

Zentrum für mikrotechnische Produktion

# Kann das funktionieren?

## Analyse der Löt- oder Sinterverbindung zwischen DCB und Die mittels Kontaktthermografie

Martin Oppermann, Thomas Zerna - Dresden, 08.12.2021

**FED**

Fachverband für Design,  
Leiterplatten- & Elektronikfertigung

SACHSEN



**VDE / VDI**

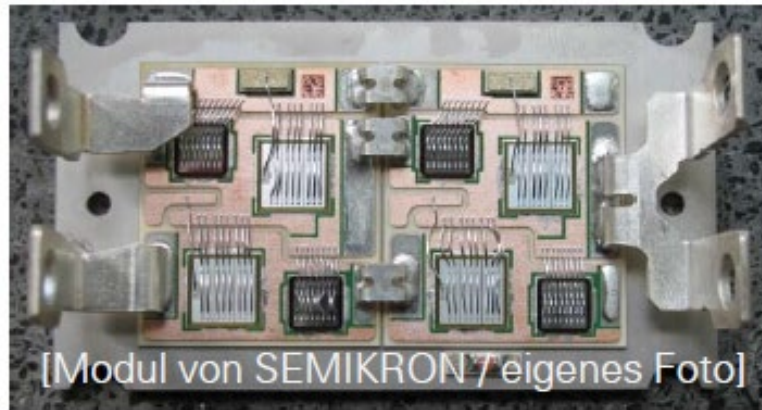
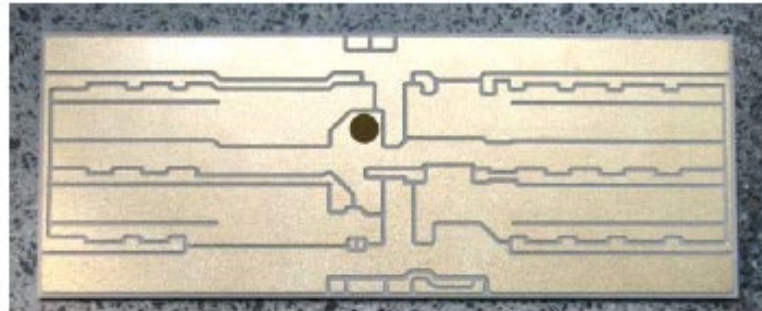
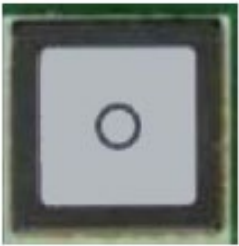
*Sächsischer  
Arbeitskreis  
Elektronik-  
Technologie*

# Agenda

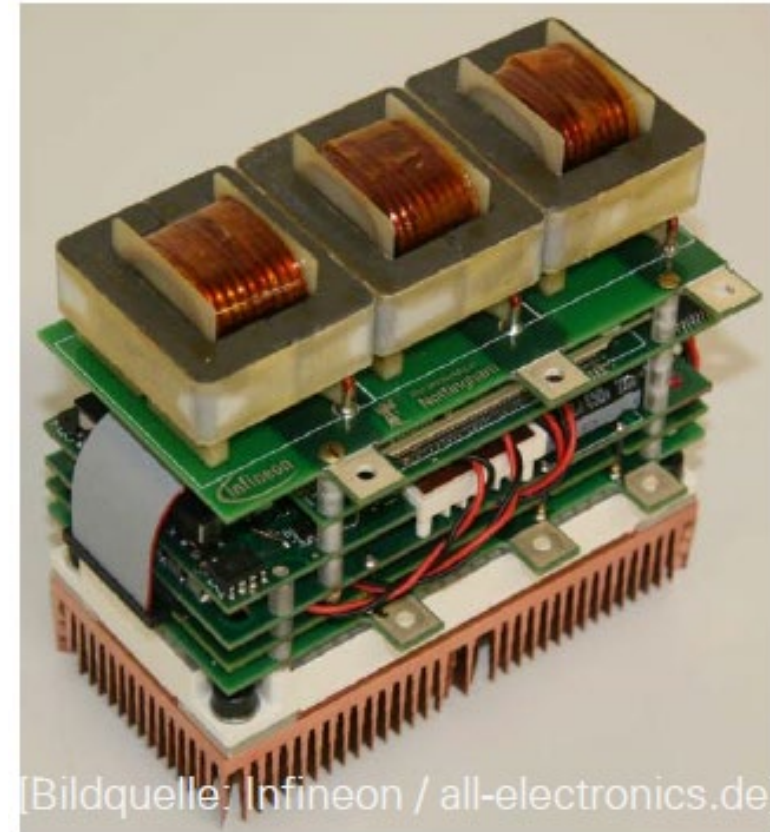
- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und nächste Schritte

# Motivation: zfP-Bedarf für die Leistungselektronik

- Leistungsmodule der Elektromobilität bzw. für die Wandlung erneuerbarer Energien basierend auf IGBTs, Dioden, FETs auf Si- oder SiC-Basis
- montiert als Die auf DCB-Substraten



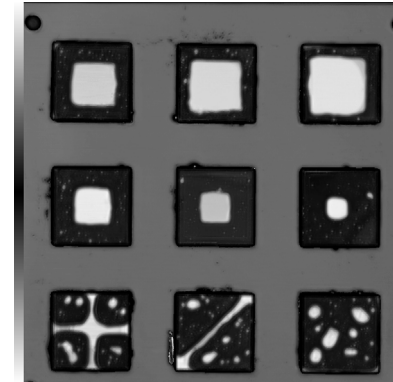
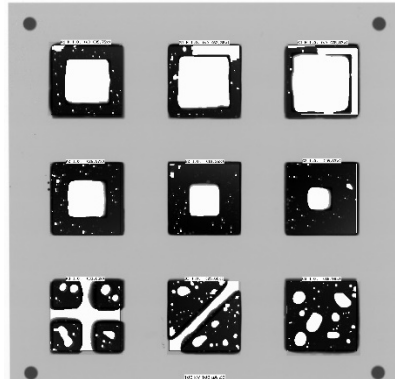
[Modul von SEMIKRON / eigenes Foto]



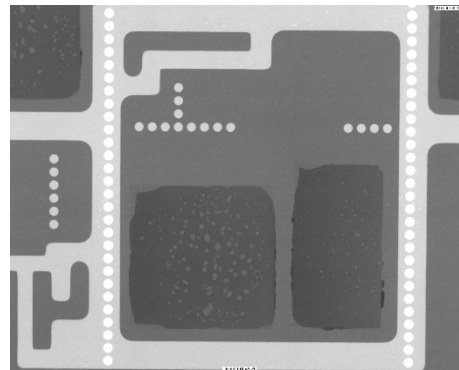
[Bildquelle: Infineon / all-electronics.de]

# Die Vorgeschichte: zfP-Bedarf für die Leistungselektronik

- Montagetechnologien: Löten und Ag-Sintern
- Serientaugliche zfP-Verfahren:
  - Gelötete Dies: Röntgen-Radiografie und (bedingt) Ultraschallinspektion



- Gesinterte Dies:



???

➔ Fazit:  
Es gibt keine serientaugliche zfP für Sinterverbindungen!

# Agenda

- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und nächste Schritte

# Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern

## *Eigenschaften der Wärmeausbreitung:*

Thermische Welle:

- Anregung durch zeitabhängige **Erwärmung** in einem Material
- Ausbreitung eines zeitlich und räumlich veränderlichen **Temperaturfeldes**
- „Thermische Welle“ entspricht damit einem **Diffusionsvorgang**  
→ keine Schwingung (wie bei Wellen) möglich

Wichtige Materialeigenschaften:

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität  $c$   
→ Wärmeeindringkoeffizient  
(thermische Effusivität)  $e = \sqrt{\lambda \rho c}$   
→ Temperaturleitwert  
(thermische Diffusivität)  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$

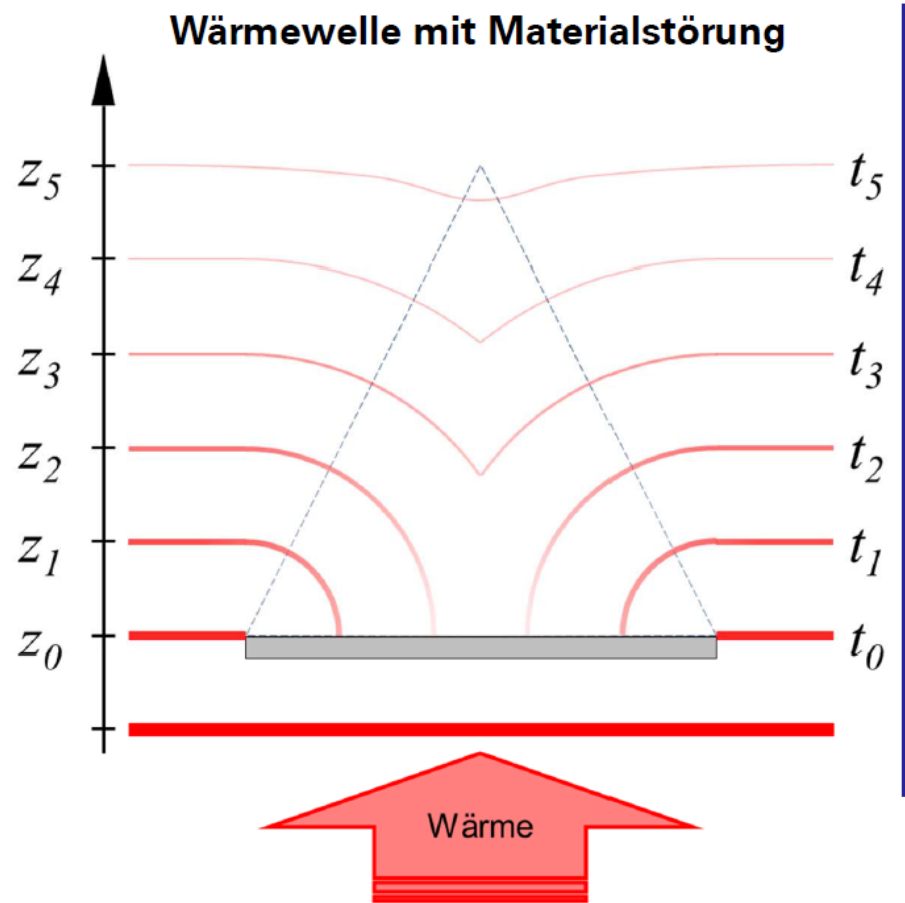
→ *Durch Messung erfassbare Eindringtiefe:*

→ thermische Diffusionslänge  $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$  → **Eindringtiefe durch Modulationsfrequenz  $f$  der Heizung einstellbar**

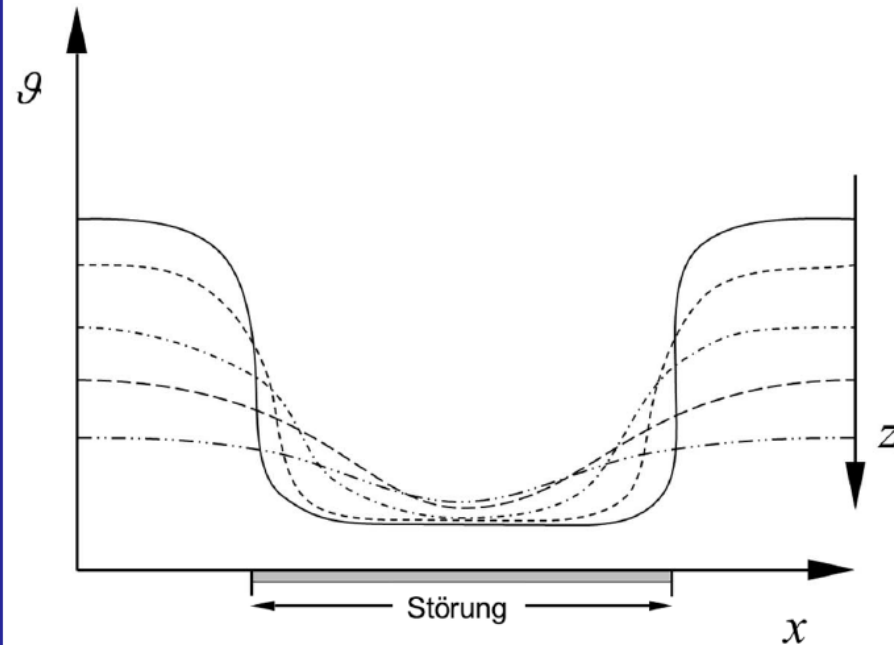


# Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern

## Eigenschaften der Wärmeausbreitung:



## Temperaturverteilung hinter Störstelle



$$a = \frac{Z}{X} = \frac{\text{Tiefe der Störung}}{\text{laterale Ausdehnung der Störung}}$$

→ Messung möglich bis  $a \leq 1$

$Z = (150) 300 \dots 500 \mu\text{m}$   
 $X > 500 \mu\text{m}$

# Agenda

- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und nächste Schritte

# Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies

## ***Generelle Problematik der Strahlungsthermografie: T-Offset***

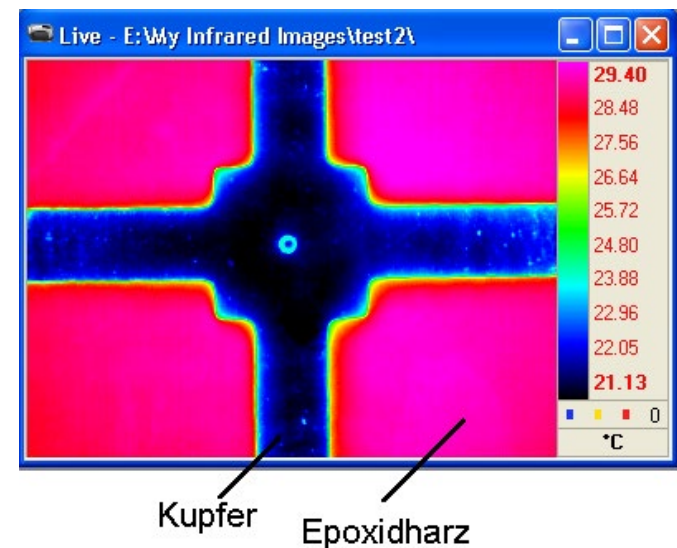
- Absoluter Nullpunkt:  $-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$
  - Die Mehrheit der T-Messungen laufen bei Raumtemperatur oder höher und benötigen hohe thermische Auflösungen (z.B. 50mK)
- ➔ Notwendige Quantisierung für z.B. Messbereich bis 200°C und 50mK Auflösung:  
ca. 9.500 Stufen    14bit ADU-Auflösung

# Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies

## Emissionsgrade von Metallen und Nichtmetallen:

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Emissionsgrad>

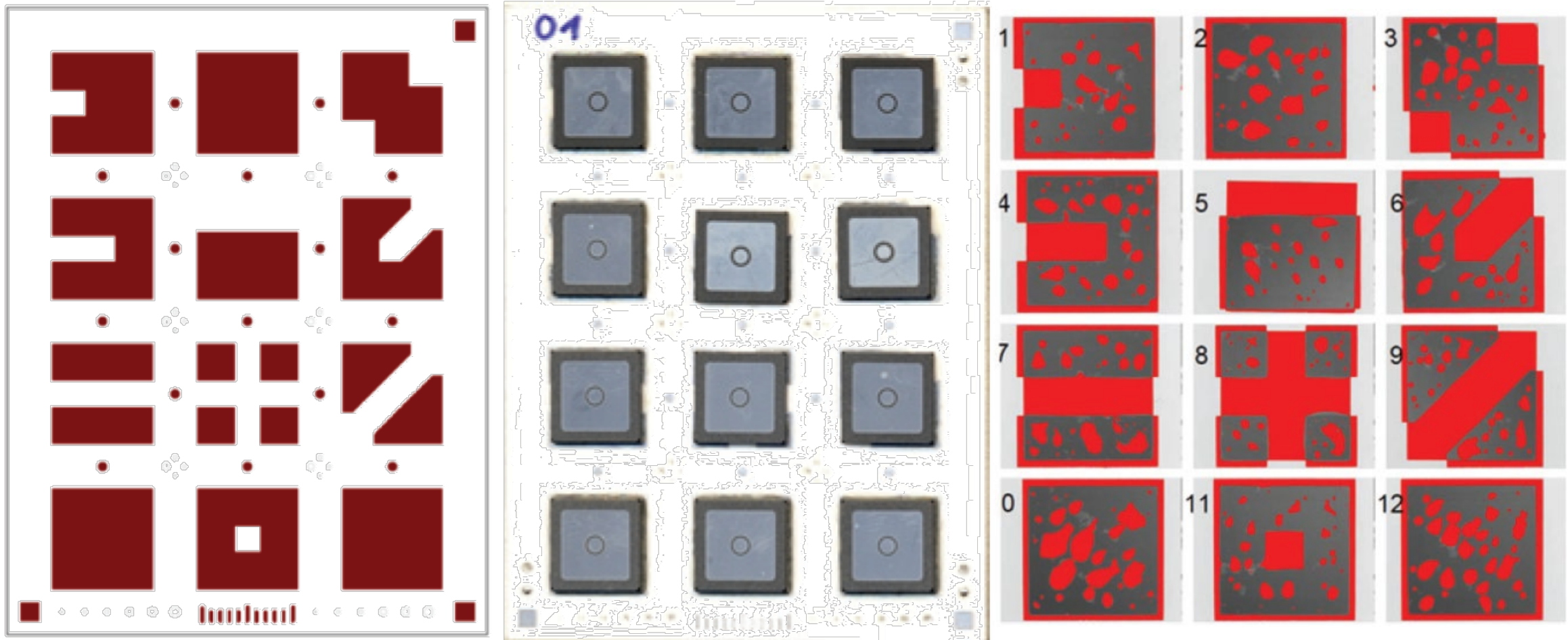
Stoff	Temperatur $\vartheta$ °C <sup>[1]</sup>	Gesamtemissionsgrad in Richtung der Flächennormale $\epsilon_n$
<a href="#">Eisen</a> , poliert	-73...727	0,04...0,19
—, oxidiert	-73...727	0,32...0,60
—, blank geschmiegelt	25	0,24
—, blank geätzt	150	0,128
—, Gußhaut	100	0,80
—, angerostet	25	0,61
—, stark verrostet	20	0,85
<a href="#">Gold</a> , poliert	227...627	0,020...0,035
—, oxidiert	-173...827	
<a href="#">Kupfer</a> , poliert	327...727	0,012...0,019
—, oxidiert	130	0,76
—, stark oxidiert	25	0,78



Stoff	Temperatur $\vartheta$ °C	Gesamtemissionsgrad in Richtung der Flächennormale $\epsilon_n$
<a href="#">Buchenholz</a>	70	0,94
Eis, glatt, Dicke > 4 mm	-9,6	0,965
<a href="#">Emaillelack</a> , weiß	20	0,91
Kohle	150	0,81
Papier, weiß, matt	95	0,92
Reifbelag, rau	0	0,985
Sand	20	0,76
Tafelglas, 6 mm dick	-60...0	0,910
	60	0,913

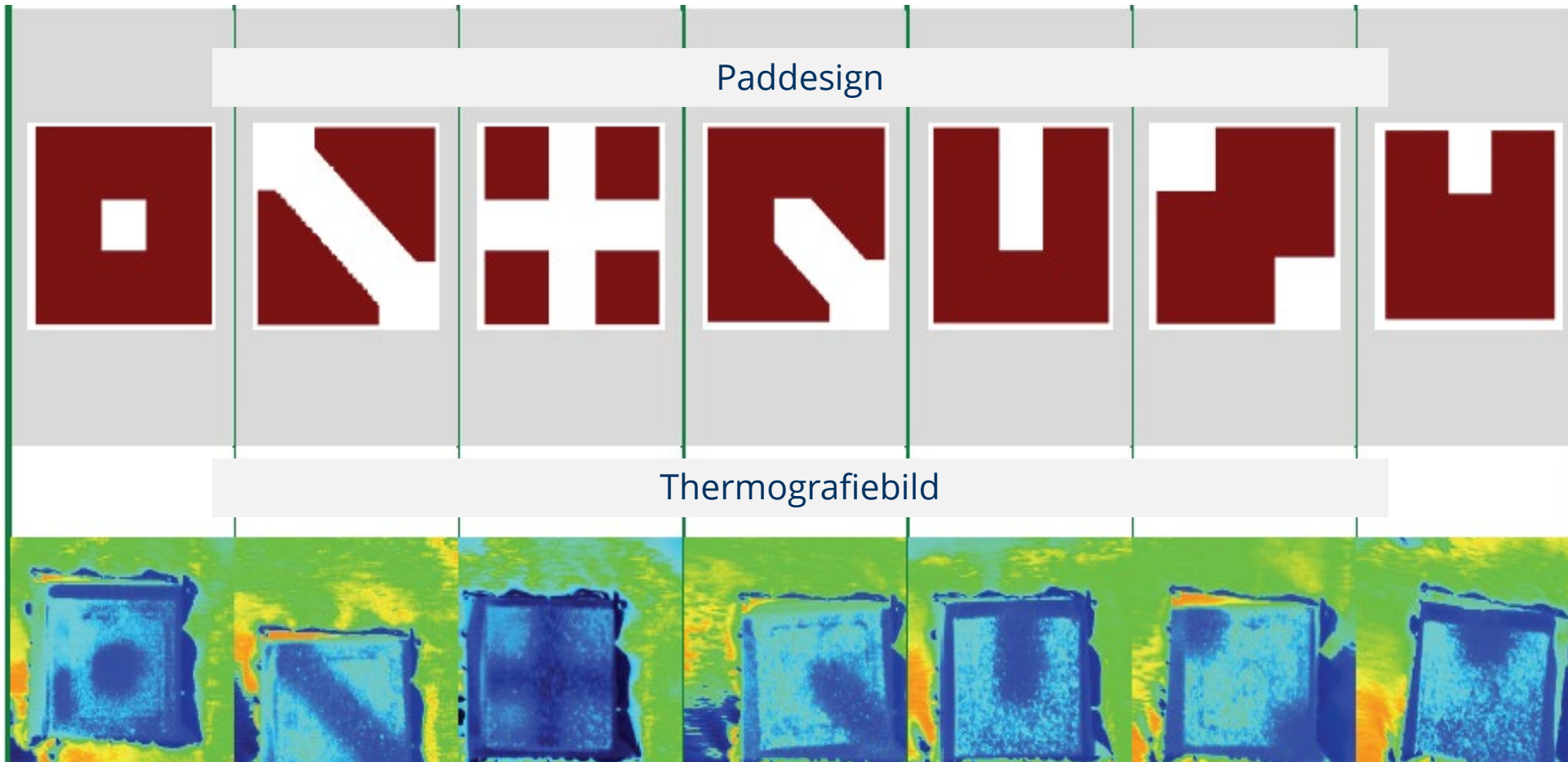
# Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies

**Untersuchungsbeispiel Die-Lötung:** Layout und aufgebautes Muster einer Fehlerbaugruppe



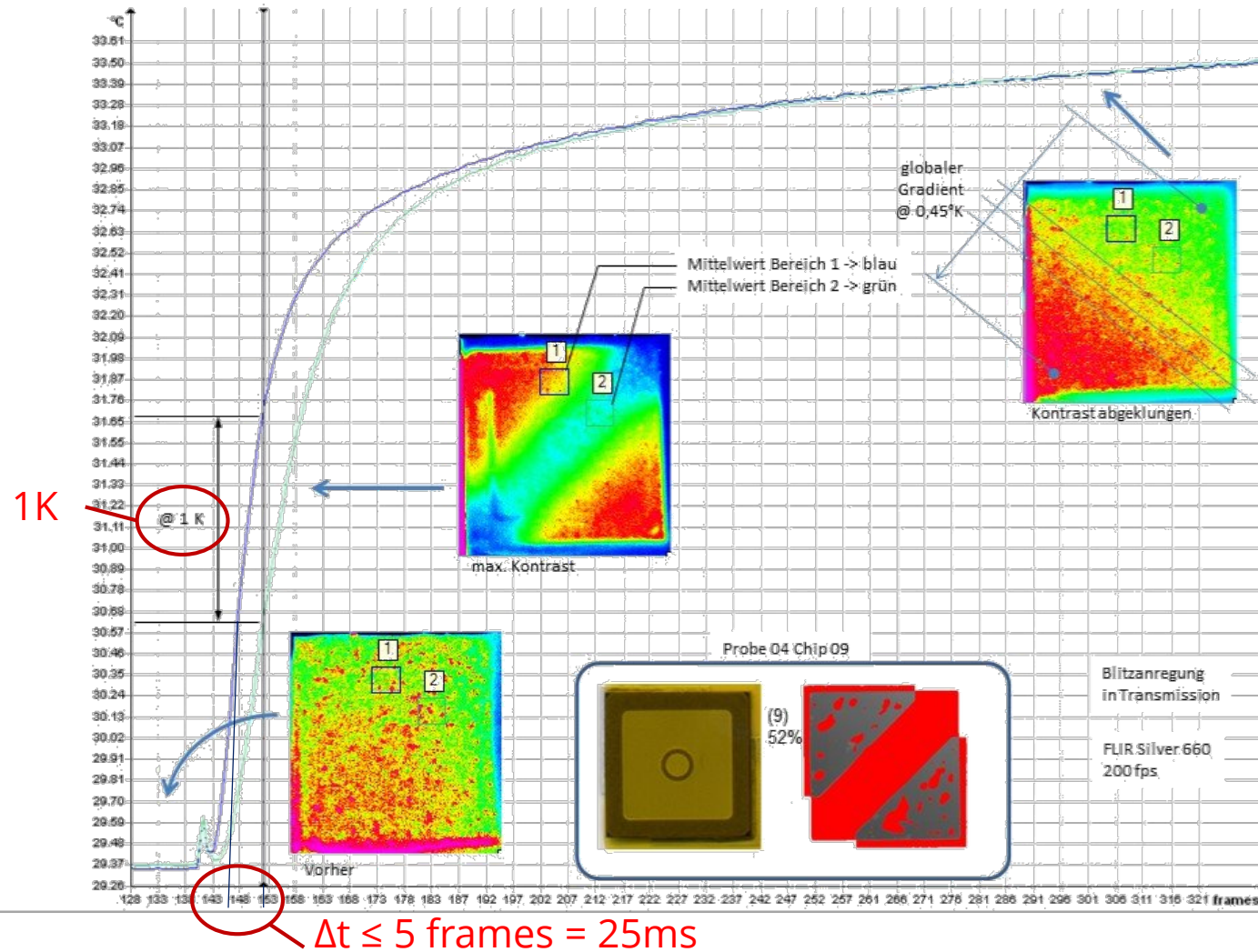
# Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies

**Untersuchungsbeispiel Die-Lötung:** Void-Bestimmung mittels Thermografie (*Dies geschwärzt*)



# Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies

## Untersuchungsbeispiel Die-Lötung: Thermisch-zeitliches Verhalten unterschiedlicher Strukturen



...und, die Proben (Dies) müssen mattschwarz lackiert werden

➔ *Nicht zerstörungsfrei!*

# Agenda

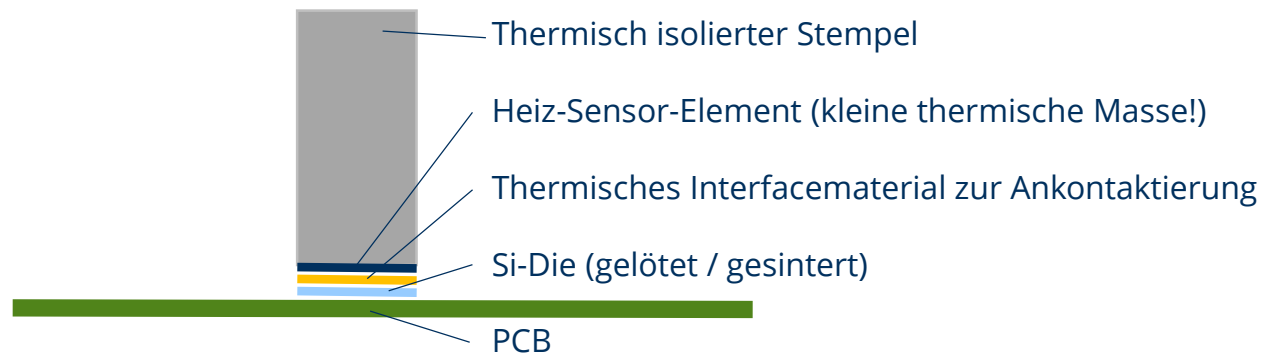
- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und nächste Schritte

# Die Idee „Kontaktthermografie“ – Ergebnisse aus „Dynatherm“

## Ideen zum Inspektionsheizer:

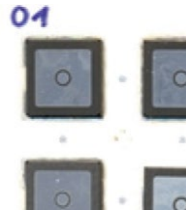
### Idee „Kontaktthermografie“:

- Aufbau eines Heiz-“Pixels“
- Design als Kontaktstempel:

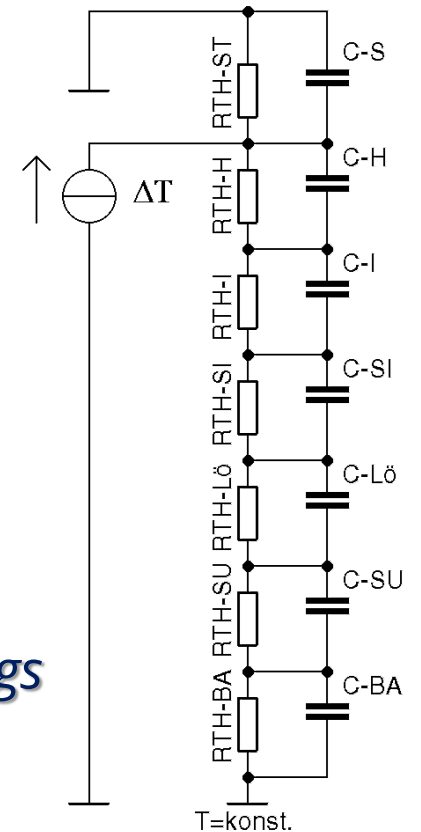


### Inspektionsziel:

Inspektion von Löt- & Sinterverbindungen an Dies („Ersatz“ für Strahlungsthermografie)



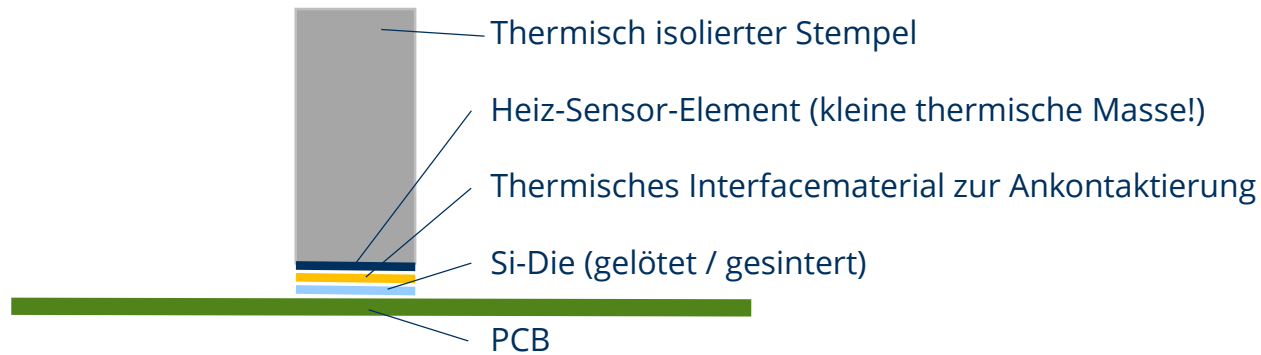
Pin = Pel  $\rightarrow \Phi$



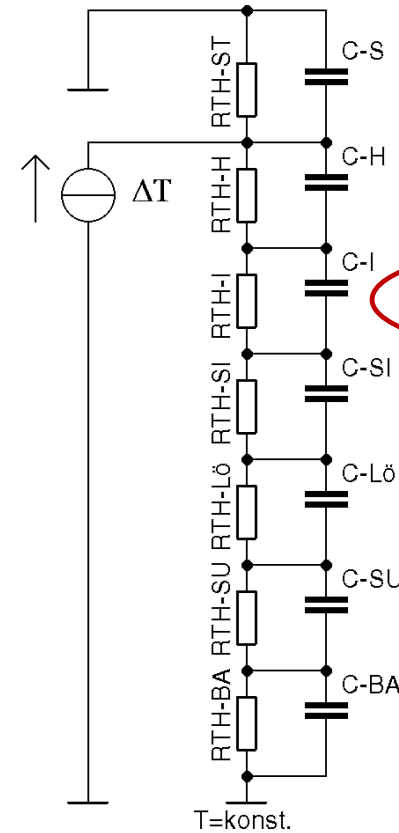
- **Ziel:** Zeitlich und thermisch aufgelöste Messung des *Entwärmungsvorgangs* nach thermischer Anregung durch Heizen

# Die Idee „Kontaktthermografie“

## Zielfunktionen:



$P_{in} = P_{el} \rightarrow \Phi$



## Ziele:

$RTH-ST \rightarrow \infty$

$C-S \rightarrow 0$

$RTH-H \rightarrow 0$

$C-H = \text{konst.}$

$RTH-I \rightarrow 0$

$C-I \rightarrow 0$

$RTH-SI = \text{konst.}$

$C-SI = \text{Konst.}$

$RTH-Lö = ?$

$C-Lö = ?$

$RTH-SU = \text{konst.}$

$C-SU = \text{konst.}$

$RTH-BA \rightarrow 0$

$C-BA \rightarrow \infty$

# Die Idee „Kontaktthermografie“

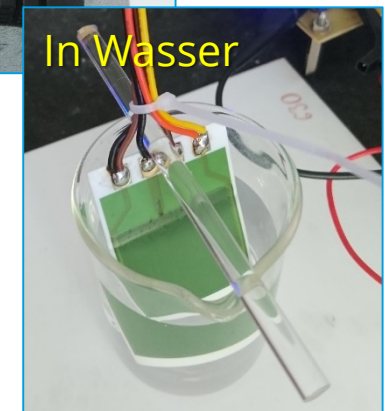
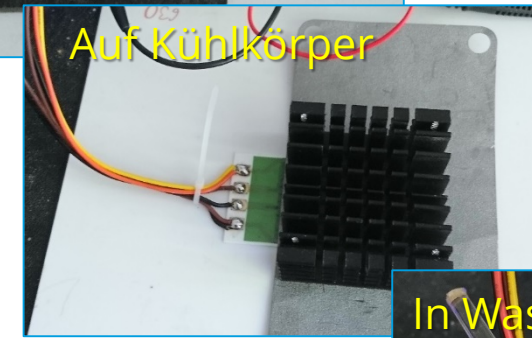
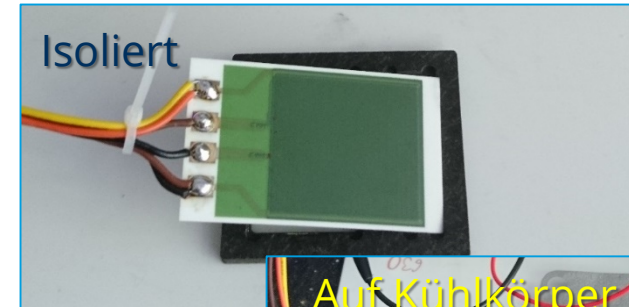
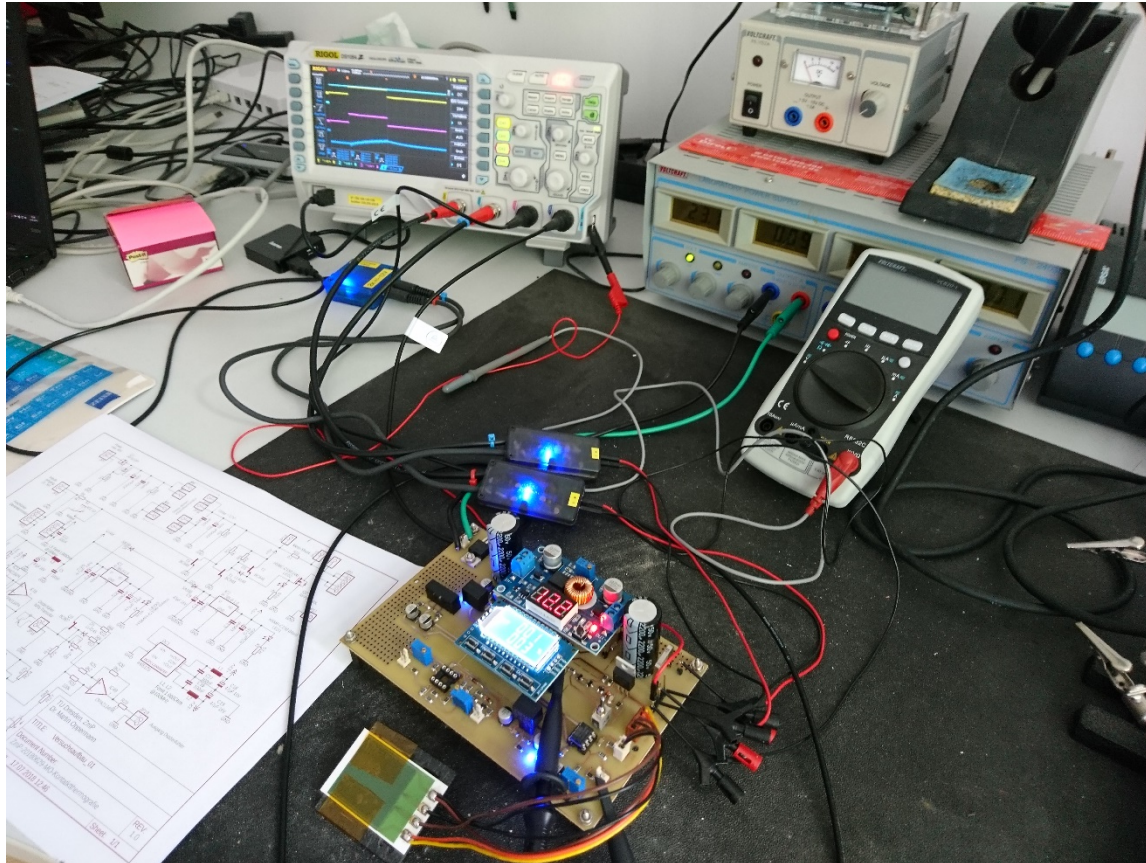
## Der Weg zum Inspektionsheizer:

### *Vorversuch:*

- Nutzung eines Dickschichtheizers mit folgenden Parametern (bei  $T = 21^{\circ}\text{C}$ ):  
 $R_H = 7,22\Omega$   
 $R_{PT100} = 107,88\Omega$
- Variation der Betriebsspannung (und damit der Leistung) und der Einschaltzeit des Heizers
- Messung des Temperaturverlaufs während Aufheizung und Abkühlung am PT100 mittels Oszilloskop
- Durchführung von „Cornering“-Experimenten
  - Messung in Luft (quasi thermisch isoliert)
  - Messung mit großem Al-Kühlkörper
  - Messung in destilliertem Wasser (ideale Kühlung)

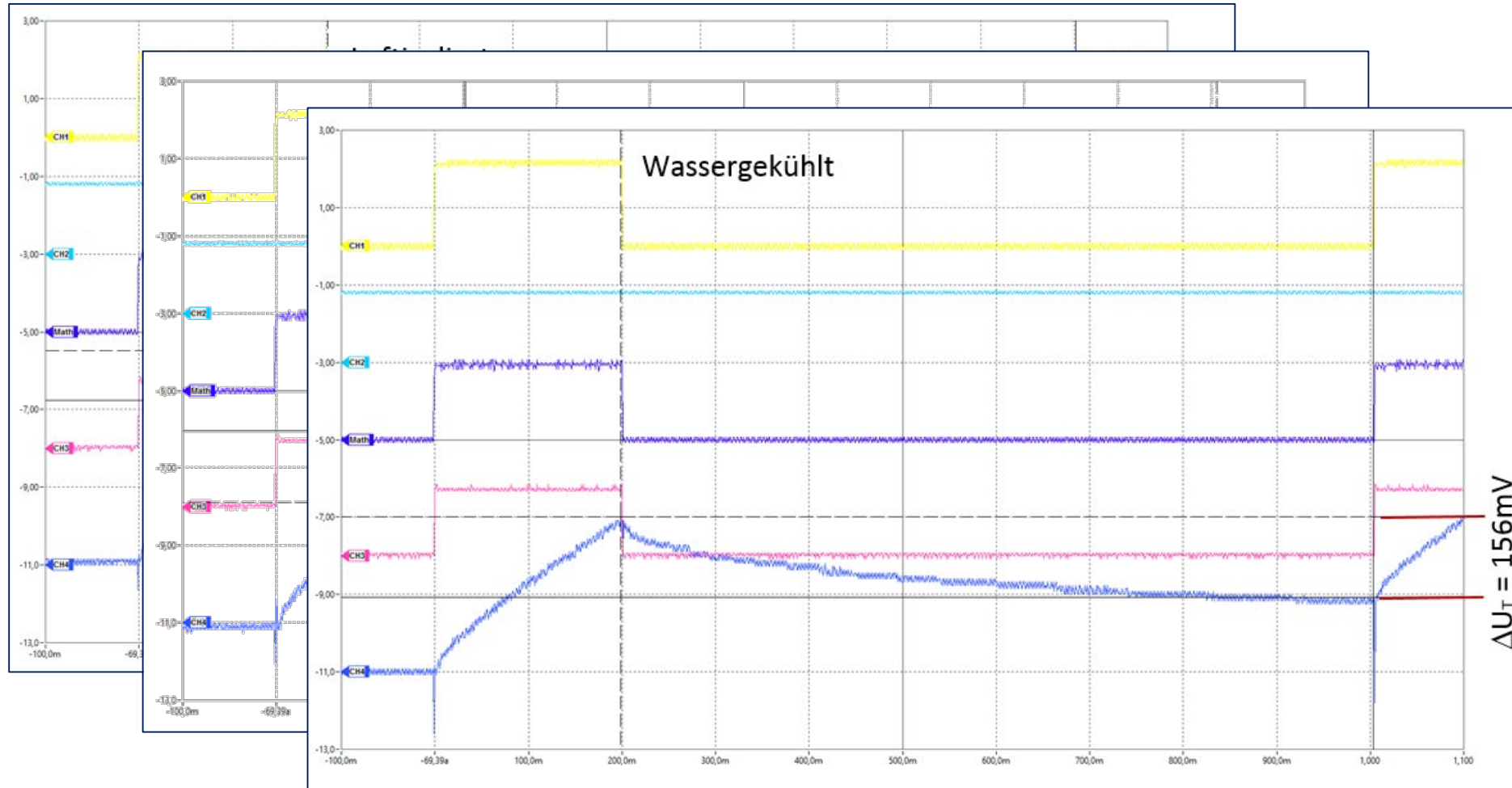
# Die Idee „Kontaktthermografie“

## Inspektionsheizer: Erster Versuchsaufbau & „Cornering-Experimente“



# Die Idee „Kontaktthermografie“

## Inspektionsheizer: Einige Messergebnisse (Versuchsreihe 03 (Power) vom 23.07.2018)

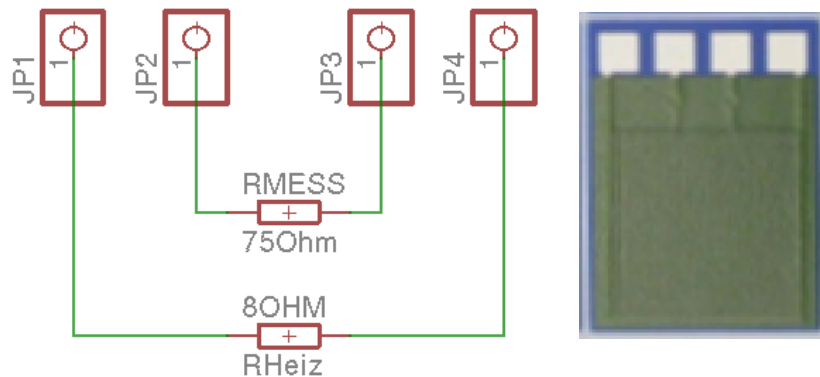


# Zielstellung für Sensoren – Zwei Varianten

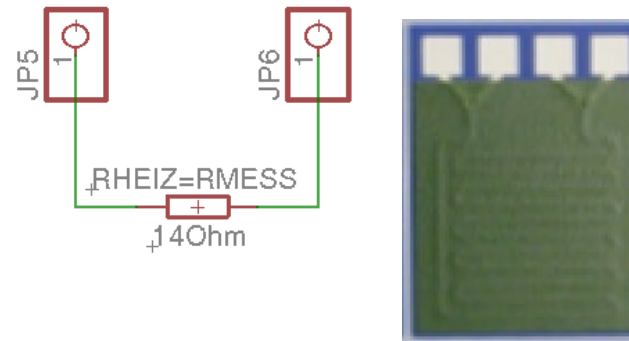
## Zielstellung

- Konstruktion und Aufbau eines einfachen Versuchsstands für reproduzierbare Messungen an Flächenlötungen
- Entwicklung einer Ansteuerelektronik für kombinierte Heizer-Sensor-Module
- Verwendung von zwei verschiedenen Heizer-Sensor-Modulen
- Bewertung verschiedener TIM

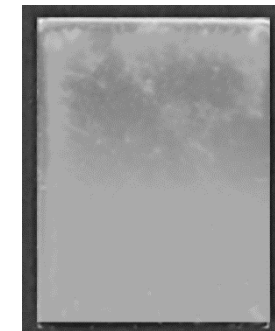
### Heizer 1



### Heizer 2



### Rückseite (beide)

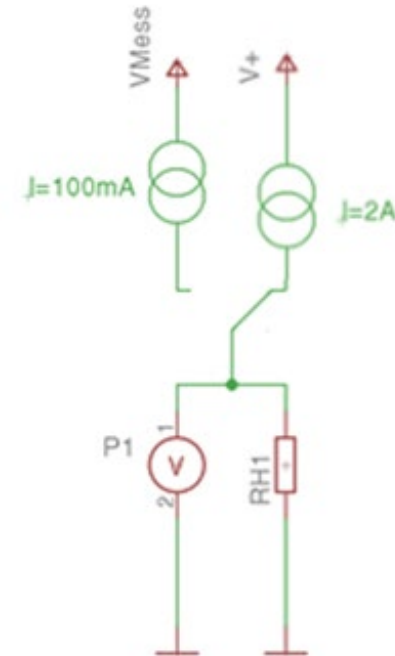


# Ideen zum Mess-Heizerentwurf

## Ideen zur Messung mit dem Heizer 2:

- Konstantstromspeisung während der Heizphase: 2A
- Konstantstromspeisung während der Messphase: 100mA

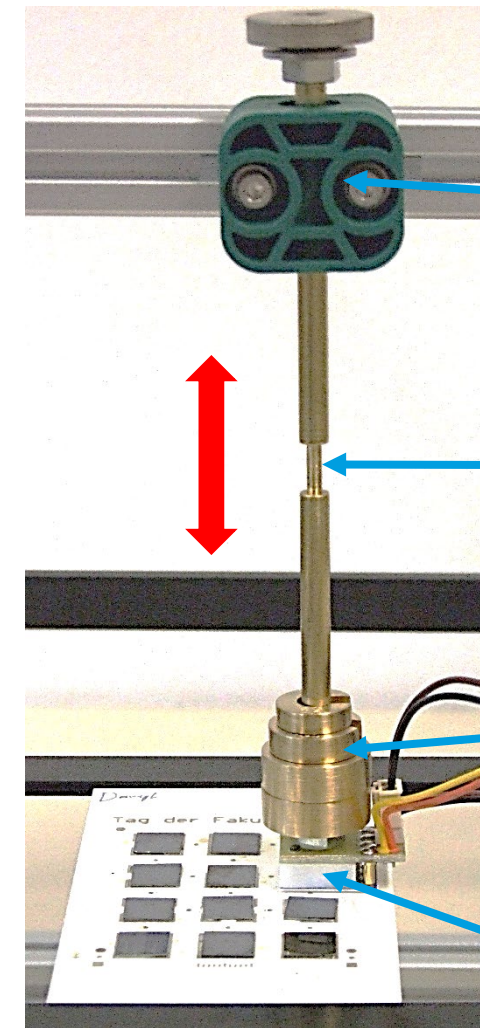
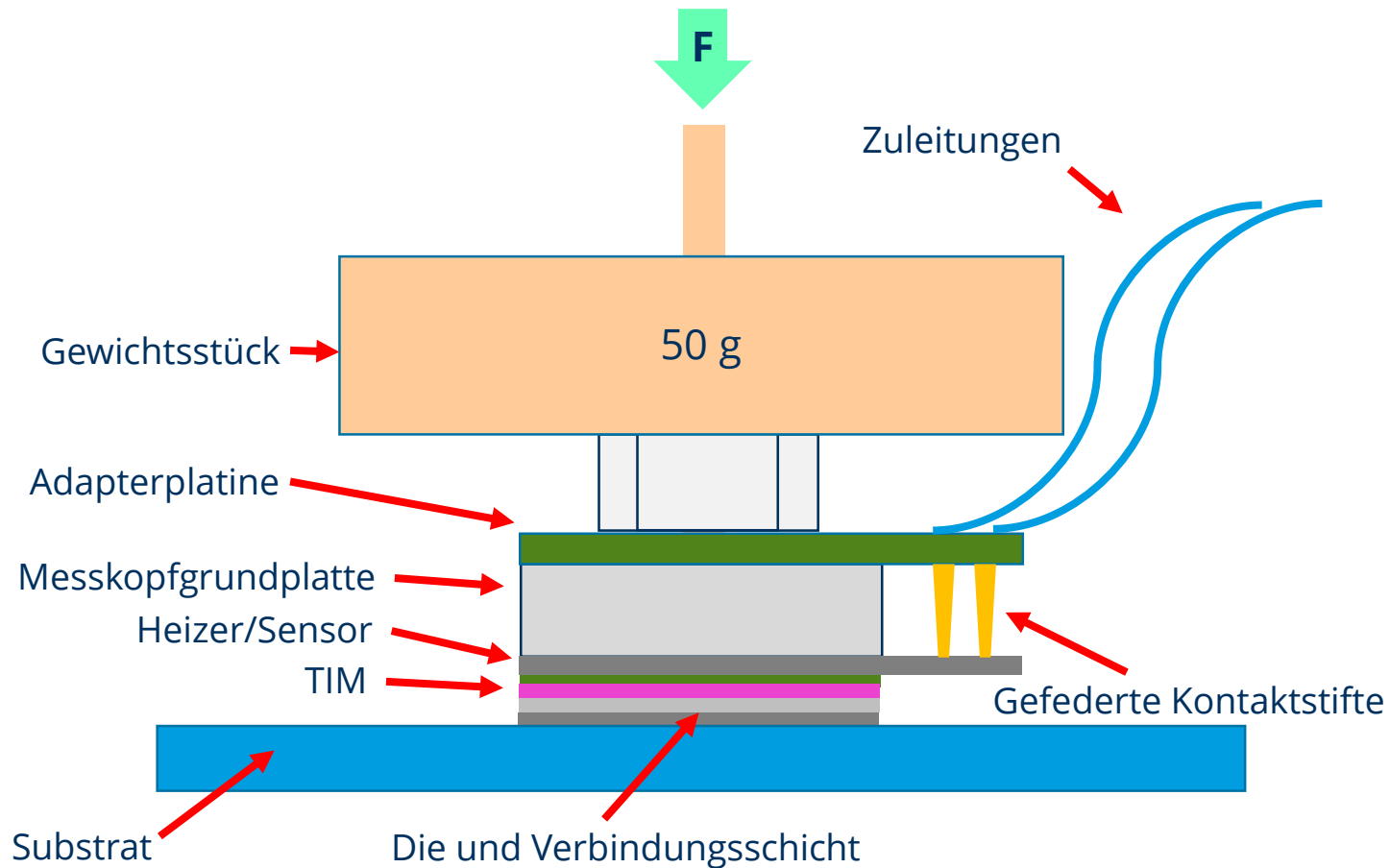
→ *Erwartung:*  $\Delta R(t)$  je nach Anbindung der Dies



# Agenda

- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und nächste Schritte

# Aktueller Messaufbau - Grundidee



Senkrechte Führung mit Linearkugellager

Messingstab mit Einbringöffnung für Gewichtsstücke

Zusatzgewichtsstücke, Variabel konfigurierbar

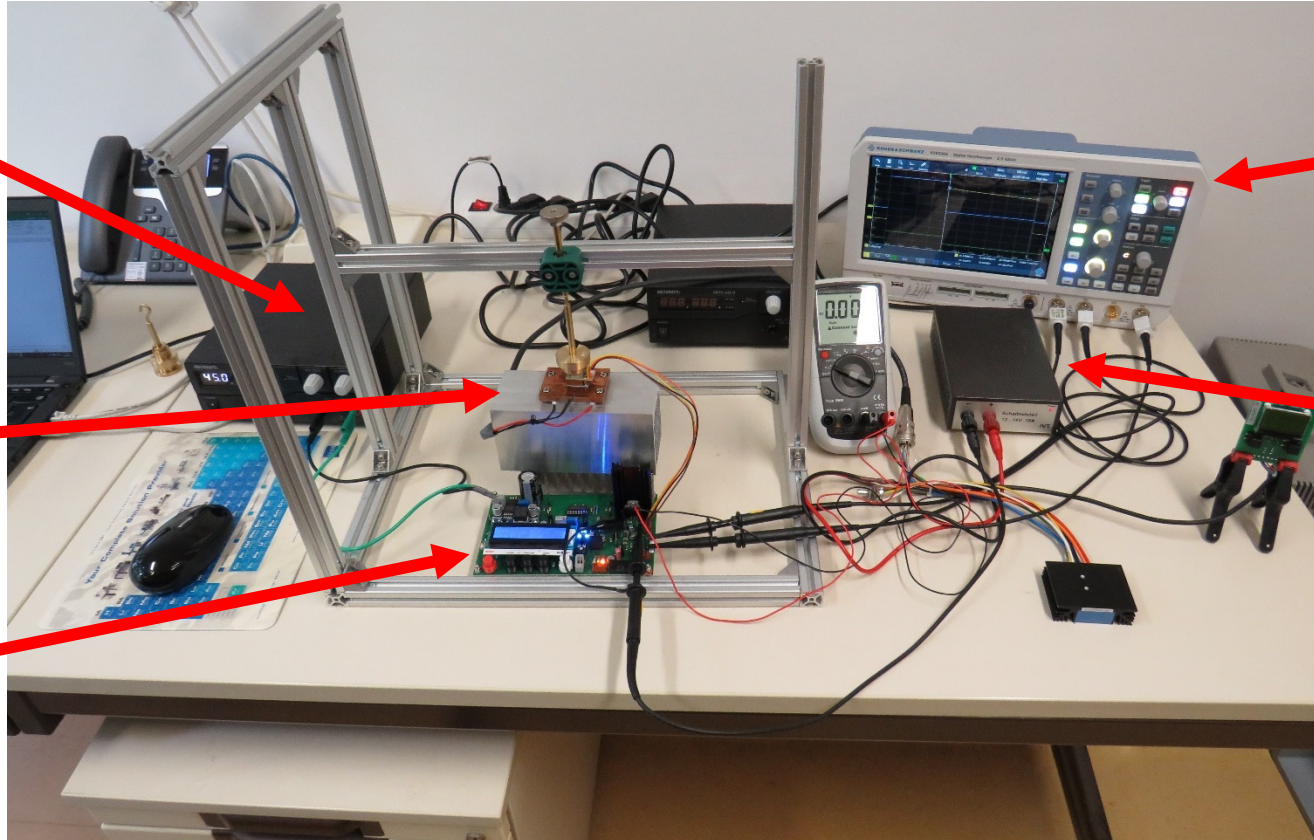
Messkopfgrundplatte, Teflon zur thermischen Entkopplung gegen den Messkopf

# Aktueller Messaufbau - Realisierung

Stromversorgung für  
Ansteuerelektronik  
bis 60 V / 8 A

Kupferblock auf  
Peltier-Element auf  
Kühlkörper  
„Thermal Ground“

Ansteuerelektronik

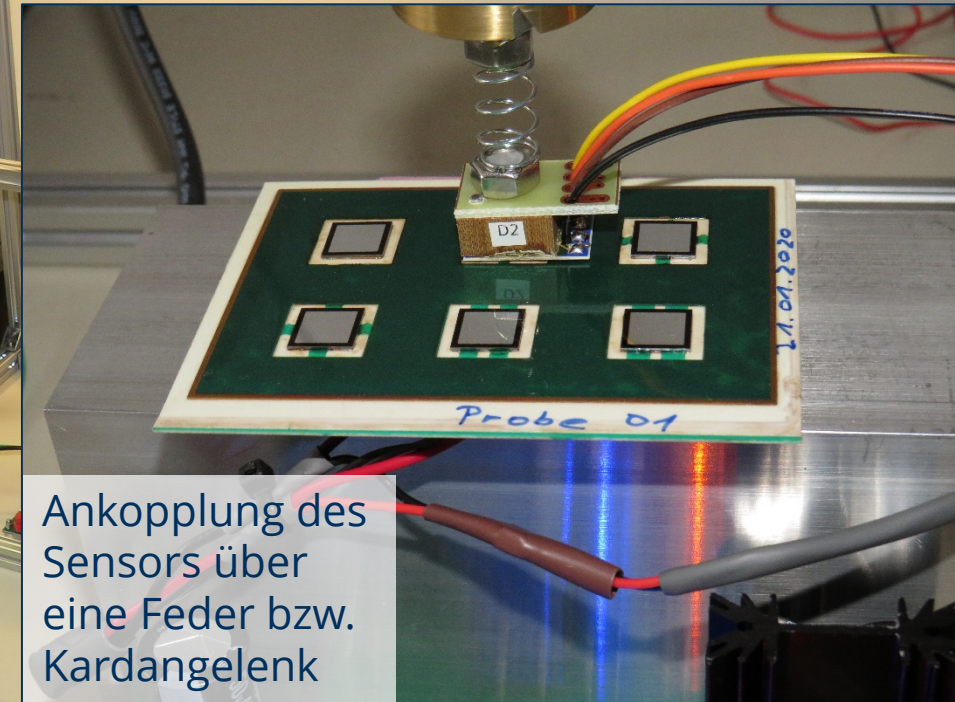


4-Kanal-Digital-Oszi  
bis 2,5 GSa/s

Netzteil und  
Steuerelektronik  
für Peltier-  
Element

# Aktueller Messaufbau - Realisierung

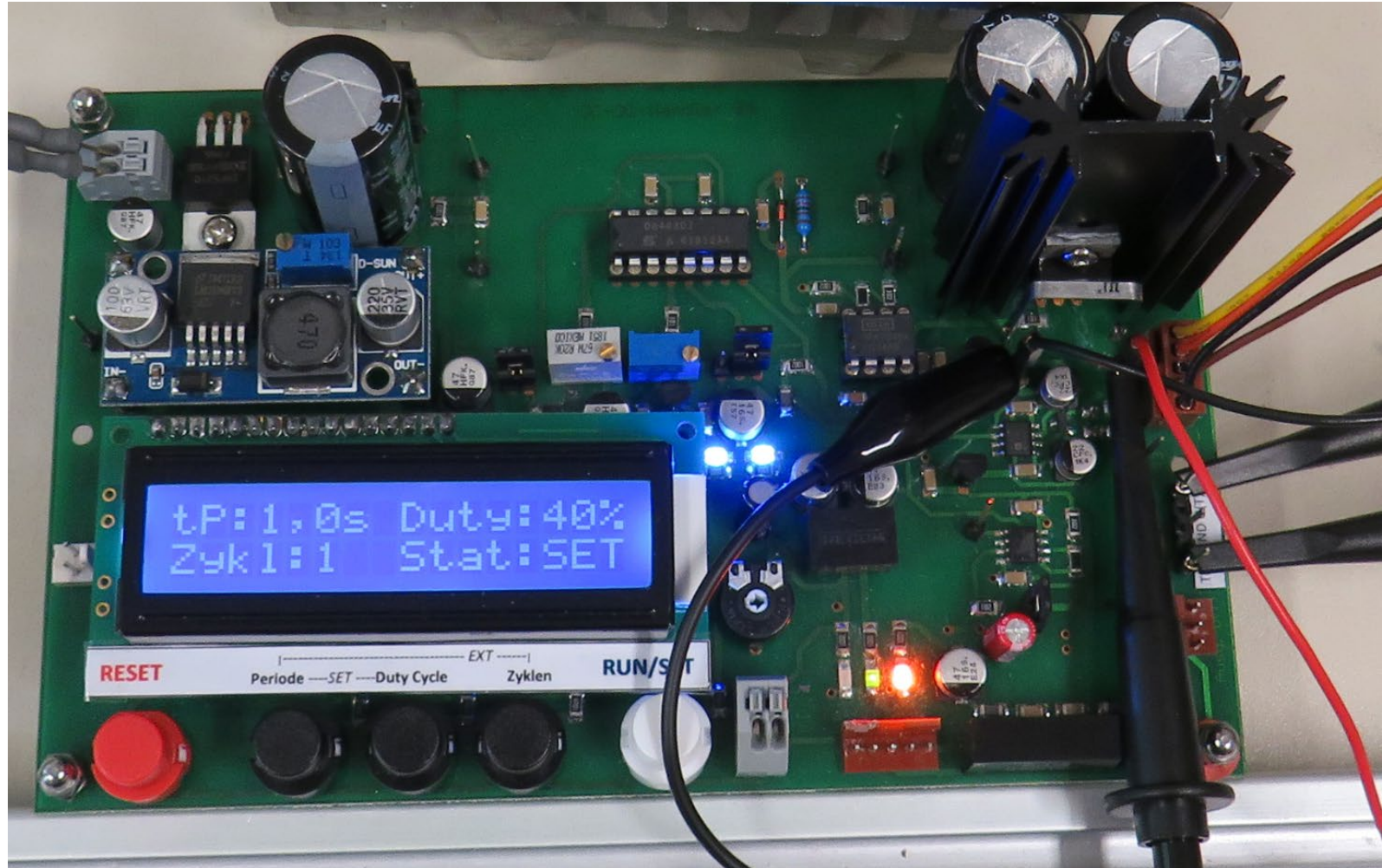
Peltier-Steuerung  
in Gehäuse



Ankopplung des  
Sensors über  
eine Feder bzw.  
Kardangelenk

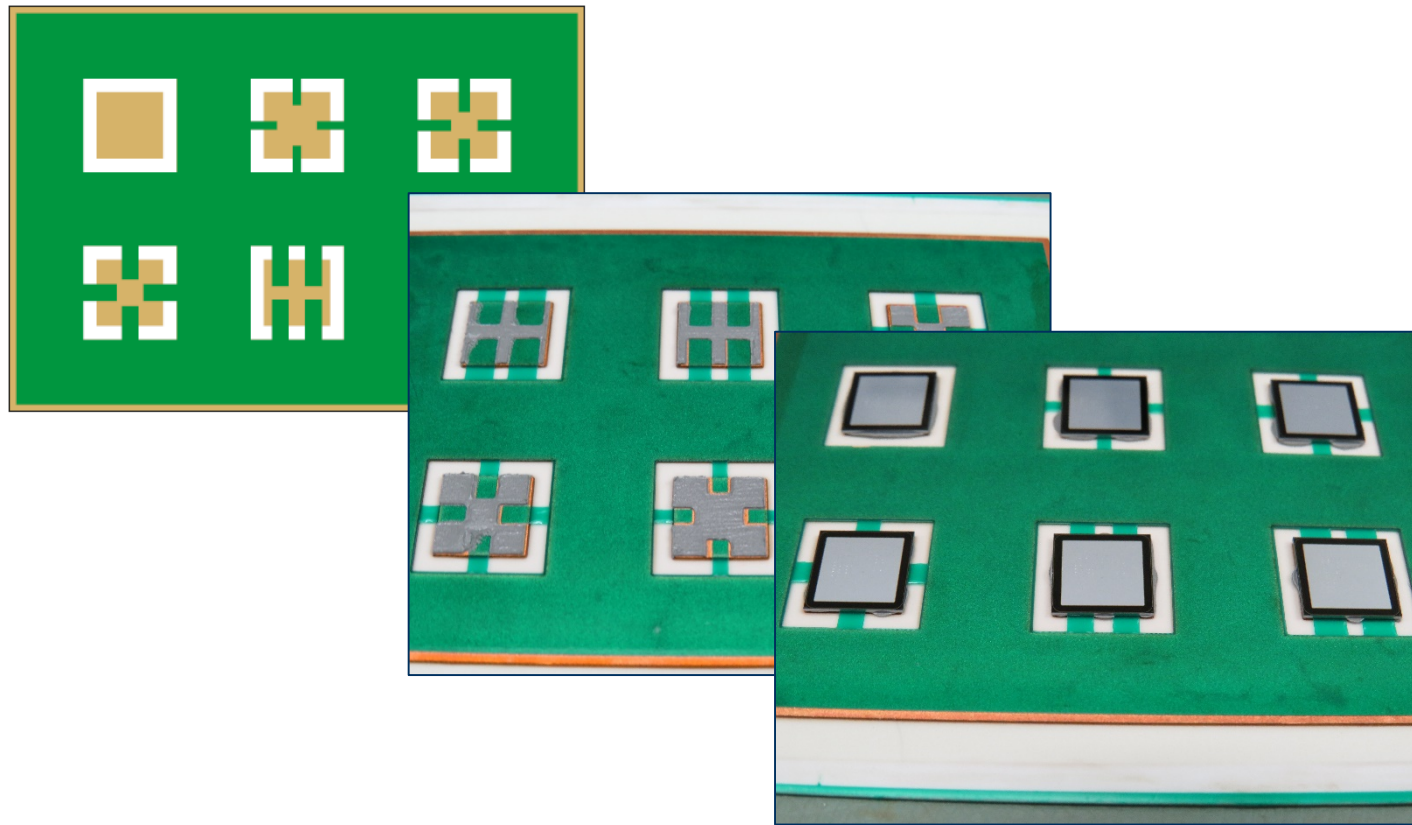
# Aktueller Messaufbau - Ansteuerelektronik für kombinierte Heizer-Sensor-Struktur (Schaltung 3)

- Konstantstromquelle, einstellbar
  - z.B. Heizen 3 A / Messen 0,1 A  
(momentan 2 A / 0,1 A)
- Drei „Zustände“: Heizen/Messen/0
- Microcontroller:
  - Zeitsteuerg. [0,5; 1; 2; 3; 5; 10] s Periodendauer
  - Duty cycle 10 ... 90%
  - Repeat 1 ... 10 mal
- Externer Takteingang für weitere variable Steuerregime
- Signalverstärker 5fach für Messausgang
- Bedienung über 3 Tasten für Voreinstellung, 1x Reset, 1x Start/Stop (kann alternativ von extern getriggert werden)
- Messungen mittels 10-Bit-Oszilloskop



# Aktueller Messaufbau – Messungen an Lötproben

6 Si-Dies (1cm<sup>2</sup>) auf strukturiertem DCB-Substrat (2x 300µm Cu) mit nichtbenetzbaren Flächen



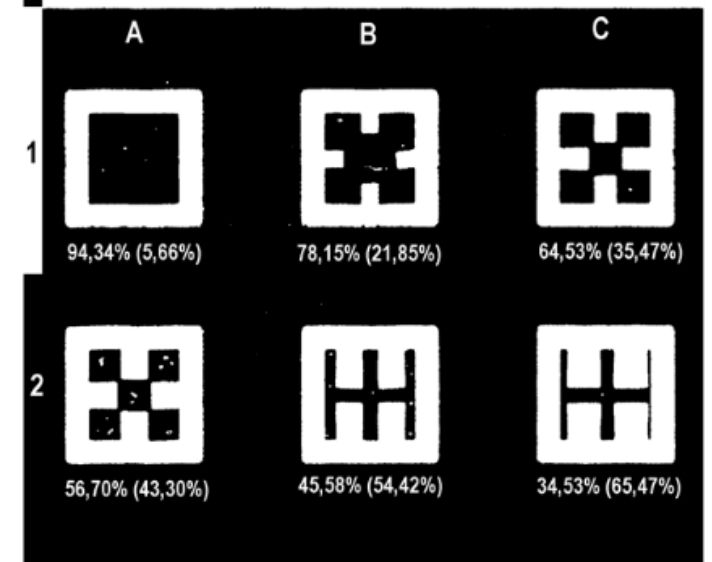
## Ultraschall-ThruScan

**Probe 01 vom 21.01.2020**

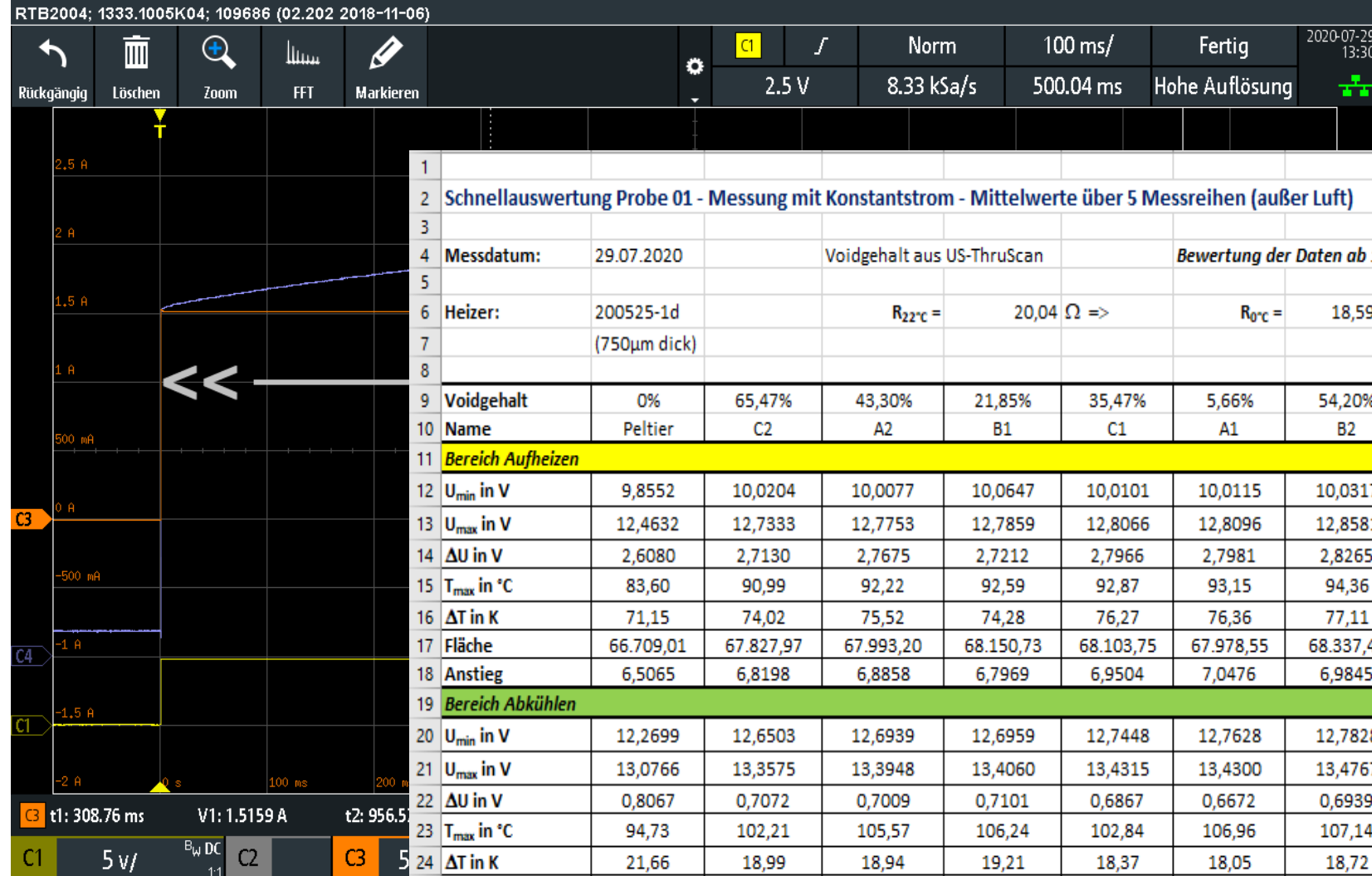
Suchfeld (Die-Größe): 197 x 197 Pixel

Pixel im Suchfeld: 38.809

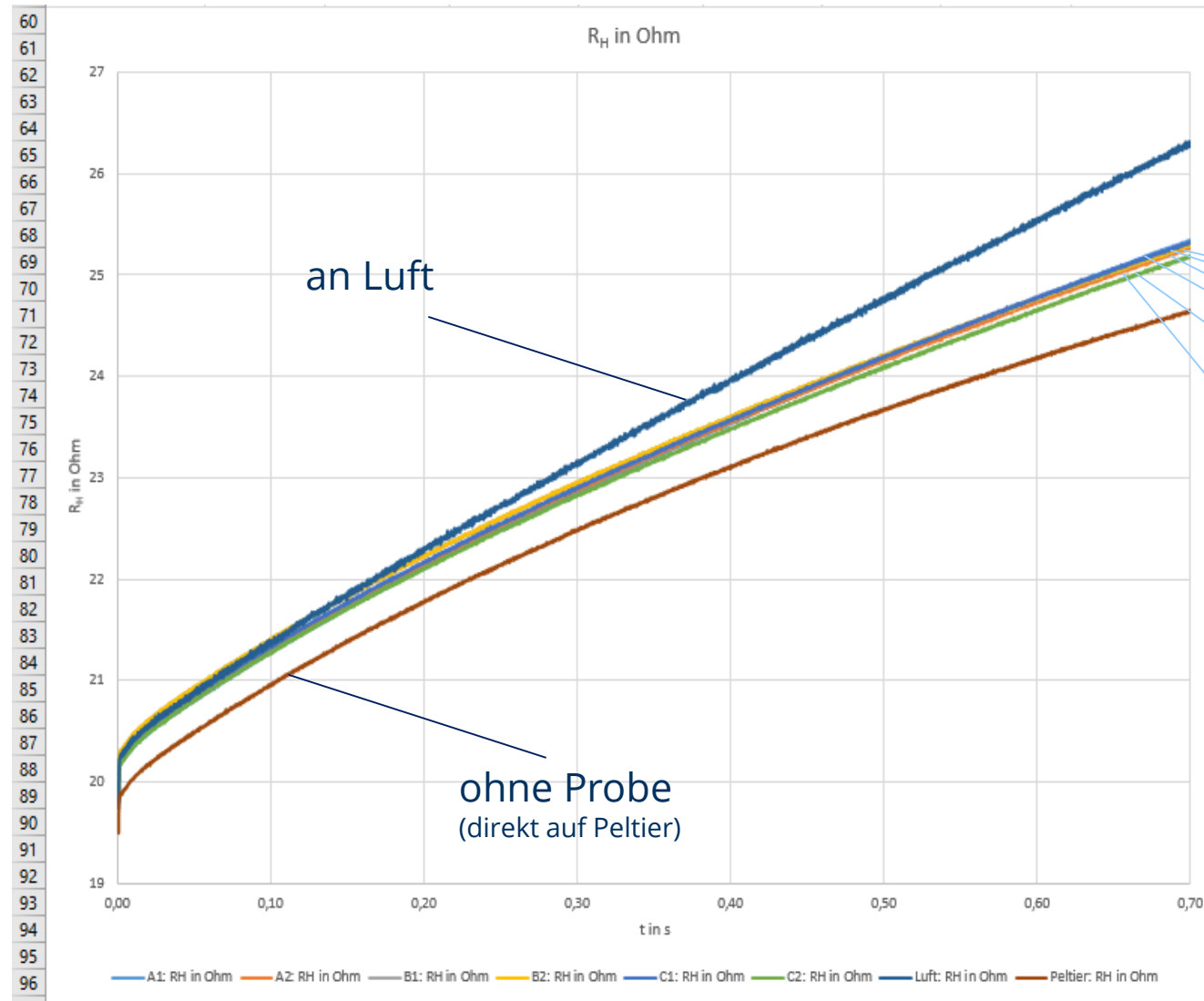
%-Wert: benetzte Fläche (Voidanteil in ())



# Erste Ergebnisse - Versuche mit Lötprobe & $R_{\text{Heiz}} = R_{\text{Mess}}$



# Erste Ergebnisse - Versuche mit Lötprobe – Aufheizen 700ms

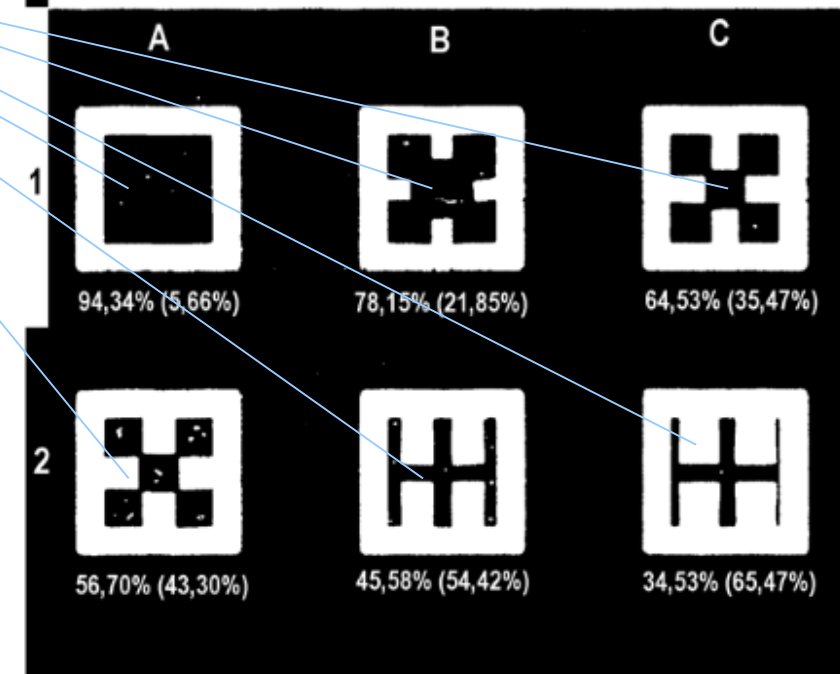


## Probe 01 vom 21.01.2020

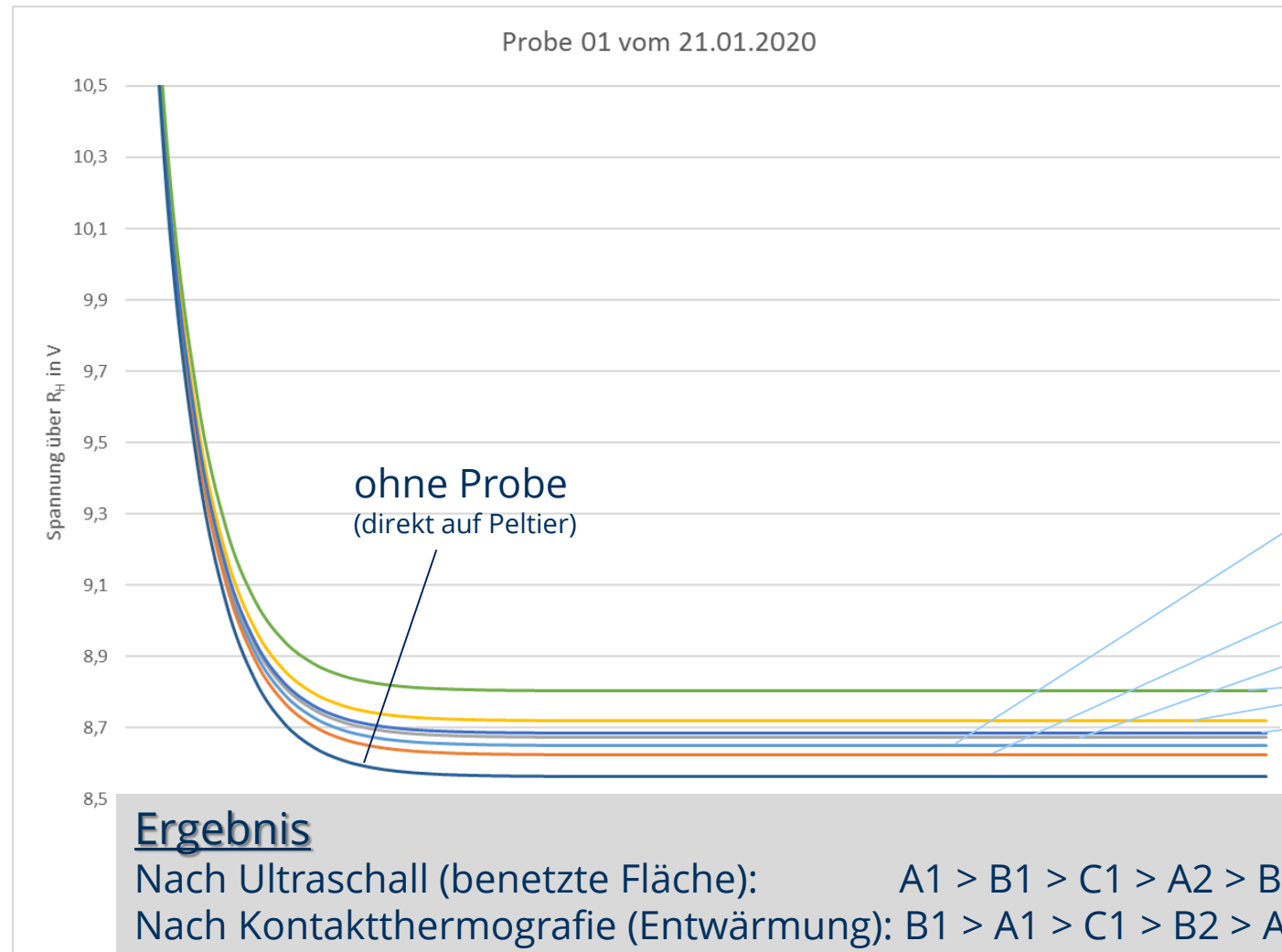
Suchfeld (Die-Größe): 197 x 197 Pixel

Pixel im Suchfeld: 38.809

%-Wert: benetzte Fläche (Voidanteil in ())



# Erste Ergebnisse - Versuche mit Lötprobe - Abkühlen

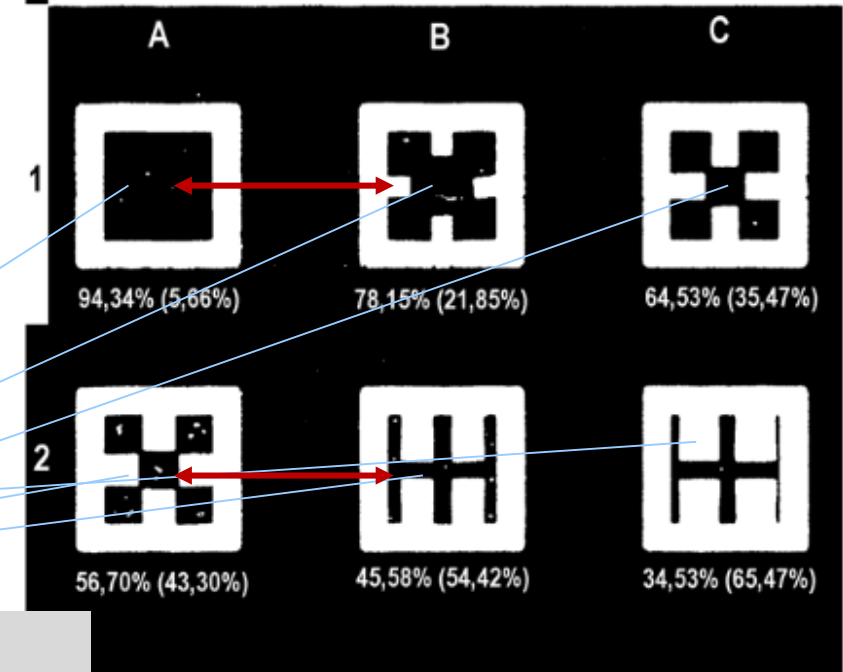


## Probe 01 vom 21.01.2020

Suchfeld (Die-Größe): 197 x 197 Pixel

Pixel im Suchfeld: 38.809

%-Wert: benetzte Fläche (Voidanteil in ())



# Agenda

- Motivation und Problembeschreibung
- Das Prinzip der Wärmeausbreitung in Festkörpern
- Messungen mit Impulsthermografie an gelöteten IGBT-Dies
- Die Idee „Kontaktthermografie“
- Messaufbau aus Dynatherm und erste Ergebnisse
- Neue Ideen und das Projekt „AnkoTherm“

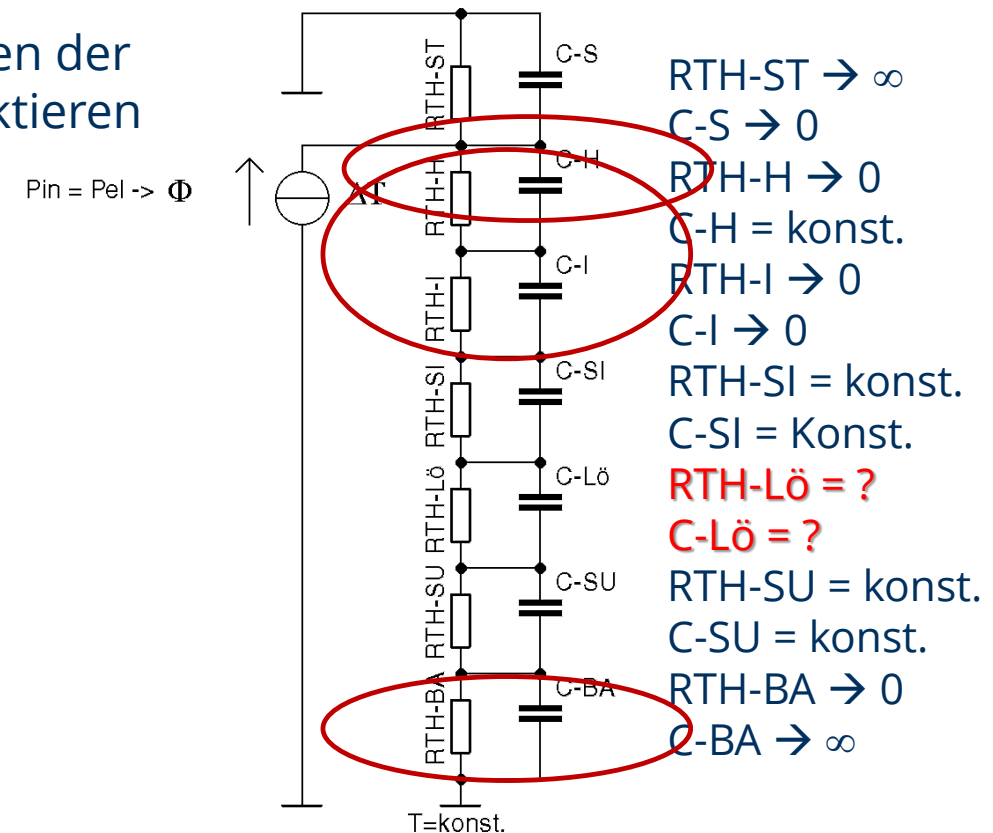
# Wie geht's weiter?

- Das Problem mit dem jetzigen Aufbau: Reproduzierbarkeit der Messungen

- Der Grund: unterschiedliche Bedingungen beim Auflegen der Probe auf den Kühltisch und beim Ankontaktieren des Prüfkopfes

- Aufgabe: Minimieren dieser Einflüsse durch neuen Messkopf

## Ziele:



# Weiter geht's mit dem Projekt „AnkoTherm“

- **Langtitel:** „Anlagenintegration der Kontakt-Thermografie als schnelles In-Line-Qualitätstool für leistungselektronische Module“
- **Projektpartner:** budatec GmbH, Berlin  
Kraus Hardware GmbH, Großostheim  
TU Dresden, ZmP
- **Finanzierung:** BMWi – ZIM
- **Laufzeit:** 10/2021 – 09/2023

Gefördert durch:



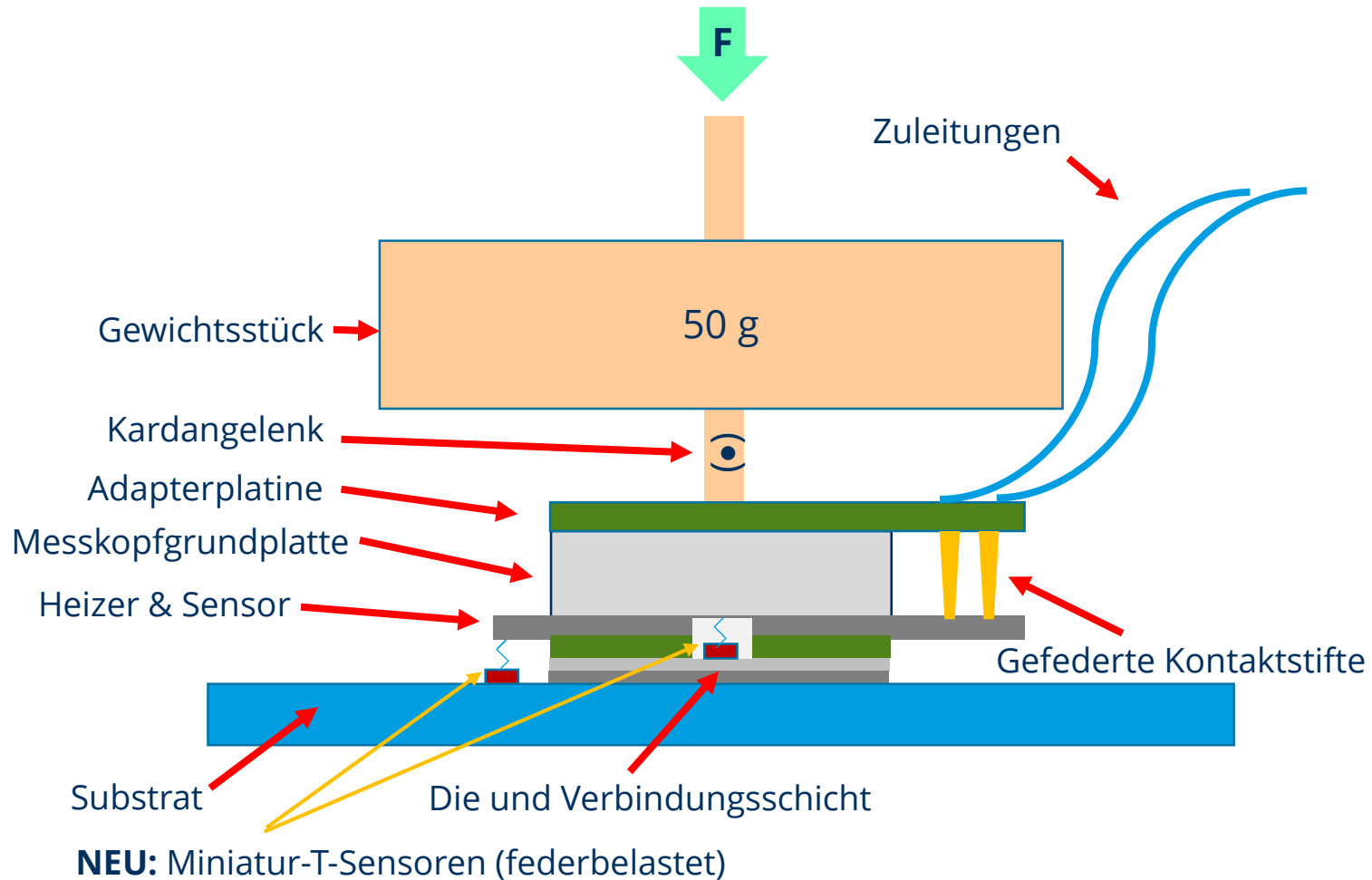
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



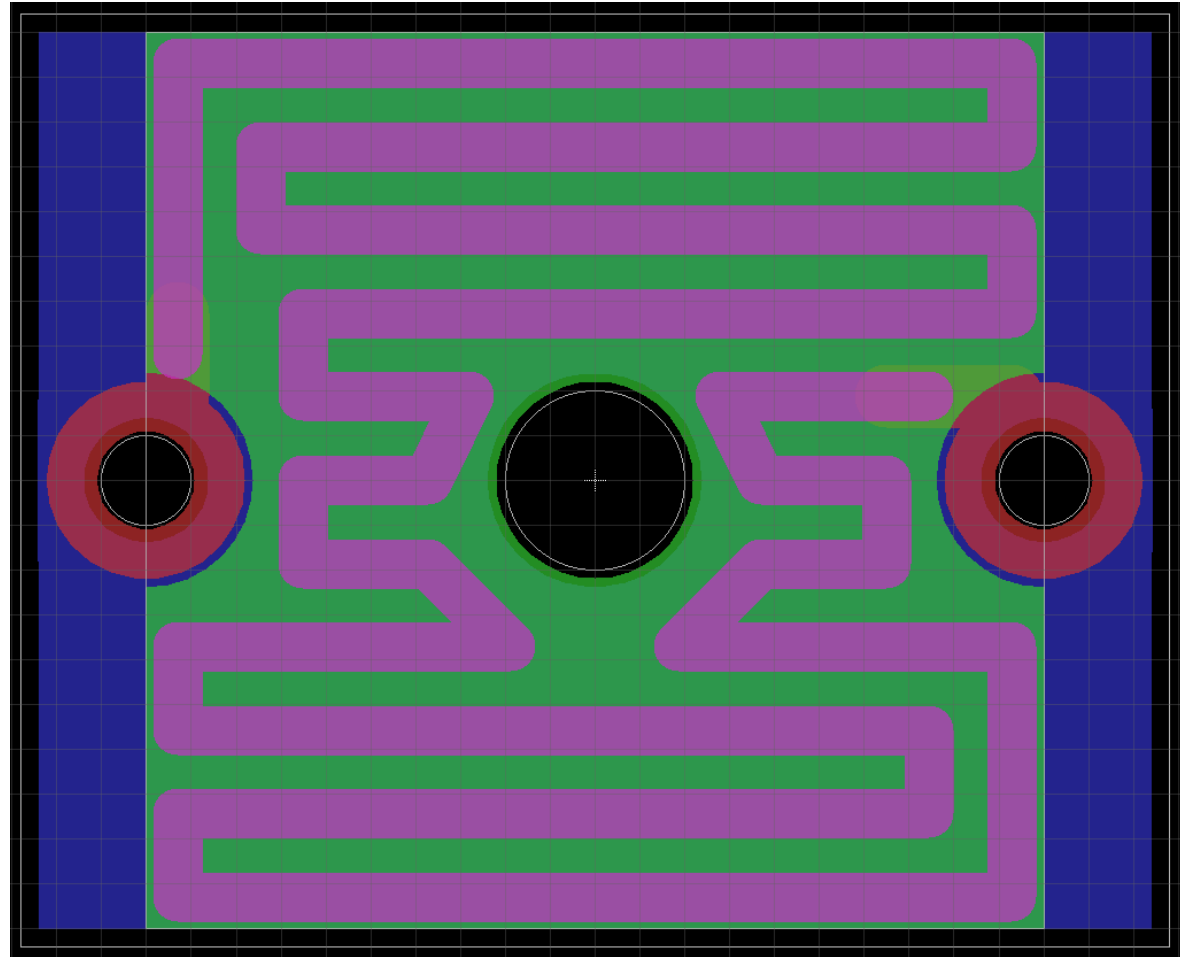
# Neuer Messaufbau - Idee

NEU: Zusätzlicher Einsatz von federbelasteten Miniatur-T-Sensoren zur T-Messung auf dem Die und dem Substrat



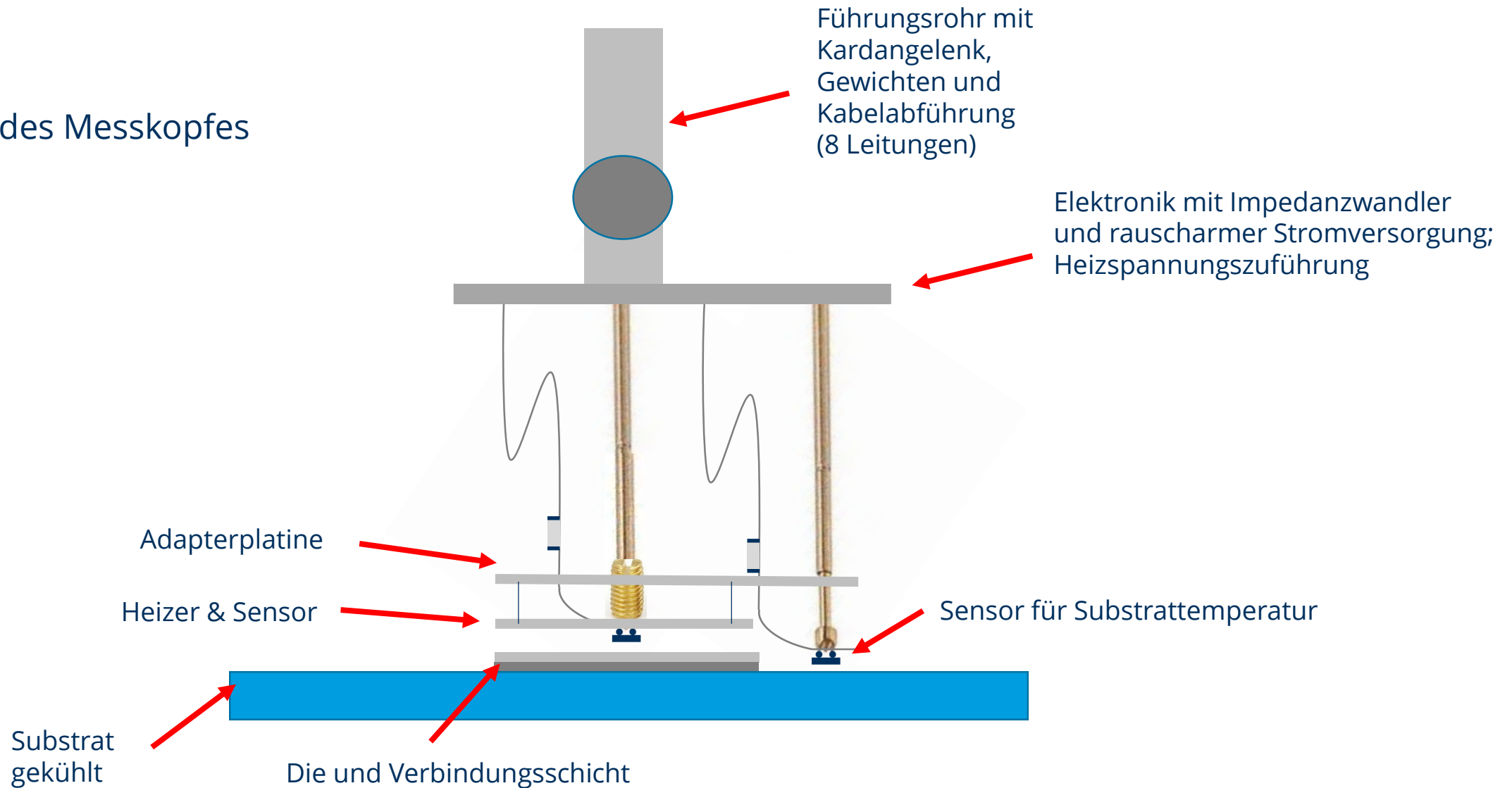
# Neuer Messaufbau (aktueller Stand)

- Neuer Heizerentwurf - Realisierung:



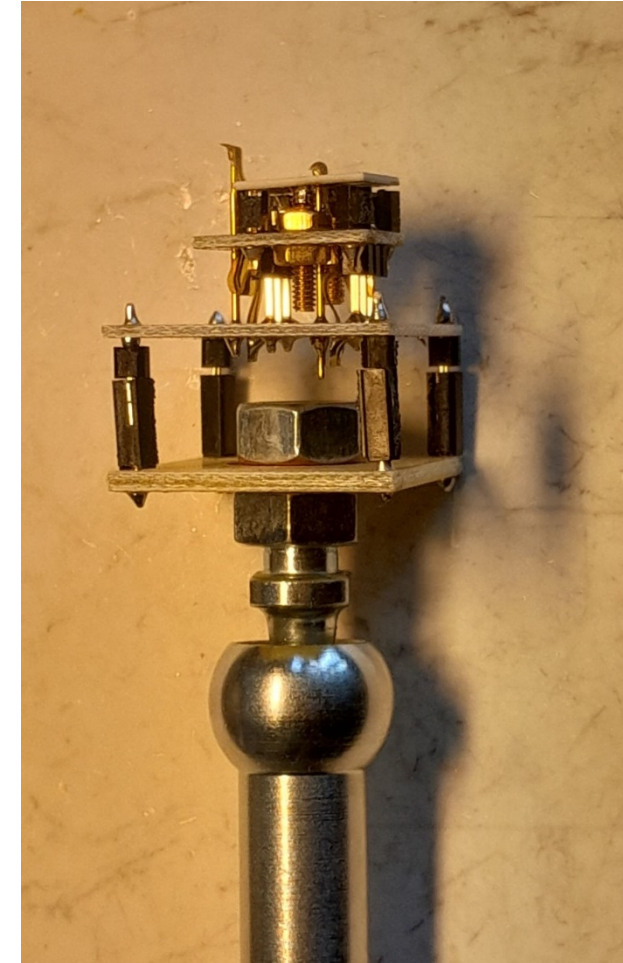
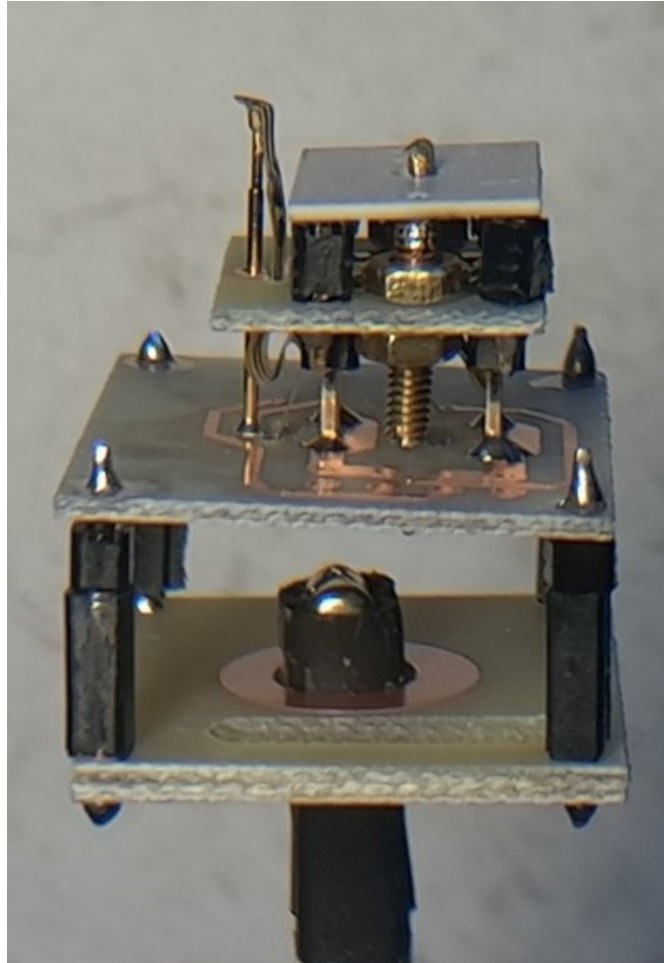
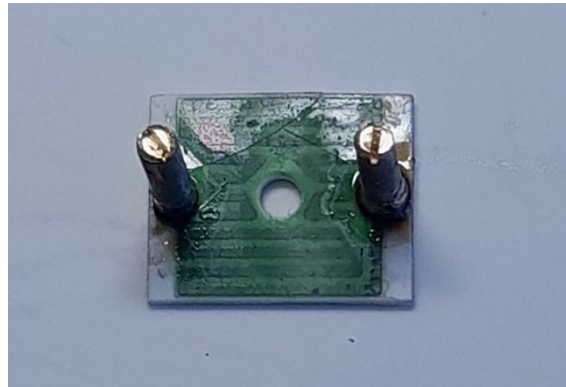
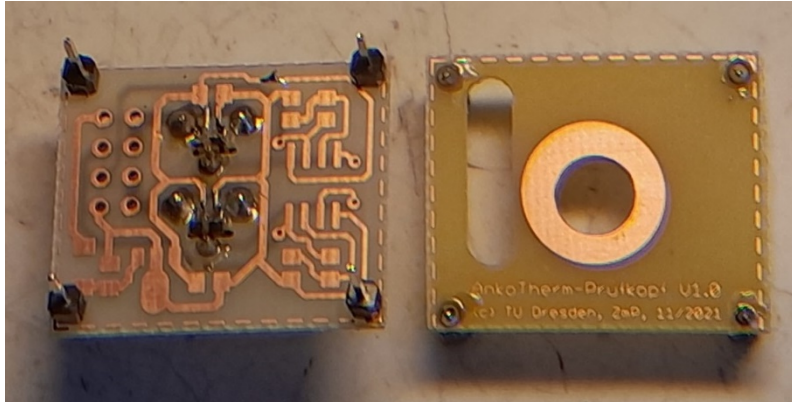
# Neuer Messaufbau – aktueller Stand

- Idee des Messkopfes



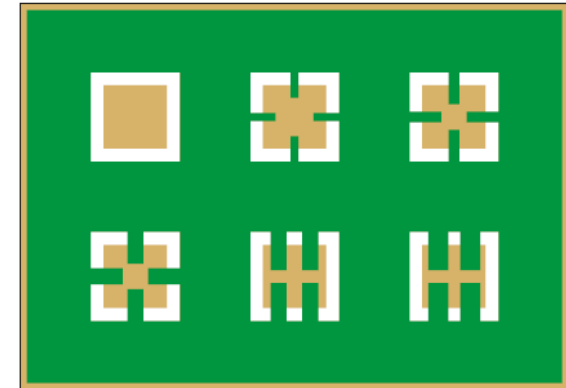
# Neuer Messaufbau – aktueller Stand

## Mechanikmuster



# Wie geht's weiter?

- Weitere Miniaturisierung des Messkopfes
- Weitere Versuche mit den Lötproben
- Vergleichende Untersuchungen mit Thermografie
- Untersuchungen an Sinterproben
- Vergleichsmessungen mit „altem“ Sensor





HF-Pentode EF183

**Vielen Dank für die  
Aufmerksamkeit!**

**Kontakt:**

Martin Oppermann

TU Dresden

Zentrum für mikrotechnische Produktion

*[martin.oppermann@tu-dresden.de](mailto:martin.oppermann@tu-dresden.de)*