

# In-Situ Röntgenuntersuchungen an Lötstellen der Leistungselektronik

Dresden, 22.04.2015    Alexander Klemm

# **Inhalt**

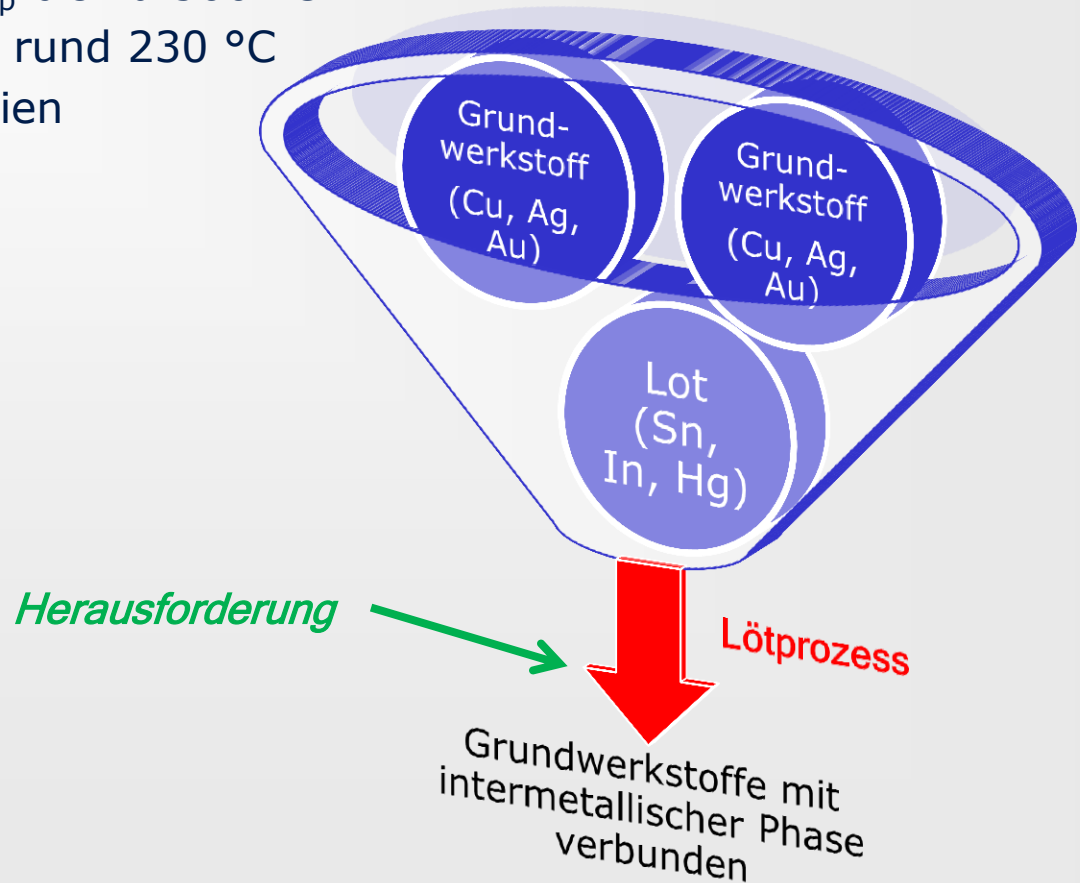
- 1. Einführung**
- 2. In-Situ Messzelle**
- 3. Experimente**
- 4. Zusammenfassung und Ausblick**

## Einführung

- Höhere Betriebstemperaturen, Höhere Zuverlässigkeit in Leistungselektronik
- Halbleitermaterial SiC →  $T_{op}$  bis zu 500 °C
- (bleifreies) Lot schmilzt bei rund 230 °C
- Neue Die-Attach Technologien  
/Materialien notwendig

→ *Diffusionslöten*

→ **Grundprinzip:**



## Diffusionslöt

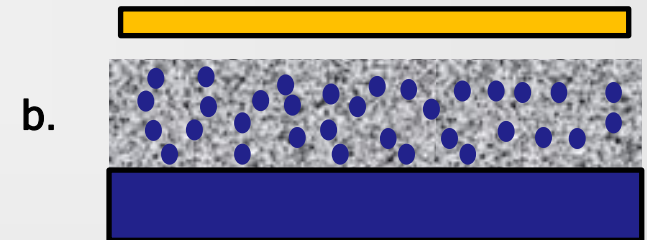
### •Herausforderung

- Fügepartner so nah aneinander bringen, dass ein hinreichender Querschnitt an intermetallischer Phase unter vertretbaren Bedingungen entstehen kann  
→ Zeit, Temperatur

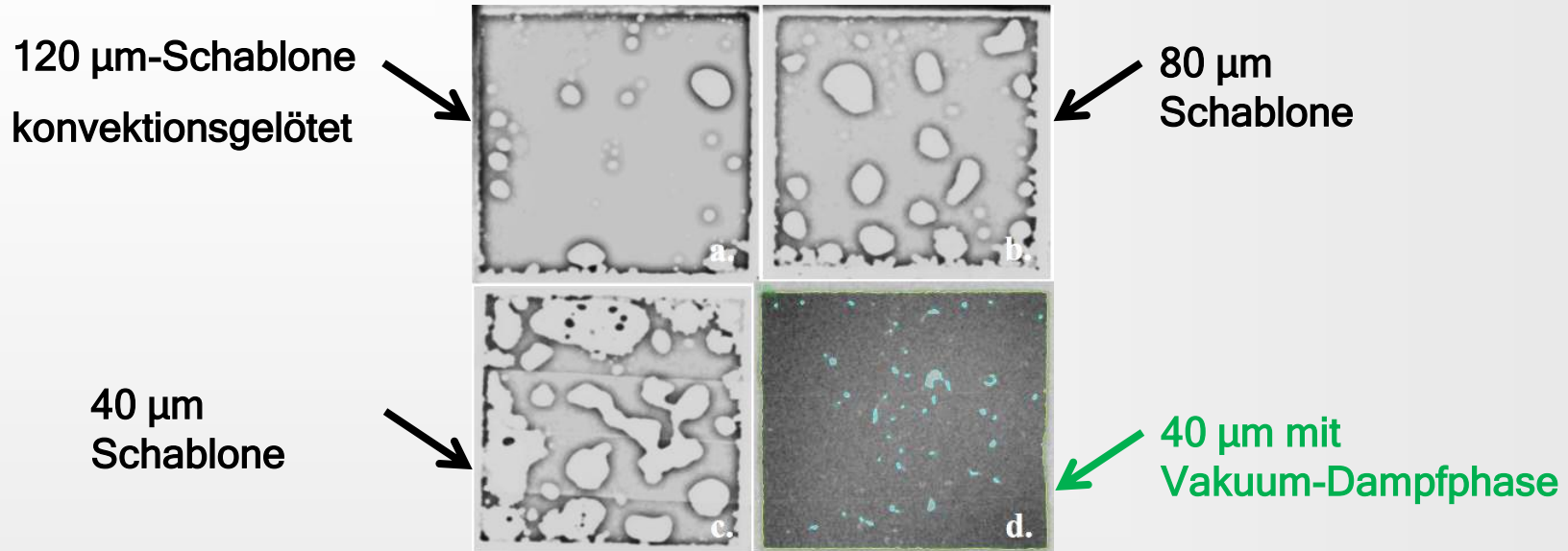
### •Bekannteste Ansätze:

- a. Dünne galvanische Schichten (SLID) [Bader 1990]
- b. Kompositlote [Ehrhardt 2012]

**c. Dünne Lotpastenschichten [Khaja 2013]**



## Diffusionslöten



Quelle: [Khaja 2013]

Offene Fragen:

- Was passiert während des Lötprozesses?
- Überdruck- vs. Unterdruck?
- Einfluss der Prozessparameter auf finalen Porengehalt?

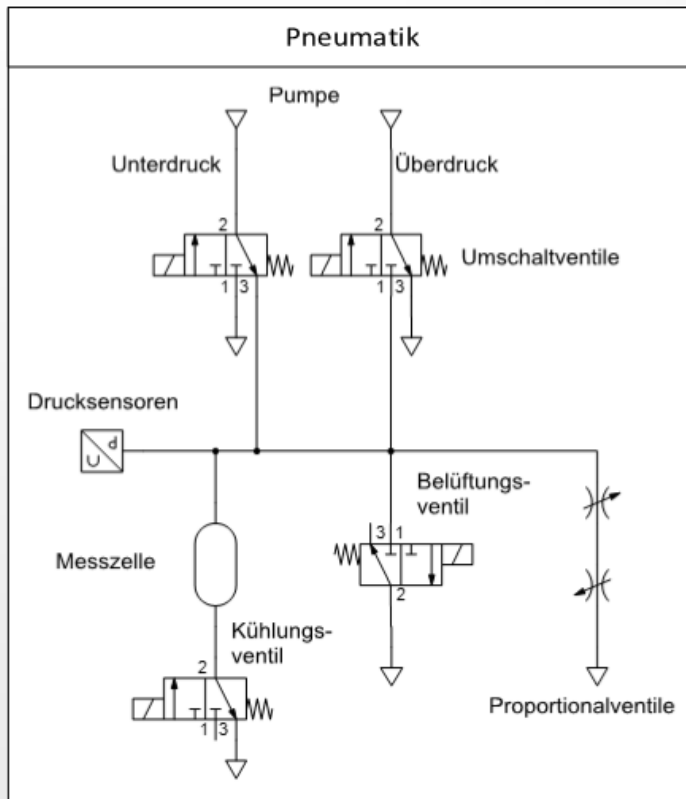
## Untersuchungsansatz

- In-Situ Beobachtung des Lötvorgangs
- Charakterisieren
- Vergleichen
- Erkenntnisse auf Diffusionslötten anwenden

Voraussetzungen:

- Versuchsstand
- Effektive Auswertung der Röntgenvideos
- Experimente

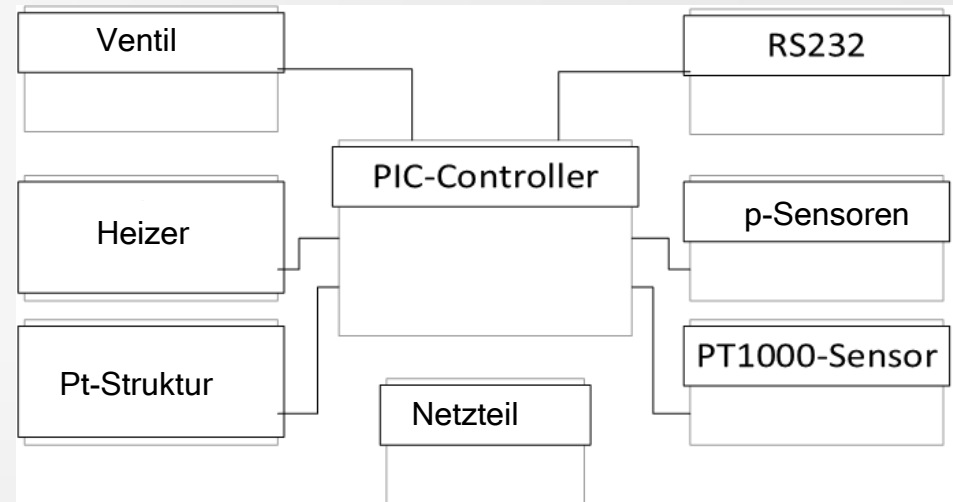
## Pneumatik und Elektronik



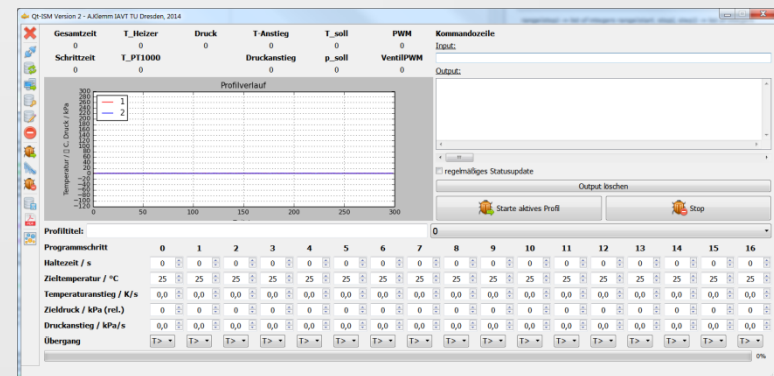
- 2 K/s
- Max.-temperatur 250 °C
- Min. Druck -80 kPa (rel.)
- Max. Druck 230 kPa (rel.)

Folie 7

## Steuerelektronik



↕  
**PC**



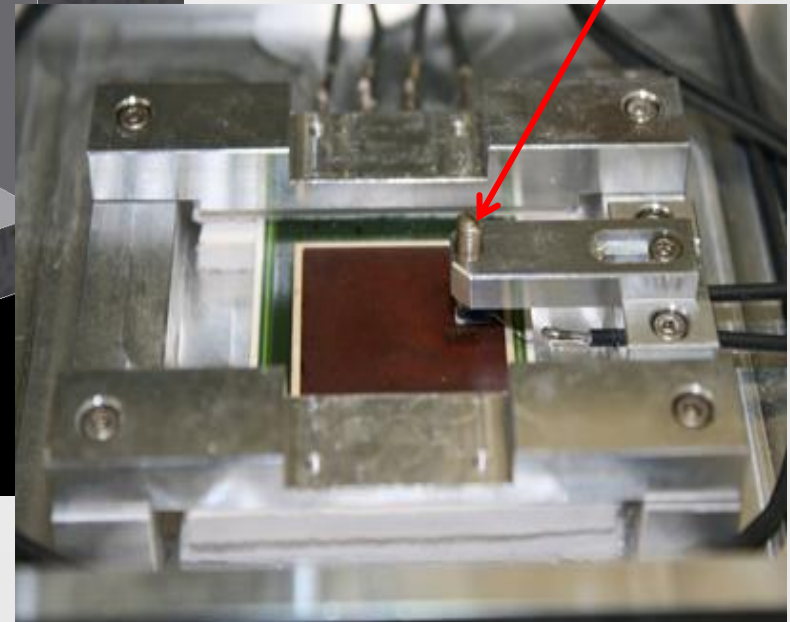
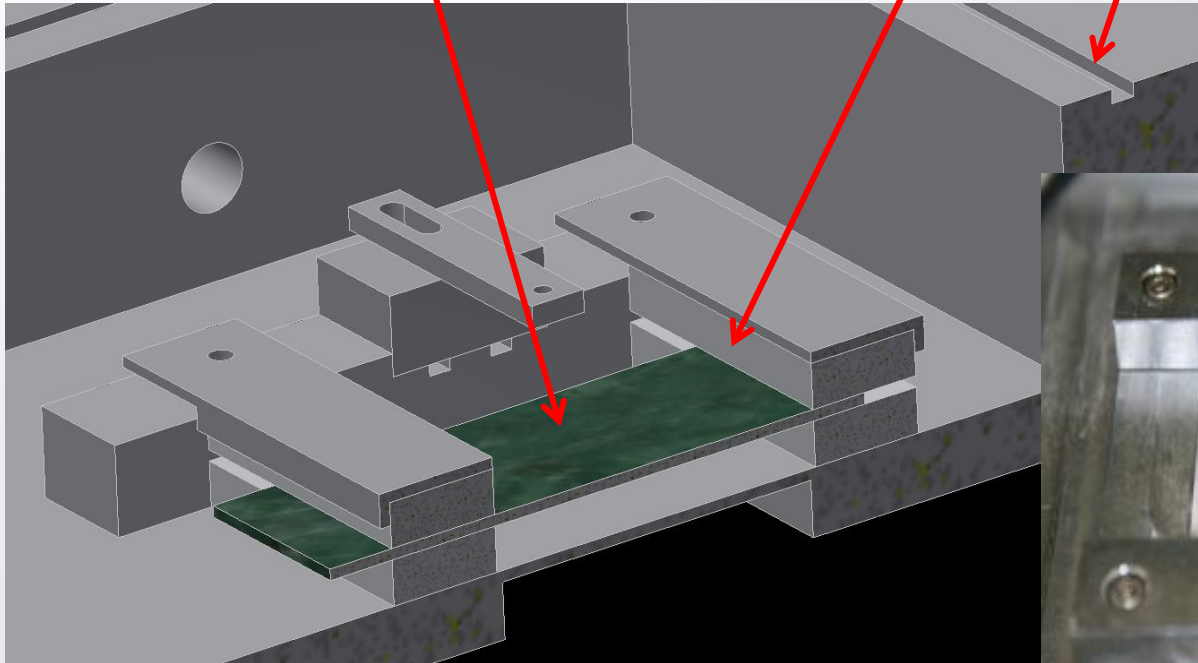
## Mechanischer Aufbau

Keramikheizer  
mit Pt-Struktur

Dämmmaterial

Nut für O-Ring

Niederhalter  
für PT1000





## Mechanischer Aufbau



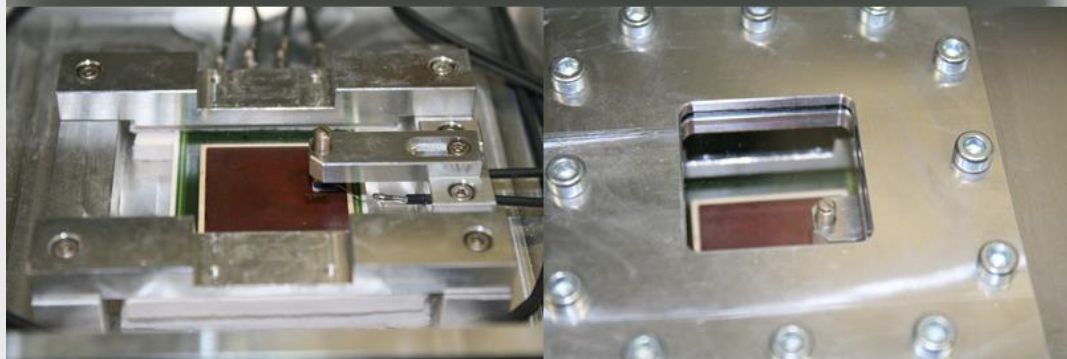
Pneumatik u. Elektronik integriert

Proportionalventile für p-Regelung

Umschalten zwischen  
Über- u. Unterdruck

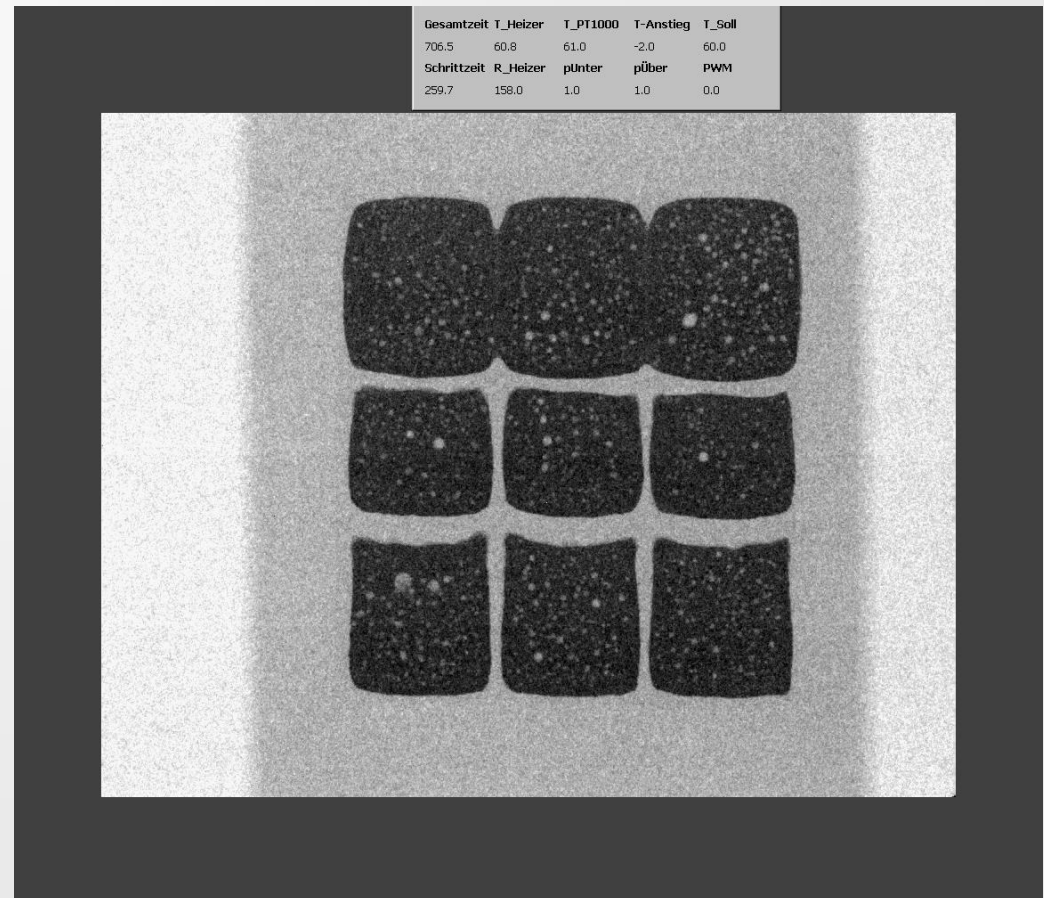
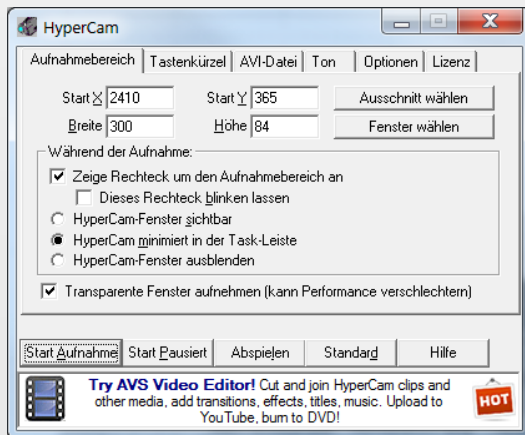
Max. Probengröße 25x30 mm<sup>2</sup>

Deckel mit Sichtfenster



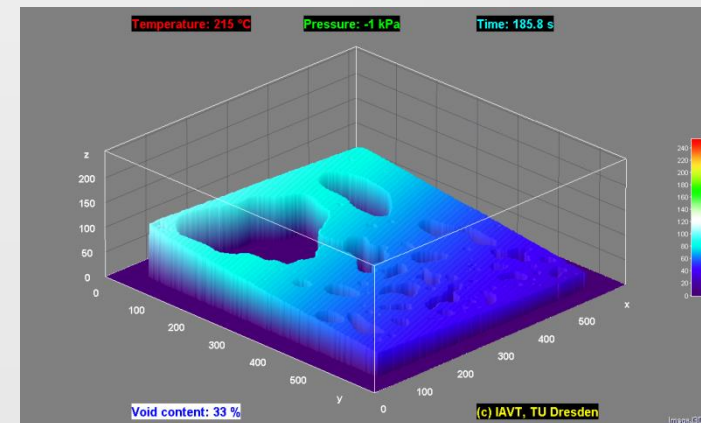
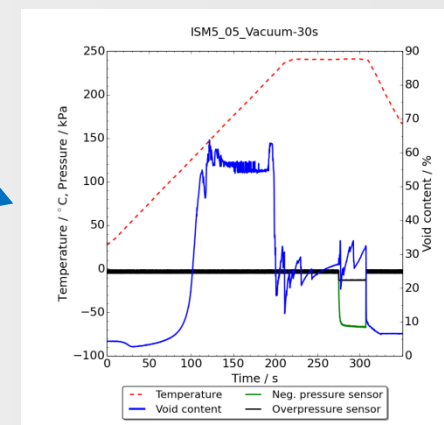
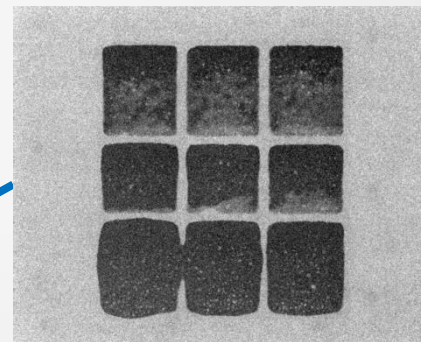
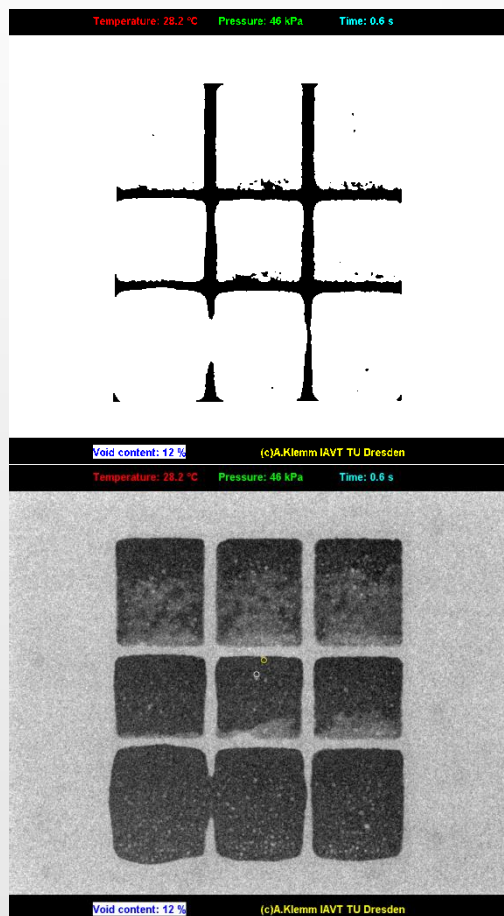
## Röntgenfilme bisher

- 5 Bilder/s
- 960x768 Pixel
- stark verrauscht
- Mit HyperCam von Monitor abgefilmt → 8 bit Farbtiefe
- 1800 Bilder für 6 min Film  
→ 1,4 GB komprimiert



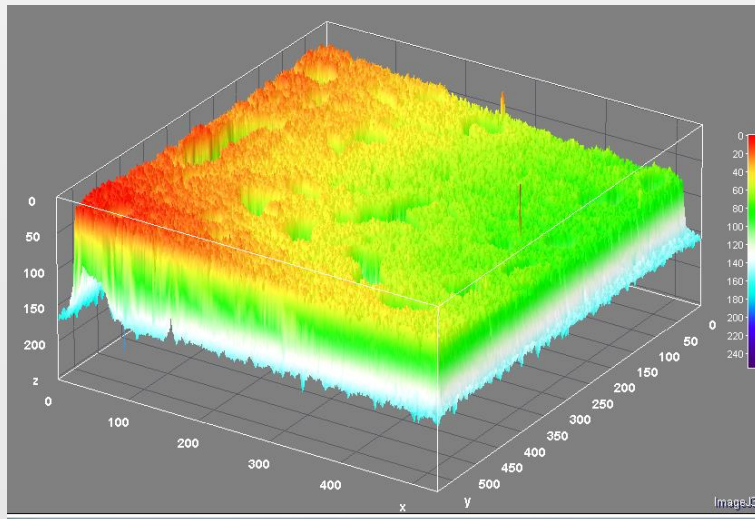
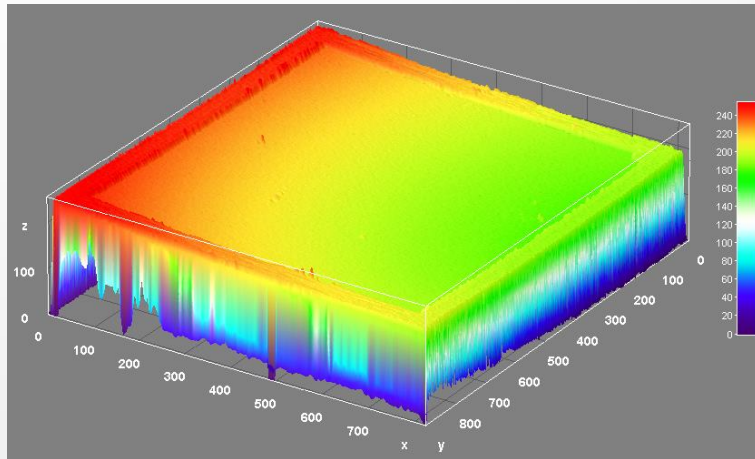
## Analyse der Röntgenfilme

- ImageJ-Skript in Python-Skript integriert, parallele Rechnung mehrerer Filme auf Sim.-Rechner (> 12 h pro Film)



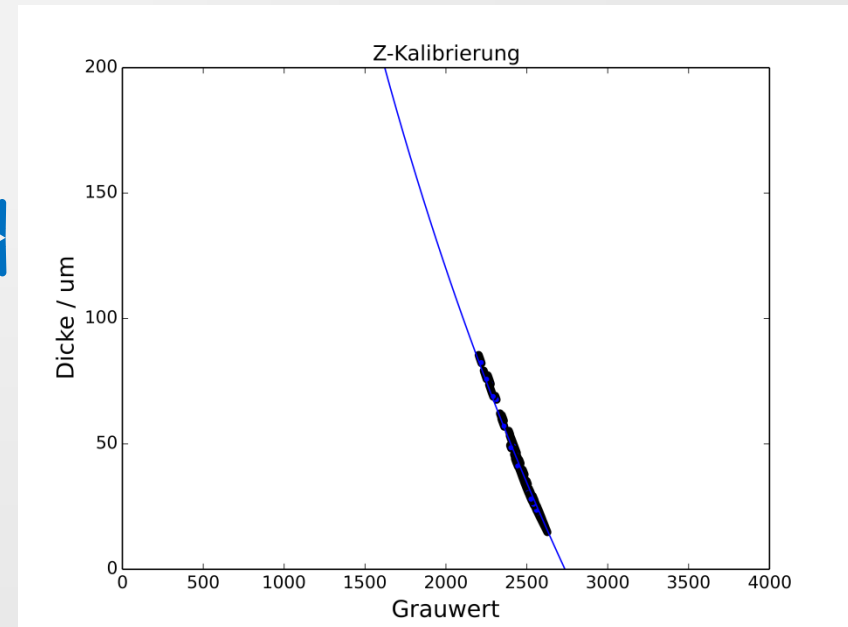
## Analyse der Röntgenfilme

Automatische Skalierung mit  $\mu$ Scan-Daten (z-Richtung)



*Lambert-Beersches Gesetz*

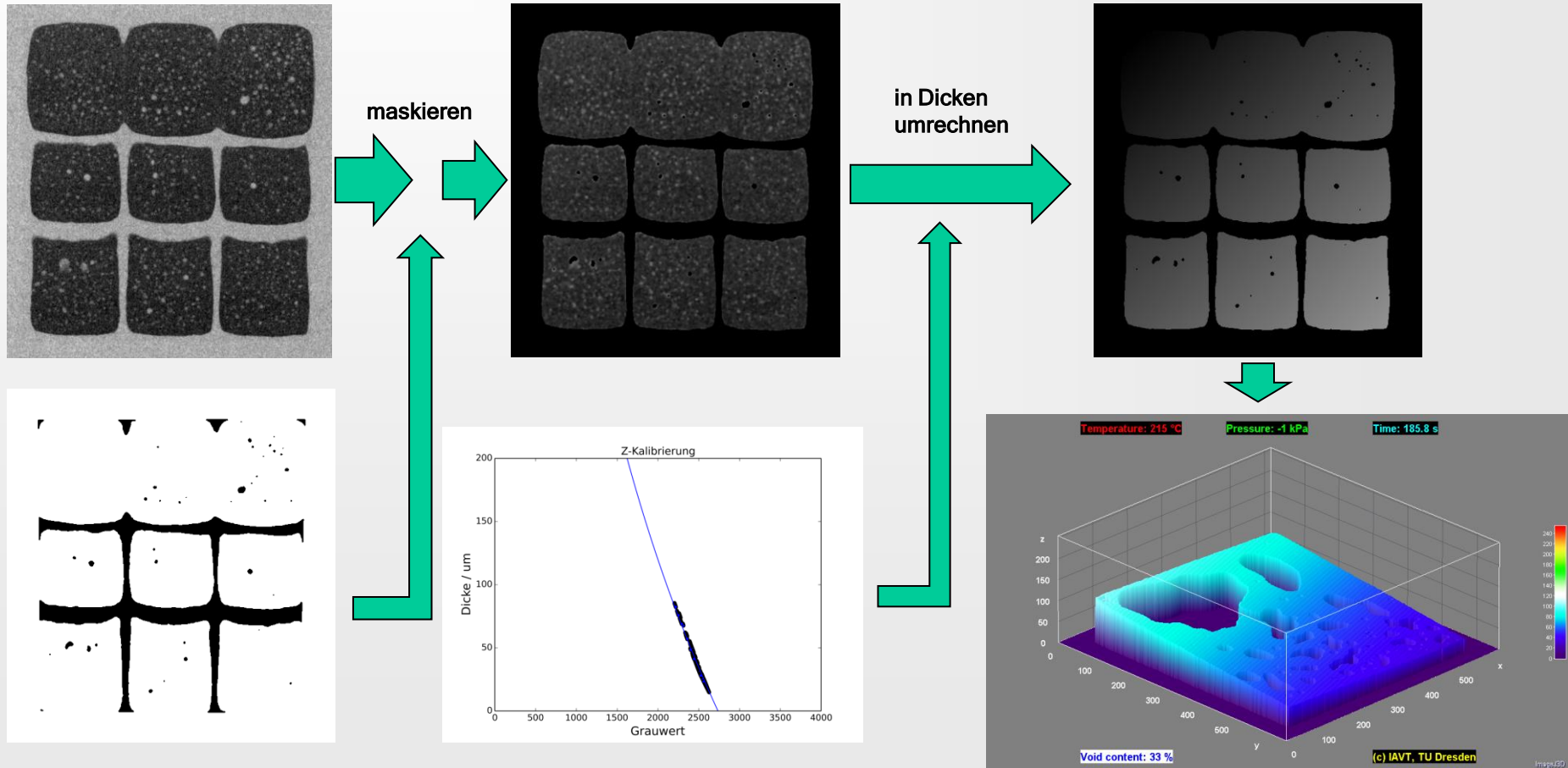
$$I_0 \cdot \exp(\mu \cdot x) \longrightarrow (1/\mu) \cdot \log((x)/I_0)$$





## Analyse der Röntgenfilme

Berechnung der 3D-Ebene des Chips



## Analyse der Röntgenfilme

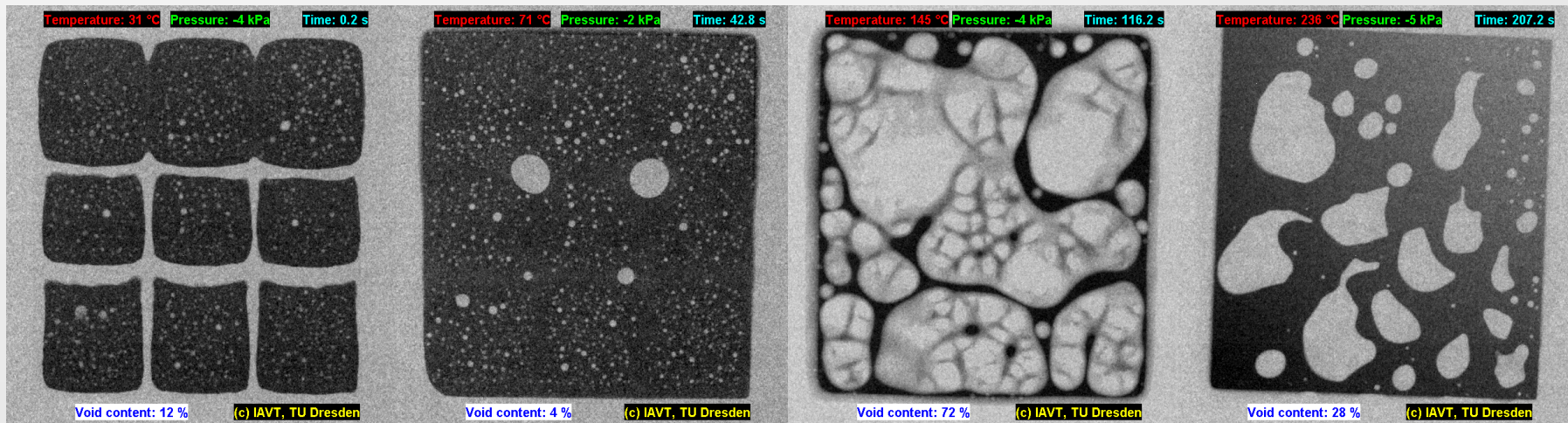
- Input:
  - Einzelbilder der Videos
  - Röntgenbild einer Kalibrierprobe
  - Versuchsdaten (.txt)
- Messgrößen:
  - Zeitlicher Verlauf von:
    - Porengehalt / % der Chipfläche (konstant 73,35 mm<sup>2</sup>)
    - Porenanzahl
    - Mittlere Porengröße / mm<sup>2</sup>
    - Neigungswinkel des Chips / ° (Ebenenglg.)
    - Summenschwerpunkt aller Poren (rel. zu Chipmittelpunkt)
    - Position, Gestalt und Größe aller Poren
  - Örtlich verteilte Bedeckungszeit mit Lot → Bild

## Forschungsfragen

- Was passiert während des Lötprozesses?
- Unterschiede zwischen Unterdruck und Überdruck?
- Wie bewegen sich Poren? Wie bewegt sich der Chip?
- Wie entwickeln sich Poren?
- Wo entstehen Poren?
- Einfluss Prozessparameter auf finalen Porengehalt?

## Was passiert während des Lötprozesses?

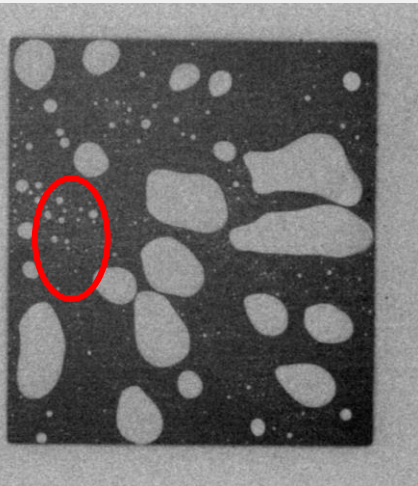
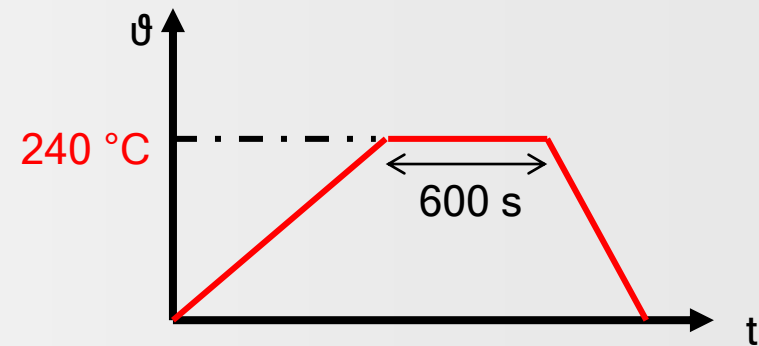
- Zusammenlaufen einzeln gedruckter Lotpastendepots ab 50 °C
- Ausgasen des Lösungsmittels ab 120 °C
- Aufschmelzen
- Heftige Gasbildung, die mit der Zeit langsamer wird
- Schrumpfen der Poren beim Abkühlen (Weil  $T_{\text{peak}} > T_{\text{schmelz}}$ )
- Erstarren (Unterkühlung sichtbar,  $T_{\text{Erstarrung}} < T_{\text{schmelz}}$ )



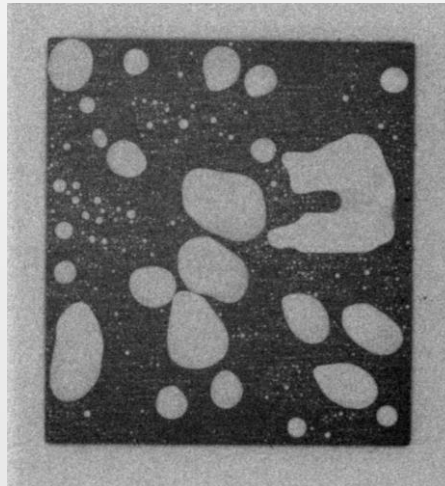


## Was passiert während des Lötprozesses?

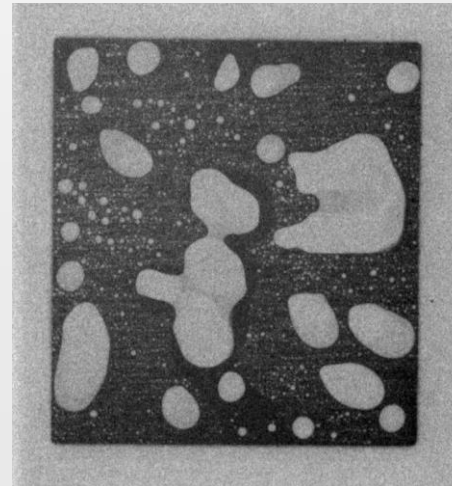
- 10 min bei 240 °C und **Normaldruck**
- DCB, Cu-Oberfläche, 150 µm Schablone
- **SnCu0.7**, Typ 6



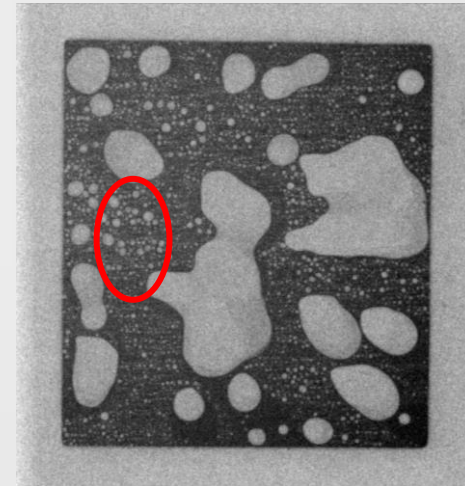
90 s at 240 °C



190 s at 240 °C

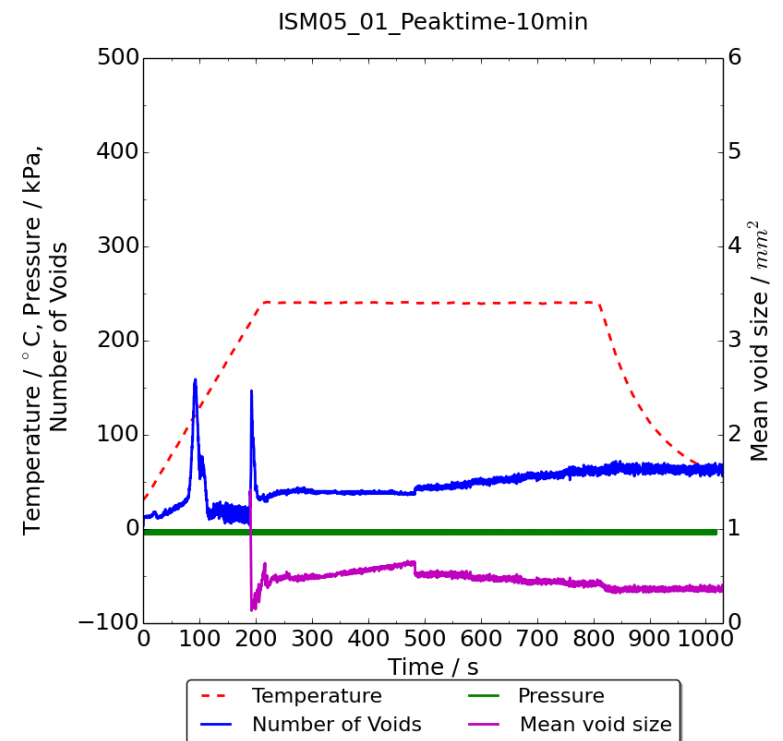
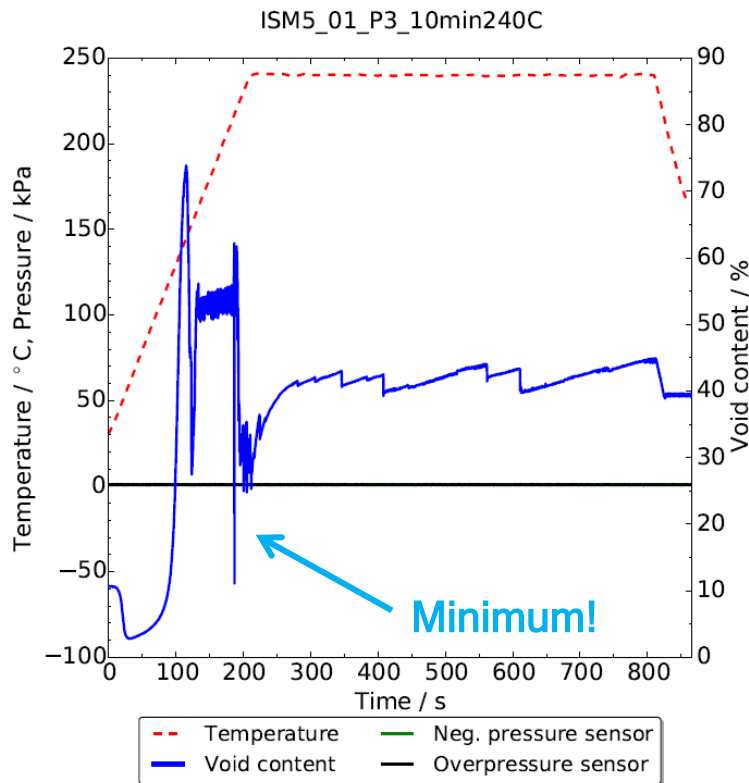


290 s at 240 °C



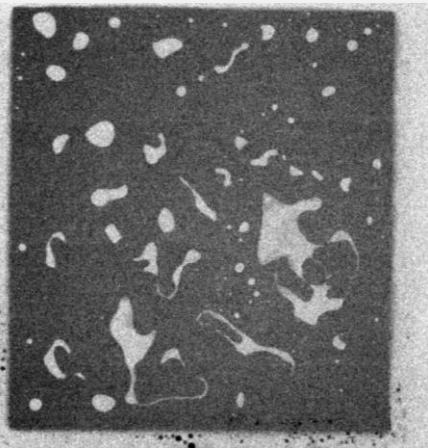
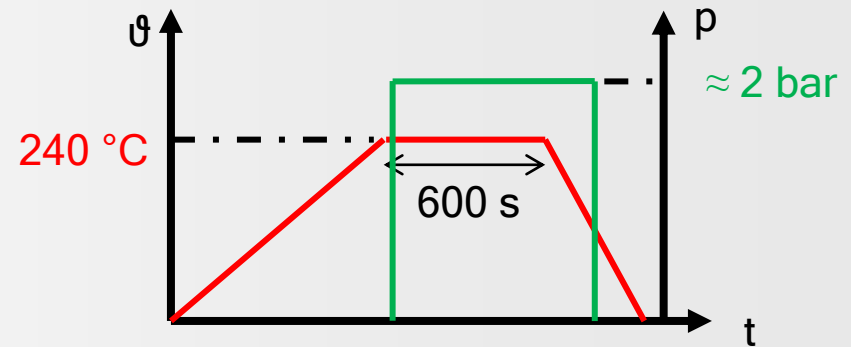
590 s at 240 °C

## Was passiert während des Lötprozesses?

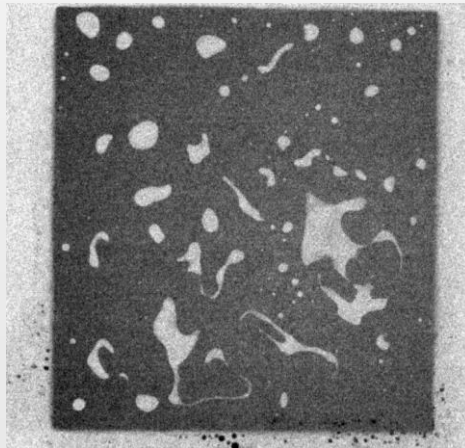


## Einfluss von Überdruck

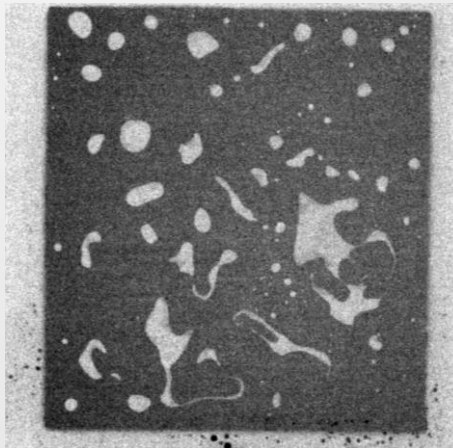
- 10 min bei 240 °C und **Überdruck**
- DCB, Cu-Oberfläche, 150 µm Schablone
- **SnCu0.7**, Typ 6



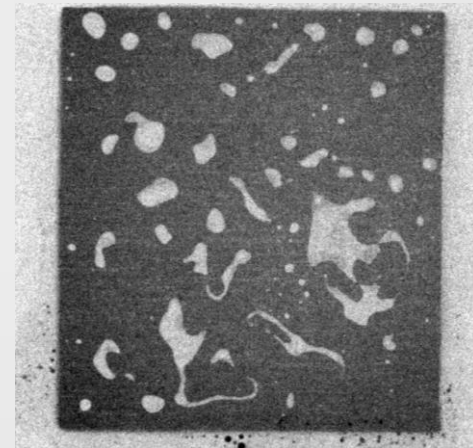
90 s at 240 °C



190 s at 240 °C



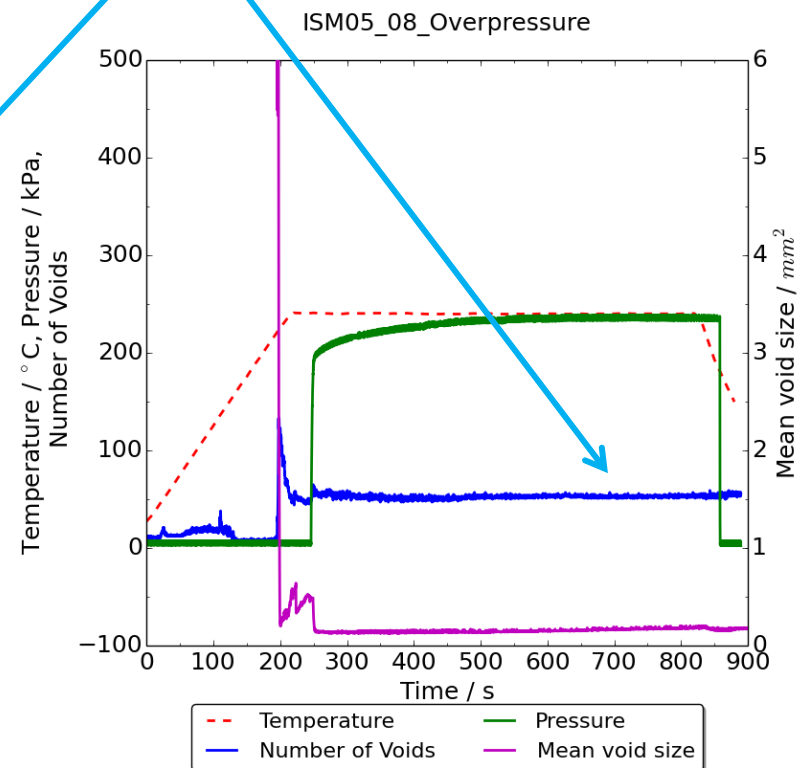
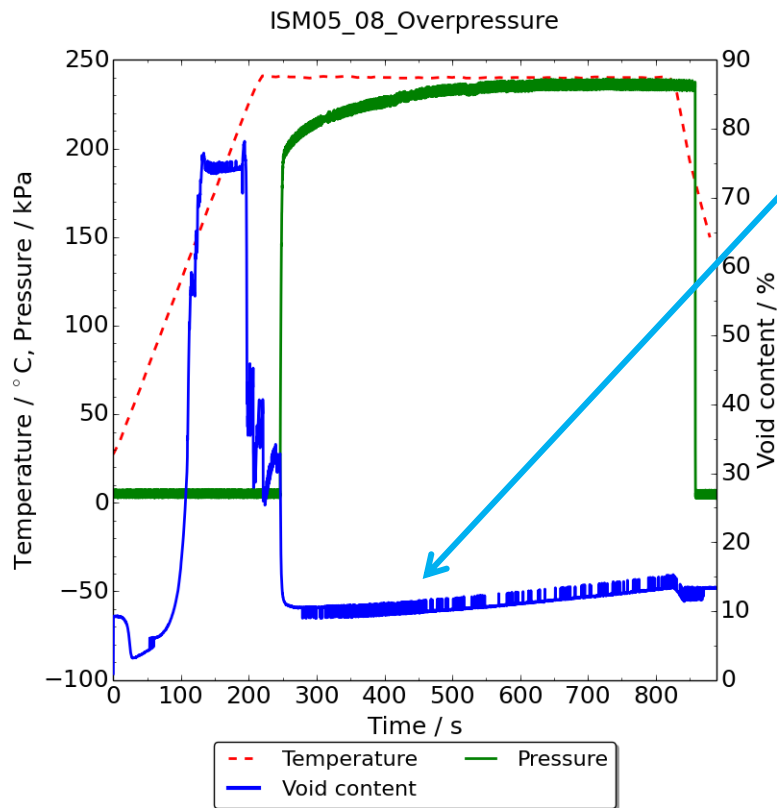
290 s at 240 °C



570 s at 240 °C

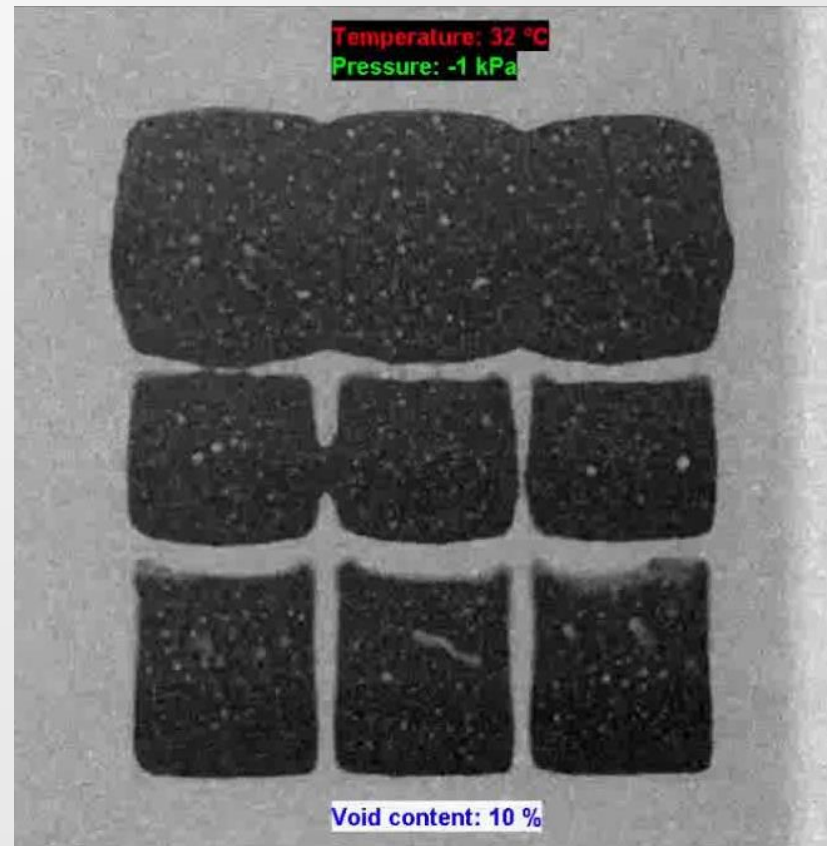
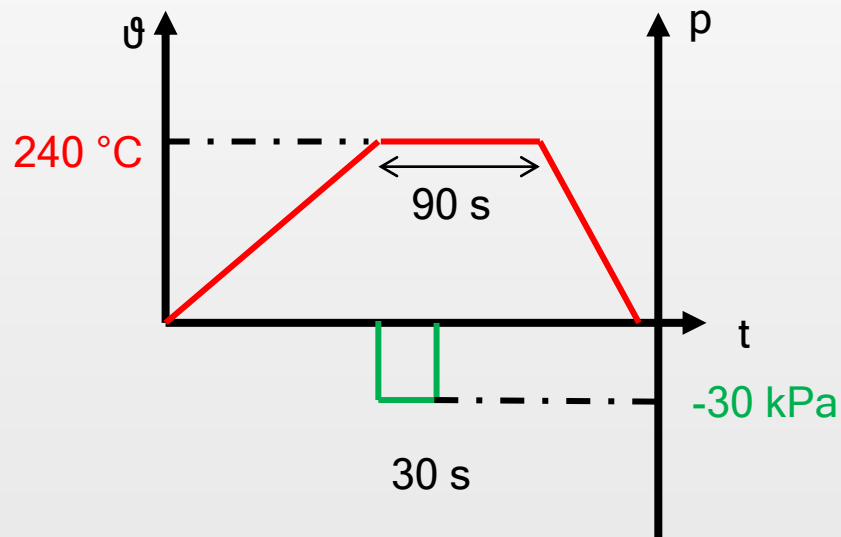
## Einfluss von Überdruck

Überdruck bremst!



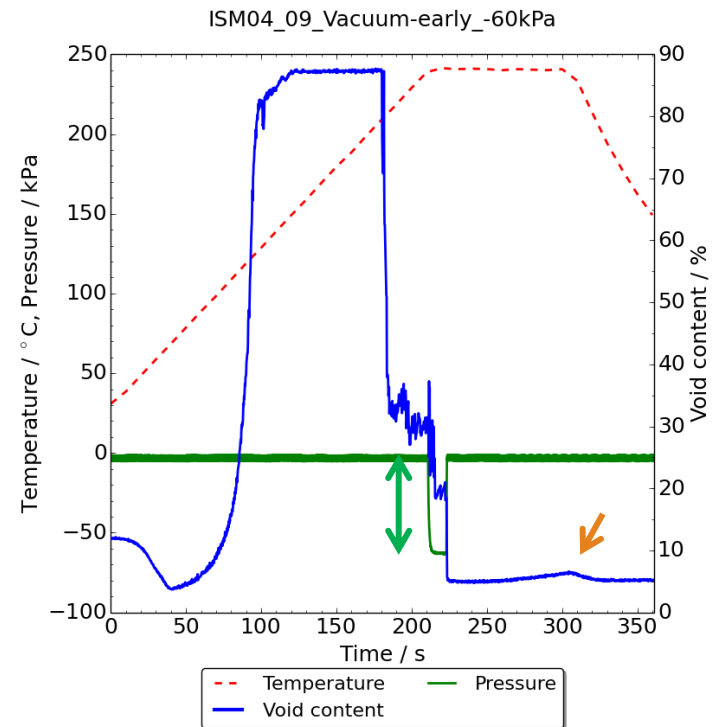
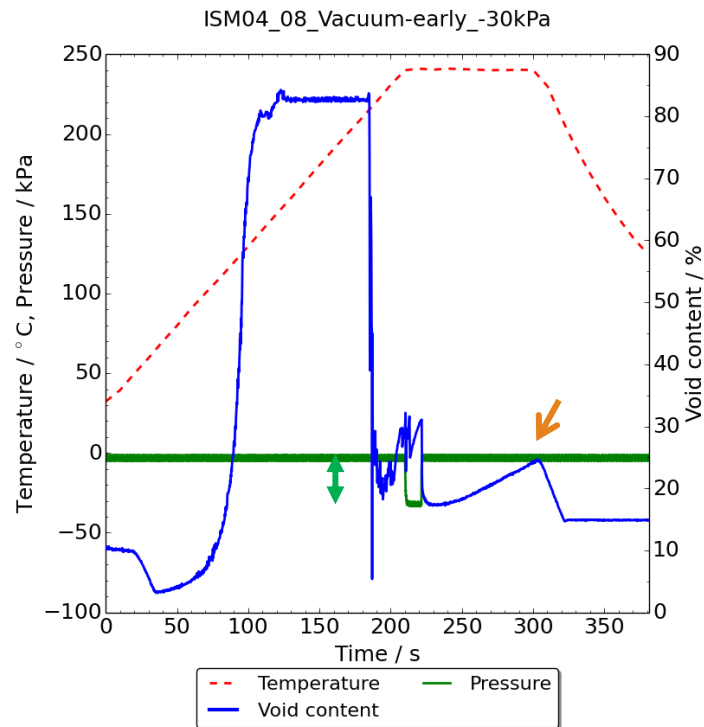
## Einfluss von Unterdruck

- DCB Substrat, Cu-Oberfläche
- **SAC305**, Typ 3, 150  $\mu\text{m}$  Schablone
- 1 K/s, 90 s Peak bei 240 °C (empfohlen: 30 – 90s)



## Einfluss von Unterdruck

- DCB Substrat, Cu-Oberfläche
- **SAC305**, Typ 3, 150  $\mu\text{m}$  Schablone
- 1 K/s, 90 s Peak bei 240 °C (empfohlen: 30 – 90s)

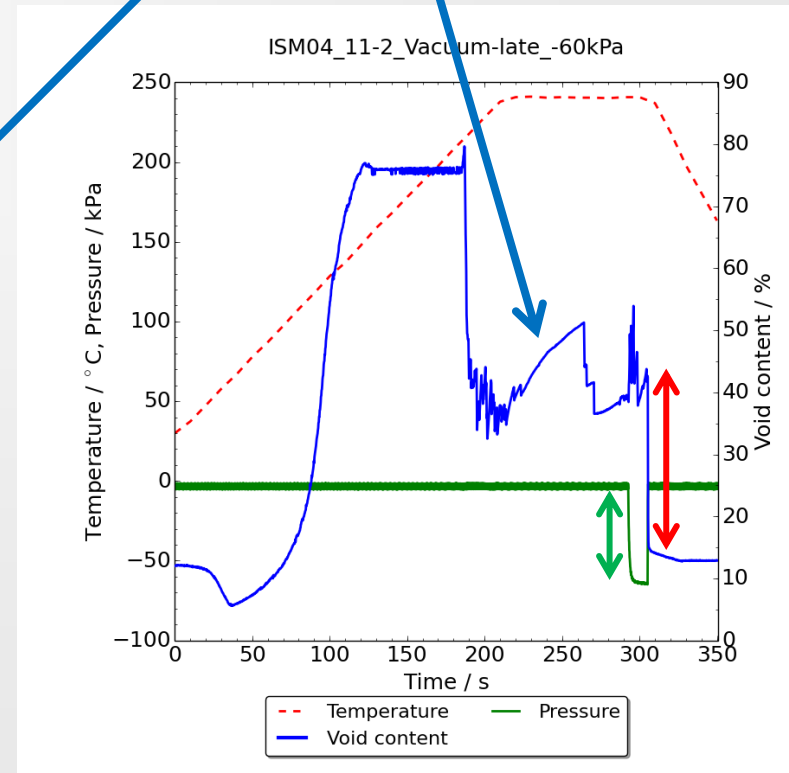
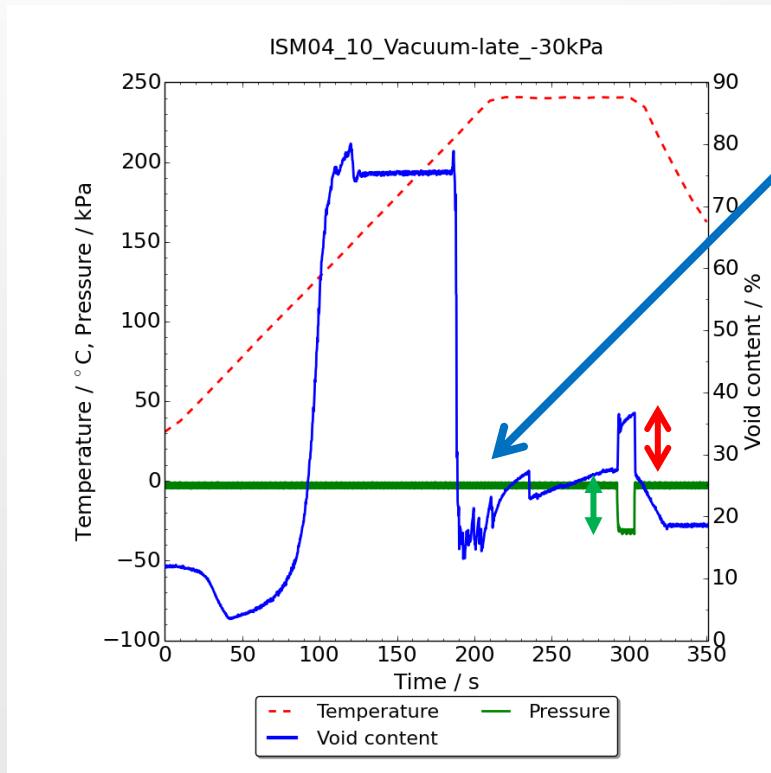


- **Druckunterschied** beeinflusst die **Reaktion**

## Einfluss von Unterdruck

- DCB Substrat, Cu-Oberfläche
- **SAC305**, Typ 3, 150  $\mu\text{m}$  Schablone
- 1 K/s, 90 s Peak bei 240  $^{\circ}\text{C}$  (empfohlen: 30 – 90s)

Starke Unterschiede zwischen einzelnen Proben!

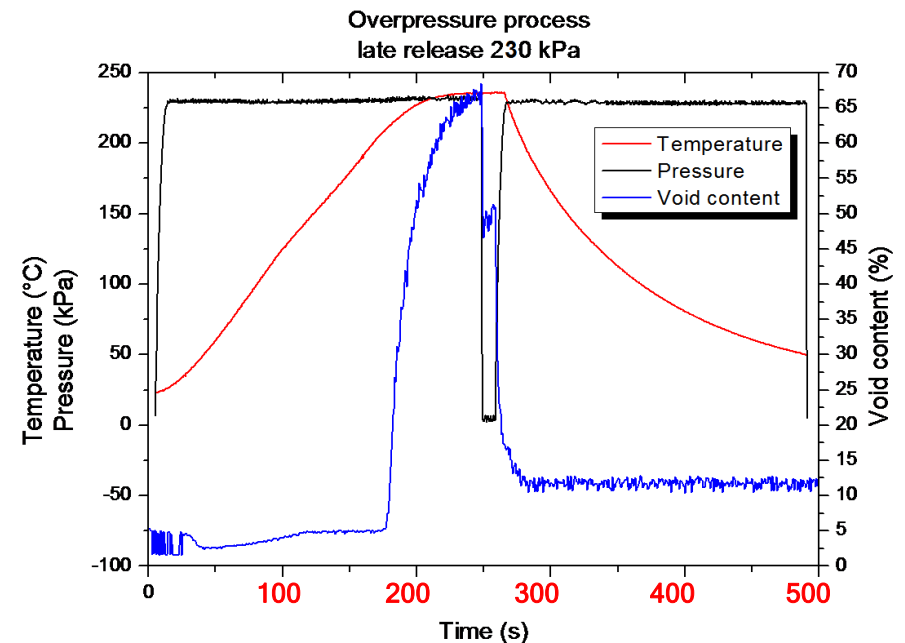
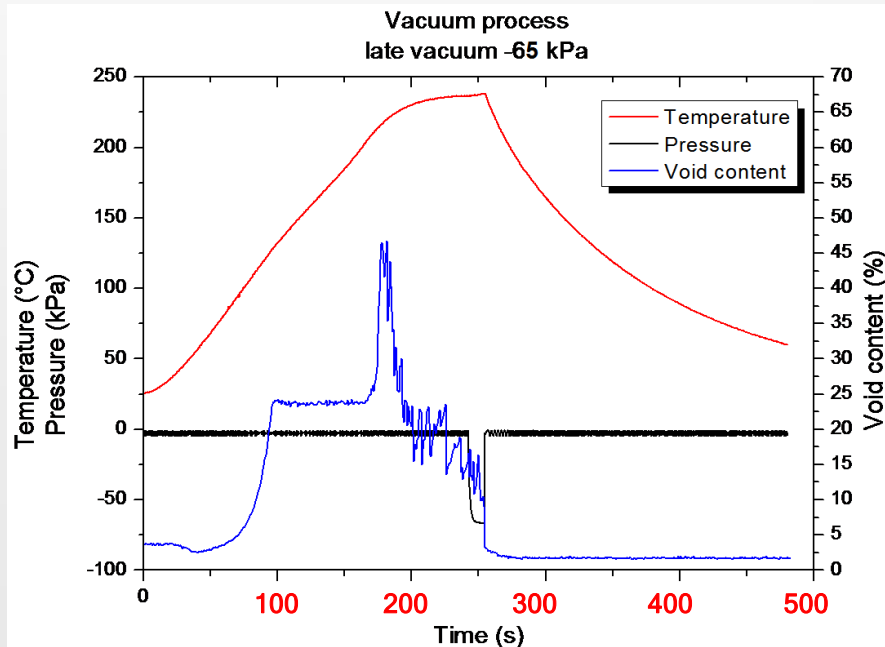


- **Druckunterschied** beeinflusst **Porenreduktion**



## Unterschiede zwischen Über- und Unterdruck

- Prinzip des kleinsten Zwangs
  - **Überdruck hemmt** Reaktion des Flussmittels
  - **Unterdruck beschleunigt**
- Überdruck erhöht** Siedetemperatur des Lösungsmittels
- Zu hoher **Überdruck stoppt** Ausgasen und akkumuliert Poren



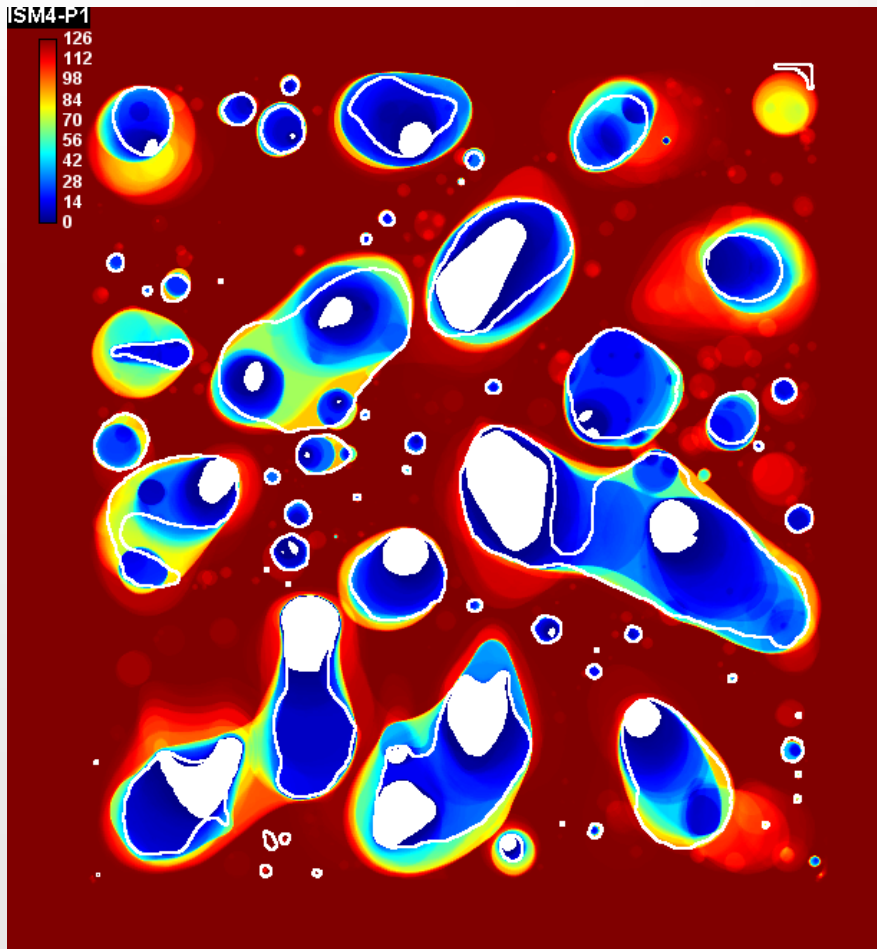


## Wie bewegen sich Poren?

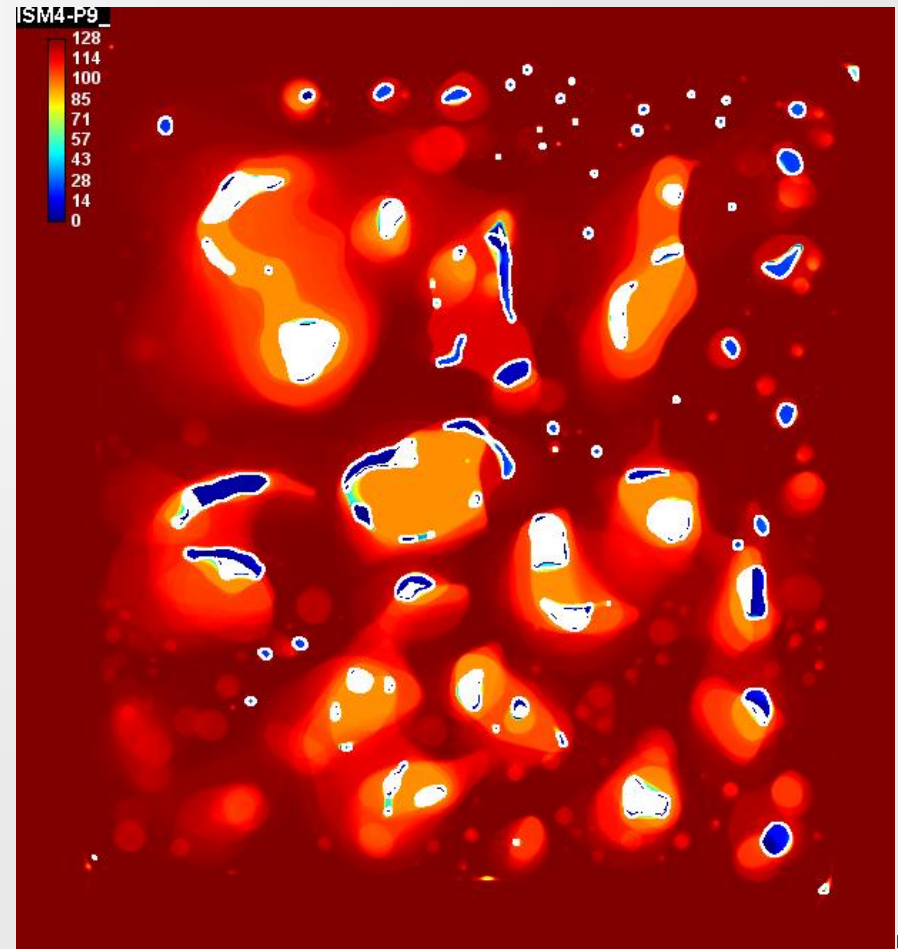
**Beispielfilm 2D  
ISM4-P9\_overlay**

## Bedeckungszeit

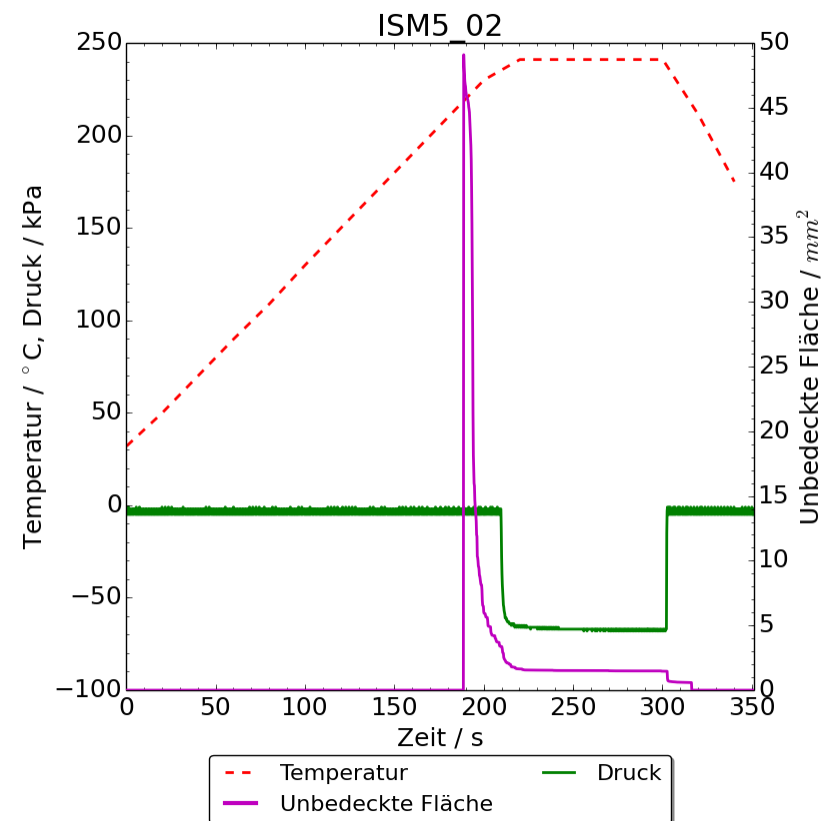
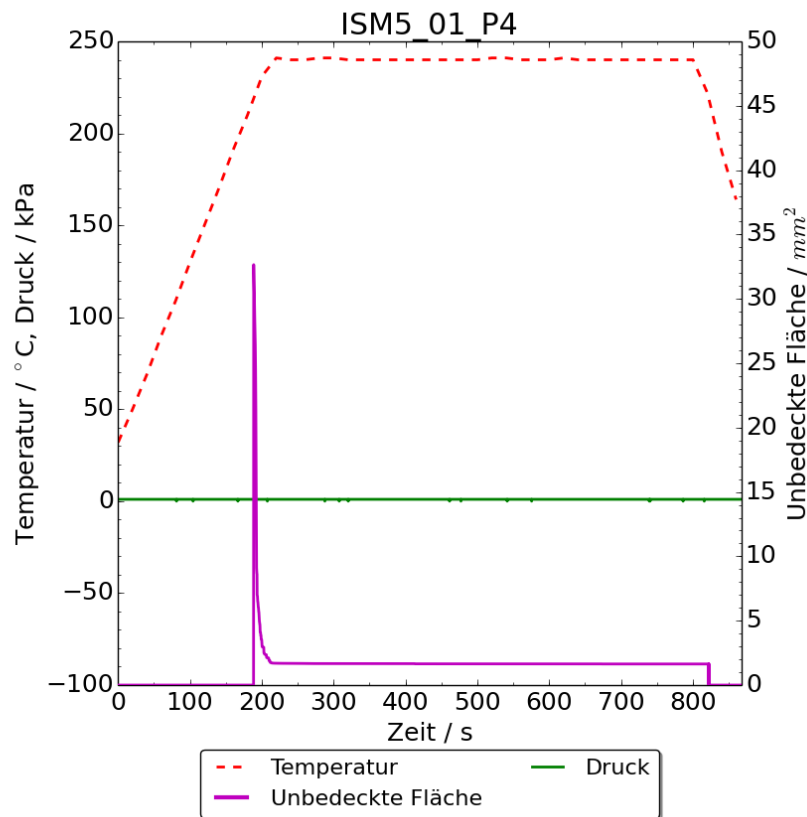
90 s @240°C



90 s @240°C, 10 s Vakuum zu Beginn



## Unbedeckte Fläche



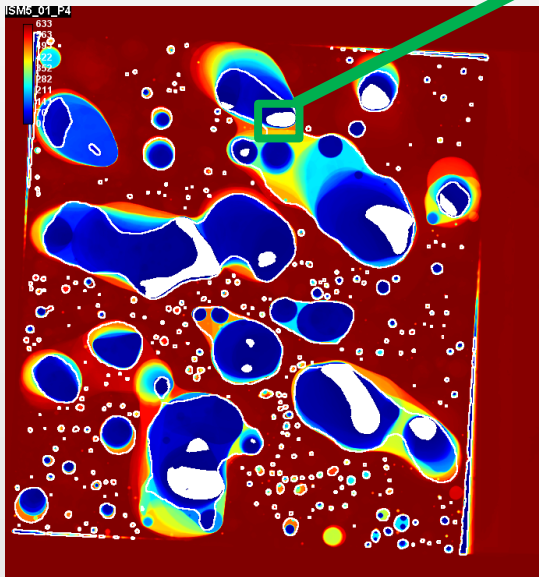
- Wesentlicher Lötvorgang scheint schon nach ca. 30 s abgeschlossen

## Blick in eine Pore von oben

10 min @240 °C

REM-Bilder von oben

DCB-Kupfer



Intermetallik



A. Klemm

Lot

## Wie bewegt sich der Chip?

**Beispielvideo 3D  
ISM4-P8\_dreiD**

## Beispielvideo mit 10 fps

**Beispielvideo 2D**  
**ISM06-01\_P1**

## Zusammenfassung

- Jetzt Filmaufnahme mit 10 fps
- Vollständig automatisierte Filmanalyse
- Vertrauenswürdige z-Kalibrierung
- Prinzip des kleinsten Zwangs
- Überdruck verhindert Trocknen vor Aufschmelzen

*Konventionelles Löten:*

→ **Unterdruck besser für Voidreduktion als Überdruck**

*Diffusionslöten:*

→ **Kombination Über- und Unterdruck sinnvoll**

- Es existiert ein **Minimum des Porengehaltes**
- Jede Lötstelle ist ein Einzelstück!
- **Mehr Experimente für umfassendes Verständnis nötig**



## Ausblick

- Kombiniertes Lötprozess (Unter- und Überdruck)
- Systematischer Versuchsplan
- *Was bestimmt die Porenverteilung?*
- *Lässt sich das Minimum des Porengehaltes verschieben?*
- *Lässt sich die niemals benetzte Fläche beeinflussen?*
- *Theoretisches Verständnis des Verhaltens von Gasblasen in flüssigem Lot:*
  - *Ausgasbedingung einer Gasblase?*
  - *Steigen Gasblasen nach oben, oder bleiben an Substrat haften?*
  - *Wie entsteht Chipneigung durch Gasblasen in Lötstelle?**→ Simulation und Berechnung*



## Quellen

- [Khaja 2013] Khaja A. S., et al. (2013). *Optimized Thin-Film Diffusion Soldering for Power-Electronics Production*, in *Proceedings of International Spring Seminar on Electronics Technology*, May 8-12, 2013; Alba Iulia
- [Bader 1990] Bader Stefan: *Erzeugung thermisch stabiler Mikroverbindungen durch isothermische Erstarrung*. Dissertation Technische Universität Stuttgart, 1990
- [Ehrhardt 2012] Ehrhardt C., Oppermann H., Lang K.-D. (2012). *Transient Liquid Phase Soldering for Lead-Free Joining of Power Electronic Modules in High Temperature Electronics*, in *Proceedings of International Conference on High Temperature Electronics (HiTEC)*, May 8-10, 2012, North Albuquerque

Videos auf Youtube:

<https://www.youtube.com/channel/UCKuFzZ3gKtmqtjzt0gS6GpA>