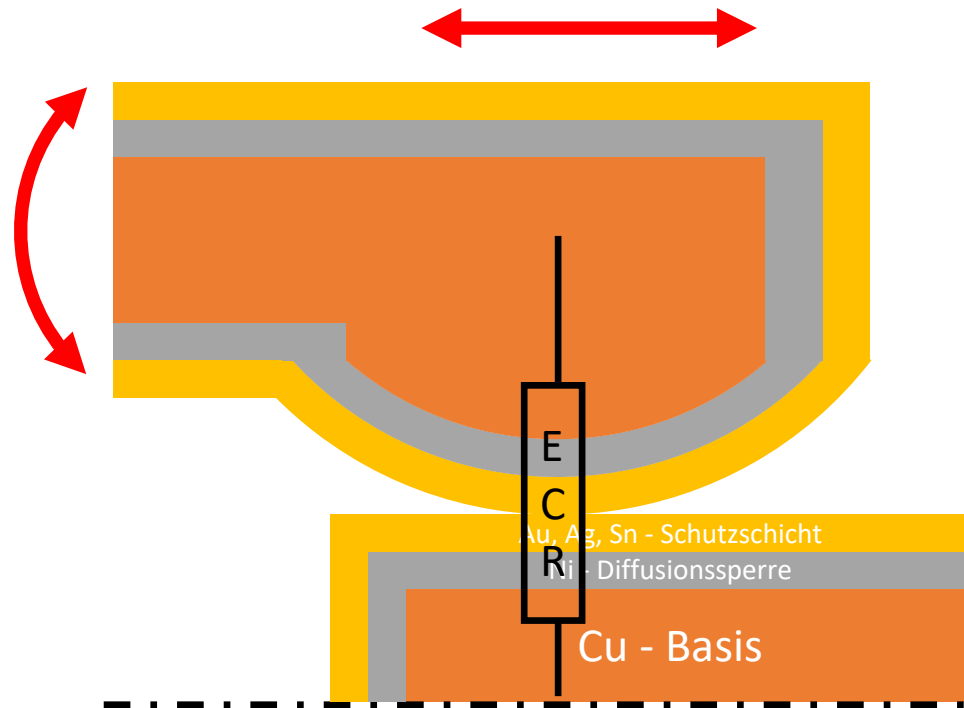
Quelle: Philipp Kolmer (2024)

Prüfung und Analyse von elektrischen Steckkontakten

- Problem der Normprüfungen:
 - Durch die Qualifizierung werden häufig Langzeiteffekte nur bedingt reproduziert (z.B. Relaxation, Migration, Diffusion, Verschleiß, Oxidation, ...)
 - Nur bestimmte Systemeinflüsse werden geprüft und Schadensfälle nicht detailliert bewertet

Elektrische Steckverbinder: Schädigung

- Auswahl geeigneter Prüfparameter für die Zuverlässigkeitsanalyse



- **Makrobewegung**
 - Anzahl Steckzyklen im Feld
- **Mikrobewegung**
 - Temperaturdifferenzen im Feld
 - Frequenz des Temperaturwechsels im Feld
 - Vibration im Feld
 - Leiterbewegung
- **Oxidation / Diffusion**
 - Feuchte im Feld
 - Schadgase im Feld
 - Umgebungstemperatur im Feld
- **Mechanische Spannungsrelaxation**
 - Erwärmung im Feld

Ziel

- Vorhersage der Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von thermischen und mechanischen Lasten in vertretbarer Zeit

- Vorgehen:
 1. Durchführung einer beschleunigten Lebensdauerprüfung
 2. Beschleunigungsfaktor AF ermitteln
 3. Modell für das Ausfallverhalten (z.B. Weibull-Verteilung)
 4. Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer (CLT)
 5. **Berechnung der FIT-Rate anhand der Zufallsausfälle über die Weibullverteilung**

Lebensdauer: FIT-Rate (Failure in Time)

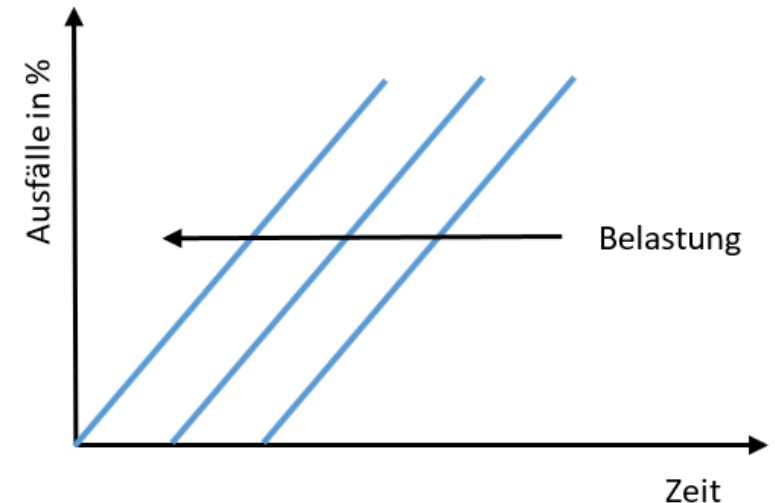
- Quantifizierung der Zuverlässigkeit durch Angabe der FIT-Rate (Failure in Time)
- FIT-Rate: Anzahl der Ausfälle nach 10^9 Betriebsstunden (10^9 h = 114.155 Jahre)
- Zu erwartende Lebensdauer ist im Vergleich zu einer akzeptablen Prüfzeit sehr lang

Lebensdauer: FIT-Rate (Failure in Time)

- Quantifizierung der Zuverlässigkeit durch Angabe der FIT-Rate (Failure in Time)
 - Berechnung auf Basis von Normen (MIL-HDBK-217, Siemens SN 29500) → ungenau [Song 2018]
 - Berechnete FIT-Raten auf Basis unterschiedlicher Normen weichen oft sehr stark voneinander ab
 - Die berechnete FIT-Rate stimmt mit den Felddaten oft nicht überein
 - Viele neuere Bauarten und konstruktive Merkmale werden in den Normen nicht berücksichtigt
 - Keine aktuellen Daten (z.B. Material, Konstruktion)
 - Wichtige Schadensursachen unzureichend berücksichtigt (z.B. Vibration, mechanische Belastung)
 - Bestimmung aus Felddaten → Erst zu einem späten Produktzeitpunkt möglich und hoher Aufwand
 - **Beschleunigte Lebensdauerprüfungen**

Beschleunigte Lebensdauerprüfung: Vorgehen

- Die Bauteile werden stärker belastet als im Betrieb
- Je stärker die Belastung, desto höher die Beschleunigung der Prüfung
- Relevante Anzahl der Ausfälle an Bauteilen für statistisch abgesicherte Auswertung
- Achtung: Keine Verursachung von betriebsfremden Schäden durch übermäßige Belastung an den Bauteilen (z.B. zu hohe Temperaturen für den Kunststoff oder das Beschichtungssystem)



Beschleunigte Lebensdauerprüfung: Berechnungsmodelle

• Arrhenius-Gleichung

- Findet Anwendung bei **konstanten Temperaturbelastungen**
- Grundlage ist die erhöhte Rate chemischer Umwandlungsprozesse bei höheren Temperaturen

$$AF_{AH} = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{Use,max}} - \frac{1}{T_{Lab,max}} \right)}$$

Mit:

- AF_{AH} : Beschleunigungsfaktor nach Arrhenius
- E_a : Aktivierungsenergie
- k_B : Boltzmann-Konstante
- $T_{Use,max}$: Maximale absolute Temperatur im Feld
- $T_{Lab,max}$: Maximale absolute Temperatur im Test

Beschleunigte Lebensdauerprüfung: Berechnungsmodelle

- Eine Weiterentwicklung stellt das **Norris-Landzberg-Modell** dar
 - Berücksichtigt zusätzlich die **Frequenz der Temperaturänderung**

$$AF_{N-L} = \left(\frac{\Delta T_{Lab}}{\Delta T_{Use}} \right)^p \cdot \left(\frac{f_{Use}}{f_{Lab}} \right)^q \cdot e^{\frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{Use,max}} - \frac{1}{T_{Lab,max}} \right)}$$

Mit:

- AF_{N-L} : Beschleunigungsfaktor nach Norris-Landzberg
- ΔT_{Lab} : Temperaturdifferenz des beschleunigten Tests
- ΔT_{Use} : Temperaturdifferenz im Feld
- p : Schadenskoeffizient für die Temperaturdifferenz im Temperaturwechseltest
- f_{Use} : Frequenz des Temperaturwechsels im Feld
- f_{Lab} : Frequenz des Temperaturwechsels im Test
- q : Schadenskoeffizient in Bezug auf die Frequenz des Temperaturwechsels
- E_a : Aktivierungsenergie
- k_B : Boltzmann-Konstante
- $T_{Use,max}$: Maximale absolute Temperatur im Feld
- $T_{Lab,max}$: Maximale absolute Temperatur im Test

Beschleunigte Lebensdauerprüfung: Berechnungsmodelle

- Beschleunigungsfaktor AF_{VTW} für Vibration und Temperaturwechsel:

$$AF_{VTW} = \frac{t_{Use}}{t_{Lab}} = \underbrace{\left(\frac{\Delta T_{Lab}}{\Delta T_{Use}}\right)^p}_{\text{Coffin-Manson-Modell (Temperaturwechsel)}} \cdot \underbrace{\left(\frac{f_{Use}}{f_{Lab}}\right)^q}_{\text{Temperaturänderungsfrequenzen}} \cdot \underbrace{e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{Use,max}} - \frac{1}{T_{Lab,max}}\right)}}_{\text{Arrhenius-Modell (konstante Temperaturbelastung)}} \cdot \underbrace{\left(\frac{V_{Lab}}{V_{Use}}\right)^r}_{\text{Vibration}}$$

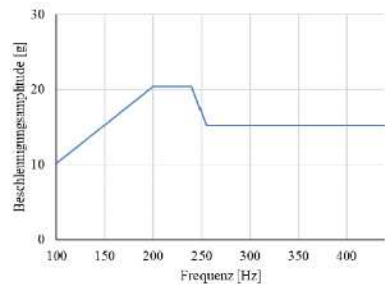
Mit:

- AF_{VTW} : Beschleunigungsfaktor für Vibration und Temperaturwechsel
- t_{Use} : Lebensdauer im Feld [h]
- t_{Lab} : Lebensdauer beschleunigt [h]
- ΔT_{Lab} : Temperaturdifferenz des beschleunigten Tests [K]
- ΔT_{Use} : Temperaturdifferenz im Feld [K]
- f_{Use} : Frequenz des Temperaturwechsels im Feld [1/h]
- f_{Lab} : Frequenz des Temperaturwechsels im Test [1/h]
- E_a : Aktivierungsenergie [eV]
- k_B : Boltzmann-Konstante [eV/K]
- $T_{Use,max}$: Maximale absolute Temperatur im Feld [K]
- $T_{Lab,max}$: Maximale absolute Temperatur im Test [K]
- V_{Lab} : Belastungsstärke im Test [g]
- V_{Use} : Belastungsstärke im Feld [g]
- r : Schadenskoeffizient in Bezug auf die Frequenz des Temperaturwechsels [-]
- p : Schadenskoeffizient für die Temperaturdifferenz im Temperaturwechseltest [-]
- q : Schadenskoeffizient in Bezug auf die Frequenz des Temperaturwechsels [-]

Quelle: Song, J., Yuan, H., Koch, C.: Accelerated Testing of Electromechanical Connectors Considering Thermal and Mechanical Loads. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 467–74, 2018.

Beschleunigte Lebensdauerprüfung: Laborprüfungen

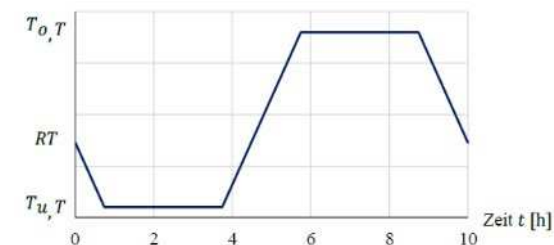
- Vibrationsprüfung



- Temperaturwechselprüfungen

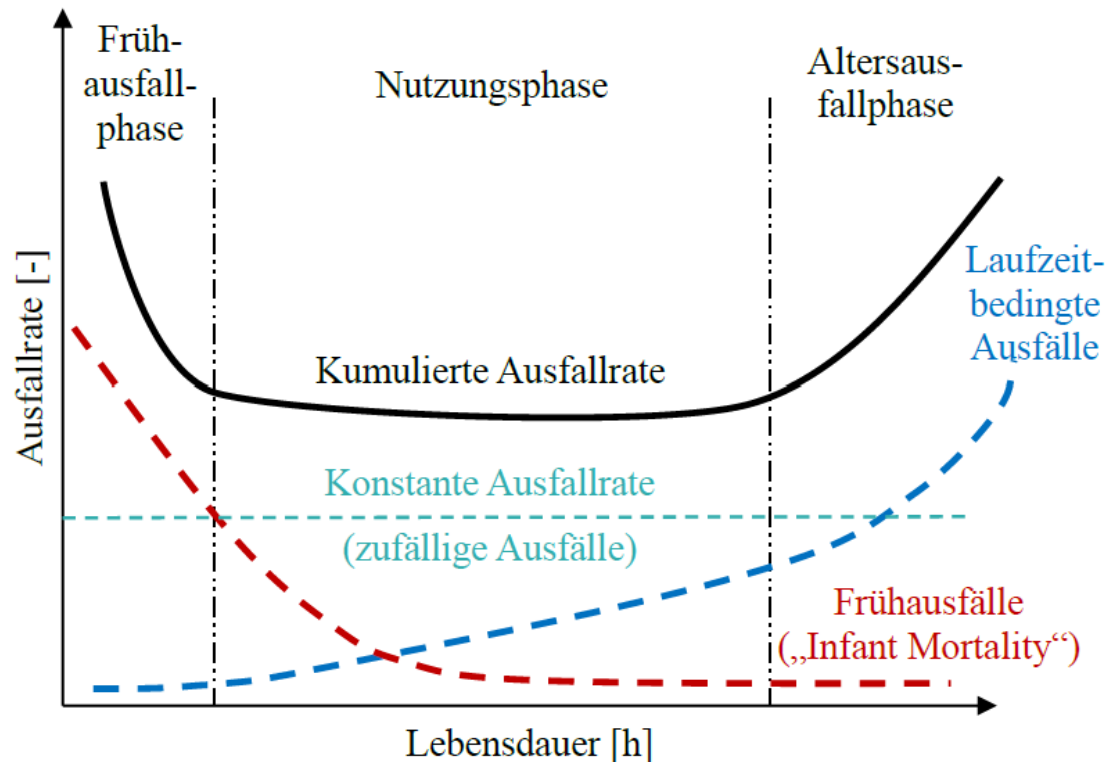


Profile nach Normen/Leitfäden wie z.B. TLF 0214



Modell für das Ausfallverhalten: Weibull-Verteilung

- Für elektronische Bauteile wird häufig die Weibullverteilung genutzt



Weibullverteilung:

$$f(t) = \frac{b}{\theta} \cdot \left(\frac{t}{\theta}\right)^{(b-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b}$$

Mit:

b : Formparameter

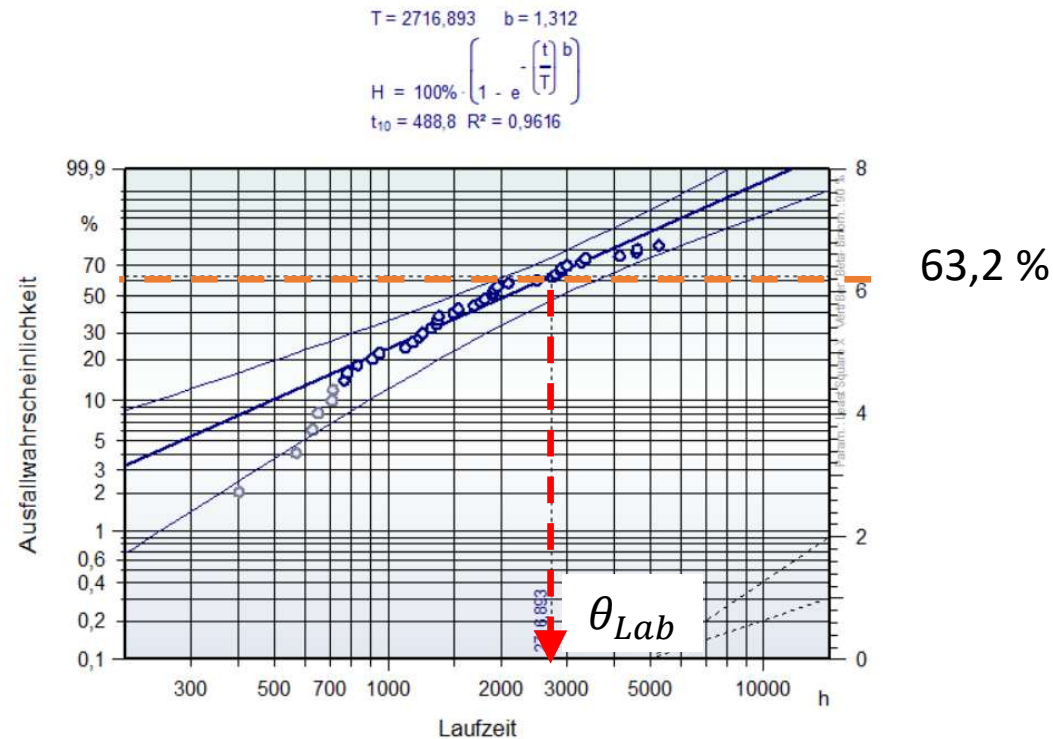
θ : charakteristische Lebensdauer [h]

t : Zeit [h]

Quelle: Krüger 2025

Modell für das Ausfallverhalten

- Ermittlung der **charakteristischen Lebensdauer (CLT)** unter Prüfbedingungen θ_{Lab}
 - Die charakteristische Lebensdauer entspricht dem Zeitpunkt, zu dem 63,2 % der Elemente der Gesamtmenge ausgefallen sind



Beschleunigte Lebensdauerprüfung

- Die charakteristische Lebensdauer unter Prüfbedingungen θ_{Lab} multipliziert mit dem Beschleunigungsfaktor AF_{VTW} für Temperatur und Vibration ergibt dann die erwartete charakteristische Lebensdauer im Feld CLT_{Field}

$$CLT_{Field} = \theta_{Lab} \cdot AF_{VTW}$$

- Für die **Berechnung der FIT-Rate der Zufallsausfälle der Weibullverteilung** wird folgende Gleichung verwendet

$$FIT_{Weibull} = \frac{10^9 \text{ Stunden}}{CLT_{Field}}$$

Beispielhafte Erkenntnisse

- Einfluss der Eibaulage
 - Die Z-Richtung für Steckverbinder ist oftmals die kritische Schwingungsrichtung [Song 2018]
 - Einfluss der Leiterführung und Leiterbefestigung
- Baugröße:
 - Große Steckverbinder und dicke Leitungen führen zu erhöhter Mikrobewegung (vibrationsempfindlicher)
- Kabeldichtung:
 - Hat positiven Einfluss auf die Lebensdauer
- Profil:
 - Rauschen hat in der Regel stärkere Auswirkungen auf den Verschleiß als Sinus-Schwingungen (StRobA) bei gleicher Vibrations-Klasse nach Norm/Leitfaden (Vgl. SG4 Sinus und Rauschen)
- Vergleich verschiedener Bauarten von Steckverbindern möglich

X – Achse: In Steckrichtung
Y – Achse: 90 °C zur Steckrichtung (horizontal längs)
Z – Achse: 90 °C zur Steckrichtung (horizontal quer)

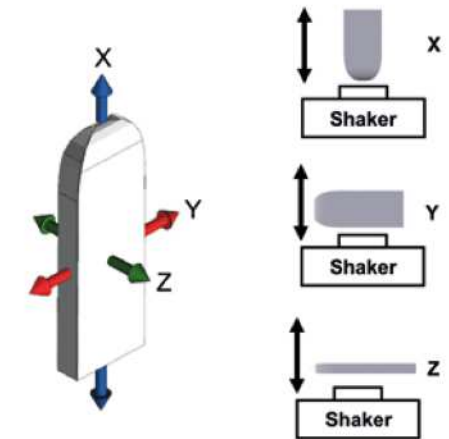


Abbildung PG 17-1 (Quelle: Kostal Kontakt Systeme)

Quelle: TLF 0214



Quelle: Krüger 2025



TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

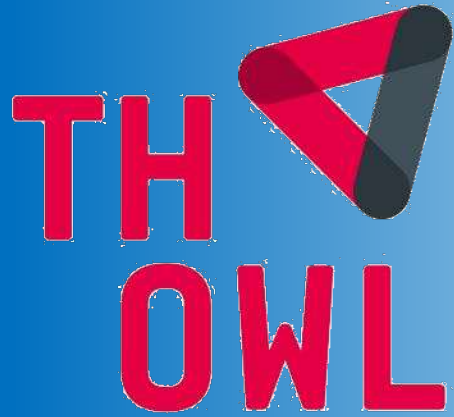
- Die Zuverlässigkeit von Steckverbindern kann durch eine beschleunigte multivariable Lebensdauerprüfung mit mechanischen und thermischen Belastungen ermittelt werden
- Der Vergleich zwischen Ergebnissen aus Laborversuchen und Felddaten zeigt eine gute Korrelation
 - Neben thermischen Belastungen müssen auch mechanische Einflussfaktoren wie eine Vibrationsbelastung berücksichtigt werden [Song 2019]
- Herausforderung: Hohe, aber keine übermäßig hohe Belastung aufzubringen
- Ausfälle müssen erzeugt werden [Song 2018]

Ausblick

- Gegenüberstellung von FIT Werten aus Felddaten (Altfahrzeuge) mit FIT Werten aus beschleunigten Lebensdauerprüfungen, um die Validität der Modelle weiter zu bestätigen
- Bestimmung von designspezifischen Schädigungskoeffizienten für die Anwendung in den Modellen
- Passende Belastungsprofile für verschiedene Anwendungen (z.B. Elektromotoren vs. Verbrennungsmotoren) müssen erarbeitet werden

Quellen:

- Michael Blauth (2017) Parametrisierte Modelle zur konstruktiven Auslegung optimierter elektrischer Steckverbinderkontakte, Dissertation, ISBN: 978-3-86360-155-3
- Song J., Yuan H., Koch C. (2018) Accelerated Testing of Electromechanical Connectors Considering Thermal and Mechanical Loads. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, [S.l.], S 467–474. doi:10.1109/HOLM.2018.8611653
- Song J., Yuan H., Shukla A., Koch C., Hilmert D. (2019) Correlation of Connector Contact Failures in Accelerated Testing and in Long-term Use Field Vehicles. In: 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, S 296–302. doi:10.1109/HOLM.2019.8923844
- Song J., Shukla A., Probst R. (2022) Prediction of failure in time (FIT) of electrical connectors with short term tests. Microelectronics Reliability 138:114684. doi:10.1016/j.microrel.2022.114684
- Philipp Kolmer (2024) Qualifikationsverfahren und Analysemethoden zur Untersuchung der Zuverlässigkeit elektrischer Steckkontakte für das Fahrzeugbordnetz, Dissertation, DOI: 10.17185/duepublico/81972
- Abhay Rammurti Shukla (2024) Parametric and Numeric Design and Test of Electrical Connectors, Dissertation, DOI: 10.17185/duepublico/81939
- Kevin Krüger (2025) Zuverlässigkeitsbestimmung von Steckverbindern; Dissertation, DOI: 10.17185/duepublico/83411
- TLF 0214 (2021) ZVEI - Technischer Leitfaden – TLF 0214. Validierung von Automotive-Niedervolt-Steckverbindern, Frankfurt am Main.



TECHNISCHE HOCHSCHULE
OSTWESTFALEN-LIPPE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Vielen Dank!

Fachgebiet Feinsystemtechnik
Prof. Dr.-Ing. Michael Blauth