



FAPS

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Modellierung des Selektivwellenlötprozesses

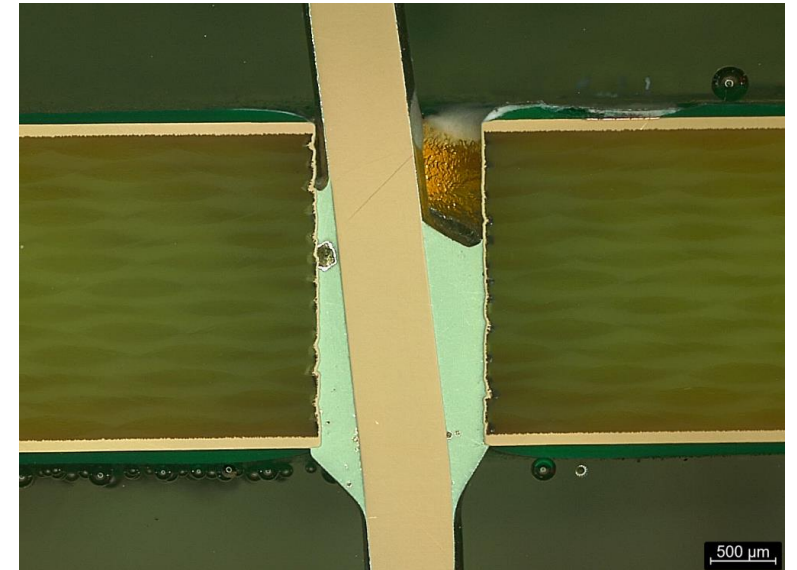
*Thermische Simulation von Wellen- und Selektivlötprozessen zur
Optimierung des Leiterplattendesigns und der Anlagenparameter für
IPC-konforme Kontaktierung von THT-Bauelementen – „SiWOLAK“*

Reinhardt Seidel

Der Vortrag zum Projekt SiWOLAK beim ERFA Kreis.

SiWOLAK

- Das Projekt SiWOLAK
- Einflüsse beim Wellen-/Selektivwellenlöten
- Kapillarkräfte als Triebkraft
- Temperaturverteilung als entscheidendes Kriterium
- Ansatz zur Bestimmung der Einflüsse von Parametern im Anbindungsdesign
- Experimentelle Untersuchung des Selektivwellenlötprozesses
- Ausblick im Projekt SiWOLAK



SiWOLAK – Entwicklung eines Konzepts zur rechnergestützten Beurteilung der Lötbarkeit von THT-Lötstellen und Leiterplatten Designs.

Projektziele und Herausforderungen

Motivation

- Hohe Packungsdichte, große Kupferdichten und mehrlagige Leiterplatten Designs sorgen für große Herausforderungen bei der Wärmeeinbringung im Lötprozess
- Design Vorkehrungen können auch an kritischen Lötstellen die Lötbarkeit sicher stellen

Projektziel

- Entwicklung eines Tools zur thermischen Beurteilung von Leiterplattendesigns zur Unterstützung im Entwicklungs- und Fertigungsprozess.
- Analyse der Einflussfaktoren auf die Entwärmung der Lötstelle durch thermische Simulation und Lötversuche an einer zu definierenden Testleiterplatte
- Analyse des Wärmeeingangs in die Lötstelle

Projektpartner

VIERLING

kurtz ersa

ADAM Research

Thermal Risk Management in Electronics

Brückmann
Elektronik GmbH



TRAINALYTICS®

Miele

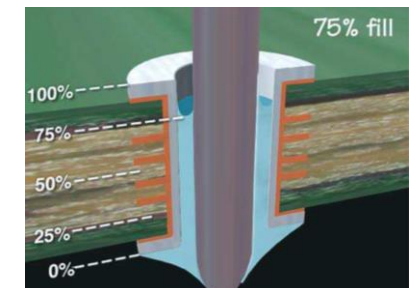
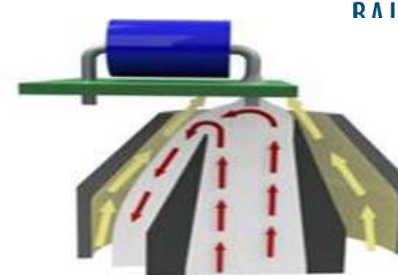
RAIVER ZINN®
COBAR®



DVS
FORSCHUNGSVEREINIGUNG

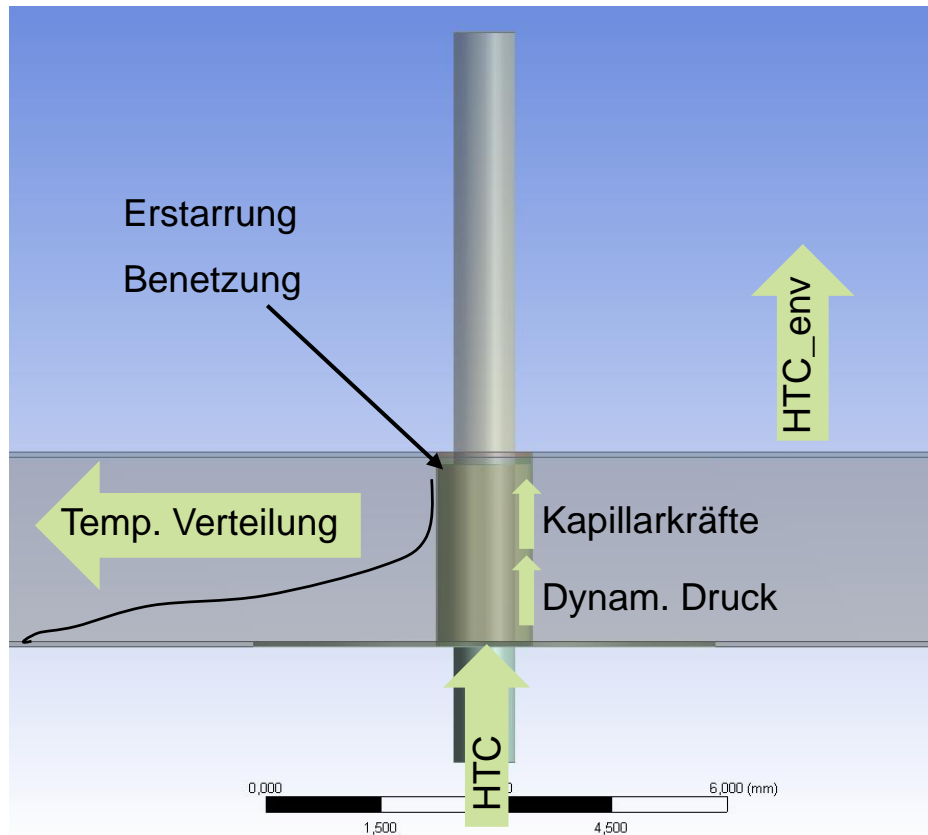
Zollner

AF



Eine große Anzahl physikalischer Effekte beim Wellen- und Selektivlöten sorgt für hohe Komplexität für die Modellierung des Lotdurchstiegs.

Physikalische Effekte



Maschinen-/Prozessparameter

Materials and Properties

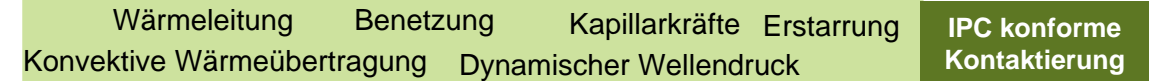
- Lotlegierung
- Flussmittel
- Leiterplattenmaterialien
- Bauteilmaterial

Methods/ Prozessparameter

- Vorheiztemperatur/-zeit
- Lottemperatur
- Lötkontaktzeit
- Kontaktfläche/-winkel
- Eintauchzeit

Leiterplattendesign

- Leiterplattendicke
- Lagenaufbau/dicke
- Anbindungsdesign
- Bauteil
- Oberflächen
- Bestückung



Machines

- Fluxer
- Vorheizungstyp
- Düsentyp
- Ggf. Löttrahmentemperatur
- Lotwellengeometrie

Environment

- Umwelttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck
- Atmosphäre
- Luftzirkulation in der Kammer
- Wärmeübergang an der Welle

Measurements

- Art der Temperaturmessung/ Steuerung der Vorheizung
- Absorptions- & Emissionskoeffizient
- Lottemperaturregelung der Vorheizung
- Temperaturregelung im Lotbad

Der dynamische Wellendruck und die kapillaren Kräfte auf Grund der Oberflächenspannung sind wichtige treibende Kräfte für den Durchstieg.

Kapillarkraft

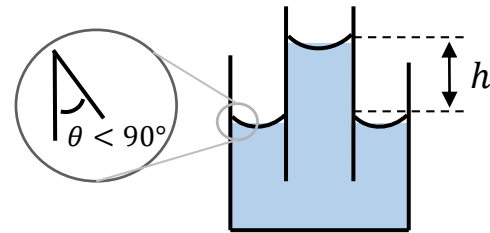
Oberflächenspannung σ_{LG}

Benetzungswinkel θ

Dichte ρ

Kapillarradien $r_1 - r_2$

Steighöhe h



Für ringförmige Kapillaren

$$h = \frac{\sigma_{LG} * \cos\theta * 2(r_1 - r_2)}{\rho g(r_1^2 - r_2^2)}$$

Abschätzung der Kapillarkräfte

	Unit	Water	SN100C	SN100C
Sigma	N/m	0,074	0,300	0,300
Lambda	°	17,000	25,000	25,000
	kg/m			
Density	3	1000,000	7360,000	7360,000
g	m/s ²	9,810	9,810	9,810
d_out	m	0,00500	0,00120	0,00120
d_in	m	0,00000	0,00000	0,00080
h_capillary	m	0,006	0,013	0,038
	mm	5,771	12,552	37,657

Dynamischer Druck

Schweredruck

p_s

Hydrostatischer Druck

p_{stat}

Hydrodynamischer Druck

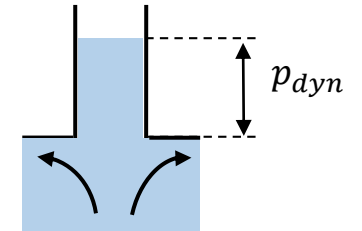
p_{dyn}

Dichte des strömenden Stoffes

ρ

Strömungsgeschwindigkeit

v



$$const. = p_s + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2}$$

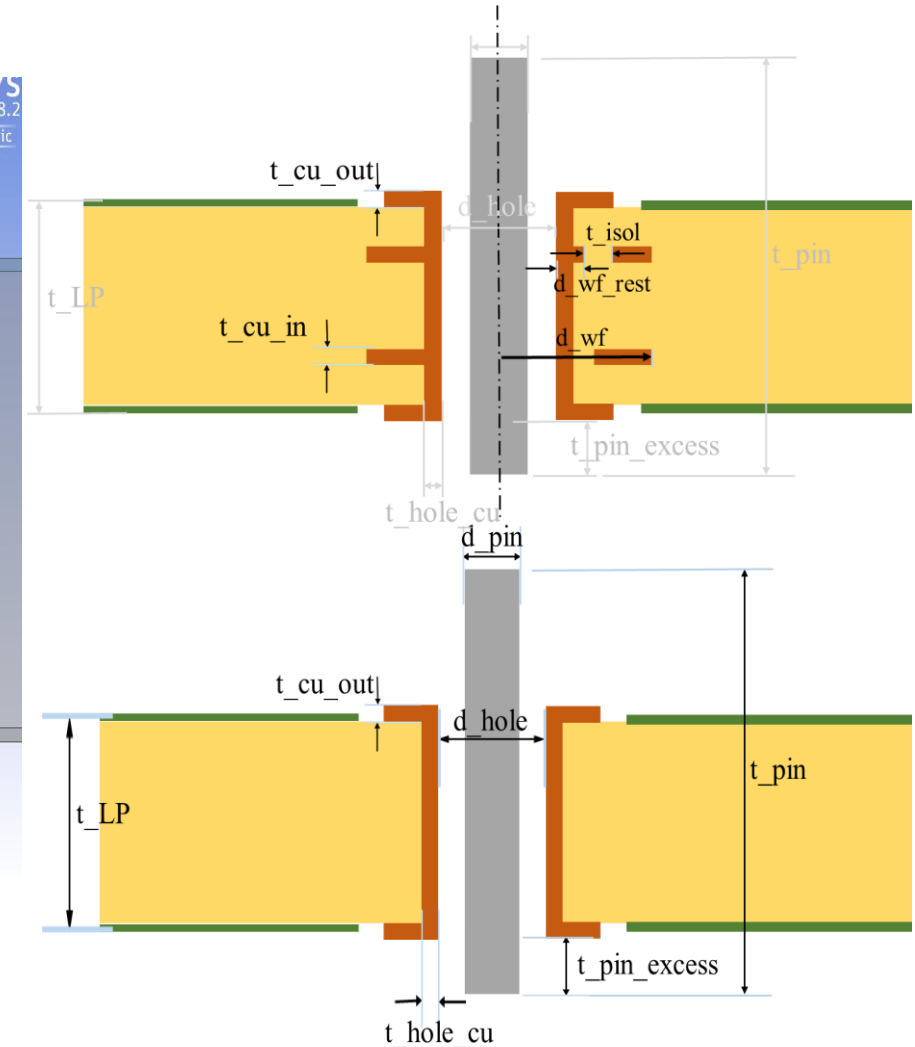
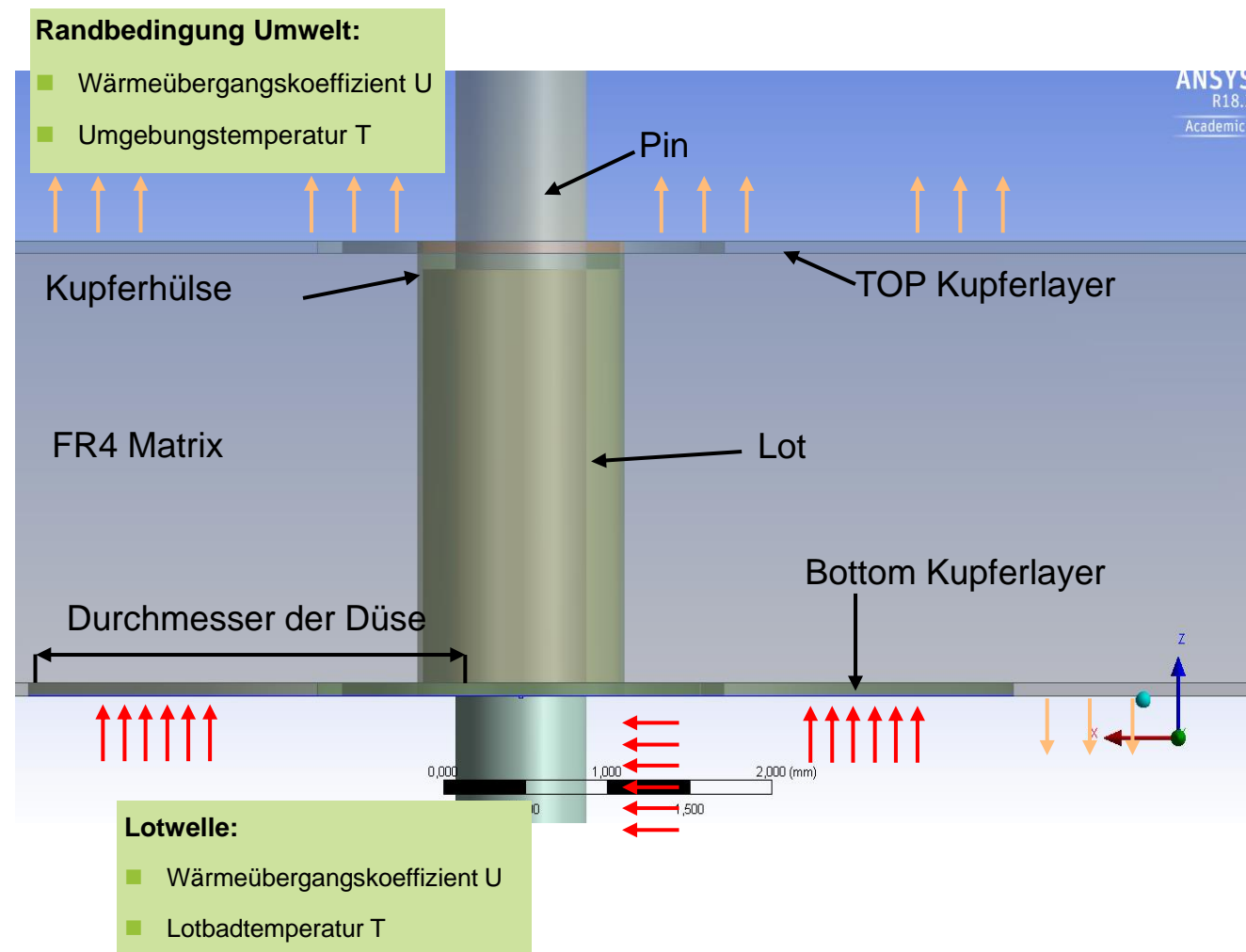
Abschätzung des dynamischen Staudrucks (Bernoulli)

	Unit	Water	SN100C	SN100C
Fluid velocity	m/s	0,200	0,100	0,200
Dynm. Wave pressure	N/m ²	20,000	36,800	147,200
Dynm. Wave height	m	0,002	0,001	0,002
	mm	2,039	0,510	2,039

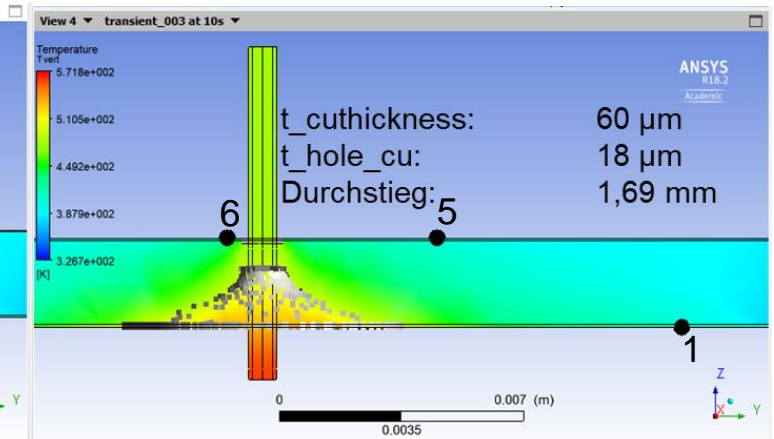
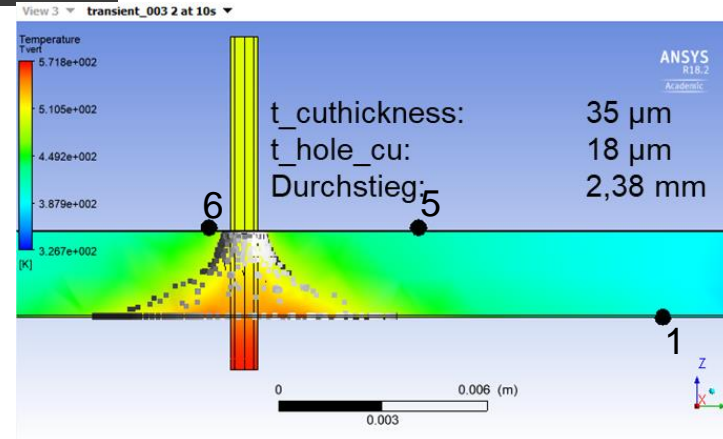
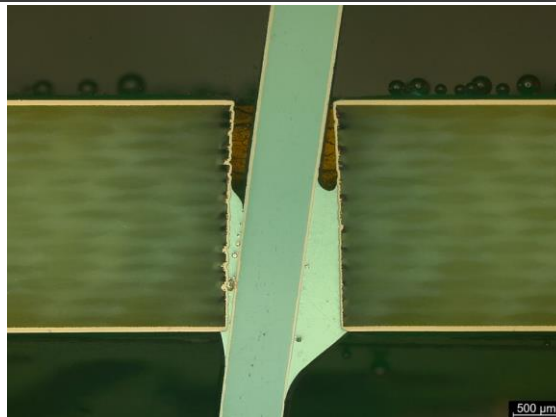
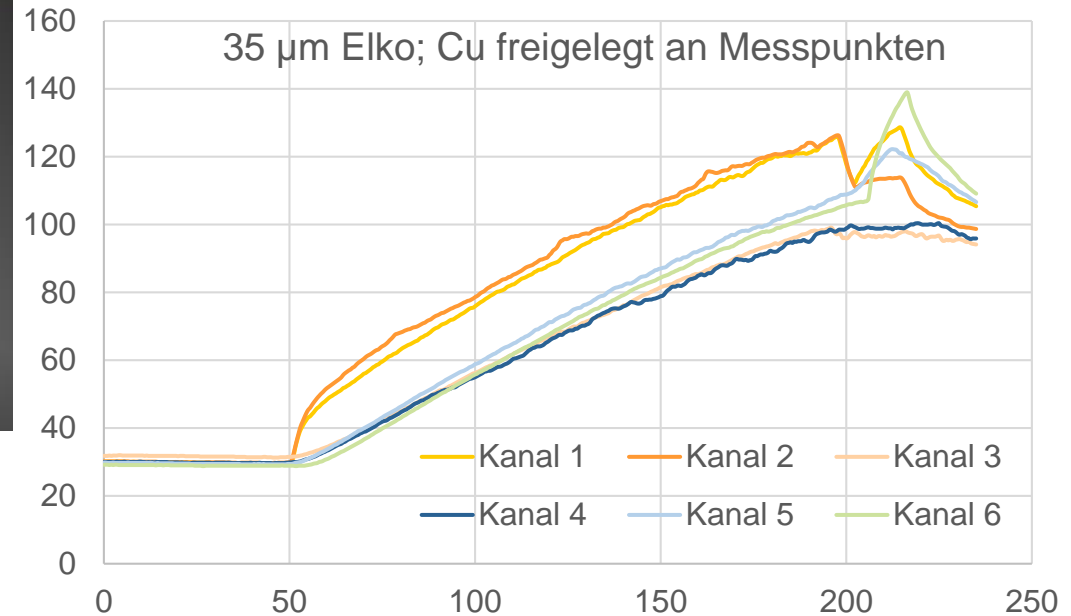
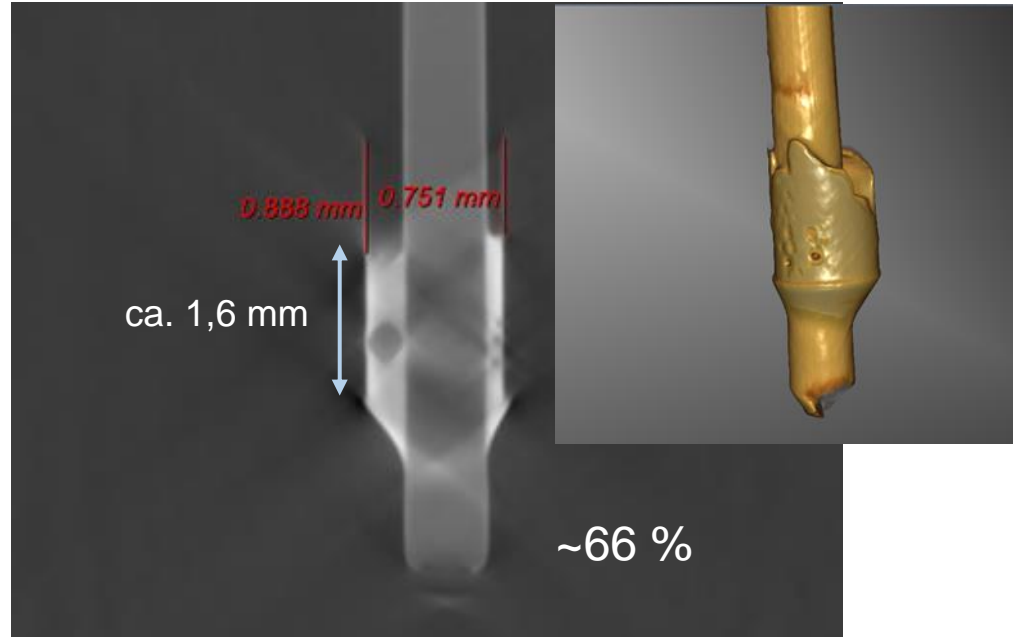
Erkenntnis:

- Kapillarkräfte und Dyn. Staudruck bestimmen nicht allein über Lötung
- Oberflächenspannung sinkt mit steigender Temperatur => Abschwächung des Kapillareffekts

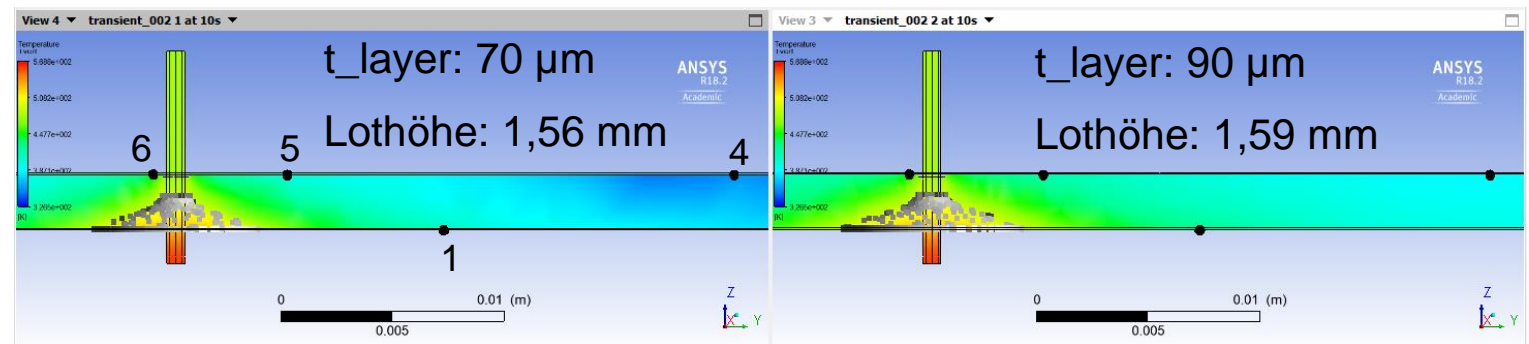
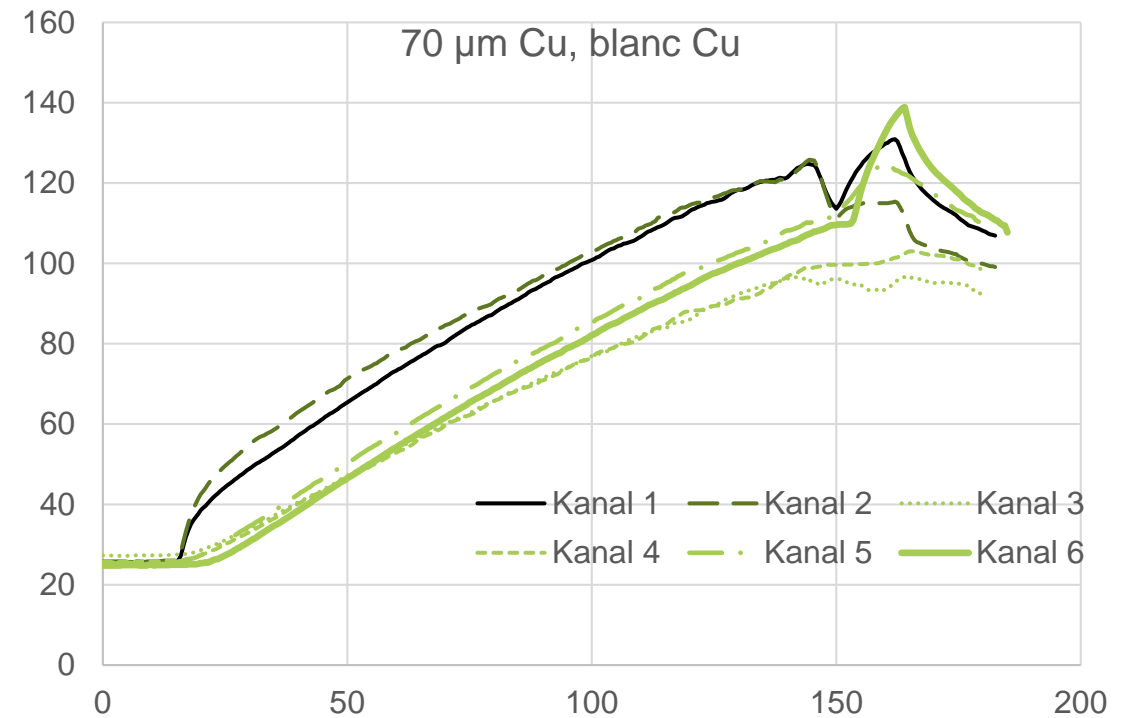
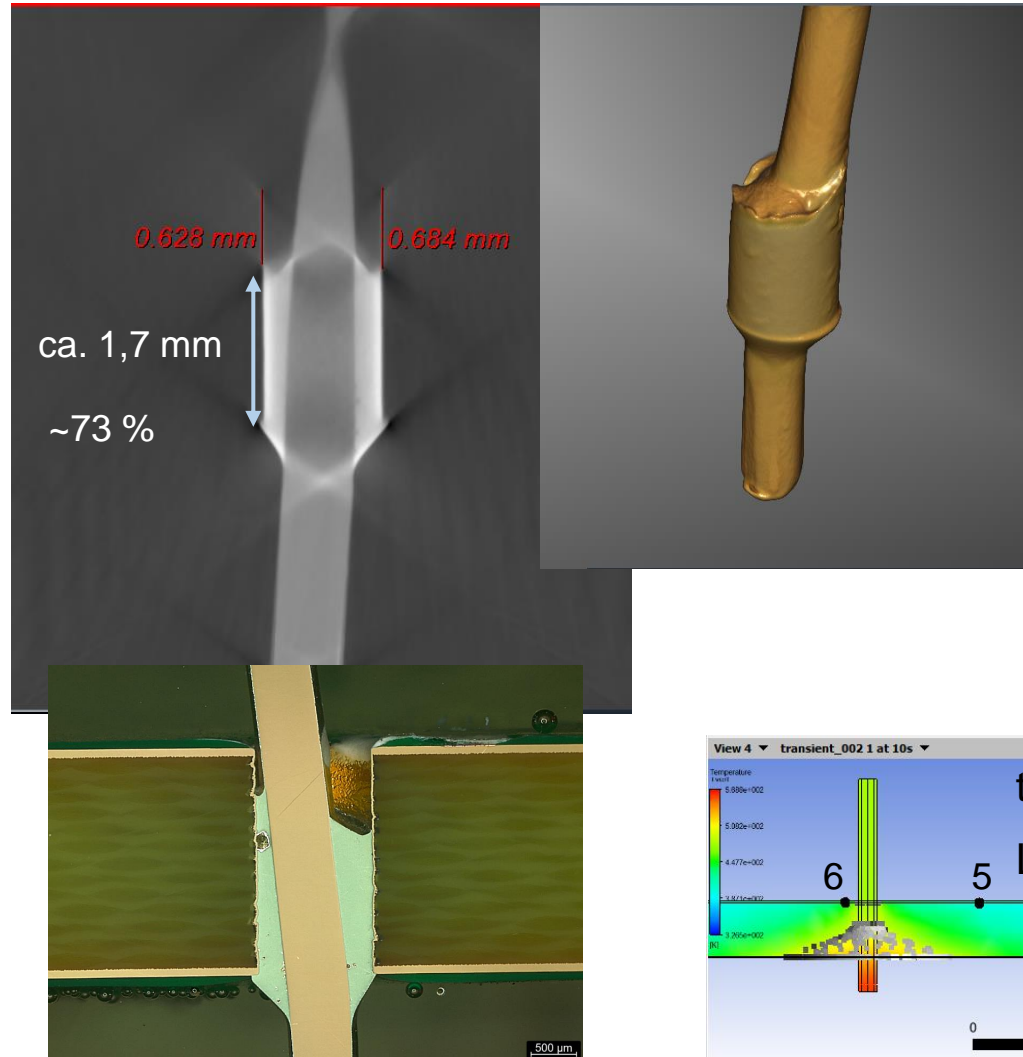
Das Simulationsmodell zur Ermittlung der Temperaturverteilung in der Leiterplatte ist parametrisiert aufgebaut und soll die Vorhersage des thermischen Durchstiegs ermöglichen.



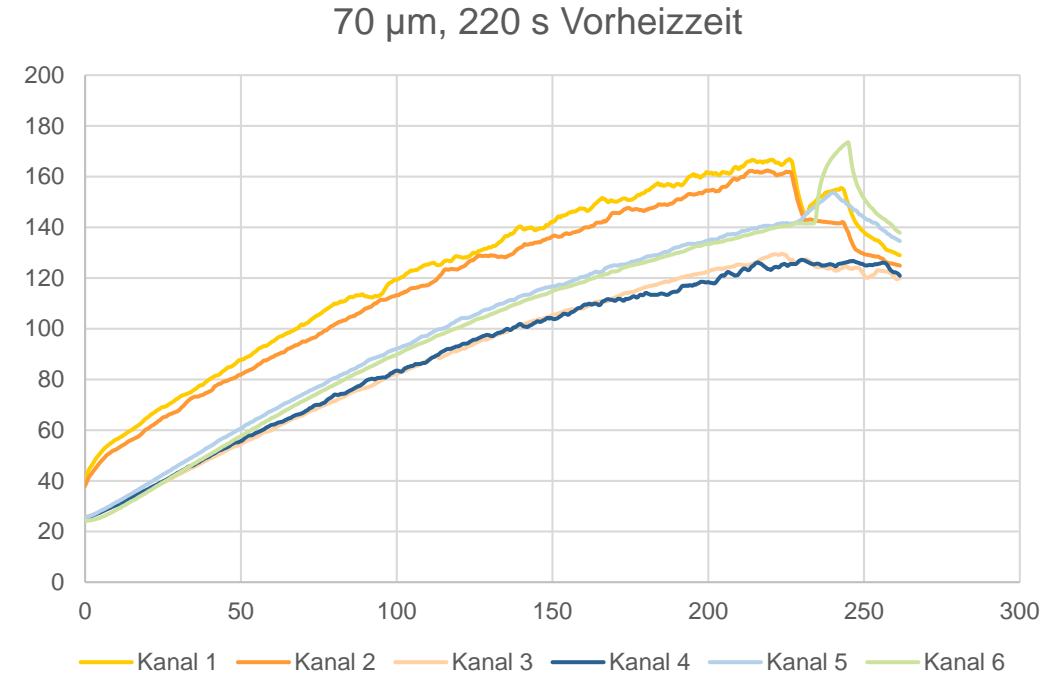
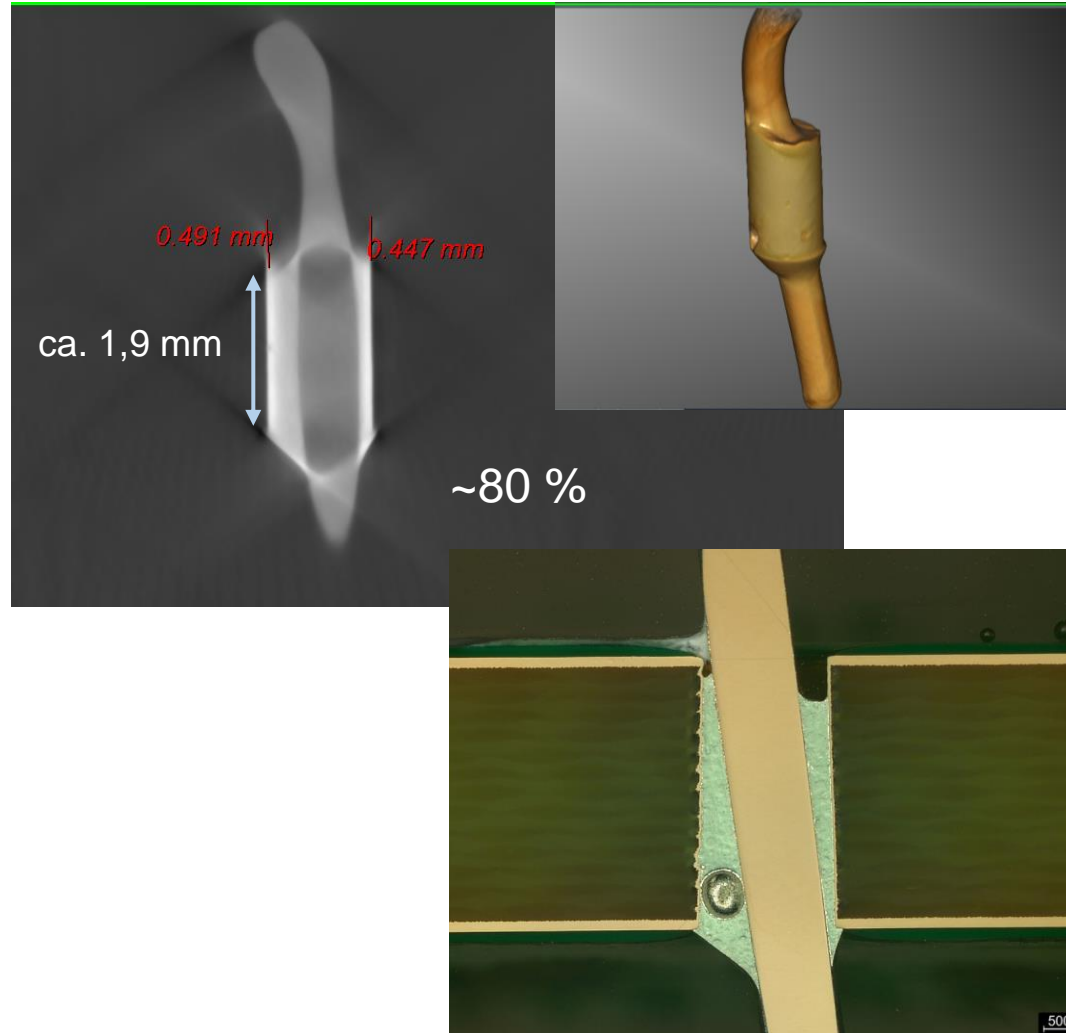
Vergleich der Simulation mit dem Lötergebnis für 35 μm – Folienkondensator – 110 $^{\circ}\text{C}$ Vorheizung – Cu Blank – Fe Pin



Vergleich der Simulation mit dem Lötergebnis für 70 μm – Folienkondensator – 110 °C Vorheizung – Cu Blank – Cu Pin



Vergleich der Simulation mit dem Lötergebnis für 70 μm – Folienkondensator – 220 s Vorheizung – Cu Pin



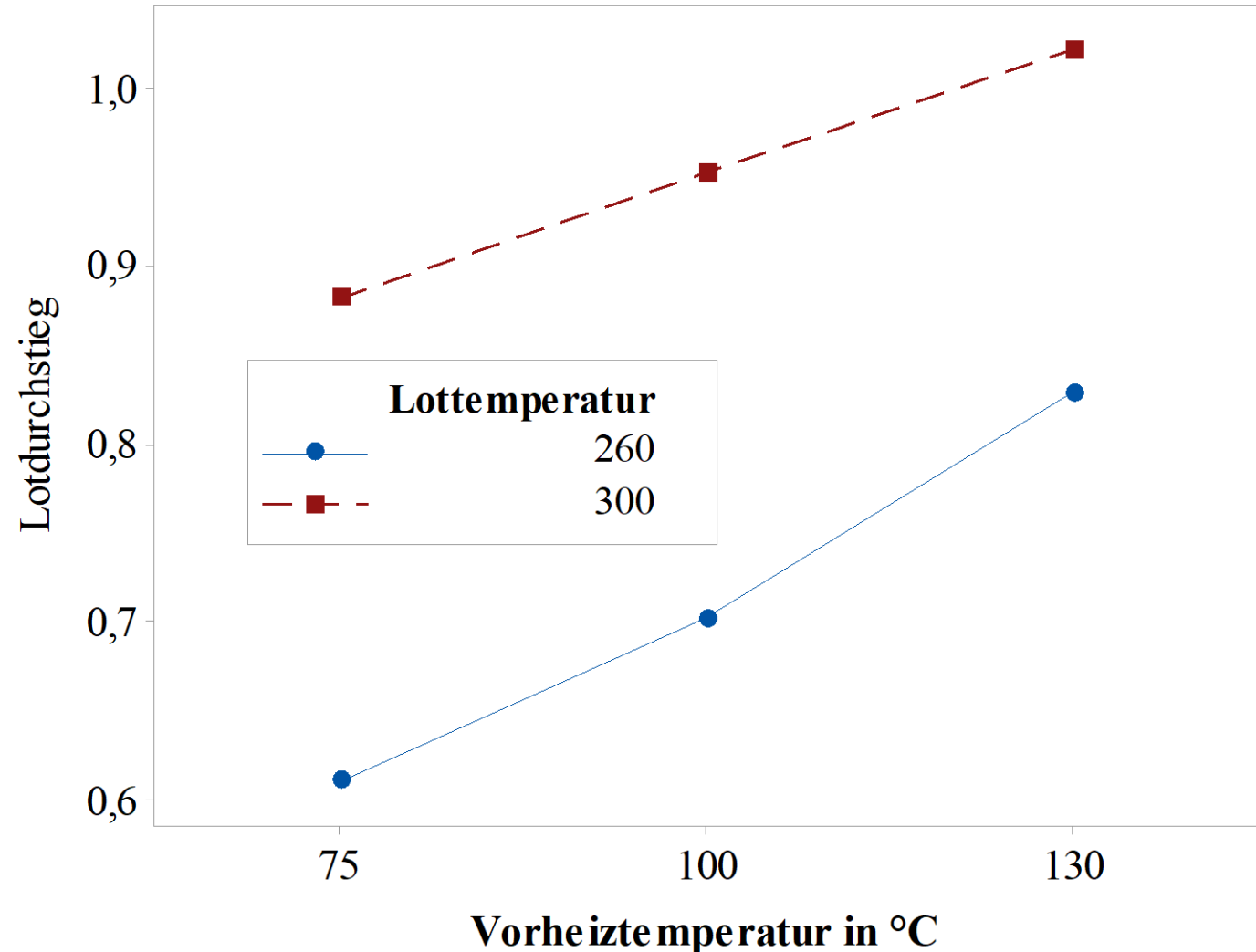
Für die Optimierung des Lötprozesses spielen sowohl Prozess als auch Designparameter eine Rolle für die Temperaturentwicklung in der Lötstelle.

Abschätzung der Einflüsse von

- Lottemperatur
- Vorheiztemperatur

Im betrachteten Bereich hält sich das Lötergebnis linear zu Lottemperatur und Vorheiztemperatur.

Eine Wechselwirkung zwischen Lottemperatur und Vorheiztemperatur ist nicht zu erwarten.



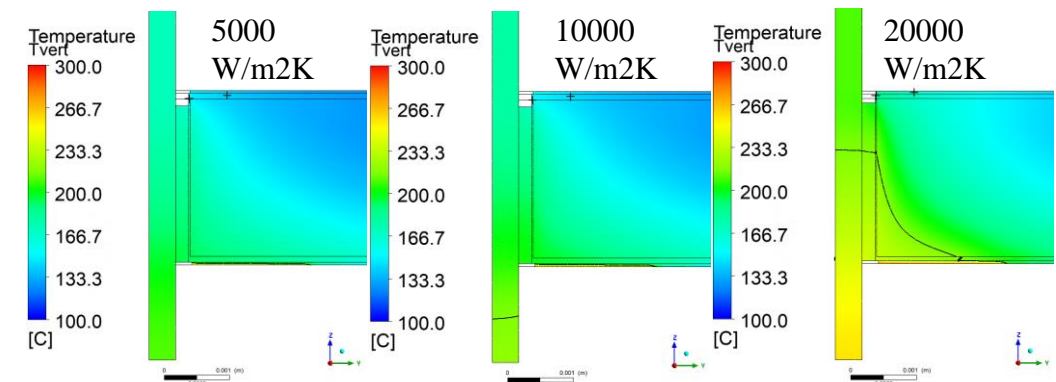
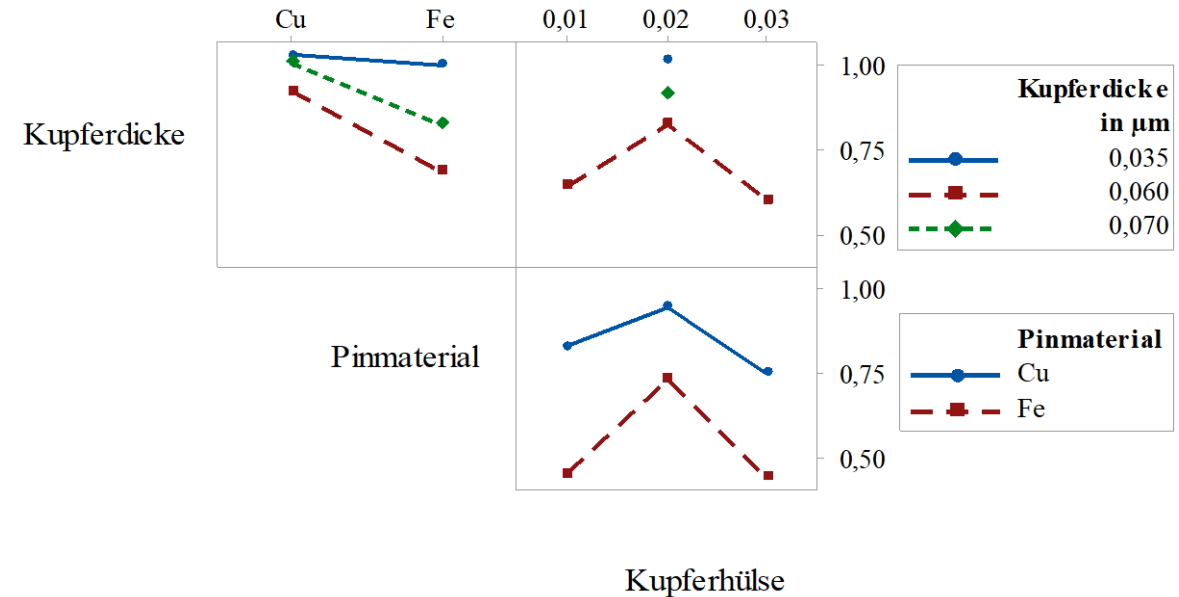
Für die Optimierung des Lötprozesses spielen sowohl Prozess als auch Designparameter eine Rolle für die Temperaturentwicklung in der Lötstelle.

Abschätzung der Einflüsse von

- Kupferlagendicke
- Pinmaterial
- Dicke der Kupferhülse
- Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient

Der Effekt der Stegbreite gegenüber der Isolationsbreite ist erwartungsgemäß gegenläufig.

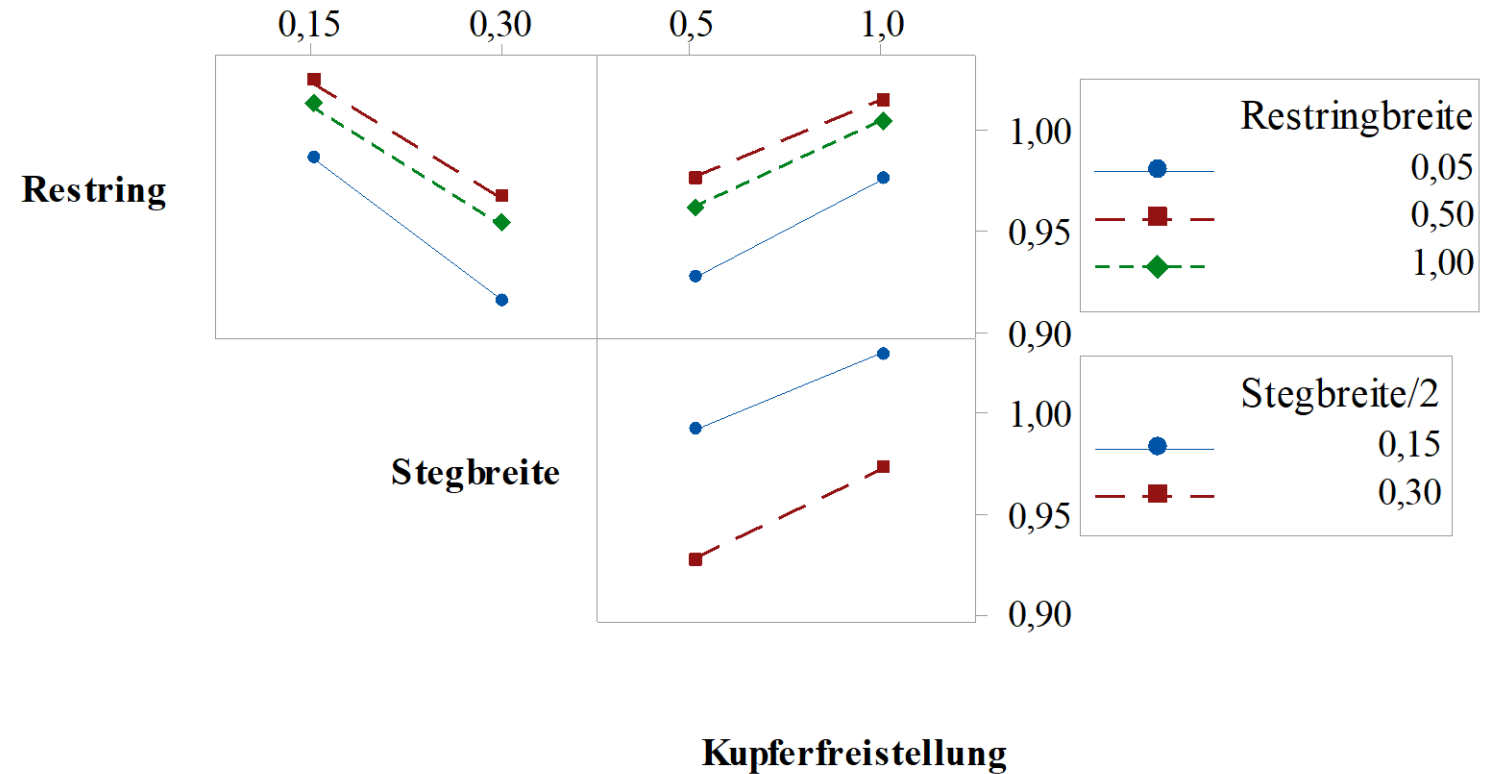
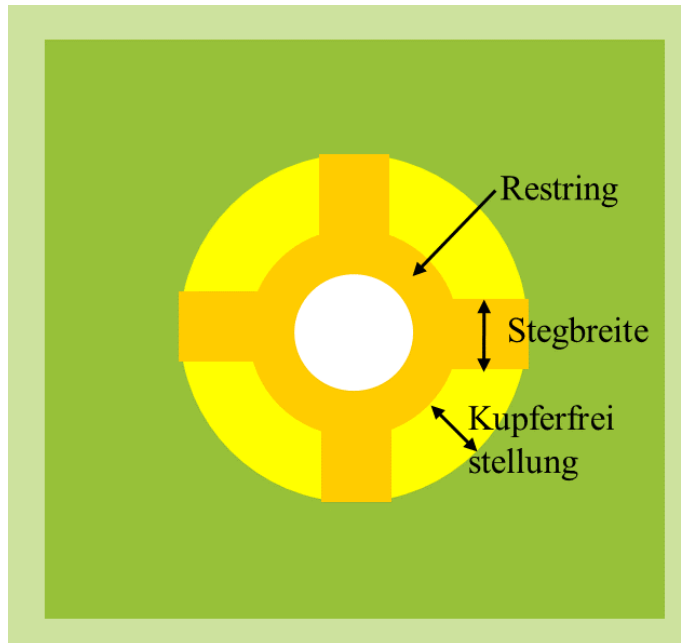
Der Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf das Simulationsergebnis ist erheblich und ist im weiteren zu untersuchen.



Wärmefallen sind eine gute Möglichkeit ungewünschte Wärmedissipation horizontal zum Durchstieg einzudämmen.

Abschätzung der Einflüsse von

- Restring
- Stegbreite
- Isolationsbreite

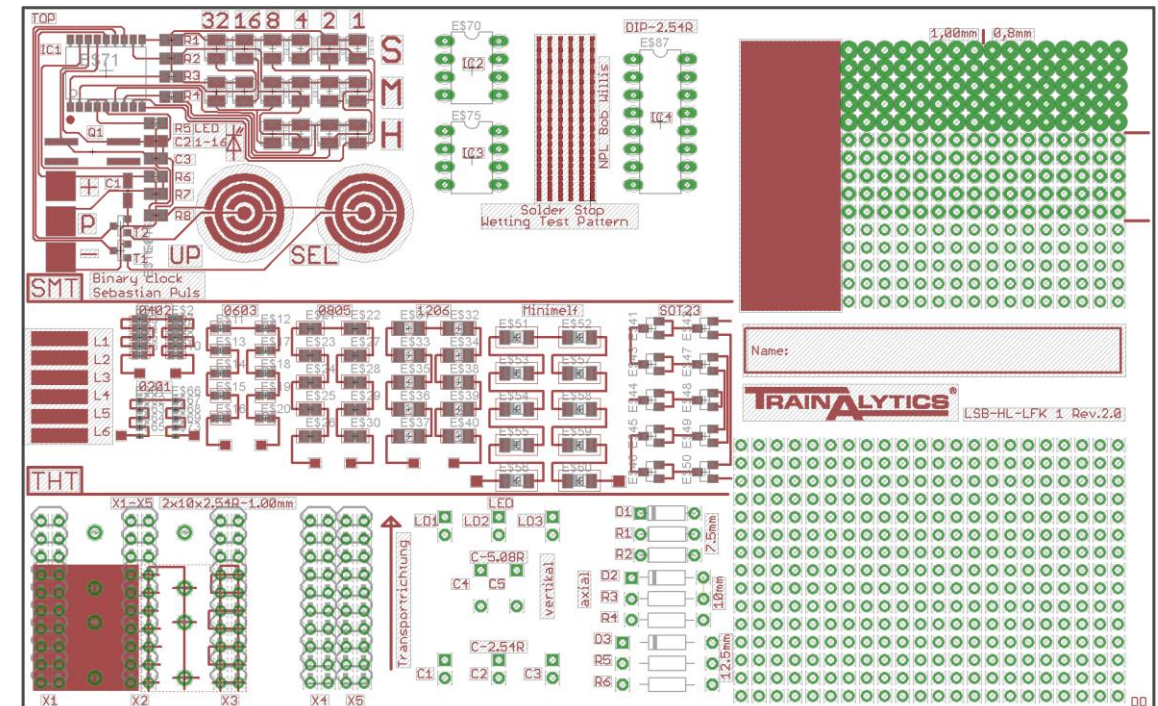
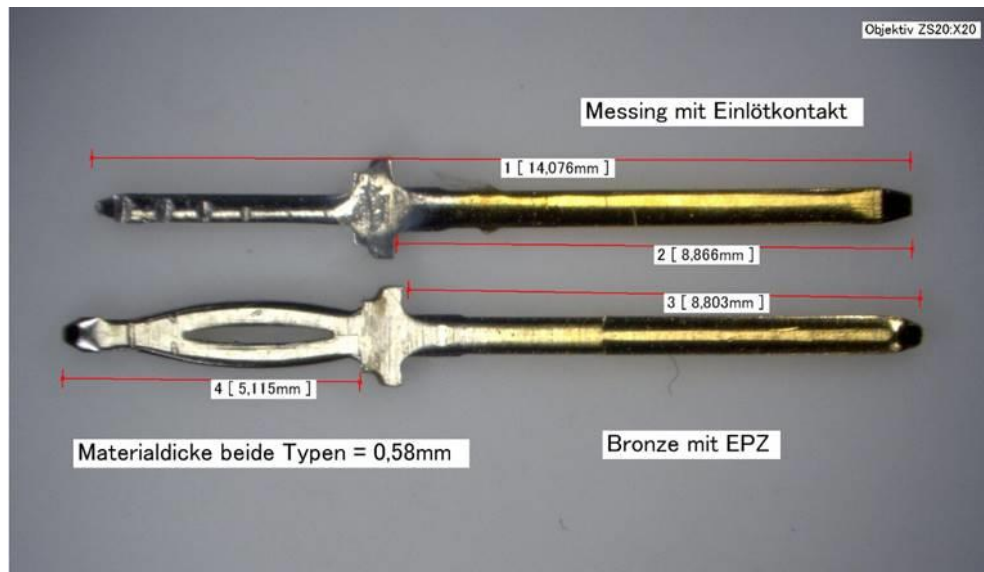
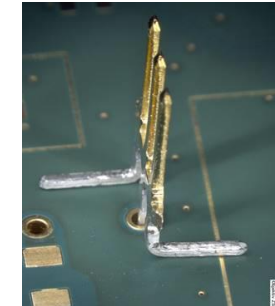
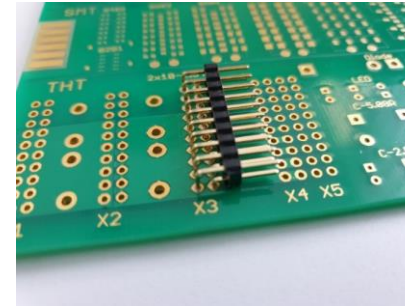


Der Effekt der Stegbreite gegenüber der Isolationsbreite ist erwartungsgemäß gegenläufig.

Im ersten Schritt werden grundsätzliche Einflüsse abgeschätzt um anschließend genauere Untersuchungen mit einem speziellen Board durchzuführen.

Die Versuche umfassen folgende Parameter

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1. Prozessstreuung | 5. Kupferlagenanschluss |
| 2. Prozessparametereinfluss | 6. Durchstiegshistorie |
| 3. Pinmaterial | 7. Pumpleistung |
| 4. Pinoberfläche | |



Unter gleich bleibenden Prozessbedingungen ist von einem stabilen Prozessergebnis auszugehen.

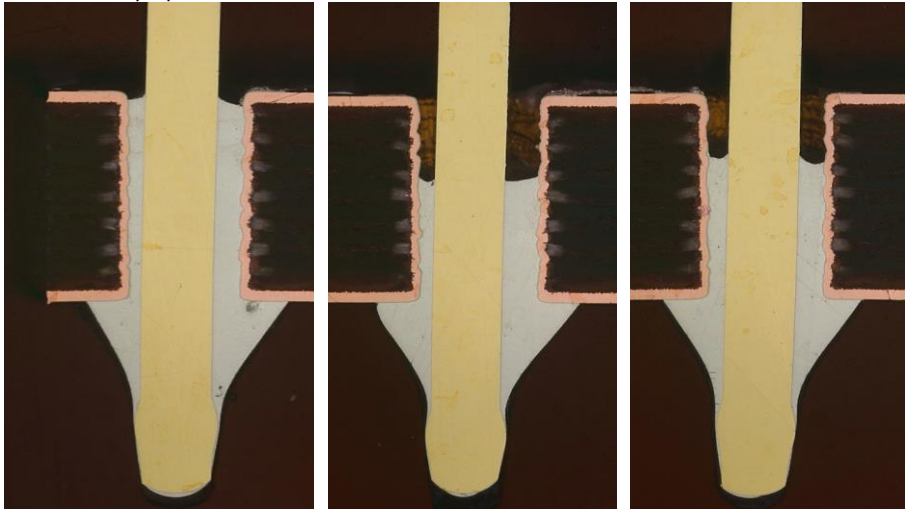
B1



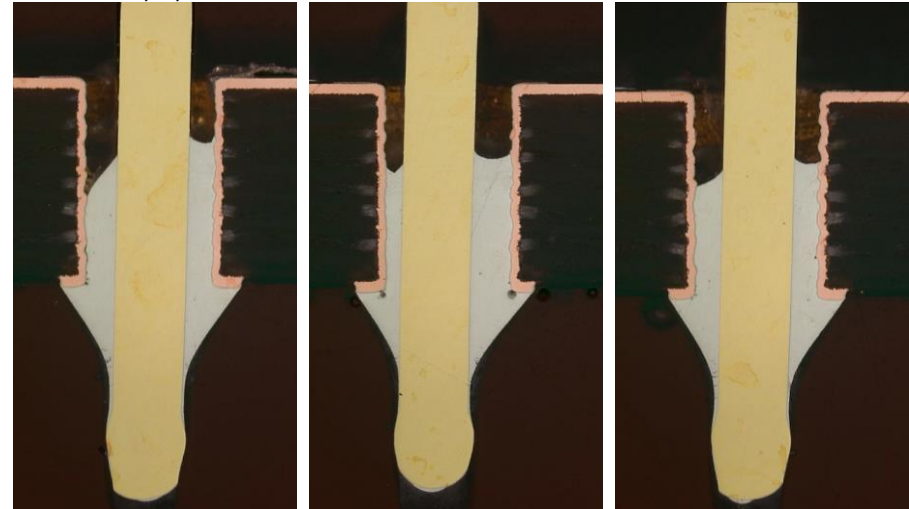
Ergebnis

- Eingrenzung der Prozessstreuung bei gleichen Bedingungen liegt im Bereich 5-10%
- Thermische Massen wie der Lötrahmen kann das Ergebnis auf am Rand liegende Lötstellen wesentlich beeinflussen

B8 – x1,2,3



B8 – x4,5,6



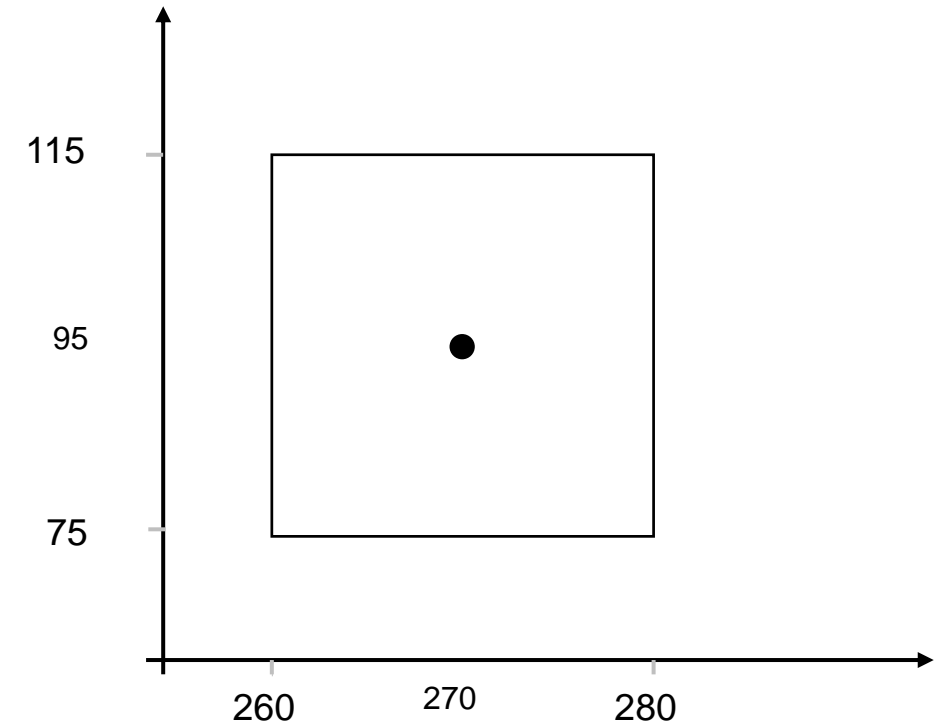
Die Lötversuche bestätigen den erwarteten Einfluss der Lottemperatur und Vorheiztemperatur.

Versuchsplan

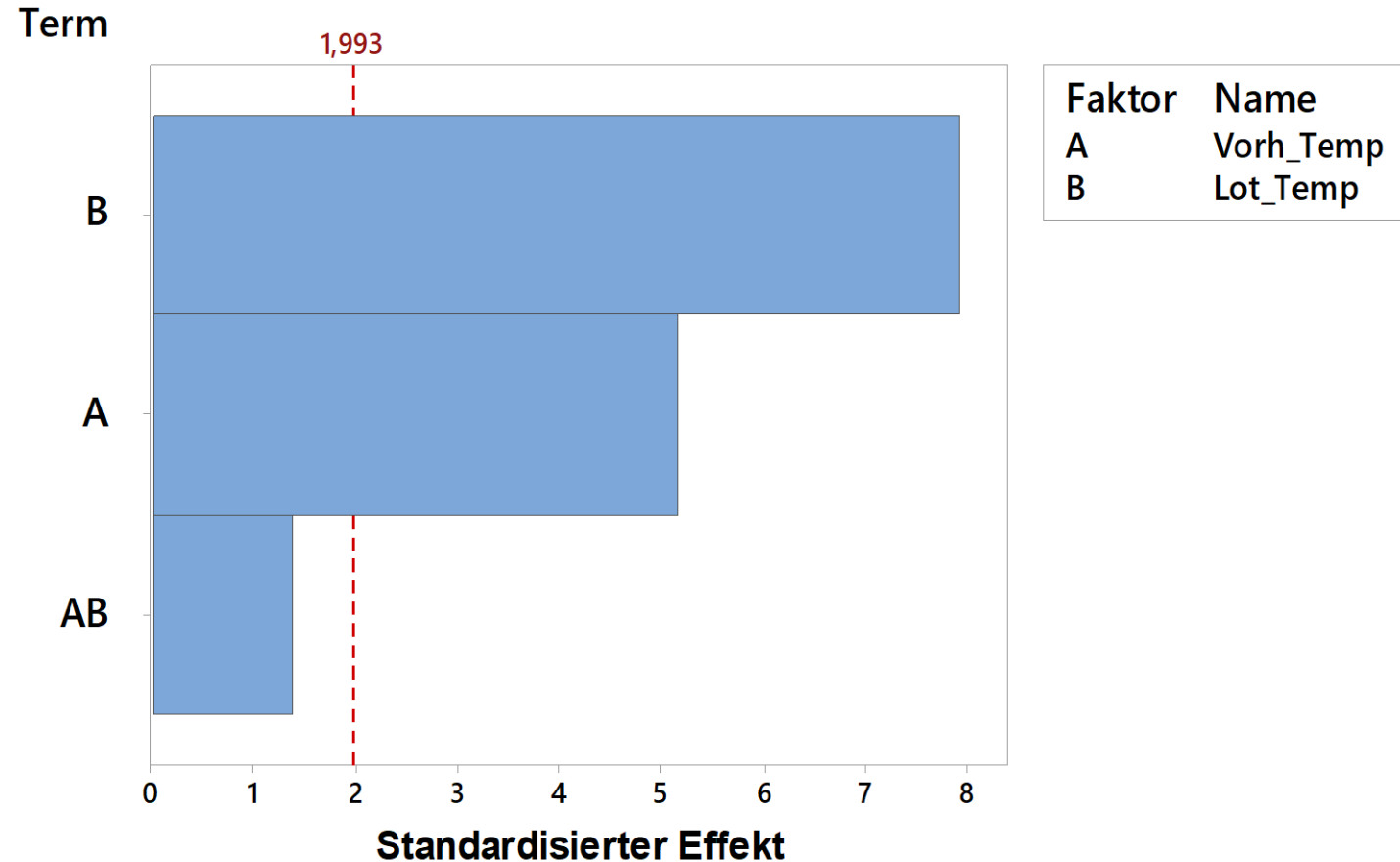
- Vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentralpunkt
- Lottemperatur 260, 270, 280 °C
- Vorheiztemperatur 75, 95, 115 °C
- 4 verschiedene Lötstellen, 35 µm Kupfer
- 4 Replikationen
- Lötzeit 2 s
- Lotlegierung: SAC305
- Flussmittel: Emil Otto EO-B-002B/X (ORL0)

Ziel

- Bestimmung des Einflusses der Lötstelle
- Bestimmung der Einflussstärke der Prozessparameter



Die Lötversuche bestätigen den erwarteten Einfluss der Lottemperatur und Vorheiztemperatur.



Versuchsplan

- Vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentralpunkt
- Lottemperatur 260, 270, 280 °C
- Vorheiztemperatur 75, 95, 115 °C
- 4 verschiedene Lötstellen

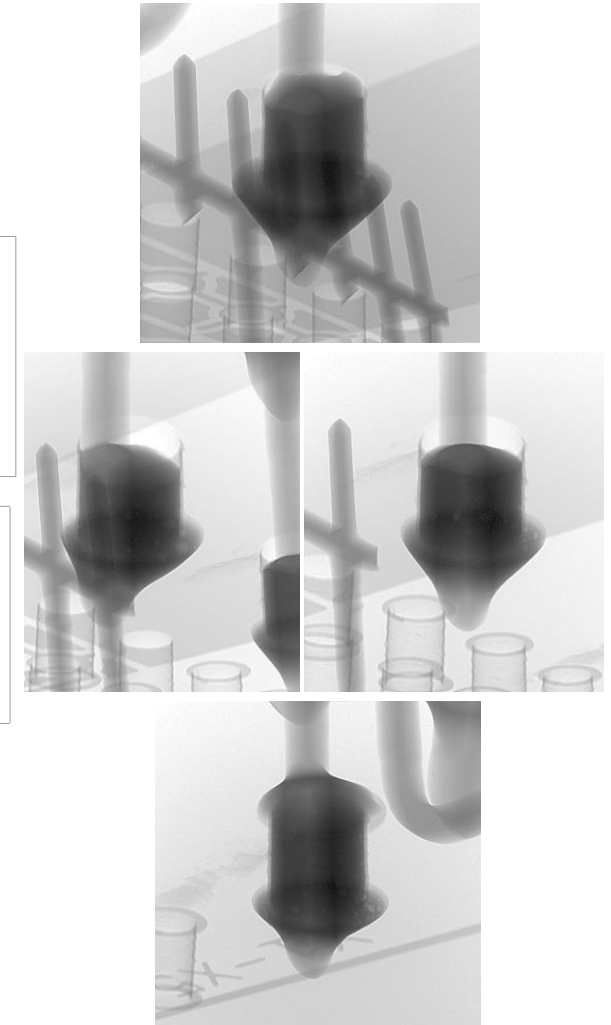
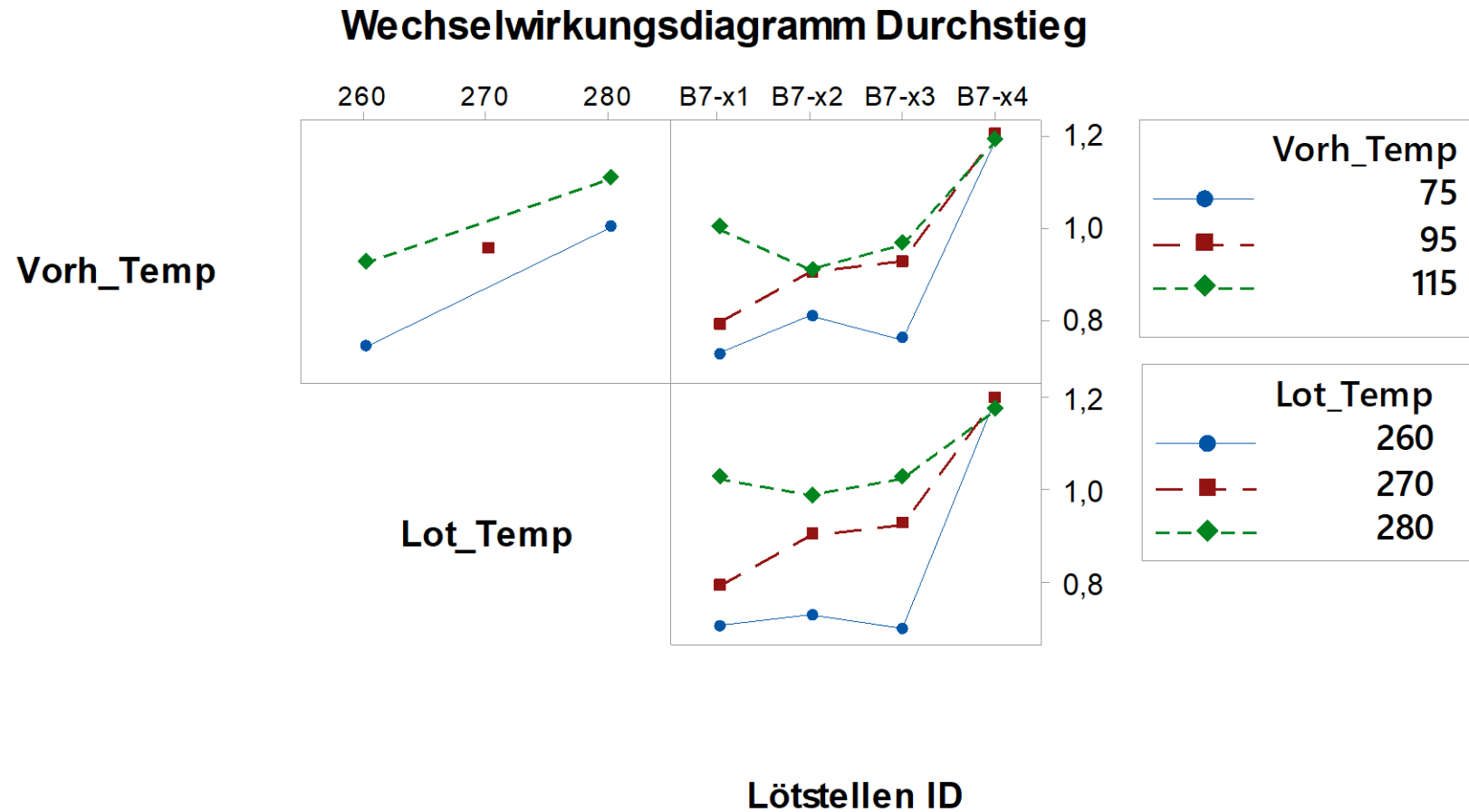
Ergebnis

- Lottemperatur und Vorheiztemperatur mit stärkstem Effekt auf das Lötergebnis
- Wechselwirkung zw. Lottemp. und Vorheiztemp. vernachlässigbar.

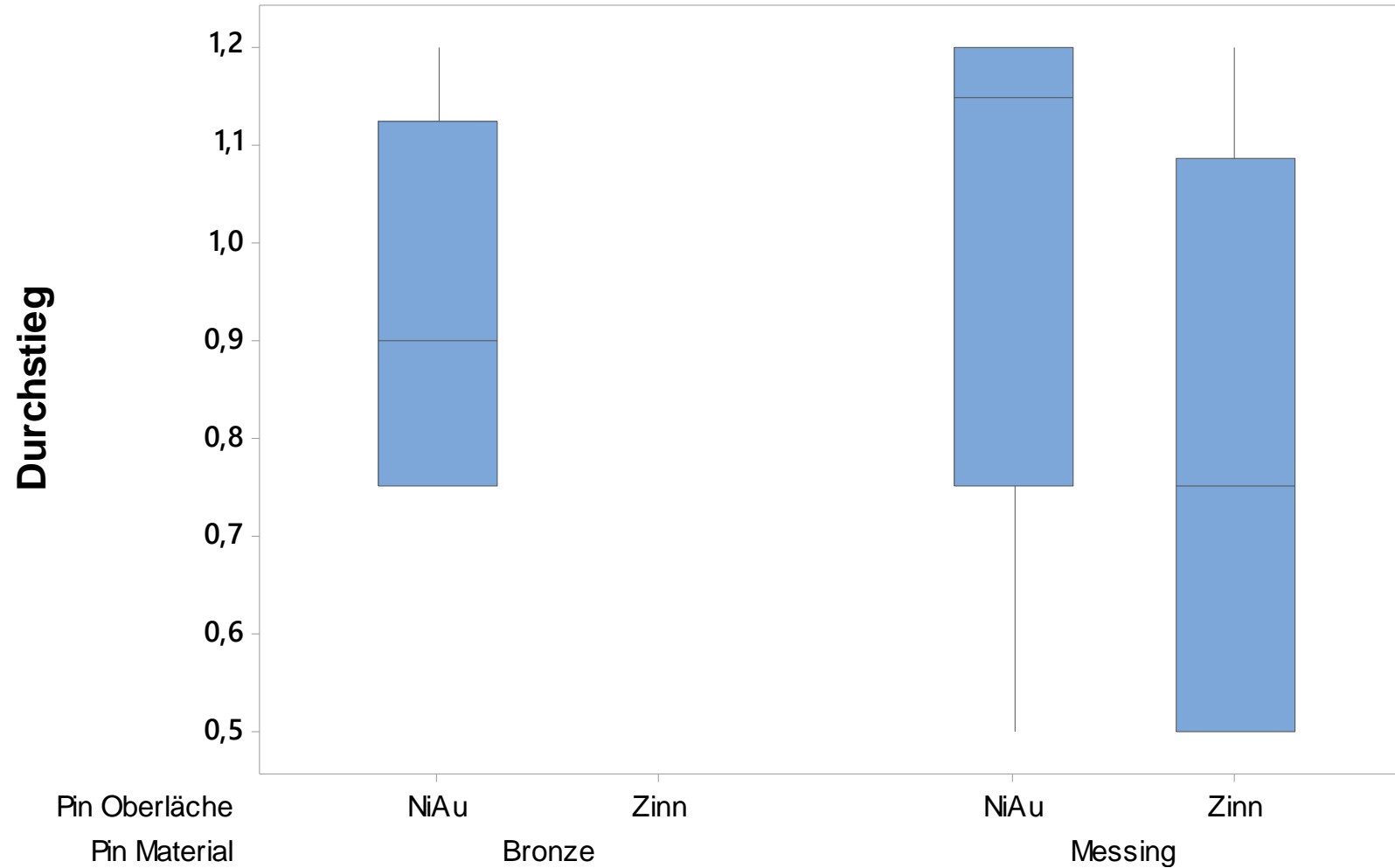
Ausblick

- Bestimmung der Prozessstreuung
- Bestimmung des Einflusses der Lötstelle

Lötversuche zeigen die starke Abhängigkeit des Durchstiegs vom Lötstellendesign.



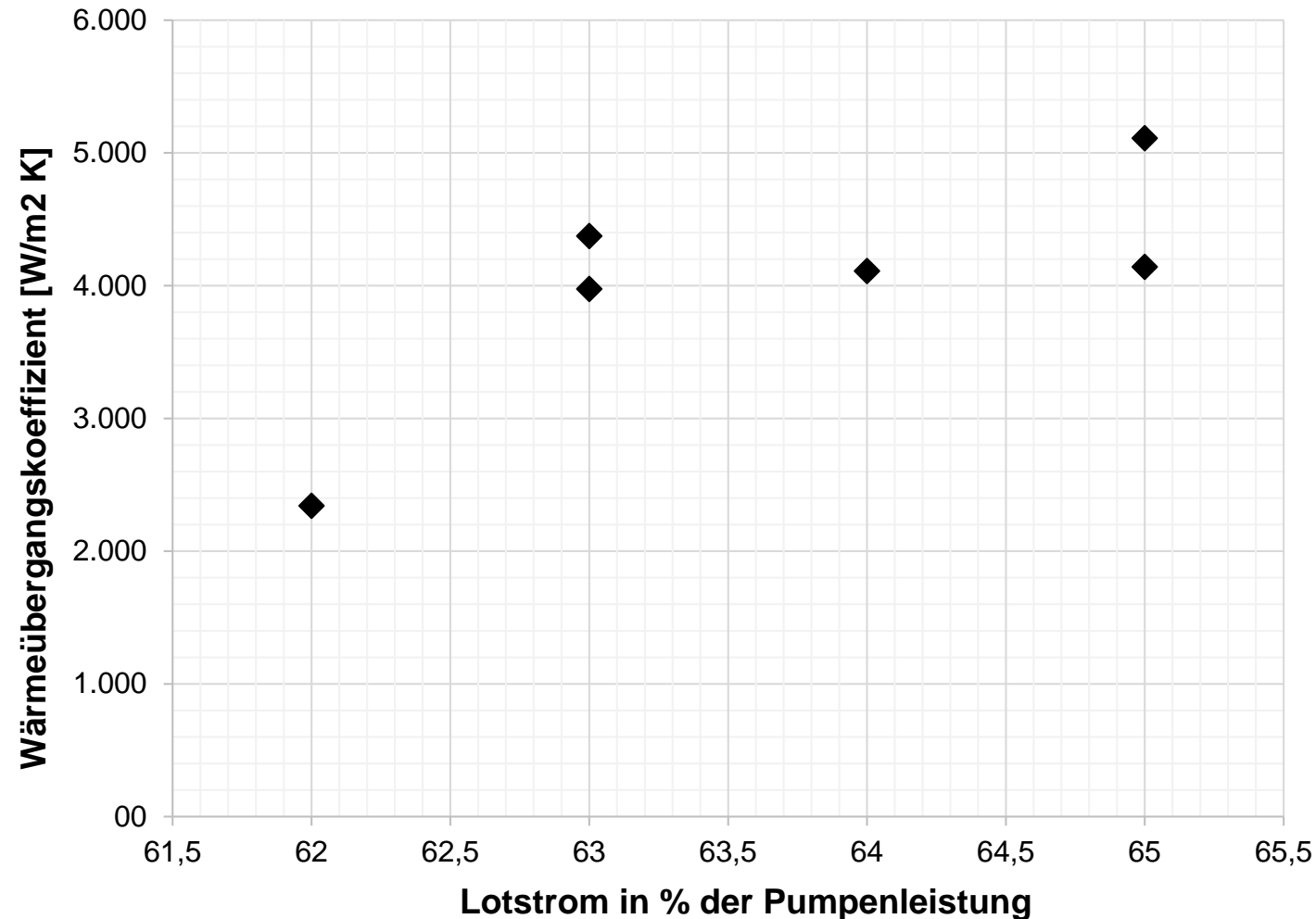
Die Wärmeleitfähigkeiten der Baueilanschlussspins tragen zur Wärmedissipation in Richtung des Bauteils als Wärmesenke.



Ergebnis

- Sowohl die Pinoberfläche als auch Pinmaterial beeinflussen das Ergebnis
- Zinn lässt sich schlechter löten als NiAu
- Die höhere Wärmeleitfähigkeit von Messing $\sim 100 \text{ W/mK}$ (Bronze ca. 60 W/mK) macht sich im Lötergebnis bemerkbar

Die Abhängigkeit des Lötresultates vom Lotstrom und folglich dem Energieeintrag lässt sich erahnen aber auf Basis der bisherigen Daten nicht zuverlässig nachweisen.



Konvektiver Wärmeübergang

■ Einheit: W/m²K

■ $\alpha = f_x(Nu, Re, Pr)$

■ $Nu = C Re_L^m Pr^n$

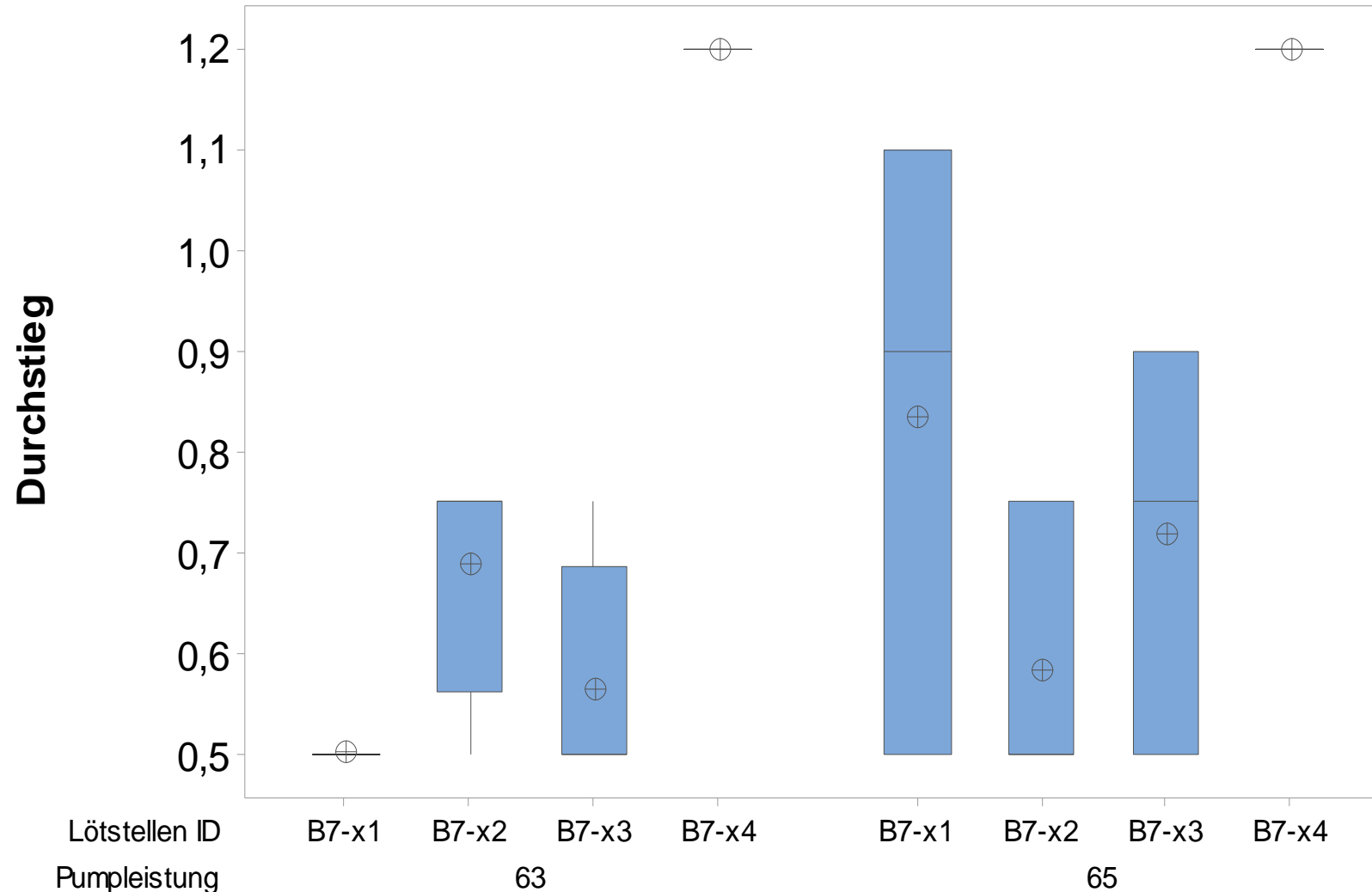
Ergebnis

- Physikalisch ist der konvektive Wärmeübergang vom Massestrom des Fluids abhängig
- Die Messung bestätigt Existenz und Messbarkeit des Effekts

Ausblick

- Validierung des Messsystems
- Bestimmung der Prozessstreuung
- Bestimmung der Effektstärke auf den Selektivwellenlötprozess

Die Abhängigkeit des Lötresultates vom Lotmassstrom und folglich dem Energieeintrag lässt sich erahnen aber auf Basis der bisherigen Daten nicht zuverlässig nachweisen.



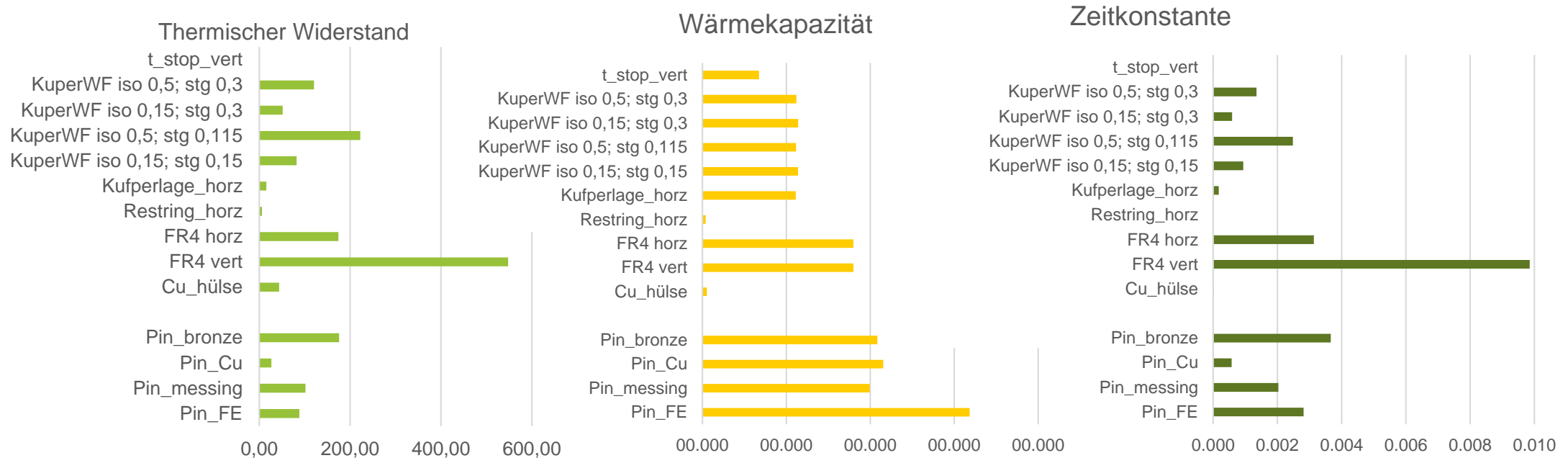
Ergebnis

- Statistisch ist der Effekt auf Basis der vorliegenden Versuche als nicht signifikant einzustufen
- Die größere Streuung der Ergebnisse weist jedoch auf eine Veränderung hin

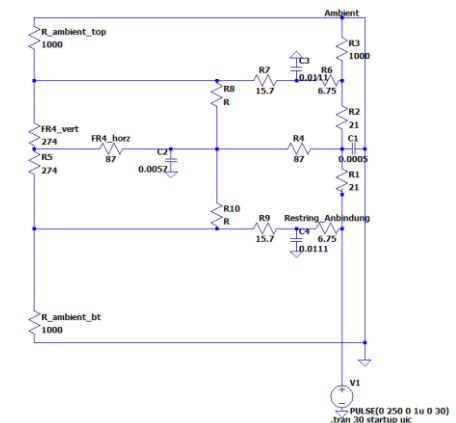
Ausblick

- Untersuchung in größerer Versuchsreihe notwendig
- Abgrenzung des Effekts auf Basis des hydrodynamischen Drucks

Die starke Abhängigkeit des Lötergebnisses vom Lötstellendesign lässt auf eine Beschreibbarkeit der Lötstelle schließen.



Die Abbildung des transienten Verhaltens einer Lötstelle erfordert die Berücksichtigung des thermischen Widerstands und der Wärmekapazität.



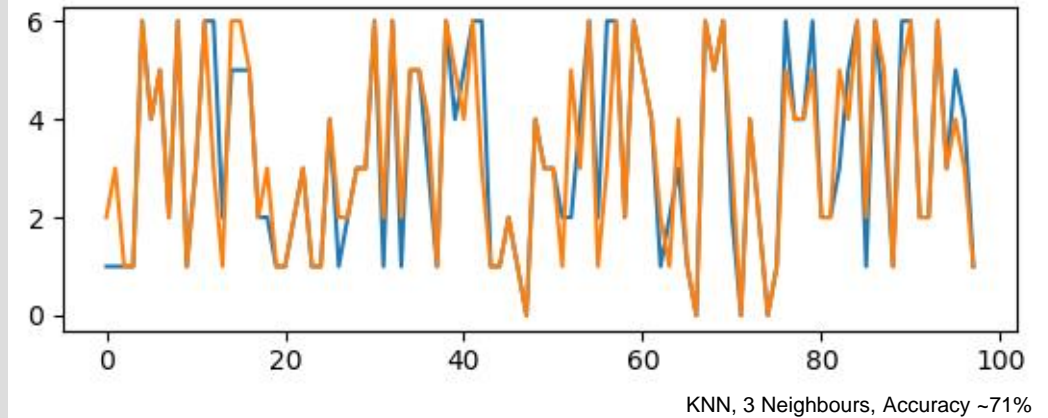
Die Vorhersage der Lötqualität beim Selektivwellenlöten kann den Fertigungsprozess erheblich erleichtern und bei der Suche nach Prozessparametern Zeit und Geld sparen.

Motivation

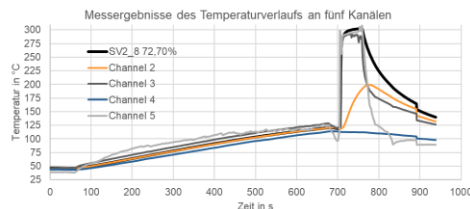
- Die Vorhersage des Lotanstiegs in der THT-Kapillare ist die relevante Qualitätsmaß für Lötverbindungen beim THT-Löten nach IPC A610.
- Reduktion von Ausschuss in der Entwicklungsphase

Approach

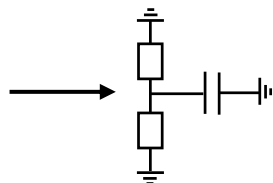
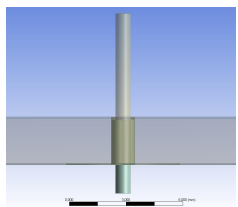
- Messung der physikalischen Prozesseigenschaften
- Maschinelle Lernverfahren auf Basis von physikalischen Randbedingungen



Heat input

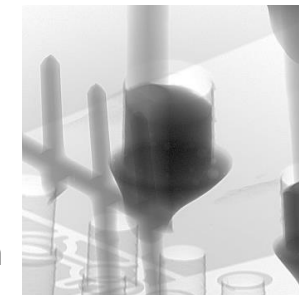


Heat dissipation



Vergleich verschiedener Vorhersagemodelle

- Analytische Modelle
- Numerische Modelle
- Machine Learning Modelle auf Basis von gemessenen Prozessparametern



- Beurteilung der thermischen Lötbedingungen
- Vorhersage der Steighöhe
- Vorhersage der Herstellbarkeit
- Empfehlung geeigneter Lötparameter

A close-up photograph of a blue microchip with intricate gold-colored circuit patterns, resting on a dark blue printed circuit board (PCB) with visible gold pads.

FAPS

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

**Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



DANKE