

# Thermische Modellierung und Charakterisierung feinwerktechnischer Baugruppen

E. Bindl  
H. Neubert  
J. Ziske

04.11.2008

# Gliederung

## 1. Einleitung

## 2. Thermische Modellierung

- Aufgabe und Ziel
- Ansätze und Methoden
- Beispiele

## 3. Thermische Charakterisierung

- Aufgabe und Ziel
- Temperaturmessung
- Beispiele

## 4. Zusammenfassung

## Einleitung

- Verlustleistung wird in Form von Wärme abgegeben und erzeugt thermische sowie thermomechanische Beanspruchungen in feinwerktechnischen Baugruppen
- Verlustleistung beeinflusst Funktion und Zuverlässigkeit in der Regel negativ
- Thermische Dimensionierung ist wesentlicher Bestandteil des konstruktiven Entwurfsprozesses

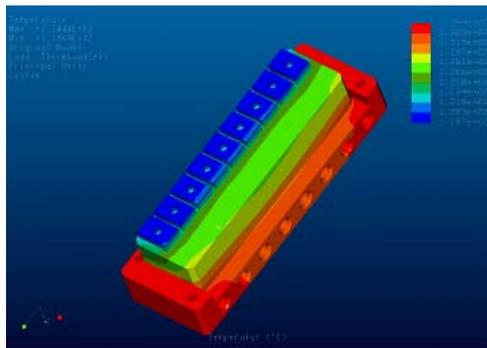
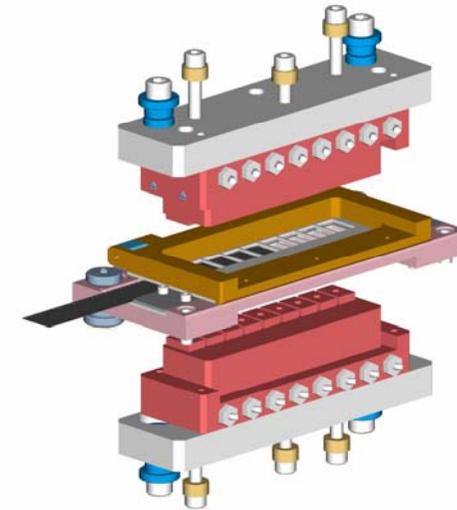
### **Teilaufgaben des thermischen Entwurfs**

- Analyse der Verlustleistungsquellen, Wärmetransportvorgänge sowie Beschreibung der stationären und transienten Temperaturfelder
- Erarbeitung von Ansätzen zur verbesserten Verlustwärmeabfuhr

# Einleitung

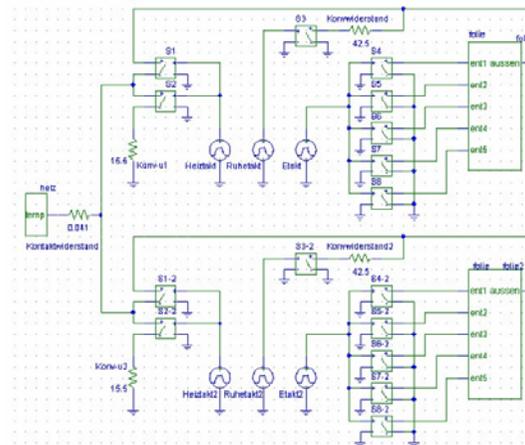
## Methoden des thermischen Entwurfs

- Modellierung thermischer Zusammenhänge
- Experimentelle Charakterisierung von Werkstoffen, Bauelementen, Baugruppen und Geräten
  - Bsp. Tiefzieheinheit einer Tape-Forming-Maschine für Blistertape

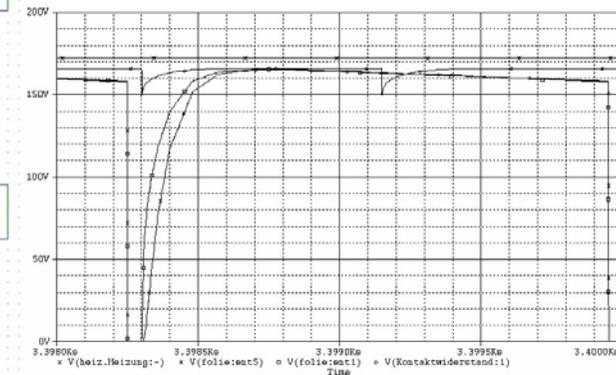


Stationäres Temperaturfeld der Heizbacke (FE-Modell)

Dipl.-Ing. E. Bindl



Transientes Temperaturverhalten (Netzwerk-Modell)



Thermische Modellierung und Charakterisierung  
feinwerktechnischer Baugruppen

# Thermische Modellierung

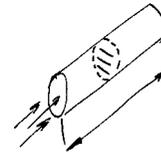
## Aufgabe und Ziel

- Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder, die durch die Wechselwirkung von Wärmequellen, **Wärmetransport** und Wärmesenken entstehen

## Wärmetransportvorgänge

- **Wärmeleitung**

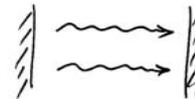
- Wärmeleitungsgleichung (Fouriersches Gesetz)



$$\vec{Q} \propto \Delta T$$

- **Wärmestrahlung**

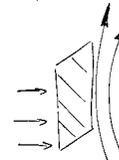
- Strahlungstransportgleichung



$$\vec{Q} \propto T^4$$

- **Konvektion**

- Wärmeleitungsgleichung
- Navier-Stokes-Gleichung



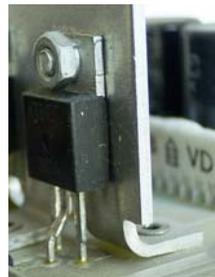
$$\vec{Q} \propto \Delta T \quad (\alpha = const.)$$

➔ Modellierung gelingt nur unter Vereinfachung der Gleichungen und Abstraktion des Aufbaus

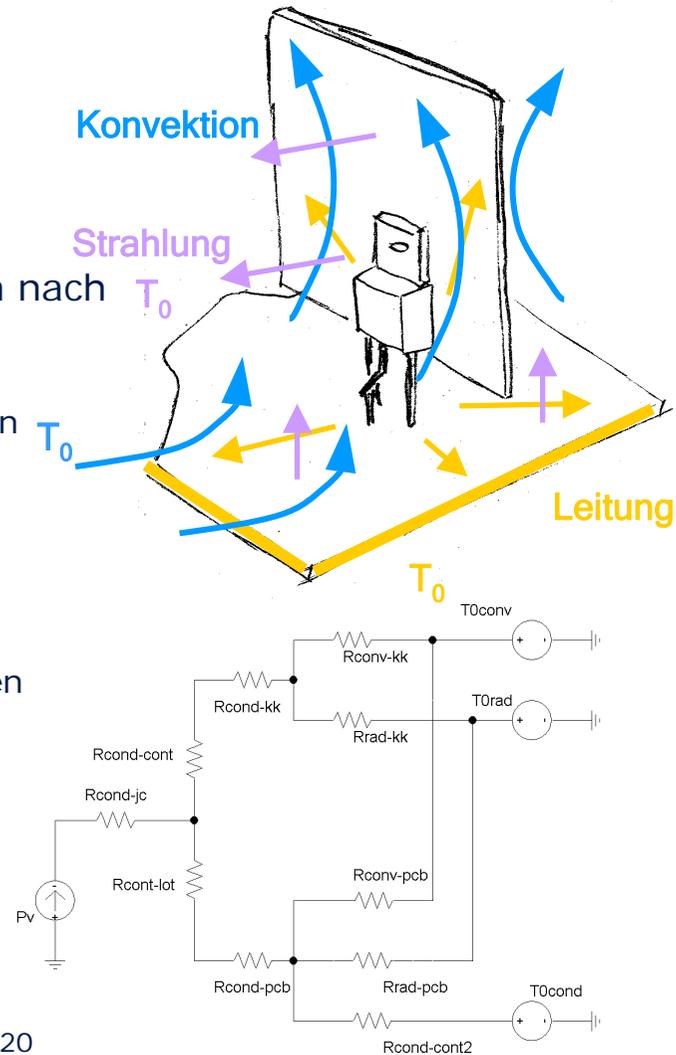
# Thermische Modellierung

## Ansätze und Methoden

- Modelle mit räumlich konzentrierten Elementen nach  $T_0$  der Netzwerkmethod
  - System lokalisiert in räumlich nicht ausgedehnten Elementen (ortsunabhängig)
  - Elemente bilden ein Netzwerk (Netzwerkgraph)
  - dynamisches Verhalten  $\Rightarrow$  gewöhnliche DGL
  - stationäres Verhalten  $\Rightarrow$  algebraische Gleichungen
  - Analytische oder numerische Berechnung der Feldgrößen



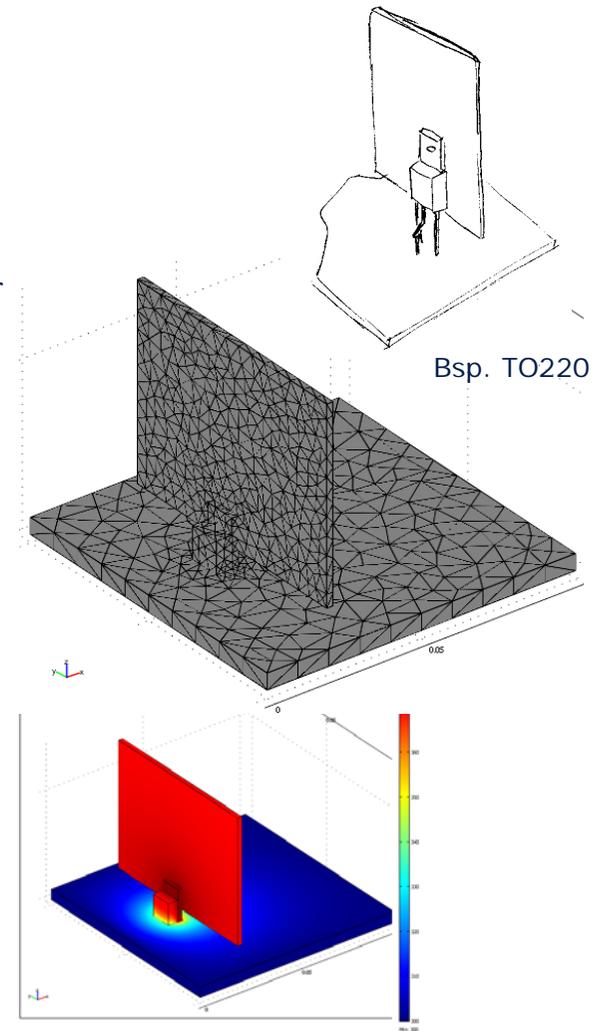
Bsp. TO220



# Thermische Modellierung

## Ansätze und Methoden

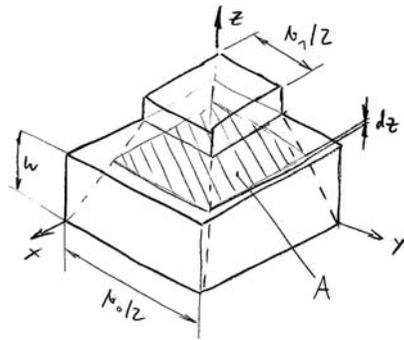
- Modelle mit räumlich verteilten Elementen nach der Finite-Elemente-Methode
  - Systemverhalten nicht lokalisiert, sondern von orts- und zeitabhängig
  - Modellierung einer vereinfachten Geometrie unter Beachtung der Anfangs- und Randbedingungen
  - dynamisches, stationäres Verhalten  $\Rightarrow$  PDGL
- Gekoppelte Modelle
  - Thermisch-Fluidmechanisch (Wärmeleitung+Konv.)
  - Thermisch-Elektrisch (Joulsche Wärme)
  - Thermisch-Strukturmechanisch (Zuverlässigkeit)
  - kombinierte Modelle (NW + FE)



# Thermische Modellierung

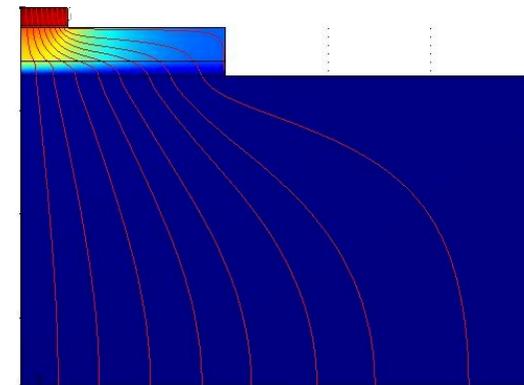
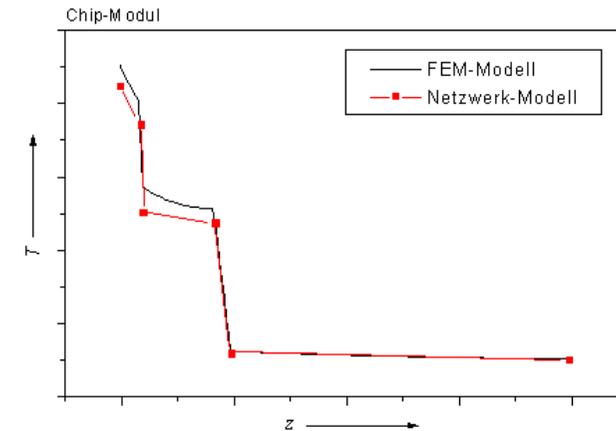
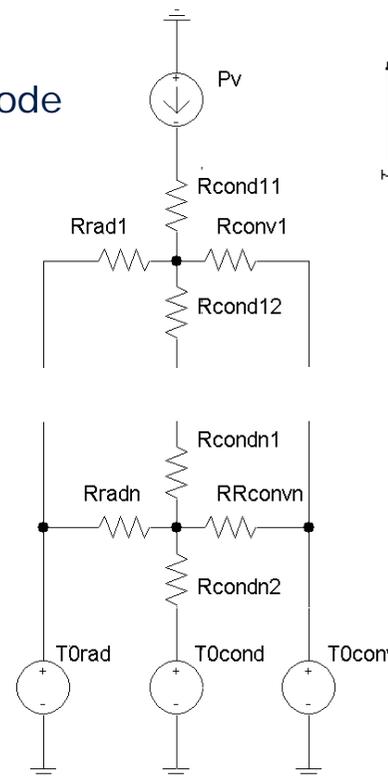
## Ansätze und Methoden

- Vergleich NW- und FEM-Methode
  - Bsp. Chipmodul auf LP



$$RL = \frac{1}{\lambda} \int_0^h \frac{1}{A(z)} dz$$

$$RL = \frac{h}{\lambda \cdot b_0 \cdot b_1}$$

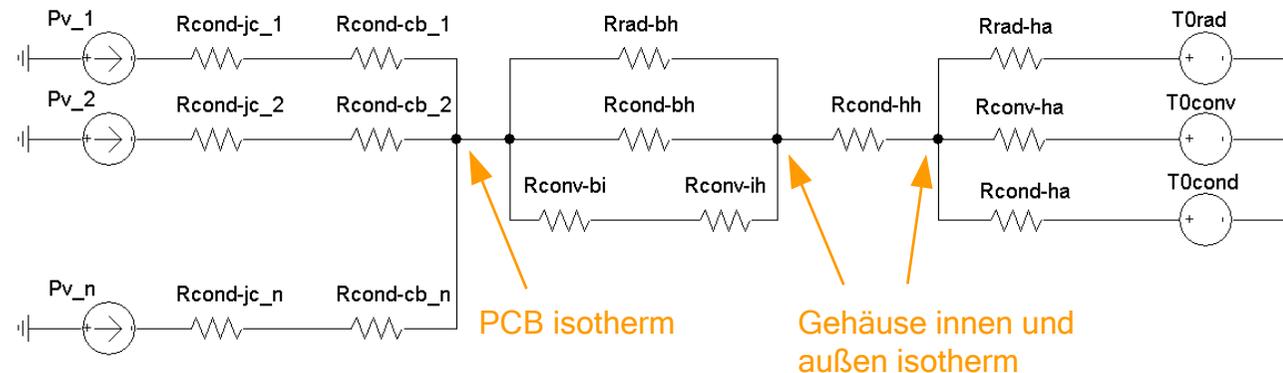


Stationäres Temperaturfeld (FE-Modell)

# Thermische Modellierung

## Beispiel - Automobilsteuergerät

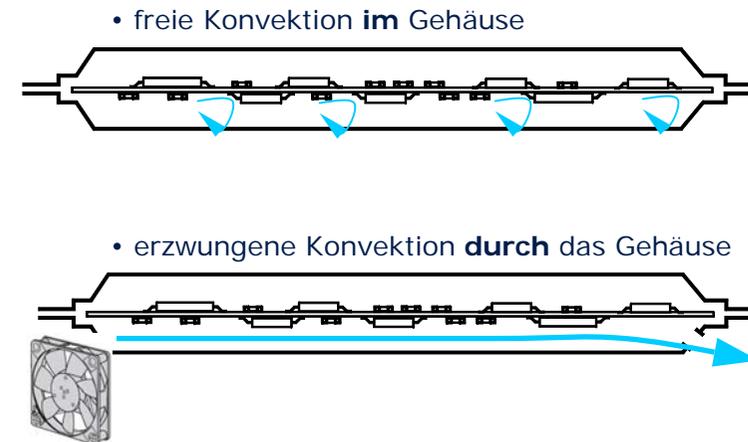
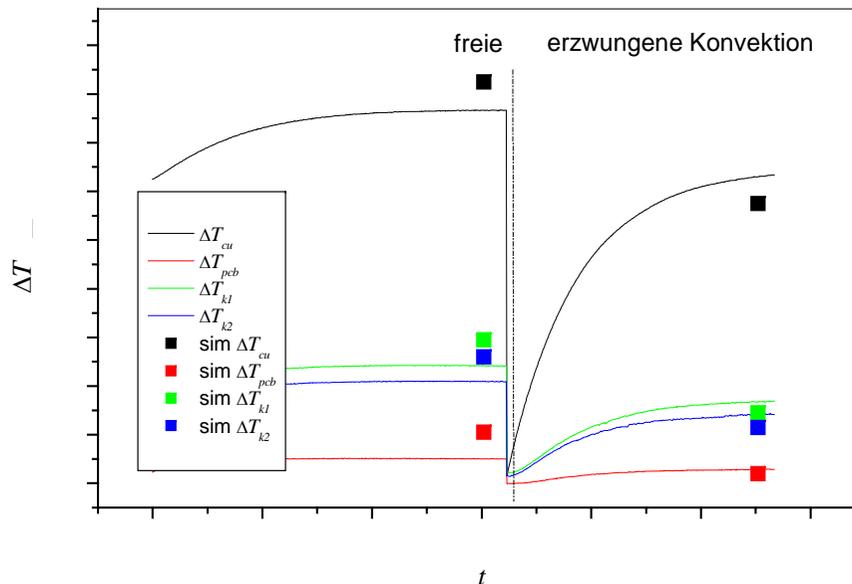
- Einflußanalyse verschiedener RB und Berechnung der Gehäusetemperatur am Netzwerkmodell
  - Verlustleistung in BE
  - Wärmeleitung, Konvektion (freie vs. erzwungene) und Strahlung im Gehäuse und an die Umgebung
  - stationäres Modell ohne Wärmekapazitäten



# Thermische Modellierung

## Beispiel - Automobilsteuergerät

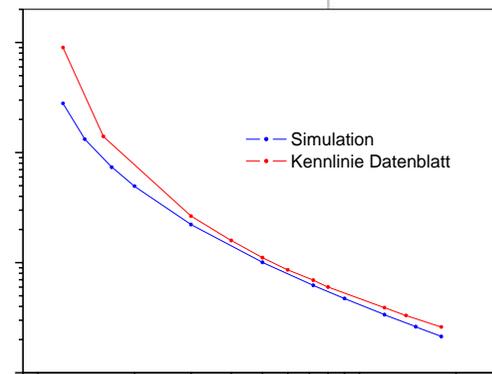
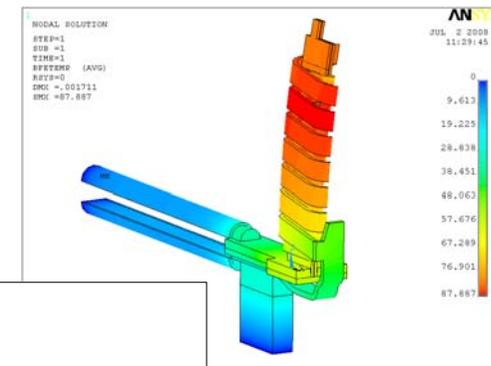
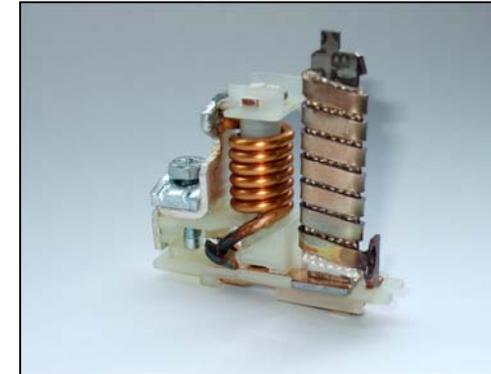
- Einflußanalyse verschiedener RB und Berechnung der Gehäusetemperatur am Netzwerkmodell
  - Temperaturen bei freier und erzwungener Konvektion



# Thermische Modellierung

## Beispiel - Überlastauslöser mit Thermobimetall

- Berechnung des Temperaturfeldes und der Ausbiegung mit transientem elektrisch-thermo-mechanischen FE-Modell
  - Joulesche Wärme im gesamten Strompfad
  - Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung
  - Kontaktelemente zwischen Heizleiter und Bimetall
  - Modelldaten:  
61300 Knoten, 16400 Elemente
  - Rechenzeit:  
transienter Auslösevorgang ca. 1h  
komplette Auslösekennlinie ca. 12h



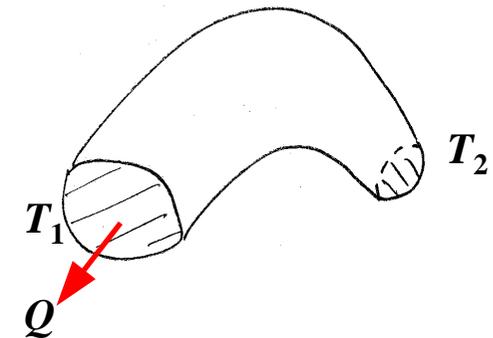
# Thermische Charakterisierung

## Aufgabe und Ziel

- Parameterbestimmung von Werkstoffen, Bauelementen und Anordnungen
- Entwicklung zugeschnittener Versuchsstände
- Verifizieren der Berechnungsmodelle durch Messungen

## Parameter

- Thermischer Widerstand
  - Verhältnis aus Temperaturdifferenz  $\delta T$  zwischen zwei isothermen Grenzflächen eines Elementes, die vom selben Wärmestrom  $Q$  durchdrungen werden
- Messgrößen
  - Temperatur
  - Wärmestrom (indirekt über Temperatur gemessen)

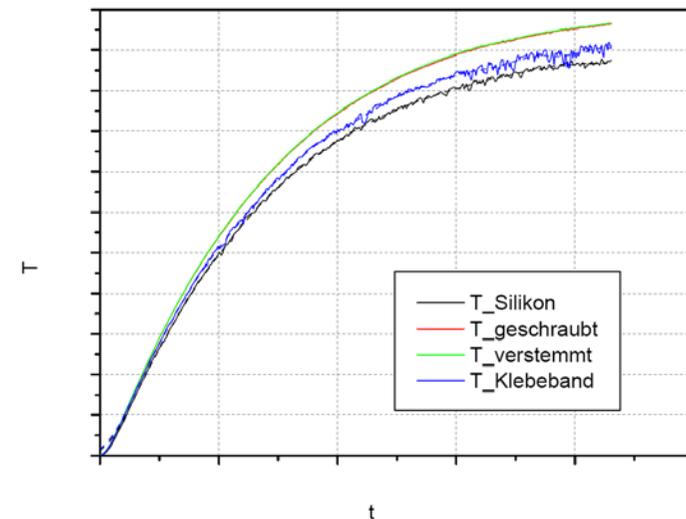
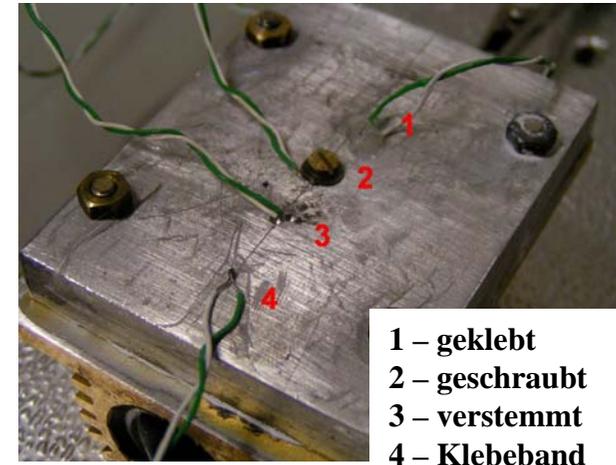


$$R_{th,cond} =: \left| \frac{\Delta T}{Q} \right|$$

# Thermische Charakterisierung

## Temperaturmessung - Thermoelement

- Oft nicht beachtete Meßfehlerquellen
  - Wärmeaustrag durch das Thermoelement
    - dünne Drähte und entlang kleiner  $dT/dx$  führen
  - Meßfehler durch ungenügenden thermischen Kontakt
    - verstemmen, anlöten
  - Meßfehler durch galvanisch induzierte Ströme
    - galvanisch trennen oder Messung und Auswertung mit wechselnder Stromrichtung

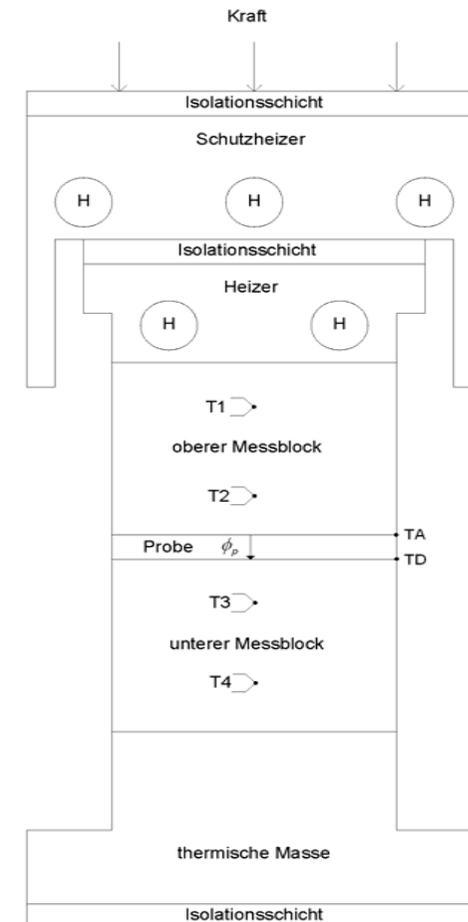


# Thermische Charakterisierung

## Beispiel - Durchgangswiderstand Kontaktwerkstoffe

- Messung des thermischen Durchgangswiderstandes nach ASTM D5470-01
  - Thermischer Durchgangswiderstand einer dünnen Probe zwischen zwei Meßblöcken
  - Heizer mit Schutzheizer
  - Meßblöcke homogen mit je zwei eingebohrten Thermoelementen
  - Berechnung des Wärmestromes aus bekanntem  $\lambda$  des Materials der Blöcke
  - Grenzschichttemperatur aus geometrischer Beziehung

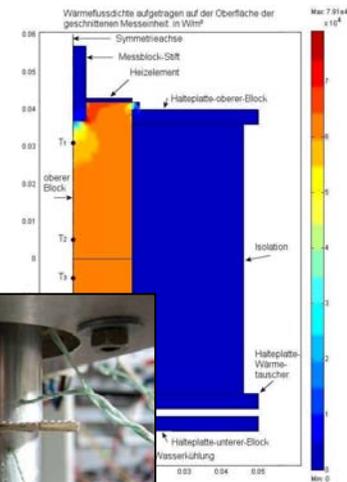
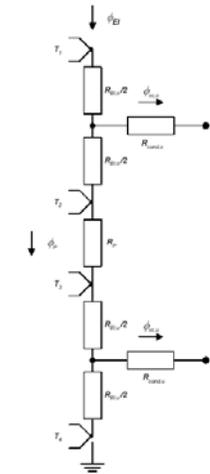
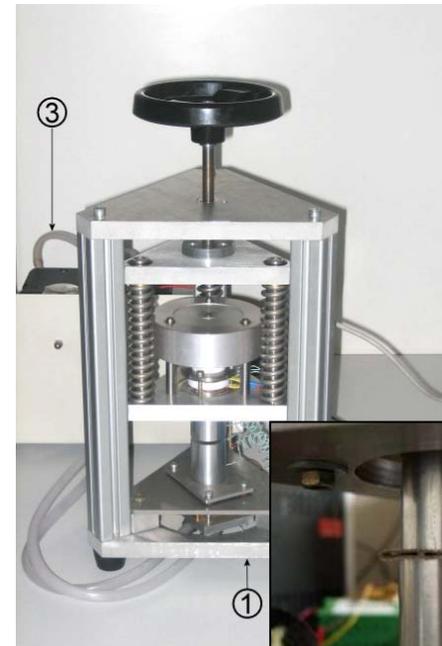
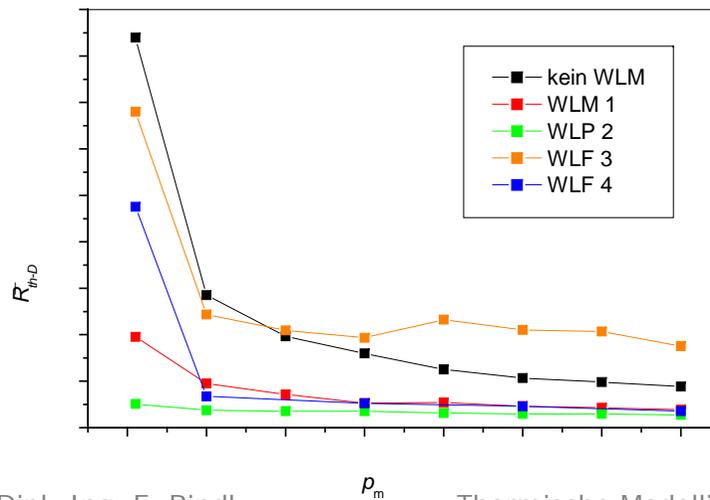
$$R_D = \frac{T_A - T_D}{\phi_p}$$



# Thermische Charakterisierung

## Beispiel - Durchgangswiderstand Kontaktwerkstoffe

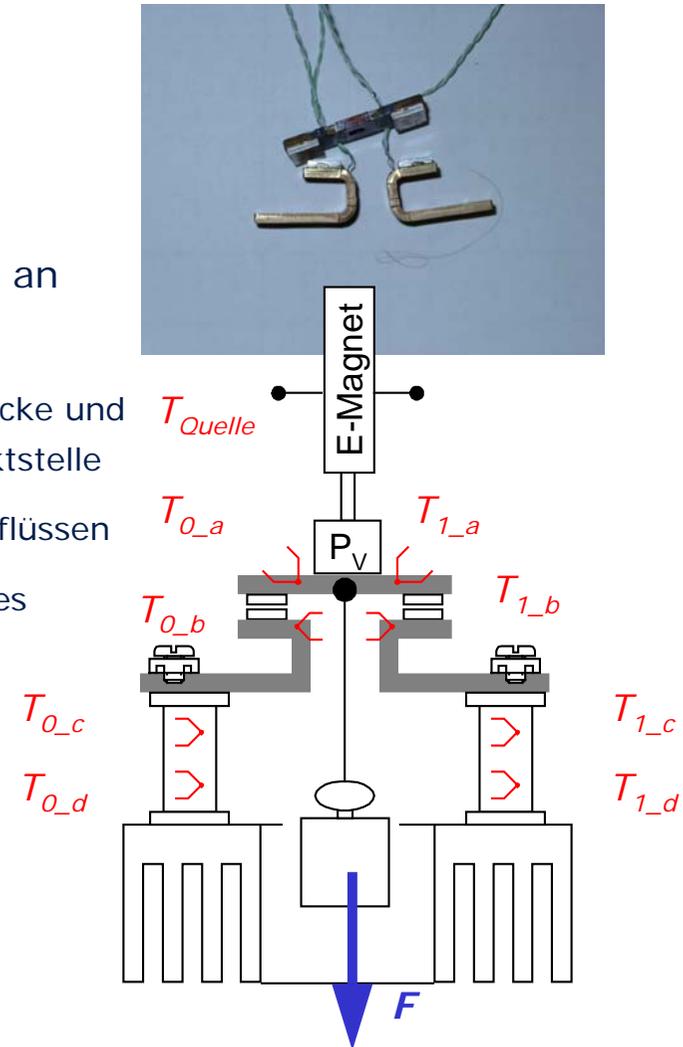
- Messung des thermischen Durchgangswiderstandes nach ASTM D5470-01
  - modellbasierte Auswertung
  - Messunsicherheit < 10%
  - Wärmeleitmedium bestimmt  $R_{th}$



# Thermische Charakterisierung

## Beispiel - Therm. Widerstand Schaltkontakte

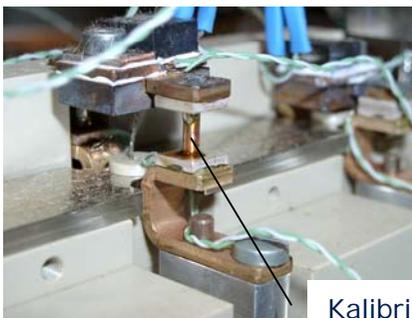
- Messung des thermischen Gesamtwiderstandes an Niederspannungs-Schaltkontakten
  - Anlegen einer konstanten Temperatur an die Brücke und Messen der Temperaturdifferenz über der Kontaktstelle
  - Definierte Wärmepfade mit geringen Wärmequerflüssen
  - Thermische Referenzwiderstände zur Kontrolle des Wärmestromes
  - Auslesen der Temperaturen nach Einstellen des stationären Zustands
  - Einstellen verschiedener Kontaktkräfte



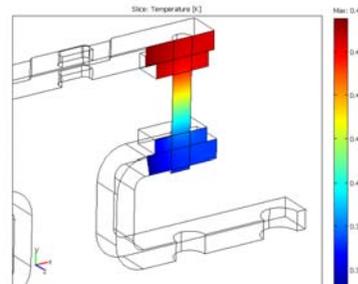
# Thermische Charakterisierung

## Beispiel - Therm. Widerstand Schaltkontakte

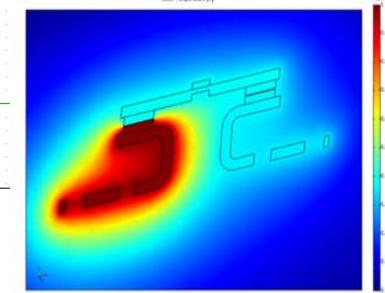
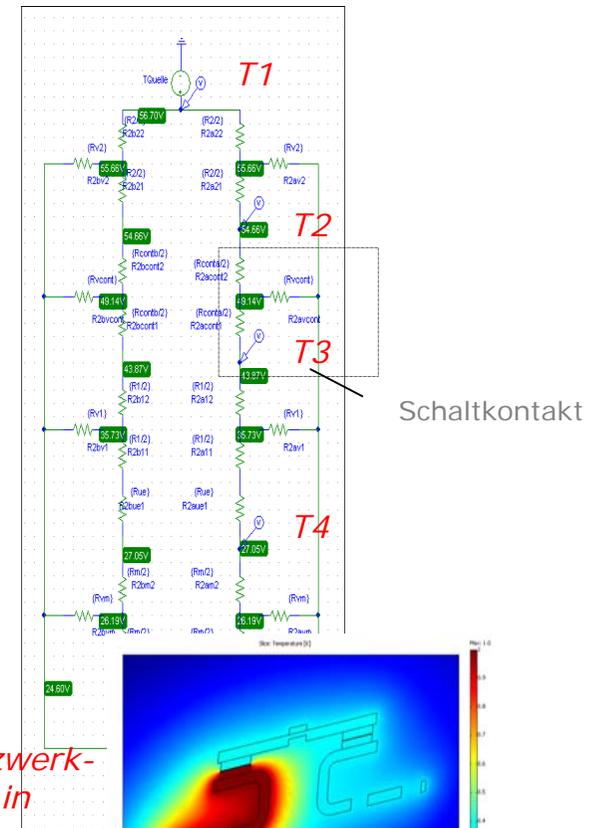
- Messung des thermischen Gesamtwiderstandes an Niederspannungs-Schaltkontakten
  - modellbasierte Auswertung (Netzwerk- und FE-Modelle)
  - Kalibriermessung zum Nachweis der Meßunsicherheit (< 15%)



Kalibrierwiderstand zwischen den Schaltkontakten



1. Netzwerk-Modell in PSpice



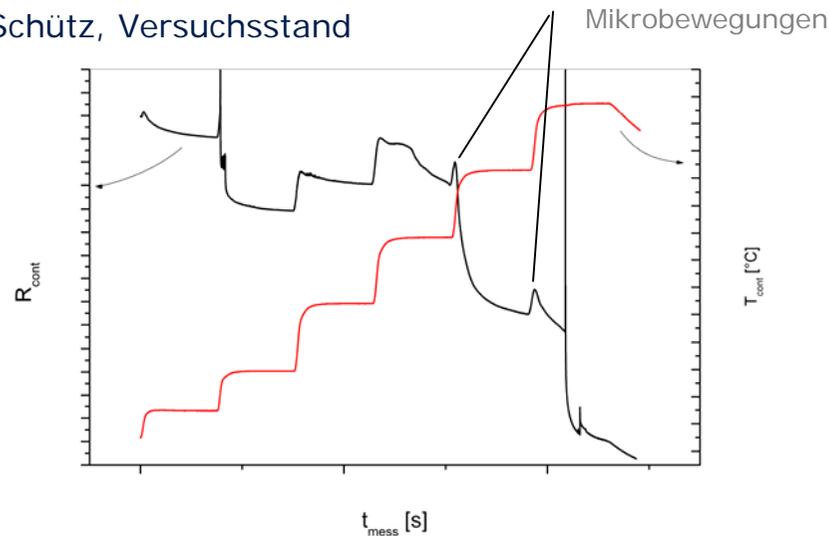
2. Parameterfindung mit FE-Modell in COMSOL

# Thermische Charakterisierung

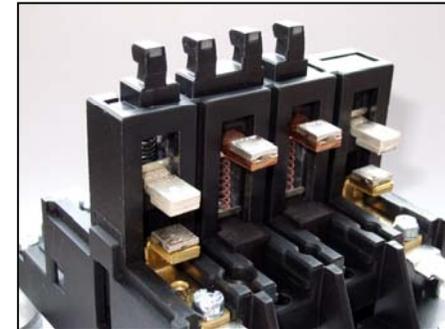
## Beispiel - Therm. Widerstand Schaltkontakte

- Messung des thermischen Gesamtwiderstandes an Niederspannungs-Schaltkontakten

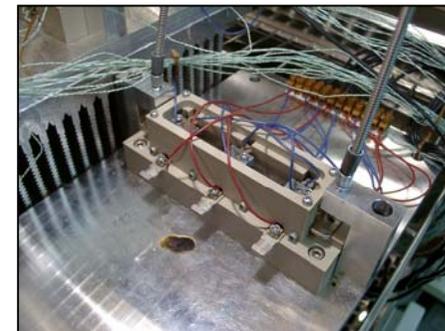
– Schütz, Versuchsstand



- ➔ Setzungen durch Mikrobewegungen erzeugen Widerstandsschwankungen (elektrisch und thermisch)



Anordnung im Schütz



Aufbau im Klimaschrank

# Zusammenfassung

## Bedeutung des Thermischen Entwurfs

- Alle elektronischen Systeme geben Verlustleistung in Form von Wärme ab.
  - Bauelemente, Leitungs- und Verbindungselemente funktionieren nur innerhalb bestimmter zulässiger Temperaturbereiche.
  - Im zulässigen Temperaturbereich nimmt die Ausfallwahrscheinlichkeit mit der Temperatur zu.
  - Die Verlustleistungsdichten in der Elektronik erhöhen sich:
    - Miniaturisierung
    - Erhöhung von Integration und Packungsdichte
    - höhere Schaltfrequenzen.
  - Elektronische Baugruppen und Geräte arbeiten zunehmend unter höheren Einsatztemperaturen und Schutzgraden.
- ➔ **Thermische Modellierung** und **experimentelle Charakterisierung** sind unverzichtbare Methoden, um den Entwurfsprozess zu unterstützen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !