

Abschlussbericht Verbundprojekt „ROBIN“

Vorhaben-Nr.: 02NUK068A

Vorhabentitel:

Verbundprojekt ROBIN: Entwicklung und Einsatz robuster elektrischer Mess- und Bildgebungsverfahren zur hochaufgelösten Erfassung von thermohydraulischen Parametern in Großversuchsanlagen der nuklearen Sicherheitsforschung, Teilprojekt A

Projektpartner:

Technische Universität Dresden (TUD), 01062 Dresden

Prof. Dr. Uwe Hampel, Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik (**TUD-PBM**), Verbundkoordinator

Prof. Dr. Antonio Hurtado, Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik (**TUD-WKET**)

Jun.-Prof. Dr. Panchenko, Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik (**TUD-IAVT**)

Berichtsdatum: 30.06.2025

Das dem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit dem Förderkennzeichen 02NUK068A gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzfassung.....	4
II. Sachbericht.....	6
Arbeitspaket 1: Sensorische Komponenten für hohe Temperaturen und Drücke	6
TP 1.1: Fügen keramischer und metallischer Werkstoffe für die Sensorintegration in Komponenten von Thermohydraulikversuchsständen (TUD-WKET, TUD-PBM).....	6
1.1.1 Fügen keramischer und metallischer Werkstoffe für die Sensorintegration	7
1.1.2 Entwicklung von elektrischen Durchführungen für Rohrwandungen.....	16
TP 1.2: Miniaturisierte Wandler auf Keramiksubstraten (TUD-IAVT, TUD-PBM)	25
1.2.1 Materialcharakterisierung für Sensoren in Wasser-/Wasserdampfumgebung bis 300 °C	26
1.2.2 Temperatursensoren für TAGS	26
1.2.3 Wandbündige Sensoren für die Messung von Kondensationsfilmdicken an Rohrwandungen	30
TP 1.3: Temperaturfeste Elektronik für Versuchsanlagen (TUD-IAVT, TUD-PBM).....	34
1.3.1 Spezifikation der Hochtemperaturelektronik.....	35
1.3.2 Erarbeitung eines Aufbaukonzepts für temperaturfeste Elektronik.....	37
1.3.3 Vorbereitung des Layouts und Auswahl der Bauelemente	39
1.3.4 Herstellung der Substrate für Funktionsmuster	40
1.3.5 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für temperaturfeste Elektronik.....	42
1.3.6 Charakterisierung der AVT (PFA und zerstörungsfreie Prüfung).....	43
1.3.7 Auswertung der Ergebnisse und Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen	44
Arbeitspaket 2: Entwicklung und Qualifizierung elektrischer Mess- und Bildgebungstechnik für Thermohydraulikversuchsanlagen.....	45
TP 2.1: Elektrische Impedanztomographie (FAU, FRAM)	45
TP 2.2: Axiale Bildgebung in Rohren (TUD-WKET, FAU, TUD-PBM).....	46
TP 2.3: TAGS zur orts- und zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung für Dampf/Wasser- Zweiphasenströmungen (TUD-PBM, BECKER)	48
2.3.1 Grundkonzept für zweiphasig einsetzbares Thermisches Anemometer	50
2.3.2 Theoretische Analysen, Wärmebilanz der TTA.....	52
2.3.3 Simulationsergebnisse.....	56

2.3.4 Experimentelle Arbeiten	60
Arbeitspaket 3: Einsatz der neuen Mess- und Bildgebungstechnik in thermohydraulischen Studien	63
TP 3.1: Experimentelle Studien mit EIT-Sensoren (FRAM, FAU)	63
TP 3.2: Experimentelle Studien zu Zweiphaseninstabilitäten im Steigrohr des Gebäudekondensators an GENEVA (TUD-WKET, TUD-PBM).....	64
TP 3.3: Experimentelle Studien zur Hochdruck-Dampfkondensation in liegenden Rohren an TOPFLOW (TUD-PBM, ETHZ)	65
TP 3.4: Experimentelle Studien zur Pool-Hydrodynamik an THAI (BECKER, TUD-PBM, TUD-IAVT)	65
III. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	67
IV. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	67
V. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	67
VI. Veröffentlichungen der Ergebnisse	67
VII. Literatur	70

I. Kurzfassung

Thermohydraulische Großversuchsanlagen sind nach wie vor ein wichtiger Bestandteil der internationalen nuklearen Sicherheitsforschung. Sie dienen dem Test von Komponenten und Systemen des nuklearen Kühlkreislaufs und des Sicherheitsbehälters, sowie von Notfallkomponenten. Mit ihnen werden Störfallszenarien realitätsnah simuliert und in generische Experimenten wertvolle Daten für die Validierung von Rechencodes generiert, mit denen Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. Defizite heutiger Rechencodes liegen insbesondere in der korrekten Abbildung von Strömungs- und Wärmeübertragungsphänomenen in komplexen dreidimensionalen Komponenten bzw. für Zweiphasenströmungen mit intensivem Phasenkontakt. Dies betrifft vor allem transiente Strömungssituationen in Wärmeübertragern (Dampferzeuger, Notkondensationseinrichtungen) und an Brennelementen mit Kondensation und Verdampfung und dem darüber stattfindenden Wärmetransport. Die Behebung solcher Defizite und damit die Verringerung von Unsicherheiten und Konservativitäten gelingt nur durch Experimente mit dedizierter zeitlich und räumlich hochauflösender Messtechnik, die es ermöglicht, Daten mit sogenannter CFD-Qualität zu erheben. Die für Großversuchsanlagen typische Instrumentierung, in der Regel Messstellen für Temperatur, Druck, Füllstand und Durchfluss, ist für diesen Zweck vielfach nicht ausreichend. Messgrößen, wie Dampfgehalt, Temperatur, Fluidgeschwindigkeit, Leitfähigkeit bzw. Konzentrationen von Bor, sind immer zeitabhängige Feldgrößen mit hoher räumlicher Variabilität. Lokale Sonden liefern hingegen nur Daten des einen Messortes. Grundsätzlich fehlt es immer noch an robusten, hochauflösenden, schnellen und vorzugsweise bildgebenden Messverfahren, um lokale thermofluid-dynamische Phänomene unter realitätsnahen Druck- und Temperaturbedingungen quantitativ zu erfassen. Solche Messtechniken existieren heute vorrangig bei moderaten Betriebsbedingungen, etwa Luft-Wasser-Betrieb bei Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur. Heiß- und druckfeste Instrumentierung, wie zum Beispiel der Einsatz von Gittersensoren und Röntgentomographie an TOPFLOW, ist dagegen immer noch sehr selten.

Im Rahmen des Projektes ROBIN wurden daher neue robuste Sensoren und bildgebende Systeme entwickelt bzw. weiterentwickelt, um Großversuchsanlagen der Reaktorsicherheitsforschung so zu instrumentieren, dass thermohydraulische Daten in CFD-Qualität erfasst werden können. Der Fokus des Vorhabens lag auf neuen Ansätzen, die tatsächliche „Instrumentierungslücken“ betreffen, die im Rahmen einer kritischen Analyse des Standes der Technik identifiziert wurden.

Das Vorhaben war in drei Arbeitspakete untergliedert. Jeder Partner bearbeitete innerhalb der vereinbarten Arbeitspakete individuelle Teilprojekte. Deren Ergebnisse sowie die Zusammenarbeit der Partner werden im vorliegenden Bericht detailliert erläutert.

Arbeitspaket 1 zielte auf eine **grundlegende Weiterentwicklung der technologischen Basis** für robuste Sensorik für Thermohydraulik-Großversuchsanlagen. Dafür wurden im Einzelnen die folgenden Unterpunkte bearbeitet:

1. Werkstoffauswahl, Entwicklung und Qualifizierung von Metall/Keramik-Fügetechnologien für eine druckfeste, dampfbeständige und isolierende Elektrodenanordnung bzw. Leitungsdurchführung für elektrische Messverfahren wie Naddelsoden, Gittersensoren oder Oberflächensensoren (**WKET, IAVT, PBM**).
2. Entwicklung wasserdampfbeständiger miniaturisierter Wandler (Platinwiderstandselemente) für Thermoanemometrie-Gittersensoren (**IAVT, PBM**).
3. Entwicklung einer temperaturfesten Analog-Elektronik (analoges Frontend) für den Betrieb von Gittersensormesstechnik in großskaligen thermohydraulischen Versuchsanlagen (**IAVT, PBM**).

In **Arbeitspaket 2** wurden **neuartige elektrische Mess- und Bildgebungsverfahren** für den Einsatz in Thermohydraulik-Großversuchsanlagen entwickelt bzw. qualifiziert:

1. Elektrische Impedanztomographie: (**FAU**) *nicht Teil dieses Berichts*.
2. Axiale Bildgebung in Rohren: Es wurden axiale Sensoren zur Visualisierung und Analyse sich räumlich ändernder Strömungsformen in Rohren entwickelt. Dabei verfolgte **FAU** Ansätze der elektrischen Impedanztomographie (EIT), während sich **PBM** auf axiale Gittersensorentwicklung konzentrierte.
3. TAGS: Das bisher ausschließlich für Gasphasengeschwindigkeitsmessung qualifizierte Messprinzip der orts aufgelösten thermischen Anemometrie (TAGS-Sensor) wurde durch den Einsatz der thermischen Transienten Methode (TTA) für Wasser/Dampf-Zweiphasenströmungen qualifiziert (**PBM**).

In **Arbeitspaket 3** sollten die neuen Sensor- und Messtechniken in **experimentellen Studien an Großversuchsanlagen der nuklearen Sicherheitsforschung** eingesetzt und deren Funktionalität und Mehrwert demonstriert werden. Ziel war es, zu demonstrieren, dass die Sensorfunktionalität auch unter typischen thermohydraulischen Einsatzbedingungen erhalten bleibt und die Messsysteme damit Daten unter realitätsnahen Bedingungen liefern können.

Bei der Konzeption des Vorhabens wurde darauf geachtet, dass die Experimente überwiegend im Rahmen laufender oder bereits genehmigter Vorhaben der nuklearen Sicherheitsforschung durchgeführt werden sollten, um zu vermeiden, neue großtechnische Versuche während der Projektlaufzeit errichten zu müssen. Leider standen die Versuchsanlagen (PKL, GENEVA und THAI) aus verschiedenen Gründen während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung.

II. Sachbericht

Arbeitspaket 1: Sensorische Komponenten für hohe Temperaturen und Drücke

TP 1.1: Fügen keramischer und metallischer Werkstoffe für die Sensorintegration in Komponenten von Thermohydraulikversuchsständen (TUD-WKET, TUD-PBM)

Beschreibung:

Es werden neue technologische Lösungen für die Integration elektrischer Sensoren in Strukturmaterialien von Versuchsanlagen auf Basis laserbasierter Fügeverfahren erarbeitet. Hintergrund ist der Bedarf, Elektrodenanordnungen für verteilte und bildgebende elektrische Sensoren druck- und temperaturfest in möglichst miniaturisierter Form in Wandstrukturen von Rohren, Behältern, Heizstäben etc. einzubringen. Dazu sollen keramische und metallische Werkstoffe mittels laserbasierter Fügeverfahren sicher verbunden werden. Das TP adressiert die Auswahl geeigneter keramischer und metallischer Materialien mit angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten, das Fügen sehr kleiner Elemente, wie Elektrode/Ferrule/Rohrwand für Elektrodensysteme sowie das direkte Aufspalten von Metall auf Keramik und Saphirglas zur Herstellung strukturierter Elektroden und elektrischer Leitungen. Alternativ sollen Techniken zur Anwendung kommen, bei denen durch Laserstrukturierung mit vorhandenen hochpräzisen Kurzpulslasern Sensoren in Substratoberflächen eingebettet bzw. Kontakte in Oberflächen fixiert werden.

Zur Bestimmung des Gasgehaltes, bzw. der Gasgehaltsverteilung und von Phasengeschwindigkeiten werden in thermohydraulischen Versuchsanlagen häufig Nadelsonden und Gittersensoren eingesetzt. Da es sich um direkt elektrisch messende Verfahren handelt, müssen die signalführenden Elektroden zum einen gegen die metallischen Gehäuse (zumeist Edelstahl) isoliert werden und zum anderen muss eine sichere Druckbarriere bei der Durchführung der Signale aus dem heißen Prozessraum an die Umgebung geschaffen werden. Letzteres ist auf Grund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung von Metallen und Isolierkeramiken und des Mangels an hochtemperaturfesten Polymeren oft nur außerhalb des heißen Bereiches (300...400 °C) möglich. In der Vergangenheit wurde das Problem oft dadurch gelöst, dass die beiden Anforderungen Isolation und Durchführung voneinander getrennt wurden. Im heißen Behälter- bzw. Rohrinne wurden hochtemperaturfeste Keramiken als Isolator eingesetzt. Dadurch werden einzelne Elektroden mittels keramischer Körper wie Röhren oder anderer Strukturen voneinander und gegen die Anlage elektrisch isoliert. Die Druckbarriere bildeten jedoch häufig Verschraubungen, z. B. Graphit-Stopfbuchsen mit Kunststoffisolation oder Vergussmassen außerhalb des heißen Bereiches bei etwa Umgebungstemperatur. Dieser Aufbau führt jedoch zu einer hohen Komplexität und hohen Kosten und verhindert die Miniaturisierung.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es daher, eine Funktionsintegration von einerseits druck- und temperaturfester Abdichtung und andererseits einer guten elektrischen Isolation von sensorischen Elektroden in einem einzigen Bauteil zu erreichen, um damit den Platzbedarf erheblich zu reduzieren, undefinierte Hohlräume zu vermeiden und die Entwicklungs- und Fertigungszeiten sensorischer Komponenten sowie die Kosten zu reduzieren. Hierzu ist eine Technologie erforderlich, welche eine dauerhaft druck- und temperaturfeste Verbindung metallischer Elektroden sowie keramischer Isolatoren ermöglicht und auch häufigen Lautwechseln standhält. Die hierfür durchgeführten Arbeiten bei TUD-WKET konzentrierten sich auf zwei Teilaufgaben:

1. Grundlagenuntersuchungen zur Verbindung von Keramik und Metall für den Einsatz in Sensoren und
2. Die Entwicklung von Signaldurchführungen in der Rohrwandung thermohydraulischer Anlagen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden beschrieben.

1.1.1 Fügen keramischer und metallischer Werkstoffe für die Sensorintegration

Stand der Technik

Traditionell werden Sensoren auf Basis von Metall-Keramik-Verbindungen, mit Metallisierungstechniken hergestellt, die mehrere Zwischenschichten erfordern. Diese Verfahren sind jedoch komplex, kostspielig und hauptsächlich für Anwendungen bei Umgebungs- oder niedrigen Temperaturen geeignet. Um den sich entwickelnden Anforderungen an Hochleistungssysteme gerecht zu werden, besteht ein dringender Bedarf an innovativen Verbindungstechniken, die haltbare Verbindungen für anspruchsvolle Umgebungen wie thermohydraulische Versuchsanlagen INKA (Framatome, Germany), ATLAS (KAERI, South Korea), TOPFLOW (HZDR, Germany), und SECA (TUD, Germany) schaffen können.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, zielen die Untersuchungen im Projekt ROBIN darauf ab, Sensoren zu entwickeln, die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen. Die Einsatzbedingungen solcher Systeme im Rahmen des Projektes ROBIN, z. B. an der TOPFLOW-Anlage (HZDR), der GENEVA-Anlage (TUD-WKET) oder der INKA-Anlage (FRAMATOME) ähneln sich und liegen bei 70...90 bar und etwa 300 °C. Die Einsatzbedingungen für die bei TUD-WKET neu zu entwickelnden Durchführungen wurden daher nach Absprache mit allen Projektpartnern zunächst auf 100 bar und 300 °C spezifiziert.

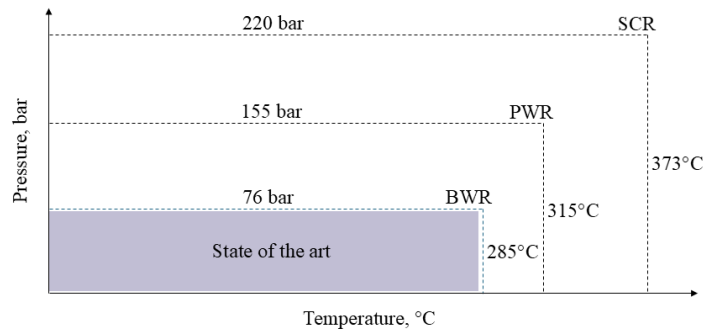


Abbildung 1: Druck/Temperaturbereiche von Kernreaktoren und grau hinterlegt Stand der Technik druck- und temperaturbeständiger thermohydraulischer Sensoren.

Pilotprojekte zum Laseraktivlöten (Laser active brazing, LAB) wurden seit den 1990er Jahren in Deutschland durchgeführt [1-5]. Es fehlen jedoch noch systematische Untersuchungen, die zu einem grundlegenden Verständnis des Prozesses führen. Das größte Problem bei der stoffschlüssigen Verbindung von Keramiken zu Metallen ist die Diskrepanz der Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) zwischen den Bond-Paaren, was zu thermischen Spannungen im Gigapascal-Bereich führen kann und die Verbindung zum Bruch bringt. Um dieses Problem zu verdeutlichen, zeigt das Ashby-Diagramm (Abbildung 2) die Beziehung zwischen CTE und dem Young'schen Modul (E) und stellt die verfügbaren Materialien dar. Unter diesen Materialien befinden sich hochreines Aluminiumoxid und austenitischer Edelstahl in der oberen rechten Ecke, was darauf hinweist, dass eine Verbindung dieser beiden Materialien aufgrund ihrer erheblichen Unterschiede in CTE und E äußerst schwierig sein könnte. Beide Materialien eignen sich für den Einsatz in thermohydraulischen Anlagen. Wenn das Löten von Aluminiumoxid zu 316Ti-Stahl erfolgreich praktiziert werden kann, könnten wahrscheinlich auch alle Materialkombinationen mit geringeren thermischen Spannungen gelötet werden.

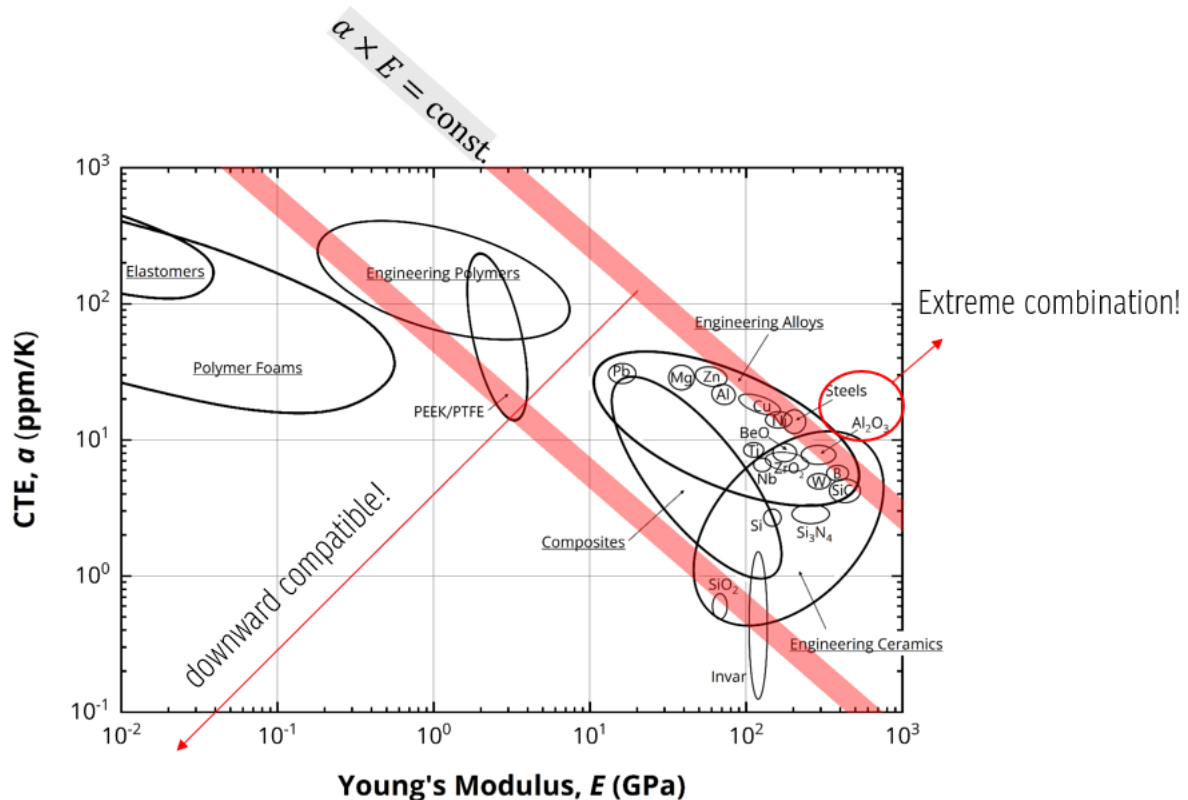


Abbildung 2: CTE–E Ashby-Diagramm.

Lösungsansätze

Für das Löten von Aluminiumoxid mit 316Ti-Stahl sollte ein laserbasierter Erwärmungs-/Abkühlprozess mit dem Einsatz von Aktivloten kombiniert werden, was im Weiteren als Laseraktivlöten (laser active brazing, LAB) bezeichnet wird. Der Einsatz von LAB ist vor allem durch hohe Effizienz und metallurgische Reinheit interessant. Um ein präzises LAB durchzuführen, waren mehrere Vorbetrachtungen erforderlich, die die Materialauswahl, das Design der Lötverbindung und die Parametrierung des Lötverfahrens umfassen, wie in Abbildung 3 gezeigt. Für die Materialauswahl wurde die Methode der mehrfachen Attribut-Entscheidungsfindung (MADM) eingesetzt. Für das Design der Lötverbindung wurden FEM-Rechnungen durchgeführt, wobei die Fügefläche der Al_2O_3 -Keramik mittels ns-gepulster Laserablation (PLA) strukturiert wurde [6]. Stationäres FEM kann die Größe der maximalen thermischen Spannung durch Optimierung der Geometrie und der Interface-/Oberflächenstrukturierung berechnen, womit im Ergebnis die Geometrie des Verbundes optimiert wird. Mit ns-PLA hingegen wird die zu fügende Oberfläche mit dem Ziel ablatiert, die Rauigkeit zu modifizieren, das Benetzungsverhalten der geschmolzenen Füllmaterialien zu kontrollieren und letztlich die Spannungskonzentration zu minimieren. Die Parameterstudie des LAB-Prozesses umfasst zeitabhängige FEM-Simulationen, laserbasierte Fügeversuche nach einer Taguchi-Experimentmatrix und systematische Materialcharakterisierungen.

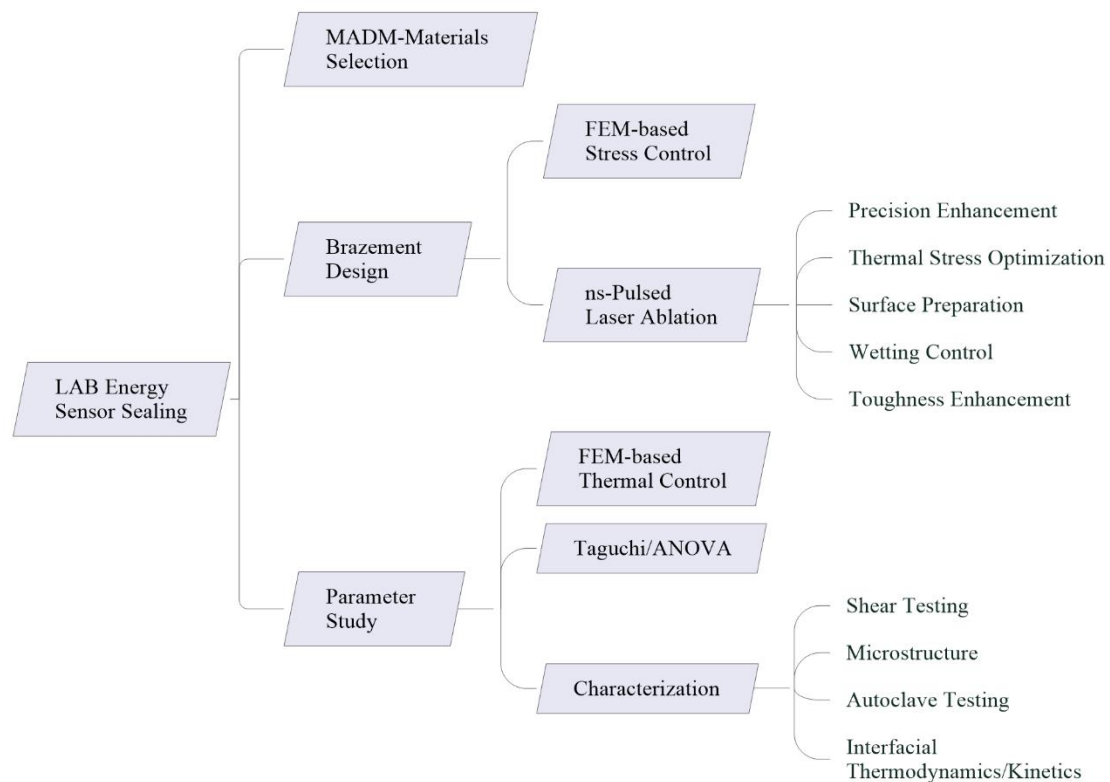


Abbildung 3: Lösungen für die LAB-Fertigung von Energiesensoren.

Materialauswahl und Optimierung des Verbunddesigns

Die Methode der Multiple Attribut-Entscheidungsfindung (MADM) ist ein verbreiteter Ansatz zur Materialauswahl, insbesondere bei der Auswahl von Materialien für komplexe technische Anwendungen. Diese Methode beinhaltet die Bewertung und den Vergleich verschiedener Materialien, wie in Tabelle 1 gezeigt, anhand mehrerer Kriterien oder Attribute, wie Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Wasserstoffbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit usw. MADM ist besonders nützlich, wenn der Entscheidungsprozess die Abwägung von widersprüchlichen Faktoren erfordert und es keine klare beste Wahl gibt.

Bei der Materialauswahl beginnt MADM typischerweise mit der Identifizierung der relevanten Attribute für die spezifische Anwendung. Im Fall des Lötens könnten beispielsweise Faktoren wie Wärmeleitfähigkeit, Schmelzpunkt und Korrosionsbeständigkeit entscheidend sein. Sobald diese Attribute definiert sind, werden verschiedene Materialien gemäß ihrer Leistung in jedem Kriterium bewertet. Jedem Attribut wird ein Gewicht basierend auf seiner relativen Bedeutung zugewiesen, und die Materialien werden anhand ihrer gewichteten Punktzahlen rangiert. Der MADM-Ansatz ermöglicht den Entscheidern, Kompromisse zwischen verschiedenen Eigenschaften zu berücksichtigen und das am besten geeignete Material auszuwählen. Er hilft Subjektivität zu minimieren, was zu objektiveren und transparenteren Entscheidungen bei der Materialauswahl führt. Für die Materialauswahl wurden die Gruppen C (mögliche keramische Fügepartner), M (mögliche metallische Fügepartner) und B (mögliche Lotmaterialien) definiert.

Tabelle 1: Materialauswahl für die MADM-Bewertung

Gruppe: Keramik			Gruppe: Metall		Gruppe: Lot	
C1	ZrO ₂ (98%, stab.)	1.9% HfO ₂	M1	304	B1	CB2
C2	Yb ₂ SiO ₅		M2	316Ti	B2	CB4
C3	Y ₂ SiO ₅		M3	318LN	B3	Ticutil
C4	Al ₂ TiO ₅		M4	Titanium G2	B4	Cusil-ABA
C5	Mullite		M5	Sea-Cure	B5	Cusin-1 ABA
C6	TiO ₂		M6	AL-6X	B6	Incusil-ABA
C7	Al ₂ O ₃ (99.6%)		M7	AL-29-4C	B7	Silver-ABA
C8	SiO ₂ (99.99%, fused)		M8	Inconel 718	B8	Gold-ABA
					B9	Au4Ti

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der MADM-Bewertung der einzelnen Materialien dargestellt. Basierend auf diesen Daten wurden geeignete Materialien identifiziert. Es wird deutlich, dass Keramiken mit Elementen der Gruppe IVB aus dem Periodensystem und Aluminiumoxid am besten für das Löten geeignet sind, während austenitische Edelstähle ideal für den metallischen Verbindungspart sind. Ag-basierte aktive Legierungen bieten Flexibilität für Lötanwendungen. Weitere Details zur Materialauswahl sind in der Veröffentlichung [7] zu finden.

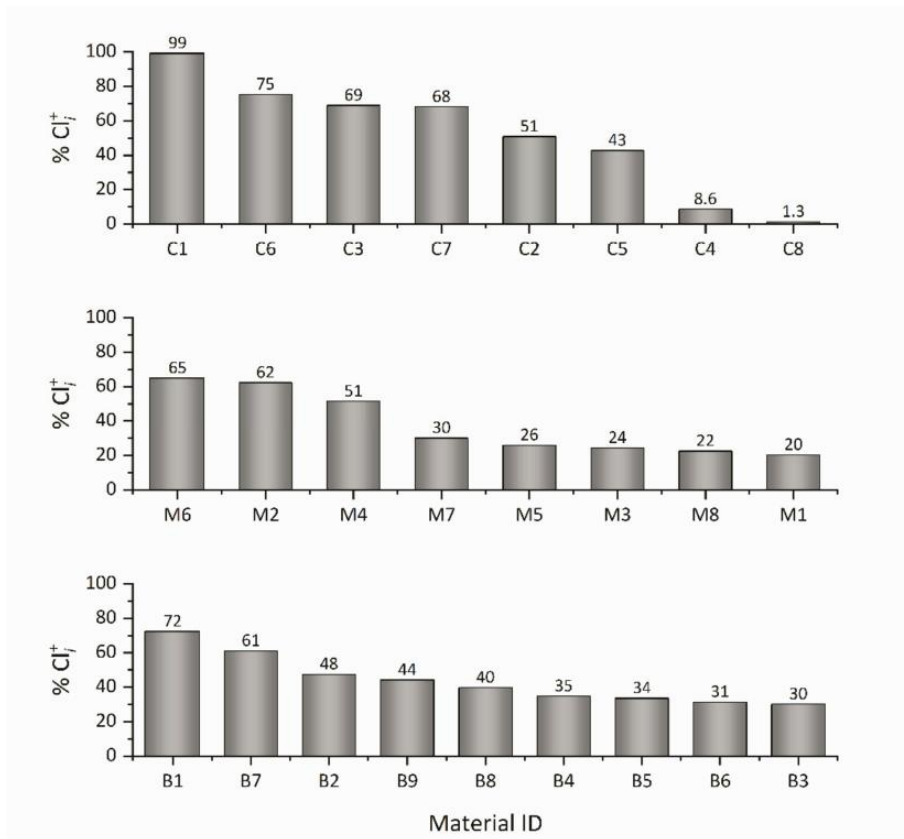


Abbildung 4: Ergebnisse der Materialauswahl unter Verwendung des MADM-Prozesses.

Sowohl stationäre als auch zeitabhängige FEM-Simulation wurden verwendet, um die Verteilung der thermischen Spannungen in den Verbindungen zu optimieren. Erstere ist kühlratenunabhängig und daher besser für qualitative Bewertungen geeignet, während Letztere den realen laserbasierten Lötprozess besser widerspiegelt, da die tatsächliche Kühlkurve in die Simulation eingebunden wurde. Die detaillierte Methode wurde in den Referenzen [8] und [9] dokumentiert. Eine allgemeine Schlussfolgerung ist, dass während der Lötprozesse die maximale von-Mises-Spannung auf der Außenfläche der Keramik, insbesondere direkt unterhalb des Lötperlenbereichs, wo die Spannungskonzentration auftritt, unter der Weibull-Festigkeit von Aluminiumoxid bleiben muss, wie in Abbildung 5 gezeigt.

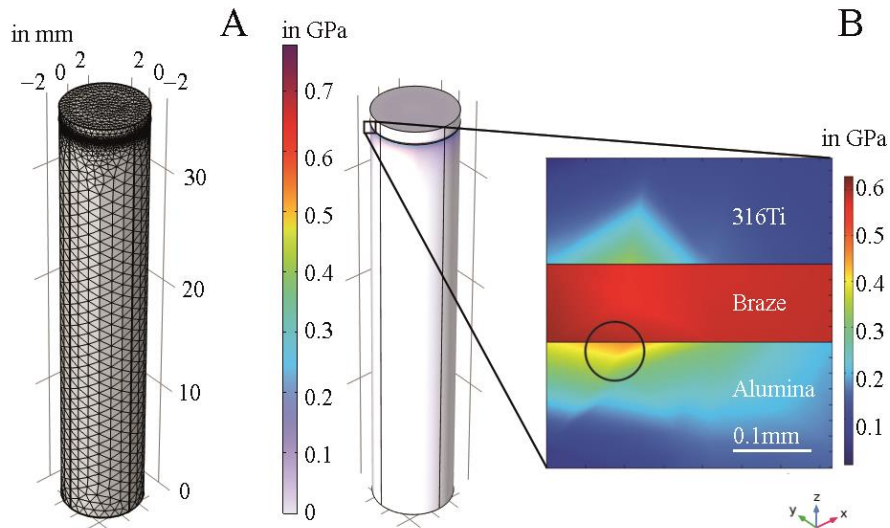


Abbildung 5: FEM-unterstütztes LAB. (A) Modellnetz. (B) Simulierte von-Mises-Spannung (in GPa), die unterhalb der Weibull-Stärke von Aluminiumoxid bleibt.

Zur Optimierung des Lötdesigns wurde zusätzlich die Strukturierung der keramischen Fügeflächen mittels ns-PLA eingesetzt. Dieses Verfahren kann für die Laserreinigung verwendet werden, um Oberflächenschichten von Keramiken zu entfernen [10]. Dadurch können z. B. nach dem Sintern verbleibende Restporen wieder geöffnet werden (Abbildung 6), und das Lot kann in die Poren eindringen, wodurch die Verankerung des Lotes in der Keramik verbessert wird. Dies ns-PLA kann die Oberflächenrauheit der Keramikoberfläche effektiv modifizieren und damit die Benetzungswinkel gemäß der Wenzel'schen Relation beeinflussen. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass mit biomimetischer Laserstrukturierung funktionale Muster erstellt werden können, um die mechanischen Eigenschaften von Keramikverbindungen zu verbessern. Wie in [11] berichtet, durch die Kombination von Laser-Pre-Cracking, ns-PLA und LAB können Risspfade in keramischen Verbindungen zwischen Keramik und Keramik präzise gesteuert werden, was zu einer erheblichen Verbesserung der Bruchzähigkeit führt, wie durch Bruchzähigkeit-Tests belegt wird.

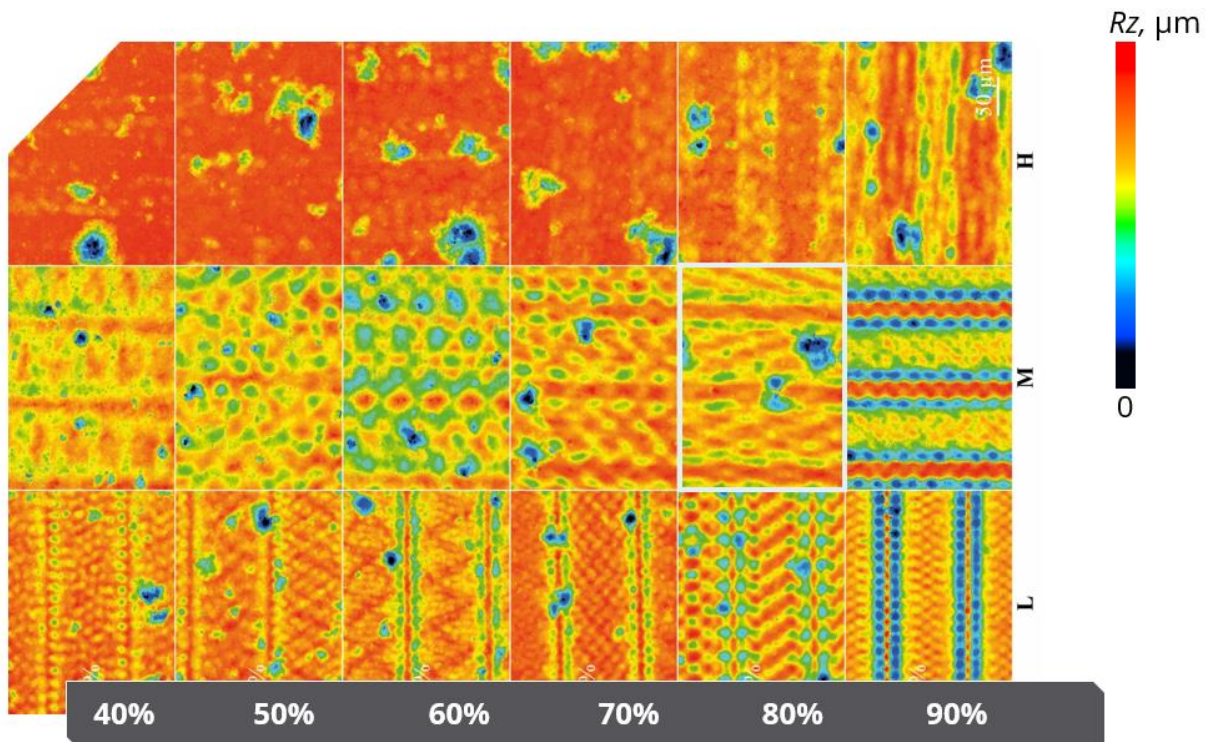


Abbildung 6: ns-PLA für die Oberflächenreinigung von Aluminiumoxid.

Parameterstudie

Im vorliegenden Projekt wurde eine neuartige laserbasierte Löttechnik untersucht, bei der ein Diodenlaser genutzt wird, um hochwertige, lokal begrenzte Verbindungen zu erzeugen und gleichzeitig die Integrität der Basismaterialien zu bewahren. In der Studie werden systematisch die Laserprozessparameter unter Verwendung von FEM und der Taguchi-Methode optimiert, um die gewünschte Verbindungsgeometrie und die Wärmebelastungsverteilung bei minimaler Wärmeeinbringung zu erreichen [12]. Ein Vergleich zwischen laserbasiertem Aktivlöten und herkömmlichem Ofenlöten wurde durch metallografische Analyse und Bestimmung der Scherfestigkeit realisiert. Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit der Verbindungen im Autoklaven (Temperatur 285 °C, Druck 69,2 bar, Dauer 60 h) wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TUD-PBM am HZDR durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Parameter des laserbasierten Prozesses Lötnahtstärke und Scherfestigkeit signifikant beeinflussen, wobei die lasergefügten Verbindungen eine überlegene Qualität und Stabilität nach Autoklavenprüfungen im Vergleich zu Ofenlötverbindungen aufweisen. Wie in Abbildung 7 gezeigt, weisen sowohl LAB- als auch FB-Verbindungen im Vergleich zu in der Fachliteratur publizierten Werten eine überdurchschnittliche Scherfestigkeit und ein vergleichbares Weibull-Modul auf. Abbildung 7C und Abbildung 7D verdeutlichen, dass die Scherfestigkeit der ofengelöteten Proben nach den Autoklavenprüfungen in Wasserdampf bei 285 °C für 60 h deutlich sank, während die lasergelöteten Proben relative Stabilität zeigten.

Die Gewichtänderungen der Aluminiumoxide-316Ti-Verbindungen vor und nach den Autoklavenprüfungen deuten darauf hin, dass keine signifikante Korrosion auf der Oberfläche aufgetreten ist.

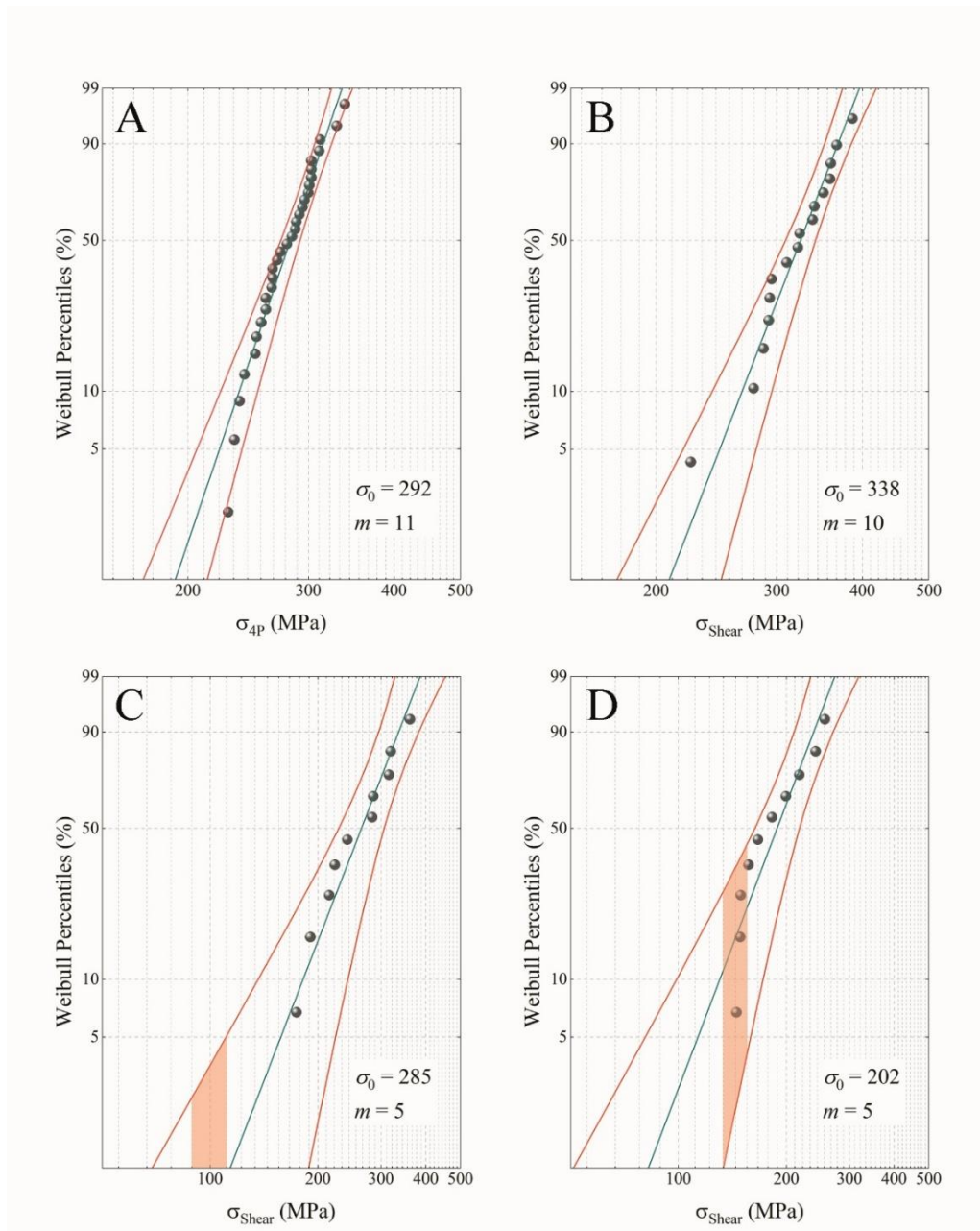


Abbildung 7: Weibull-Verteilung der Scherversuchsergebnisse für (A) Aluminiumoxid-Stäbe vor dem Löten, (B) Aluminiumoxid-Stäbe nach dem Löten, (C) Aluminiumoxid-316Ti-Verbindungen, die im Ofen verarbeitet wurden (FB), und (D) LAB-hergestellte Aluminiumoxid-316Ti-Verbindungen (LAB-2321). Der in Rot markierte Bereich zeigt die Scherkräfte der Proben nach den Autoklavenprüfungen an.

Diese Schlussfolgerung wird durch weitere Mikrostrukturuntersuchungen nach den Scherversuchen unterstützt. Abbildung 8 und Abbildung 8C zeigen keine Hinweise auf Korrosion in den Ag- oder LAB-Verbindungen. Abbildung 8D zeigt jedoch signifikante Ag-Spikes an den Grenzflächen zwischen Lot und 316Ti in den ofengelöteten Proben nach den Autoklavenprüfungen, was eine Erkenntnis darstellt, die in der Literatur bisher nicht berichtet wurde. Der Bildungsmechanismus dieser Spikes und ihre Auswirkungen auf die Stabilität der Verbindun-

gen erfordern weitere Untersuchungen. Darüber hinaus wurde auf der Oberfläche der ausgespülten Füllmetalle in Abbildung 8D möglicherweise ein Oxidationsfilm beobachtet, vermutlich aufgrund der Oxidation während der Abkühlphase des Ofenprozesses, als der Sauerstoff-Partialdruck in der Ofenatmosphäre anstieg. Die thermodynamischen und kinetischen Aspekte des Lötprozesses wurden ebenfalls analysiert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das laserbasierte Aktivlöten zum Fügen von 316Ti mit Aluminiumoxid eine erfolgreiche und effiziente Alternative darstellt, wobei die durch traditionelle Ofenlöten erreichte Verbindungseigenschaften übertroffen wurden.

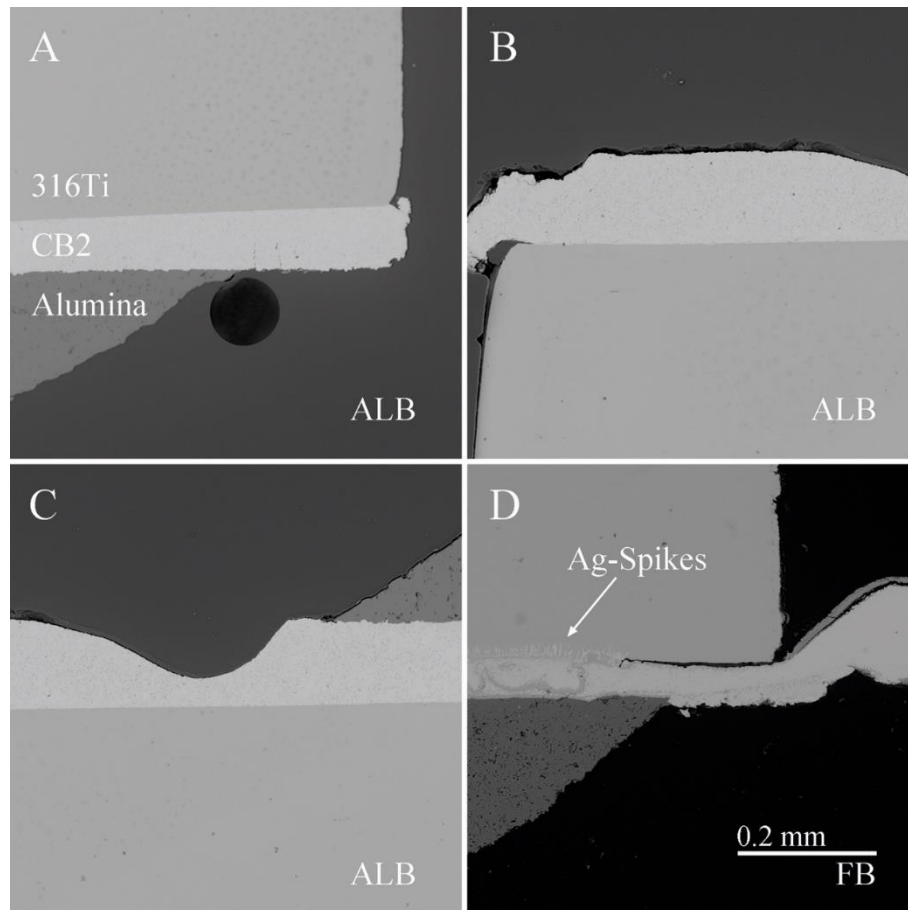


Abbildung 8: REM-Aufnahmen der Aluminiumoxid-316Ti-Verbindungen nach Scherversuchen. (A) Lasergefügte Proben vor der Autoklavenprüfung, (B) und (C) Lasergefügte -Proben nach den Autoklavenprüfungen, und (D) Ofengelötete Proben nach den Autoklavenprüfungen.

1.1.2 Entwicklung von elektrischen Durchführungen für Rohrwandungen

Auf Basis der Ergebnisse aus Teilprojekt 1.1.1 sollten miniaturisierte elektrische Durchführungen für Rohrwandungen (Stahl, 3-5 mm Wandstärke) entwickelt werden, die sowohl für Standardinstrumentierungen wie Nadelsonden oder Gittersensoren als auch für die wandbündigen wasserdampffeste Sensoren für die elektrische Filmdickenmessung (vgl. AP 1.2) eingesetzt werden können. Diese sind gekennzeichnet ist durch:

1. eine technisch einfache Lösung,
2. Sattedampfbeständigkeit (< 300 °C),
3. Druckfestigkeit (50...70 bar),

4. einfache Austauschbarkeit.

Die gegebenen Randbedingungen setzen voraus, dass Materialien mit hoher Temperaturbeständigkeit, chemischer Resistenz, hoher Festigkeit und - da die Verwendung verschiedener Materialien in einem mehrere Hundert Kelvin umfassenden Temperaturbereich nötig ist - abgestimmten thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Verwendung finden.

Um der Austauschbarkeit der Durchführung bei den geforderten thermochemischen und mechanischen Beanspruchungen Rechnung zu tragen, wurde die Entwicklung einer elektrischen Durchführung in Form einer Edelstahlschraube mit aufgestecktem Dichtungsring angestrebt. Axial in der Schraube soll die zur Schraube/Rohrwand elektrische isolierte Durchführung angeordnet werden.

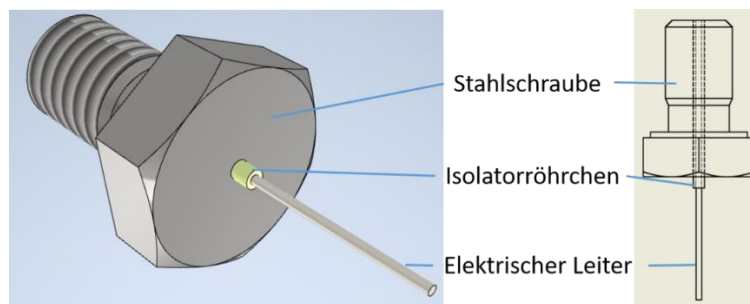


Abbildung 9: Konstruktionszeichnung Schraube mit axiale, Isolierröhrchen und elektrischer Durchföhrung.

Als Schraube soll eine belüftete Vakuumschraube aus Edelstahl (hier M4x6) Verwendung finden. In dieser ist standardmäßig eine Innenbohrung mit einem Durchmesser von 1 mm vorhanden. In diese Innenbohrung soll ein Isolierröhrchen aus Keramik, welches eine elektrische Durchführung enthält, eingelötet werden. Sollte diese Entwicklung gelingen, wären die Anforderungen an eine technisch einfache und austauschbare Lösung erfüllt.

Verwendete Materialien

Die vorgeschlagene Lösung beinhaltet drei verschiedene Materialien, welche in ihrer Funktion und in ihren Eigenschaften aufeinander abgestimmt werden müssen. Das bedeutet konkret:

- hohe elektrische Leitfähigkeit der Durchführung,
- hohe elektrische Isolation der Keramik,
- hohe Temperaturbeständigkeit aller Komponenten,
- hohe Resistenz gegen Wasserdampf bei Temperaturen bis 300 °C,
- hohe Festigkeit (Druckbeständigkeit),
- abgestimmte thermische Ausdehnungskoeffizienten.

Vorbetrachtungen zu geeigneten Materialien sind im Bericht von Feng [7] aufgeföhrt. Diese Informationen fließen in die getroffene Auswahl ein. In der folgenden Tabelle 2 sind die entscheidenden Eigenschaften der für die Versuche ausgewählten Materialien gegenübergestellt.

Tabelle 2 ist die grundsätzliche Eignung der ausgewählten Materialien zu entnehmen. Für eine Lötverbindung spielt der auf die Fügepaare abgestimmte thermische Ausdehnungskoeffizient eine große Rolle- er sollte ähnlich hoch sein. Das ist zwischen Titandraht, Al₂O₃-Kapillare und Lot gegeben. Das Lot hat eine Löttemperatur von 880-900 °C [13]. Es handelt sich um ein Aktivlot der Zusammensetzung Zr20Ni20Cu20Ti20. Aktivelemente, in diesem Fall Zirkon und Titan, sind für die Benetzung metallischer Lote auf Oxidkeramiken notwendig. Deutlich abweichend ist der thermische Ausdehnungskoeffizient der Edelstahlschraube. Einerseits passend zum Edelstahlrohr, in das die elektrische Durchführung eingeschraubt werden soll, ist er im Vergleich zu den sie beinhaltenden Komponenten deutlich höher. Der Lösungsansatz verfolgt die Idee, dass einerseits sowieso eine Schnittstelle zwischen Edelstahlrohr und Durchführung geschaffen werden muss - hier also mit Materialien gleicher Dehnung (Edelstahl) und andererseits beim Einlöten der keramischen Kapillare die Schraube aufgeschrumpft wird. Die stoffschlüssige Verbindung zwischen Kapillare und Edelstahlschraube würde damit durch eine formschlüssige Verbindung überlagert.

Tabelle 2: Verwendete Materialien und ihre Eigenschaften

		Al ₂ O ₃ (Al23) [14]	Titandraht	Edelstahlschraube	Lot TiBraze 200
Außendurchmesser	mm	1	0,5	-	-
Innendurchmesser	mm	0,5	-	1	-
Elektr. Durchschlagfestigkeit	kV/mm	20- 230	-	-	-
Spez. elektr. Widerstand	Ωm	≈10 ¹²	0,5- 0,7	-	-
E-Modul	GPa	380	116	200	-
Wasserdampfbeständigkeit		gegeben	gegeben	gegeben	gegeben
Schmelztemperatur	°C	2050	1668	1440	850
Therm. Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ *K ⁻¹	8,2	9,0 [15]	16- 17	8,8 (13)

Laserstrahllöten Titandraht in Al₂O₃-Kapillare

Für die Versuche zum Laserstrahllöten wurde ein fasergeführter 10 kW Diodenlaser der Firma Laserline GmbH verwendet, der die Wellenlängen 915, 940, 980 und 1030 nm emittiert. Um den geforderten geringeren Leistungsbereich besser regeln zu können, wurde nur mit der Wellenlänge von 1030 nm gearbeitet, die im Maximum 2560 W erreicht. Der Durchmesser des Laserstrahls an der Bearbeitungsstelle betrug ca. 8 mm. Zur Vermeidung von Oxidationen der metallischen Komponenten fand der Fügeprozess in einer Vakuumkammer bei 10⁻⁴ mbar statt.

Ziel dieser Versuche ist es, den Titandraht (Schmelztemperatur 1668 °C) stoffschlüssig in die Keramikkapillare (Schmelztemperatur 2050 °C) einzuschmelzen. Dazu wurde ein ca. 40 mm langer Titandraht in ein ca. 12 mm langes Röhrchen eingeführt und mittels Laserstrahlung erhitzt. Der Versuchsaufbau ist nach diversen Optimierungen in Abbildung 10 dargestellt. Dieser Versuchsaufbau gewährleistet im Moment des Schmelzens des Titandrahtes im Bereich der Einwirkzone des Lasers einerseits eine Führung des Drahtes und andererseits eine Nachführung des Drahtes, die idealerweise zur vollständigen Ausfüllung der Kapillare führen soll.

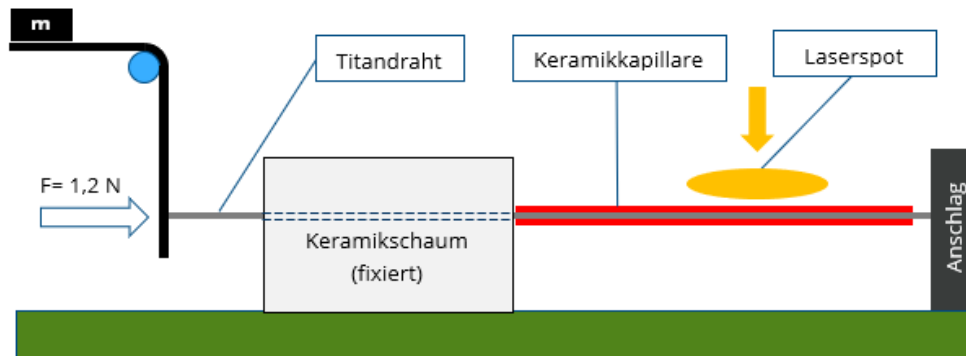


Abbildung 10: Schematische Darstellung Versuchsaufbau Einschmelzen Titandraht in Kapillare.

Untersuchungen zu einer geeigneten Temperaturführung setzen die Kenntnis der während des Prozesses aktuellen Temperatur voraus. Zur Temperaturerfassung kam ein Echtzeit-Thermografiesystem Variocam hr der Firma Infratec GmbH zum Einsatz, welches im Spektralbereich von 7,5...14 μm Temperaturen mit einer Messgenauigkeit von 2% bis 2000 °C erfasst. Die Transmission der emittierten Strahlung durch ein ZnSe-Fenster wurde mit einem Korrekturfaktor von 0,8 berücksichtigt. Die Temperaturmessung erfolgte auf der Keramik bei einem Emissionswert von $\varepsilon = 0,75$. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die erfassten Temperaturwerte einem Fehler unterliegen, der mit ± 100 K geschätzt wird. Wesentliche Einflussgröße ist der Emissionskoeffizient ε . Er beruht mit $\varepsilon = 0,75$ auf Erfahrungswerten mit Al_2O_3 -Keramik. Aufgrund der geringen Größe der Kapillaren und der gewölbten Oberfläche wäre eine Erfassung des Emissionskoeffizienten sehr aufwendig. Die Werte bieten jedoch Orientierung und erlauben, Temperaturänderungen relativ zueinander zu erfassen.

Laserstrahllöten Al_2O_3 -Kapillare in Schraube

Auch für diese Versuche wurde der fasergeführte 10 kW Diodenlaser der Firma Laserline GmbH mit einer Wellenlänge von 1030 nm genutzt. Der Durchmesser des Laserstrahls an der Bearbeitungsstelle betrug ca. 8 mm. Zur Vermeidung von Oxidationen der metallischen Komponenten fand der Fügeprozess in einer Vakuumkammer bei 10^{-4} mbar statt.

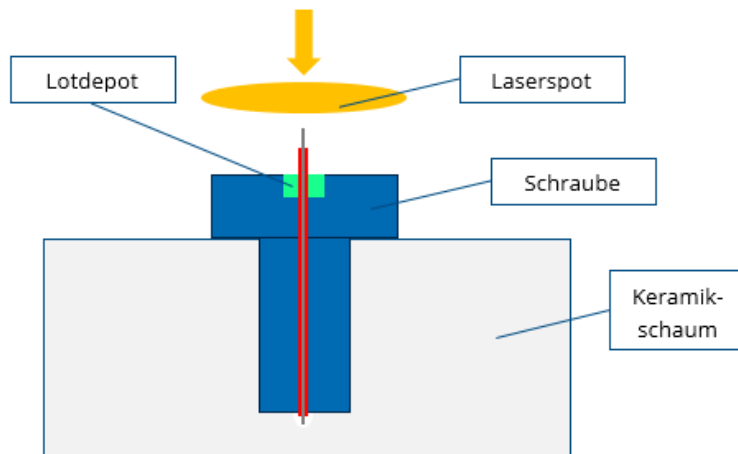


Abbildung 11: Schematische Darstellung Versuchsaufbau Löten Kapillare in Schraube.

Als Edelstahlschraube (1.4301) diente eine Sechskantschraube M4x6 mit Gewinde bis zum Kopf und axialer Bohrung mit einem Durchmesser von ca. 1,2 mm. In den Kopf wurde eine Senkbohrung von 2 mm Breite und 2 mm Tiefe eingebracht. Nach Einführen der Kapillare diente diese Bohrung zur Aufnahme des pulverförmigen Lotes, welches die Vertiefung zu ca. 50% ausfüllte. Die Schraube wurde bis zum Kopf in Keramikschaum eingelassen.

In Abbildung 11 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Bei vertikaler Position trifft der Laserstrahl auf den Schraubenkopf. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl wird die Schraube gleichmäßig erwärmt und dehnt sich dabei aus. Wenn das Lot seine Schmelztemperatur erreicht hat, kann es zwischen Kapillare und Schraube nach unten fließen. Während des Erstarrens des Lotes wird die Schraube auf die Kapillare zusätzlich aufgeschrumpft.

Zur Erfassung einer annähernd realistischen Temperatur mittels Echtzeit-Thermographiesystem Variocam hr der Firma Infratec GmbH während des Lötprozesses wurde auf den Schraubenkopf bei langsamer Erwärmung desselben mittels Laserstrahlung eine ca. 1 mm große Silberkugel positioniert. Der Moment des Schmelzens des Silbers (Schmelztemperatur 960 °C) diente als Anpassung des Emissionswertes einer Seitenfläche des Schraubenkopfes auf 0,14, bei dem exakt die Schmelztemperatur von Silber ausgegeben wird.

Ergebnisse

Laserstrahllöten Titandraht in Al_2O_3 -Kapillare

Erste Untersuchungen galten der Ermittlung der Temperatur, bei der das Titan in der Kapillare schmilzt, aber die Keramikkapillare beständig bleibt, sowie geeigneter Aufheiz- /Abkühlraten und Haltezeiten. Titan schmilzt bei 1668 °C, Al_2O_3 bei 2050 °C. Daraus resultierend wurde zum Einschmelzen des Titandrahtes eine Temperatur angestrebt, die innerhalb dieser Grenzen liegt.

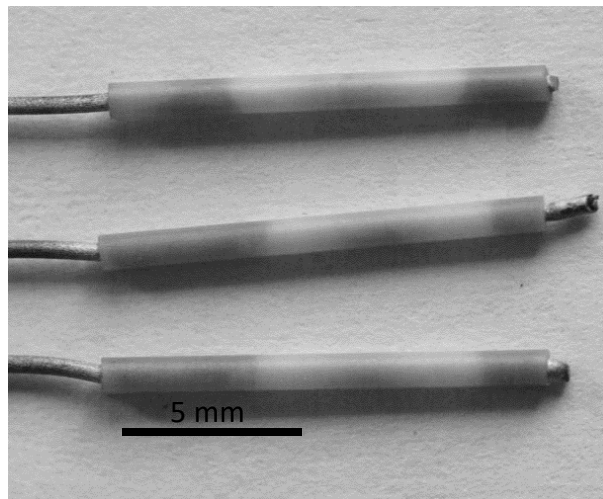


Abbildung 12: Foto dreier unter optimierten Bedingungen gefügten Verbindungen.

Titan gehört zu einem der Aktivelemente, welche beim Lötten von Keramik mit metallischen Loten eine Benetzung derselben ermöglichen [16]. Diese beruht darauf, dass das Aktivelement Titan eine chemische Verbindung mit der Al_2O_3 -Keramik eingeht. In [17] konnte bei einer Haltezeit von 1,5 h bei $1250\text{ }^\circ\text{C}$ der Beginn der Reaktion von Titan mit Al_2O_3 zu Al_2TiO_5 nachgewiesen werden. Im System TiO_2 - Al_2O_3 liegt dieser Wert unabhängig von der prozentualen Masseverteilung bei $1283\text{ }^\circ\text{C}$ [18]. Zwischen TiO_2 und Al_2TiO_5 ist weiterhin ein Eutektikum festzustellen, welches bei $1700\text{ }^\circ\text{C}$ [18] respektive $1705\text{ }^\circ\text{C}$ [1] zur Schmelze führt, also wenige Kelvin oberhalb der Schmelztemperatur von Titan.

Für die Optimierung der Temperaturführung lässt sich aus diesen Kenntnissen folgendes ableiten:

1. Der Laserstrahl sollte nur punktuell und nicht über die gesamte Länge der Kapillare wirken, um bei Einsetzen der Schmelzphase eine Nachführung des Titandrahtes zu ermöglichen.
2. Um eine Fixierung des Drahtes während des Aufheizens durch chemische Reaktionen zu vermeiden (was die Nachführung des Drahtes beim Schmelzen behindern würde), muss die Reaktionszeit durch Maximierung der Aufheizrate minimiert werden.
3. Nach erfolgtem Schmelzen des Drahtes können bei einer Haltezeit im unkritischen Temperaturbereich (unterhalb Eutektikum) sowohl chemische Reaktionen die Festigkeit der Verbindung erhöhen als auch Spannungen abgebaut werden.

Aufgrund der Unsicherheit in der Temperaturmessung (noch dazu bei sehr engem Arbeitsfenster: Schmelze Titan bei $1668\text{ }^\circ\text{C}$, Eutektikum bei $1700\text{ }^\circ\text{C}$) steht die Frage, ob der Titandraht innerhalb der Kapillare tatsächlich geschmolzen ist. Um dies zu testen, stünden nur zerstörende Verfahren zur Verfügung, die ein nachfolgendes Einlöten der Kapillare in die Schraube ausschließen. Als Maß für den Erfolg des Schmelzens des Titandrahtes in der Kapillare wurde die Längenänderung betrachtet, die bei Ausfüllen des Spaltes zwischen Kapillare

und Draht auftreten sollte. Bei einer Länge des Titandrahtes von rund 41 mm lässt sich dieser Wert mit rund 3% erfassen.

Laserstrahllöten Al_2O_3 -Kapillare in Schraube

Es wurde ein Temperatur-Zeit-Regime entwickelt, bei dem die Temperatur auf Löttemperatur gebracht und sich ca. 70 s maximal 150 K oberhalb der Löttemperatur bewegt. Der gesamte Prozess dauert 2 min. Die Abkühlung erfolgt unregelt. Es ist zu beobachten, dass das Lotpulvervolumen von ca. 3 mm³ vollständig geschmolzen ist und das Lotdepot verlassen hat. Im Lotdepot befindet sich kein Lotpulver mehr. Aufgrund einer sehr guten Benetzung an den sichtbaren metallischen und keramischen Flächen, ist das Lot sowohl in die mit der Keramikkapillare versehene Bohrung in der Schraube eingedrungen als teilweise auch an der Kapillarwandung in vertikaler Richtung nach oben geflossen (vgl. Abbildung 13). Bei Versuchen, bei denen die Kapillare ca. ≤ 1 mm über den Schraubenkopf ragte, kam es durch die Benetzung zum Kurzschluss zwischen Schraube und Draht.

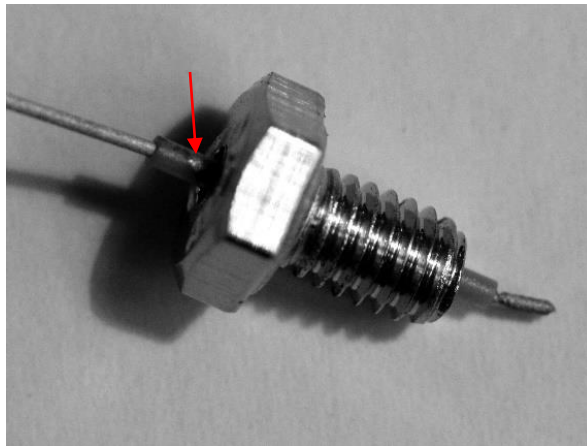


Abbildung 13: Vollständig gefügte miniaturisierte elektrische Durchführung mit Keramikkapillare (roter Pfeil: das Lot ist entlang der Keramikkapillare nach oben geflossen).

Seitens TUD-IAVT erfolgte im Anschluss eine zerstörungsfreie Untersuchung der miniaturisierten Durchführungen. Ähnlich einem medizinischen Röntgenbild konnten hochaufgelöste computertomografische Aufnahmen der Verbindungen erzeugt werden. Das Computertomografiesystem nanotom[®] der Firma phoenix/x-ray Systems + Services GmbH Wunstorf erlaubte die bildliche Darstellung der Durchführung in frei wählbaren Ebenen. Bei einer Beschleunigungsspannung von 120 kV bei einem Strahlstrom von 100 μ A konnte mit einer Voxelgröße von 8,3 μ m ein kontrastreiches Bild zur Analyse erzeugt werden.

In Abbildung 14 ist beispielhaft für 3 untersuchte Proben eine Längsansicht der Schraube im Bereich der Keramikkapillare mittels Computertomografie (CT) dargestellt. Bei zunehmender Ordnungszahl der Elemente der Materialien ermöglicht eine zunehmende Helligkeit der Bereiche einen Kontrast, der eine Differenzierung der einzelnen Komponenten ermöglicht. Sehr gut zu unterscheiden sind danach Stahl, Keramik und Titandraht. Eine Differenzierung zwischen Stahl und Lot ist schwer bzw. indirekt über das Fehlen des Lotes und dem dort befindlichen Luftspalt möglich. In Kontrast zur Keramik kann man im oberen Bereich der Schraube

erkennen, wie das Lot aus dem Lotdepot entlang der Keramik nach oben geflossen ist. In die Tiefe hat es eine Verbindung zwischen Kapillare und Schraube über eine Strecke von ca. 3,8 mm (im Durchschnitt über die 3 Proben 5,0 mm) erzeugt. Im unteren Bereich der Schraube befindet sich im Titandraht ein Mikroriss und eine Gasblase (Lunker). Beides ist als Mangel zu bewerten, erhöht es doch in diesem Bereich den Widerstand des Drahtes.

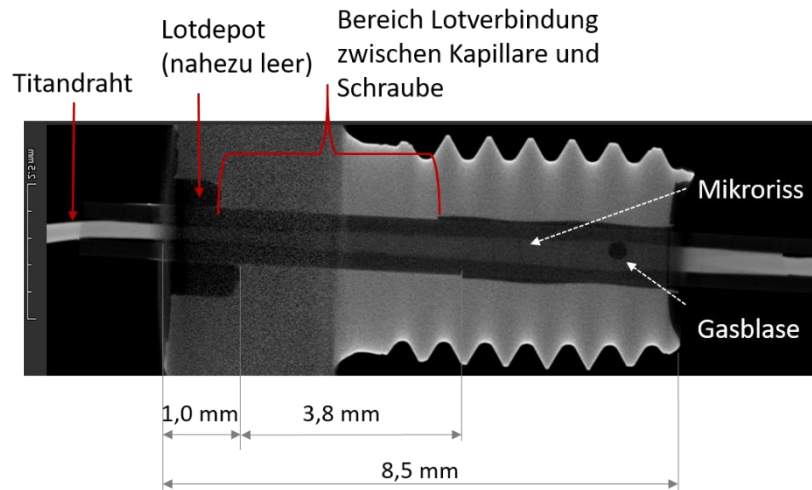


Abbildung 14: CT-Aufnahme der Verbindung Längsschnitt.

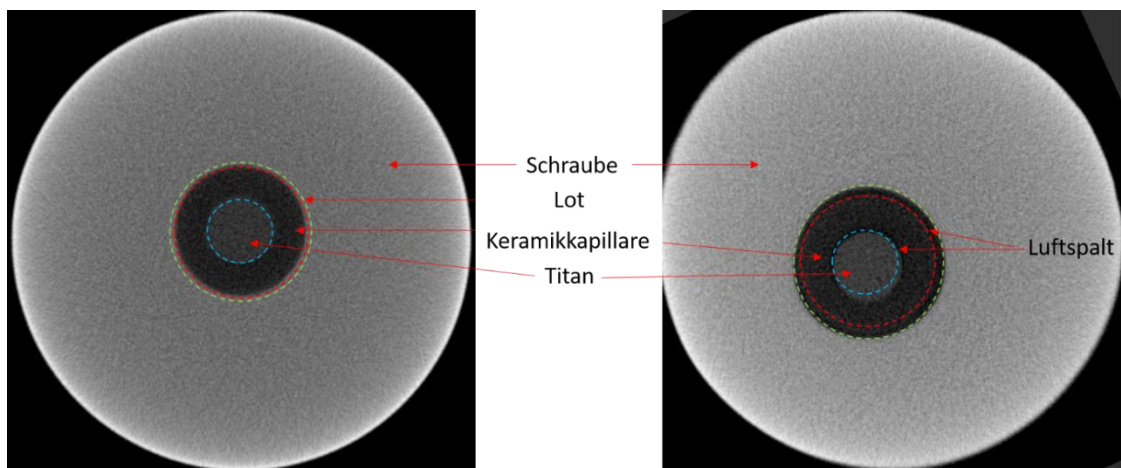


Abbildung 15: CT-Aufnahme Querschnitt durch Bereich idealer Verbindung bei ca. 3 mm (links) und durch Bereich ohne Verbindung bei ca. 8,3 mm (rechts).

Zur Veranschaulichung einer idealen Verbindung, wie sie über eine Strecke von rund 4 mm erzeugt wurde, dient Abbildung 15 in der Querschnittsansicht. Der Übergang zwischen Schraube und Lot ist nur vage erkennbar. Deutlich wird jedoch der stoffschlüssige Übergang zwischen den einzelnen Komponenten, im Gegensatz zu Abbildung 15 (rechts), aufgenommen am untersten Rand der Schraube. Hier ist sowohl ein Luftspalt zwischen Schraube und Kapillare (Übergang rot-grün) als auch zwischen Kapillare und Titan (Übergang rot-blau) erkennbar.

Anhand der deutlichen Sichtbarkeit eines Luftspaltes zwischen Titandraht und Keramik konnte anhand der Querschnittsaufnahmen erfasst werden, dass sich die stoffschlüssige Verbindung des Titandrahtes über eine mittlere Länge von über 6,5 mm erstreckt.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich aus der Projektbearbeitung folgende wesentliche Schlussfolgerungen ziehen:

- Mit Anwendung eines MADM-Ansatzes zur Materialauswahl wurden hochreines Aluminiumoxid und 316Ti als geeignete Materialien identifiziert. Auswahlkriterien waren die mechanischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit. Die Kombination beider Eigenschaften stellt eines der herausforderndsten Paare im Ashby-Diagramm dar, insbesondere hinsichtlich des Kompromisses zwischen CTE und Young'schem Modul.
- Sowohl stationäre als auch zeitabhängige FEM-Simulationen wurden eingesetzt, um das Design der Lötverbindungen zu optimieren, wodurch eine präzise Kontrolle über die Geometrie und Verteilung der thermischen Spannungen ermöglicht wurde.
- Biomimetisches ns-PLA erfüllte mehrere Schlüssel-Funktionen, einschließlich der Oberflächenreinigung, der Kontrolle der Oberflächenrauheit, des Diffusionsrückzugs, der Umverteilung der thermischen Spannungen und sogar der Steuerung der Risspfade.
- Matrixexperimente zeigten, dass mit LAB robuste Verbindungen mit verbesserter metallurgischer Reinheit und minimalem Materialverlust erzeugt wurden. Diese Verbindungen wiesen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit in den Autoklavenprüfungen auf.
- Thermodynamische Analysen und kinetische Modellierungen gaben Einblicke in chemische Reaktionen an Grenzflächen und die Transportkinetik aktiver Elemente, was das Verständnis von LAB verbesserte.
- Mit der Kombination aus FEM/ns-PLA/LAB können Materialien mit extremen Unterschieden im thermischen Ausdehnungskoeffizienten effektiv verbunden werden, ohne dass zusätzlich zum Lot Zwischenschichten notwendig waren.
- Der Titandraht wurde direkt mittels Laserstrahl in eine Aluminiumoxid-Kapillare eingelötet. Mit einer entsprechenden Prozessführung gelingt es, dem Schmelzen des Titandrahtes entgegenzuwirken und die Temperatur unterhalb des Eutektikums von $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ zu halten. Damit kann die Kapillare mit geschmolzenem Metall durch angewendeten Druck gefüllt werden.
- Die verbundene Kapillare wurde anschließend erfolgreich durch Laserlöten auf eine Edelstahl-Schraube aufgebracht. Die Lötlegierung benetzte die Kapillare durch Kapillarwirkung. Die Qualität der Verbindung wurde durch eine Micro-CT-Untersuchung bestätigt.

In folgenden Arbeiten sollte eine systematische Prüfung der Testmuster unter den Bedingungen von Druckwasserreaktoren durchgeführt werden, um den genauen Anwendungsbereich dieser neuartigen Technologie zu bestimmen.

Meilensteine

Mit den beschriebenen Ergebnissen können die Meilensteine:

- M1.1.1 (Konzepte für Elektrodendurchführung),
- M1.1.2 (Techniken zum Einbetten von Sensoren in Wandstrukturen getestet) und
- M1.1.3 (Verfahren zur strukturierten Metallisierung entwickelt und erprobt)

als erfolgreich abgeschlossen betrachtet werden.

TP 1.2: Miniaturisierte Wandler auf Keramiksubstraten (TUD-IAVT, TUD-PBM)

Beschreibung:

Es werden miniaturisierte Dickschichtelemente für zwei Anwendungsfälle entwickelt:

1.) Wandler zur Messung von Temperatur und Fluidgeschwindigkeit in Thermoanemometrie-Gittersensoren: Die Wandlerelemente (Größe 1 mm x 8 mm) umfassen ein Platin-Widerstandselement für die Heißfilmanemometrie. Des Weiteren werden bereits theoretisch ausgearbeitete Konzepte für eine bilaterale Fluidgeschwindigkeitsmessung bzw. eine Mehrkomponenten-Fluidgeschwindigkeitsmessung über multiple Wandler auf einem Substrat erprobt.

2.) Wandbündige wasserdampffeste Sensoren für die elektrische Filmdickenmessung: Dazu werden Leitfähigkeitselektroden auf ein Keramiksubstrat aufgebracht und mit mineralisierten Kabeln kontaktiert. Gemeinsam mit TP1.1 wird eine Lösung zur Integration in Metallwände (Rohre und Platten) erarbeitet.

Wie in der Aufgabenstellung beschrieben sollten im Arbeitspaket 1.2 seitens TUD-IAVT insgesamt zwei Sensortypen für den Einsatz in gesättigter Wasser-/Wasserdampfumgebung bis ca. 300 °C entwickelt und erprobt werden. Dabei handelt es sich um:

- Miniaturisierte Temperatursensoren für Thermoanemometrie-Gittersensoren von TUD-PBM (TAGS, vgl. AP2.3) zur Messung von Temperatur und Fluidgeschwindigkeit, sowie
- Wandbündige Sensoren für die Messung von Kondensationsfilmdicken an Rohrwandungen (vgl. AP3.3).

Beide Sensoren unterscheiden sich in ihrem Einsatzgebiet und in ihrer Funktionsweise fundamental voneinander, weshalb die jeweiligen Arbeiten im Folgenden gesondert beschrieben werden. Parallel zur Entwicklung der Sensoren wurde durch IAVT und PBM in Zusammenarbeit mit unseren Partnern vom HZDR eine umfangreiche Materialcharakterisierung durchgeführt, deren Ergebnisse in beide Sensoraufbauten eingeflossen sind.

1.2.1 Materialcharakterisierung für Sensoren in Wasser-/Wasserdampfumgebung bis 300 °C

Aufgrund der harschen Einsatzbedingungen für die beiden zu fertigenden Sensoraufbauten (Wandsensor und Pt-Elemente für TAGS), wurden über den Projektzeitraum hinweg verschiedene Materialkombination auf ihre Eignung für den Einsatz bei Sättigungsbedingungen von Wasser/Wasserdampf bis 300 °C (ca. 70 bar) evaluiert. Dazu wurden zwei Testvehikel aufgebaut, um verschiedene keramische Substratmaterialien, sowie unterschiedliche Leit- und Isolationsschichten in Dünn- und Dickschichttechnologie in Autoklaventests (ca. 50 h) auszulagern. Die Details dieser Analyse sind in der Veröffentlichung „Study of the Water and Steam Resistance of Thick Film Materials for Sensor Application up to 300 °C“ [20] zu finden.

Es ist festzuhalten, dass es, unter den analysierten Materialien, keine geeigneten Isolatoren gibt, die den Umweltbedingungen bis 300 °C im direkten Kontakt zu Wasser/Wasserdampf dauerhaft standhalten. Während glasbasierte Isolationsschichten bereits bei 150 °C degradieren, wurden die besten Ergebnisse für Polyimide (bis 172 °C) und PEEK (bis 300 °C, aber Haftungsverlust ab 172 °C) erreicht. Metallische Schichten sind bis 300 °C grundlegend widerstandsfähiger, wobei insbesondere die Grenzschicht zwischen Metall und Keramik angegriffen wird und es teilweise zum Haftungsverlust kommen kann. Dieses Verhalten ist maßgeblich von der Dichte der Schicht abhängig, weshalb Dickschichtpasten mehrfach gedruckt werden müssen und idealerweise eine oxydische, nicht glasbasierte Verbindung zum Substrat aufweisen sollten. Im Rahmen des Projekts werden metallische Leitschichten daher auch als Passivierung für die vulnerablen Isolationsschichten der Pt-Sensoren (TAGS) genutzt. Dünne metallische Schichten (500 nm), bspw. aus Ti, sind zwar grundlegend auch geeignet, aber sehr anfällig für Oberflächendefekte, weshalb diese weniger hermetisch abdecken. Die Beständigkeit keramischer Substrate ist vordergründig von deren Reinheit abhängig. Demzufolge sind für die Sensoren sowohl 99,6 % Al₂O₃ als auch ZrO₂ geeignet.

1.2.2 Temperatursensoren für TAGS

1.2.2.1 Spezifikation und Konzept

Zusammen mit den Kollegen von TUD-PBM und dem HZDR wurde seitens TUD-IAVT die Spezifikation für die Sensorelemente erarbeitet (siehe Tabelle 3). Aufgrund des gewünschten Widerstandsbereichs von 1 kΩ und der vorgegebenen Dimensionen (1 mm x 8 mm) ist die Umsetzung nur auf Basis von Pt-Dünnschichtwiderstandselementen realisierbar. Da kommerziell erhältliche keramische Widerstandssensoren, aufgrund der Geometrievorgaben, der Montagefähigkeit im Gittersensor (GS) und den harschen Umgebungsbedingungen für diese Aufgabe ungeeignet sind, wurde sich für eine Fertigung der Pt-Elemente am IAVT entschieden. Dies erfordert eine komplette Technologieentwicklung mit einer Kombination aus Dick- und Dünnschichttechnologien, erlaubt aber auch maximale Flexibilität beim Design. Die zu fertigenden Elemente sollen dabei sowohl als Temperatursensor als auch als Heizer genutzt werden (vgl. TP2.3, TUD-PBM), um die Funktion als Anemometer zu gewährleisten.

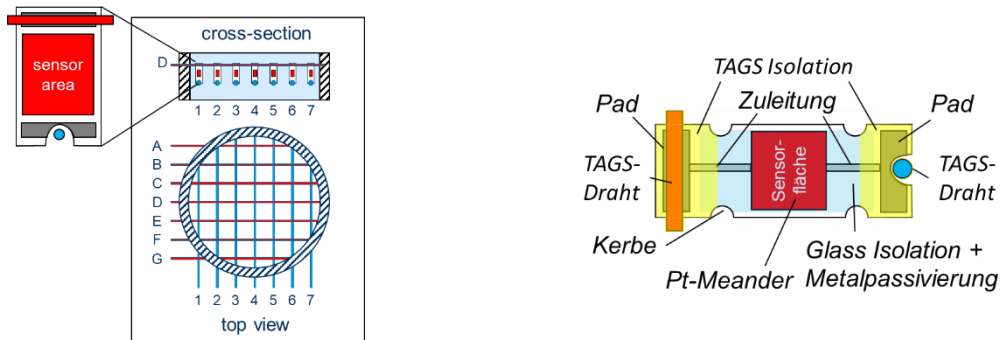
Das erarbeitete Konzept für die Sensoren ist schematisch in Abbildung 16 dargestellt. Abbildung 16a zeigt exemplarisch die Montage der Einzelemente in den Kreuzungspunkten des

Gittersensors. Der Strömungswiderstand ist dabei so gering wie möglich, was etwaige Verwirbelungen in der Strömung reduziert. Im Gegenzug verringert sich aber auch die Wärmeabgabe während des Heizerbetriebs. In Abbildung 16b ist eine schematische Skizze der Sensorelemente mit allen relevanten Bestandteilen dargestellt. Um den Einbau im Gittersensor zu vereinfachen, haben die Elemente gegenüberliegende Pads. Ein Pad ist dabei mit einer Kerbe versehen, wodurch der Draht (blau) senkrecht zur Substratoberfläche angebracht werden kann (Abbildung 16b). Der kreuzende Draht (rot) wird an der gegenüberliegenden Seite parallel zum Pad angelötet. Die Sensorfläche soll so klein wie möglich sein, was an die Wahl der Dimensionen (Leitbahnbreite/-abstand) beim Dünnschichtprozess gekoppelt ist. Die beim Heizerbetrieb entstehende Wärme soll idealerweise nur an das Medium abgegeben werden, ohne Ableitung durch das Substrat bzw. die Drähte. Dazu sind zusätzliche Kerben am Rand der Elemente vorgesehen, welche die Sensorfläche eingrenzen. Weiterhin sollen die Zuleitungen so dimensioniert werden, dass es zu keiner Wärmeableitung (zu dick) oder Wärmeerzeugung (zu dünn) kommt.

Tabelle 3: Spezifikation der miniaturisierten Temperaturelemente für den TAGS

Sensortyp:	Temperatursensor gleichzeitig als Heizer verwendbar (Pt Meander)
Dimensionen:	1 mm x 8 mm (möglichst dünnes Substrat) 16x16 Elemente für den Gittersensor notwendig
Widerstandsgröße:	min. 100 Ω idealerweise 1000 Ω bei 0 °C → Genauigkeit 10 %
Temperaturbereich:	0 bis 200 °C (idealerweise bis 300 °C)
Druck:	16 bar bei 200 °C (idealerweise bis ca. 70 bar bei 300 °C)
Eigenschaften:	<ul style="list-style-type: none"> • resistent gegen Wasser/Wasserdampf bei Sättigungsdruck • keramisches Substrat (bspw. Al₂O₃) • leichter Einbau in Gittersensor • Lötbarkeit der Pads • elektrisch isoliert gegenüber Medium • geringer Einfluss auf die Strömungseigenschaften • hohe Dynamik (Aufheizen/Abkühlen) • schlechte Wärmeleitung des Substrates • idealerweise geringe Wärmekapazität

Eine besondere Aufgabe muss die Isolation erfüllen. Diese muss das Sensorelement gegen das Umgebungsmedium elektrisch isolieren, einen möglichst geringen Wärmeleitwiderstand aufweisen (bzw. dünn sein) und gleichzeitig den harschen Umweltbedingungen standhalten. Da in den durchgeführten Materialuntersuchungen (siehe Teilaufgabe 1.2.1) keine der gewählten Isolationen den Bedingungen standhalten konnte, muss die Isolation zusätzlich mit dichten metallischen Schichten passiviert werden. Ein weiterer kritischer Punkt ist die elektrische Isolation des gesamten Sensoraufbaus (inkl. der Drähte), wobei die Sensorfläche für die bessere Wärmeableitung freigestellt werden muss (TAGS Isolation – Abbildung 16b).



- a) Anordnung der Sensorelemente in den Knotenpunkten eines GS zur Messung der Fließgeschwindigkeit in einem Rohr.
- b) Schematischer Aufbau des Sensorelements mit allen relevanten Bestandteilen.


Abbildung 16: Konzept der Pt-Elemente für die Anwendung zur Messung von Fluidgeschwindigkeiten in einem Rohr mit einem TAGS.

1.2.2.2 Technologieentwicklung und Sensorfertigung

Im Rahmen des Projekts wurde ein kompletter Ablauf für die Fertigung der Pt-Sensorelemente basierend auf einem Technologiemix von Dünn- und Dickschichttechniken für keramische Substrate erarbeitet. Der abschließende Prozessablauf ist grob vereinfacht in Tabelle 4 aufgeführt und basiert auf einer Vielzahl von Technologieexperimenten.

Tabelle 4: Wichtigste Schritte des erarbeiteten Technologieablaufs zur Fertigung der Pt-Sensorelemente auf keramischen Dünnschichtsubstraten für TAGS (Beispiel: 20 μm Meander, 750 Ω)

<p>1. Sensorschicht (Dünnschichtabscheidung \rightarrow Lift-Off)</p> <p>a) Cu ganzflächig b) strukturierte Haftmaske aufbringen c) Cu ätzen d) Haftvermittler – Cr – 50 nm – bedampft e) Leitschicht – Pt – 256 nm – bedampft f) Maske entfernen g) Cu rückätzen h) visuelle Inspektion/Widerstandsmessung</p>	
<p>2. Laserbohrung (\varnothing 350 μm)</p>	
<p>3. Padverstärkung (Dickschicht – 10 μm – Siebdruck – AgPd) 1x Drucken/Trocknen/Brennen (850 $^{\circ}\text{C}$)</p>	
<p>4. Isolation (Dickschicht – 20 μm – Siebdruck – Glass) 2x Drucken/Trocknen/Brennen (850 $^{\circ}\text{C}$)</p>	
<p>5. Passivierung (Dickschicht – 20 μm – Siebdr. – AgPt/Au) 2x Drucken/Trocknen/Brennen (850 $^{\circ}\text{C}$) oder</p>	

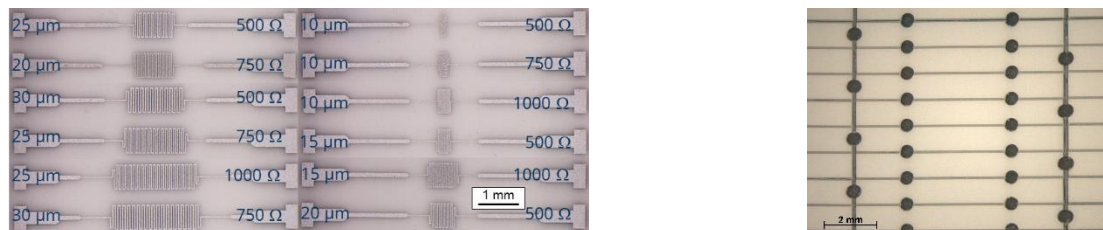
	Dünnschicht – 500 nm – Ti – bedampft	
6.	Wafersägen (100 µm Sägegraben)	

Als Basismaterial dienen für Dünnschichtabscheidungen geeignete keramische Substrate wie Al_2O_3 (99,6 % – Kyocera A-493 – Dicke 250 µm) und ZrO_2 (Y_2O_3 stabilisiert – Kerafol – Keraproject – Dicke 300 µm), entsprechend der Ergebnisse der Materialcharakterisierung. Für die Dünnschichtabscheidung der Pt-Meander wurde das am IAVT vorhandene Elektronenstrahlbedampfen gewählt (siehe Punkt 1 in Tabelle 4). Die Strukturierung wurde mit dem Lift-Off Verfahren durchgeführt, da Rückätzversuche ganzflächiger Pt-Schichten (mit Königswasser) nicht reproduzierbar waren. Beim Lift-Off traten diverse Probleme insbesondere bei der Belichtung, Entwicklung und dem Entfernen der Maske auf, welche aber mit einer Vielzahl von Technologieexperimenten im Rahmen des Projekts gelöst werden konnten

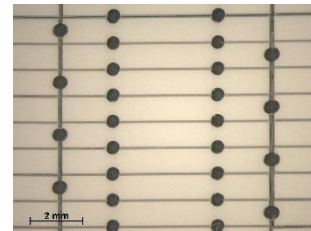
Initiale Tests zur Kompatibilität der Pt-Dünnschicht zu anschließenden Dickschichtprozessen bei 850 °C (nötig ab Punkt 3 in Tabelle 4) führten zu Rissen in der Pt-Schicht. Dieses Verhalten wurde durch die Anpassung der Haftvermittlerschicht ($\text{WTi} \rightarrow \text{Ti} \rightarrow \text{Cr}$), sowie die Vergrößerung der abzuscheidenden Schichtdicke (100 nm \rightarrow 250 nm) minimiert. Erwartungsgemäß sinkt der Widerstand der Pt-Schicht durch die initiale Wärmebehandlung bei 850 °C signifikant (Kornvergrößerung), wobei weitere Wärmebehandlungen bei 850 °C hingegen keine relevanten Veränderungen mehr hervorrufen.

Anhand dieser Erkenntnisse wurde ein erstes Layout für die Herstellung von Pt-Elementen erstellt, um die Fertigung unterschiedlicher Geometrien von 10 bis 50 µm (Linienabstand und Liniendicke, siehe Abbildung 17a) zu prüfen und die Widerstandsveränderung durch anschließende Hochtemperaturprozesse zu quantifizieren (ca. 1/3 des Widerstands nach Abscheidung). Bzgl. der Geometrien wurde deutlich, dass sich die Ausbeute, aufgrund von Partikelkontaminationen und Belichtungsfehlern mit abnehmender Strukturgröße verringert. Außerdem war die Substratgröße zu groß, so dass es zu abweichenden Widerstandswerten am Substratrand kommt. Weiterhin sind Strukturen größer als 30 µm für die Fertigung ungeeignet, da der finale Widerstandsbereich von 1 kΩ auf der vorhandenen Fläche (1 x 8 mm) nicht gefertigt werden kann, ohne die Schichtdicke zu stark zu verringern. Erste Versuche zur Kompatibilität zwischen der Padverstärkung (Punkt 3 Tabelle 4) und den darunterliegenden Pt-Pads zeigten, dass einige der vier eingesetzten Pasten nach dem Brennen zur Blasenbildung sowie zur verringerten Haftung neigen. Parallel dazu wurden erfolgreiche Bohr- und Sägetests der Keramiken durchgeführt (Tabelle 4 – Punkt 3/6 und Abbildung 17b), was aber die mechanische Festigkeit der Elemente deutlich verringert. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem ersten Layout wurden in einem weiten Layout umgesetzt, um gezielte Widerstandswerte (500 Ω, 750 Ω, 1000 Ω - siehe Abbildung 17a) zu erzeugen und den Gesamttechnologieablauf aller aufeinanderfolgenden Schritte (inkl. Isolation und Passivierung – Tabelle 4 Punkt 4/5) zu überprüfen. Hierbei wurde festgestellt, dass weitere Layoutanpassungen zur Maßhaltigkeit der Strukturen nach der Belichtung der Maske notwendig sind.

Weiterhin sind die nun ermittelten Widerstandswerte deutlich geringer als bei Layout 1, was vermutlich auf den Wechsel des Haftvermittlers von Ti auf Cr zurückzuführen ist.



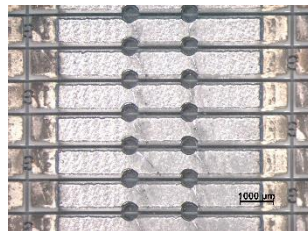
a) Vergleich der gefertigten Meanderdimensionen (Layout 2)



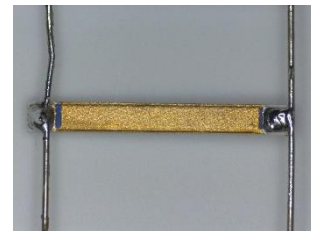
b) Bohr und Sägetest



c) Prozessierte Pt-Elemente mit Au-Passivierung (DiS)



d) Prozessierte Pt-Elemente mit Ti-Passivierung (DüS)



e) Gelötetes Pt-Element mit Drähten

Abbildung 17: Gefertigte Pt-Elemente mit unterschiedlichem Fertigungszustand (Layout 2).

Die Erkenntnisse aus der Prozessierung von Layout 2 sind in die Technologieabfolge und in ein verbessertes Layout eingeflossen. So müssen die Bohrungen vor den Dickschichtstrukturen gefertigt werden und im Layout bei Isolation und Passivierung ausgespart werden (vgl. Abbildung 17c/d). Weiterhin wurde das Layout der Dickschichtpassivierung optimiert, um beim Drucken keine Kurzschlüsse mit den Pads zu verursachen (Abbildung 17c). Einige Proben von Layout 2 wurden bei ersten Löttests mit Drähten versehen und als erste Funktionsmuster bereitgestellt (Abbildung 17e).

1.2.3 Wandbündige Sensoren für die Messung von Kondensationsfilmdicken an Rohrwandungen

1.2.3.1 Spezifikation und Konzept

Seitens der Projektpartner TUD-IAVT und TUD-PBM wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Spezifikationen erarbeitet. Als Basis für die Spezifikationen diente der final geplante Einsatz des fertigen Sensorelements in der COSMEA-Anlage bei TOPFLOW am HZDR (vgl. TP 3.3). Der Sensor basiert auf einer Impedanz- bzw. Leitfähigkeitsmessung zwischen einer Sendelektrode (Transmitter) und einer Empfangselektrode (Receiver). Sobald ein Flüssigkeitsfilm auf der Sensoroberfläche kondensiert, steigt die Leitfähigkeit proportional zur Filmdicke an, wodurch sich der am Receiver gemessene Stromfluss vergrößert. Von den beiden, in Tabelle 5 dargestellten, Sensorlayouts wurde die Doppelringanordnung (Typ B) favorisiert. In Simulationsrechnungen sowie experimentellen Untersuchungen seitens TUD-PBM/HZDR zeigte sich, dass diese spezielle Anordnung mit zwei Transmittern eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit sowie des Dynamikbereichs ermöglicht [21]. Das Sensorsubstrat muss isolierende Eigenschaften aufweisen und in der Wasser-Wasserdampfumgebung (bis 300 °C, 70 bar) bestehen. Anhand der Materialcharakterisierung besteht das Sensorsubstrat aus hochreiner Al₂O₃ Keramik. Besonders herausfordernd ist die Integration des Sensors in die

Edelstahlwand des Innenrohres (siehe Tabelle 3). Anspruchsvoll ist dabei das Fügeverfahren zwischen beiden Partnern, da es resistent zu den Umgebungsbedingungen sein muss und gleichzeitig das Innenrohr druckfest und hermetisch zum Kühlmedium abdichten hat.

Tabelle 5: Spezifikation der wandbündigen Leitfähigkeitssensoren für COSMEA/TOPFLOW

<p>Sensortyp:</p>	<p>Leitfähigkeitssensor für Impedanzmessungen</p> <p><u>2 mögliche Layouts:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fingeranordnung (Typ A) - Ringanordnung (Typ B) 		
<p>Dimensionen:</p>	<p>Möglichst wandbündiger Einbau in Doppelrohranordnung (COSMEA):</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="544 741 826 1016"> <p>Querschnitt Doppelrohr COSMEA</p> </div> <div data-bbox="986 696 1342 1016"> <p>Doppelringsensor (TYP B)</p> </div> </div> <p>Innenrohr: \varnothing 48,3 mm x 3,2 mm 1.4571</p> <p>Außenrohr: \varnothing 120 mm x 2,0 mm 3.7035</p> <p>Sensorgroße bei Ringanordnung min. 9,4 mm</p>		
<p>Temperatur:</p>	<p>20 bis 300 °C</p>	<p>Druck:</p>	<p>bis ca. 70 bar Sättigung</p>
<p>Eigenschaften:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • resistent gegen Wasser/Wasserdampf bei Sättigungsdruck • keramisches Substrat (bspw. Al_2O_3) • wandbündiger Einbau in Innenrohr • hermetische Dichtheit zwischen Innen- und Außenrohr (Druckunterschied) • Elektroden herausgeführt (elektrisch isoliert gegenüber Kühlmedium) • geringer Einfluss auf das Kondensationsverhalten • vergleichbare thermische Eigenschaften wie Edelstahl 		

Das zwischen den Partnern TUD-IAVT, TUD-PBM und TUD-WKET erarbeitete Konzept für die Sensorintegration im Innenrohr ist in Abbildung 18 dargestellt. Diese besteht aus dem Sensor, welcher konventionell mit Au-Elektroden auf Al_2O_3 Substraten in Dickschichttechnologie aufgebaut wird. Die Ringanordnung der zum heißen Medium gerichteten Sensorseite wird mit leitfähigen Durchkontaktierungen auf die Sensorrückseite umverdrahtet. Die Sensorscheibe wird in einer aus Edelstahl gefertigten Sensoraufnahme eingelötet. Durch diese Aufnahme sind in Al_2O_3 isolierte Ti-Drähte (TUD-WKET) eingebracht, die mit den Anschluss pads der Sensorscheibe verbunden werden. Die Verbindung zur Sensorscheibe und zur Sensoraufnahme soll idealerweise gleichzeitig mit der Verbindung zwischen Sensorscheibe und Sensoraufnahme gefügt werden. Dadurch soll eine zweifach hermetische Abdichtung zwischen dem Medium im Innenrohr und dem Kühlmedium im Außenrohr erzeugt und Kurzschlüsse

auf der Rückseite des Sensors durch das Kühlmedium vermieden werden. Die fertigen Sensoren (bestehend aus Sensorscheibe, Drahtelektroden und Sensoraufnahme) können nach dem Fügen individuell auf Dichtheit geprüft und elektrisch getestet werden. Für die abschließende Montage im Rohr ist eine Schraub- oder Schweißverbindung zur Sensoraufnahme angedacht.

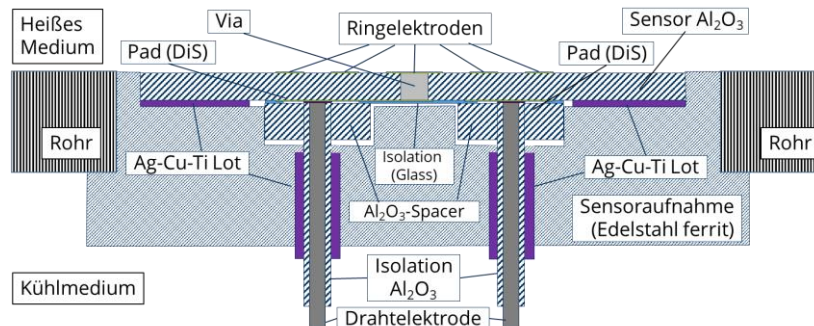


Abbildung 18: Konzept für die Rohrwandintegration der Sensoren (die Rohrwand wurde zur Vereinfachung als eben angenommen).

1.2.3.2 Technologieentwicklung und Sensorfertigung

Anhand des Konzepts wird klar, dass das von TUD-WKET entwickelte Fügeverfahren mit Aktivloten (TP 1.1 – Teilaufgabe 1.1.1) eine vielversprechende Methode zum hermetischen Fügen der Wandsensoren ist. Da das Löten mit Aktivlot (Ag-Cu-Ti) eine Vakuum- oder Ar-Umgebung bei Temperaturen bis 850 °C benötigt, sind diese Arbeiten gerätetechnisch am IAVT nicht durchführbar, weshalb das TUD-WKET außerplanmäßig als weiterer Partner im Arbeitspaket 1.2 für die kritischen Fügeversuche herangezogen wurde. Die Aufgabe des IAVT ist dabei die Bereitstellung der Probekörper, wie Sensoraufnahmen, Sensorplättchen sowie Fügehilfen. Weiterhin wurden für die Versuche durchweg ebene Al₂O₃-Substrate ohne Anpassung an die Rohrkrümmung verwendet.

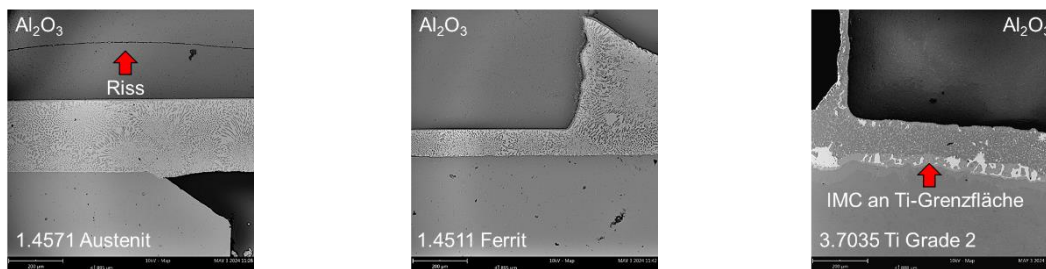


Abbildung 19: Schliffpräparation der mit Ag-Cu-Ti (CB4) gelöteten Fügezone zwischen Sensor (Al₂O₃) und verschiedenen Materialien der Sensoraufnahme.

Im ersten Schritt wurden vereinfachte Probekörper (Abbildung 20a, b) für initiale Fügeversuche hergestellt. Diese bestehen aus einem Rundstab aus Edelstahl und unstrukturierten, ebenen Keramikscheiben. Der Probendurchmesser entspricht speziellen Öffnungen (Ø 8 mm) im Autoklaven am HZDR, um anschließende Druck- und Lebensdauertests in Wasser/Wasserdampf durchzuführen. Als Lot wurden passgerechte Formteile aus einer Ag-Cu-Ti Aktivlotfolie (BrazeTec CB4 Saxonia, Dicke: 100 µm) lasergeschnitten. Die Ergebnisse der Gefüge-Untersuchung der initialen Lötversuche sind in Abbildung 19 dargestellt. Die austenitische Sensoraufnahme zeigt aufgrund des hohen Ausdehnungsunterschiedes (Austenit: 16-

19 ppm/K; Al₂O₃-Keramik: ca. 8,5 ppm/K) beim Lötten Risse in der Keramik. Der Ausdehnungsunterschied zwischen Titan und Keramik ist zwar nahezu vernachlässigbar (Ti: 8,9 ppm/K), aber die Grenzflächenreaktion mit dem Aktivlot erzeugt eine dicke intermetallische Grenzschicht, die u. U. zur Verringerung der Lebensdauer und Druckbelastung führt. Darüber hinaus ist das nachträgliche Schweißen der Ti-Sensoraufnahmen in das Edelstahlrohr vergleichsweise kompliziert. Am besten eignet sich der ferritische Edelstahl, dessen Ausdehnungskoeffizient (mit 10...11 ppm/K) zwischen der Keramik und dem austenitischen Edelstahl des Rohrs liegt und damit als Ausgleichswerkstoff zwischen den Fügepartnern fungiert.

Bei den Fügeversuchen wurde festgestellt, dass die Sensorscheiben beim Fügen verrutschen (Abbildung 20a), weshalb eine Fügehilfe (Abbildung 20c) hergestellt wurde. Weiterhin wurde die Sensoraufnahme für die Aufnahme und Kontaktierung einer Zentralelektrode abgeändert (vgl. Abbildung 20a, b mit c-e). Diese Aufnahme kann nach dem Fügen des Sensorteils und der Elektrode in ein ca. 200 mm langes Rohr gesteckt und verschweißt werden, um Tests im Autoklaven durchführen zu können. Als Elektrode kommt die vom TUD-WKET entwickelte Ti-Elektrode mit Al₂O₃-Mantel für elektrische Durchführungen durch Rohrwandungen zum Einsatz (siehe Teilaufgabe 1.1.2). Erste mit der Fügehilfe gefertigte Demonstratoren sind in Abbildung 20d-e dargestellt. Parallel dazu ist der Aufbau einer Sensormatrix für Messungen bei Raumtemperatur geplant (Abbildung 20f), um die Auflösung der finalen Sensoren bei Festfilmdicken zu bestimmen sowie notwendige Änderungen am Sensorlayout seitens TUD-PBM zu ermitteln.

Meilensteine

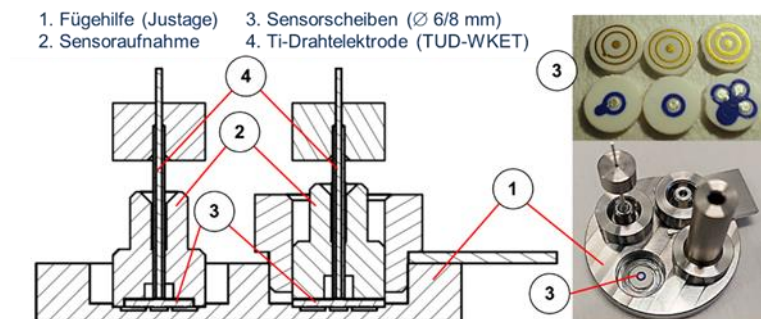
Der im Projekt geplante Meilenstein M1.2.1 – „Konzeptentwicklung für TAGS Wandler abgeschlossen“ konnte für beide Sensoraufbauten erreicht werden. Der Meilenstein M1.2.2 – „Funktionsmuster für TAGS-Wandler abgeschlossen“ wurde im Fall des TAGS verspätet abgeschlossen, aber für die wandbündigen Sensoren innerhalb des Projekts nicht vollständig erreicht. Die Entwicklung an beiden Sensortypen wurde, in Vorbereitung auf ein Nachfolgeprojekt, weitergeführt und eine Evaluation der Aufbauten steht noch aus.



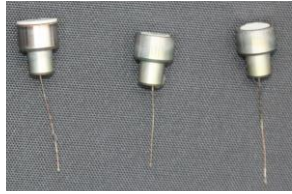
a) Ø 8 mm Sensorscheiben aufgesetzt



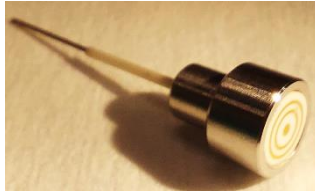
b) Ø 6 mm Sensorscheiben gesenkt



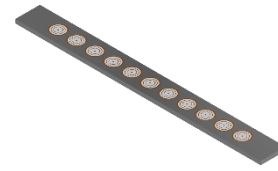
c) Fügehilfe mit geänderter Sensoraufnahme und gefertigte Sensorscheiben für den initialen Technologiedemonstrator für Autoklaventests



d) gelötete Sensoraufbauten



e) Technologiedemonstrator



f) Sensorarray für Funktionstest des Sensorlayouts bei Raumtemperatur (CAD)

Abbildung 20: Im Projekt durchgeführte Arbeiten an den Wandsensoren:
 a-b) initiale Fügetests; c-e) Fügehilfe und Sensoraufbauten für den Technologiedemonstrator (Autoklaventest);
 f) Aufbau eines Sensorarrays für Funktionstests des Sensorlayouts.

TP 1.3: Temperaturfeste Elektronik für Versuchsanlagen (TUD-IAVT, TUD-PBM)

Beschreibung:

Es wird eine Lösung für eine hochtemperaturtaugliche Frontend-Elektronik entwickelt. Hintergrund ist das Problem, dass bildgebende Sensoren viele druckfeste Einzeldurchführungen benötigen. Mit diesen steigen Kosten, Ausfallwahrscheinlichkeit und Wartungsaufwand. Es ist sinnvoll, grundlegende elektronische Komponenten (Analog und Mixed-Signal) von elektrischen Mess- und Bildgebungsverfahren in den Prozessraum zu verlegen und Basisfunktionen, wie Anregung, Vorverstärkung und vor allem ein Signalmultiplexing, dort zu realisieren. Weiterhin sind in manchen Versuchsanlagen Komponenten so groß (zum Beispiel INKA, THAI), dass die ungestörte Übertragung primärer Analogsignale nicht möglich ist. Hier ist eine Signalvorverstärkung nahe des Sensors im Behälter notwendig. Die Anforderungen an Temperaturfestigkeit sind in der Regel moderat (Ziel: 200 °C), da selbst bei Temperaturen bis 300 °C (PKL) in der Nähe von Komponentenwänden kältere Zonen geschaffen werden können. Der Fokus der Arbeiten liegt auf einer temperaturwechselfesten Aufbau- und Verbindungstechnik auf Basis kommerziell verfügbarer Hochtemperaturelektronik-Bausteine.

Für den Einsatz von hochtemperaturbeständiger Elektronik besteht eine wachsende Nachfrage, vor allem aus den Bereichen der Leistungselektronik sowie im Rahmen industrieller Anwendungen. In der nuklearen Energieversorgung dienen thermohydraulische Großversuchsanlagen beispielsweise dem Test von Komponenten und Systemen des Kühlkreislaufs und des Sicherheitsbehälters. Diese Anwendungen erfordern meist eine engmaschige und zuverlässige, sensorische Überwachung, um einen erfolgreichen und sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Im vorliegenden Fall geht es um das zeitliche und räumliche Monitoring einer Phasenverteilung (mindestens zwei Phasen) in der Hochtemperaturumgebung thermohydraulischer Versuchsanlagen (siehe bspw. Abbildung 21). Für die Prozessregelung bzw. Störfallerkennung ermöglichen Gittersensoren die Erfassung von Phasengehaltsfeldern, basierend auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. relativen Permittivität in den Kreuzungen eines

Drahtelektrodenarrays. Sie sind minimalinvasiv und liefern Daten mit hoher räumlicher ($\sim 3 \text{ mm}$) und zeitlicher ($\sim 10 \text{ kHz}$) Auflösung.

Aktuelle Lösungen platzieren die Elektronik zur Anregung und Verstärkung der Sensorsignale außerhalb des Kondensators, um Ausfälle aufgrund korrosiver Medien und Temperaturbeschränkungen konventioneller Elektronik zu vermeiden. Im skizzierten Einsatzfall (Abbildung 21) ist diese Vorgehensweise jedoch nicht akzeptabel, da die Signalstabilität bei meterlangen Zuleitungen aufgrund von sich überlagernden Einflussfaktoren (Temperatur, elektrische und magnetische Felder) nicht gewährleistet ist. Die dafür einsetzbare Elektronik sowie Sensorik muss daher den harschen Umweltbedingungen, wie hohe Temperaturen, hoher Druck, korrosive Medien und Vibrationen, standhalten. Diese Elektronik soll später am THAI zum Einsatz kommen (siehe TP 3.4).

1.3.1 Spezifikation der Hochtemperaturelektronik

Für die Umsetzung einer entsprechenden Hochtemperaturelektronik mussten einerseits die Umweltbedingungen und andererseits die Schaltungsspezifikation betrachtet werden. Abbildung 21 fasst die Anforderungen kompakt zusammen.

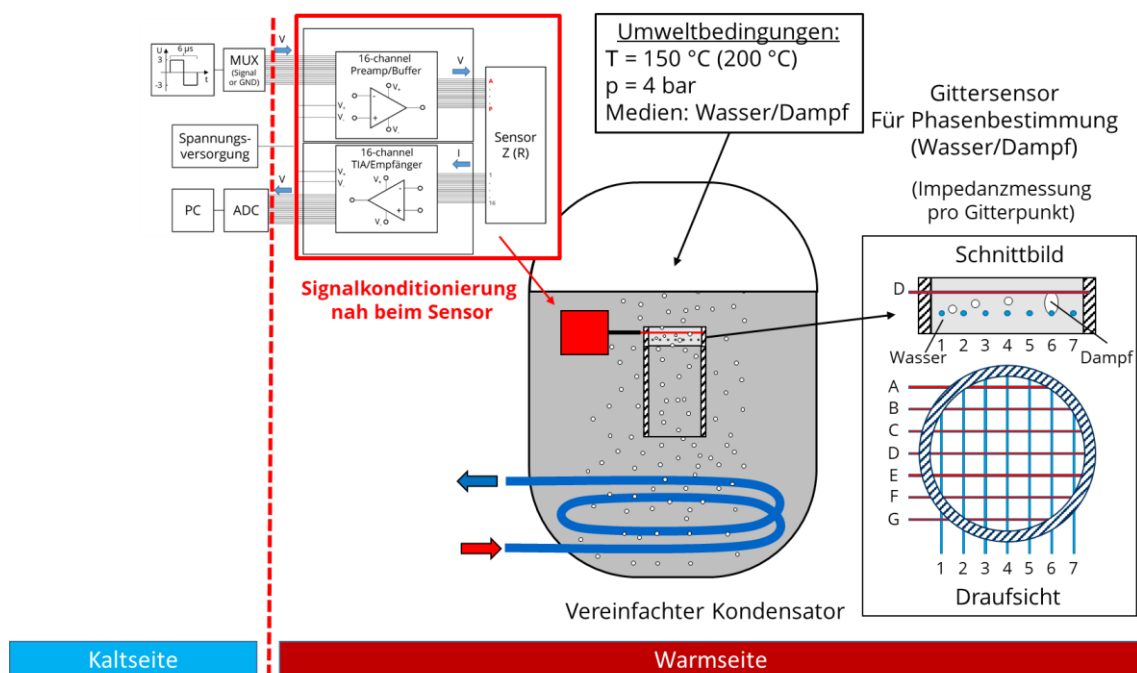


Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Messaufbaus für die Phasenanalyse durch Gittersensoren in einem Kondensator. Die Hochtemperaturelektronik, bestehend aus Transmitter (Buffer) und Receiver (Empfänger), ist dabei sensornah, d.h. direkt im Kondensator, untergebracht.

Umweltbedingungen:

Für die am THAI geplanten Versuche (AP3) ist eine Temperatur- und Druckbeständigkeit der Elektronik von min. $150 \text{ }^\circ\text{C}$ und 0.4 MPa in Wasser-Wasserdampfumgebung gefordert. Konventionell erhältliche Si-basierte Hochtemperaturbauelemente (meist Si on Insulator) decken den geforderten Temperaturbereich von $150 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (ohne Kühlung) gut ab, sind aber in ihrer Verfügbarkeit und Funktionsvielfalt begrenzt. Nicht zu vernachlässigen sind aber auch

die Temperatureinflüsse auf die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit der Aufbau- und Verbindungstechnik (beschleunigte Alterung der Leiterplatte und Verbindungen). Die Drücke und die korrosiven Medien im Kondensator können mit einem effektiven hermetischen Gehäuse und angepasster Kabeldurchführung gehandhabt werden. Bei korrekter Umsetzung herrscht im Gehäuseinneren ein konstant atmosphärischer Druck gegenüber der Versuchsumgebung. Darüber hinaus können auch starke Vibrationen auftreten.

Schaltungsspezifikation:

Wie bereits weiter oben beschrieben, war im Projektzeitraum die Anwendung des neuen Systems in der THAI-Anlage beim Partner Becker Technologies vorgesehen. Die Anlage hat einen Designdruck von 14 bar und eine Designtemperatur von 180 °C. Die Experimente werden aber i. d. R. bei einem Maximaldruck von 4 bar gefahren, was einer Sättigungstemperatur von ca. 144 °C entspricht. Als Obergrenze wurde daher auf Basis dieser Vorbetrachtungen die finale Einsatzbedingung des Hochtemperaturteils der Elektronik auf 150 °C festgelegt.

Der Aufbau besteht aus einem Heiß- sowie aus einem Kaltbereich (siehe Abbildung 21). Im Kaltbereich befinden sich Signalanregung, Multiplexer, Spannungsversorgung sowie ADC und Rechner. Die Sende- und Empfängerschaltung befindet sich hingegen im Heißbereich.

Die Signalanregung soll gittersensortypisch über einen Signalgenerator erfolgen, welcher ein Rechtecksignal mit einer Amplitude von ± 3 V und einer Periodendauer von 6 μ s ausgibt. Daraus ergibt sich eine Betriebsfrequenz von ca. 166,66 kHz. Das Abtastintervall der Auswerteelektronik (Analog-Digital-Wandler – ADC) beträgt 3 μ s, weshalb sichergestellt werden muss, dass die zu fertigende Elektronik (insbesondere die slew rate des Operationsverstärker – OPA) das Signal nicht zu stark verzerrt. Der Abtastzeitpunkt ist bei 2,8 μ s nach der Flanke gefordert.

Der Gittersensor soll gemäß Spezifikation aus 16 Sende- und 16 Empfangselektroden bestehen, was insgesamt 256 Kreuzungs- bzw. Messpunkte ergibt. Der zu erwartende Messbereich des Gittersensors in den Kreuzungspunkten wird zwischen 1 k Ω (100 % Wasser) und 1 M Ω (100 % Wasserdampf) angenommen.

Das rechteckige Anregungssignal wird durch einen Multiplexer immer auf nur jeweils eine Sendeleitung gesetzt und alle anderen Leitungen liegen auf Masse. Das Signal wird dabei vor dem Sensor nochmals verstärkt und muss den entsprechenden Strom bereitstellen (Preamplifier/Buffer). Nach dem Sensor wird der zu messende Strom jeder Empfangsleitung durch einen Transimpedanzverstärker (TIA) gewandelt und verstärkt.

Eine Übertragung der Sende- und Empfangssignale sollte idealerweise in differentieller Form erfolgen, um äußere Störeinflüsse zu minimieren. Daher sind zusätzliche Differenztreiber im Heißbereich sowie eine Anpassung des bestehenden Messsystems im Kaltbereich notwendig.

Um ein Übersprechen der jeweiligen Schaltungsteile zu vermeiden, müssen die Buffer- und TIA-Schaltungen auf separaten Trägern untergebracht werden. Am Ausgang der Vorverstär-

ker müssen daher die 16 Sendedrähte des Gittersensors als Einzelleitungen angebunden werden. Die 16 Empfangsdrähte des Gittersensors müssen dementsprechend an die Eingänge der dazugehörigen TIA-Boards angeschlossen werden.

Weitere Forderungen umfassen den stabilen Schaltungsbetrieb über den gesamten Temperaturbereich hinweg. Daher ist die Temperaturabhängigkeit der passiven Bauelemente auf maximal 25 ppm/K beschränkt. Die Umsetzung soll auf Basis kommerziell verfügbarer Komponenten realisiert werden. Die Lebensdauer muss mindestens zwei Wochen (336 h), idealerweise jedoch 1.000 h, betragen.

1.3.2 Erarbeitung eines Aufbaukonzepts für temperaturfeste Elektronik

Der Einsatz herkömmlicher elektronischer Baugruppen ist limitiert auf den Temperaturbereich von 125 °C bis max. 150 °C. Das trifft im Allgemeinen auf Komponenten, Substrate sowie die Verbindungstechnik zu. Die Entwicklung und der Einsatz von hochoberflächiger Elektronik für Temperaturen ≥ 200 °C ist ein aufstrebendes Thema, das neue Materialien und Prozesse oder die Kombination von bestehenden Materialien und angepassten Prozessen erfordert. Die Arbeiten im Projekt konzentrierten sich auf die Verwendung kommerziell erhältlicher Komponenten und Verbindungstechnologien. In diesem Zusammenhang wurden etablierte Prozesse bewusst über die bekannten Grenzen hinaus getestet und neue Prozessabläufe erforscht.

Komponenten:

Die Auswahl von analogen Bauelementen für Einsatztemperaturen bis 210 °C (Si auf Isolator) ist begrenzt. Darüber hinaus finden sich zwar eine Reihe von Halbleitern (SiC, GaN, GaAs) und passiven Bauelementen, die den erhöhten Anforderungen gerecht werden; diese benötigen aber in der Regel eine angepasste Auf- und Verbindungstechnik (AVT).

Substrate:

Die Auswahl des Substrats hat einen erheblichen Einfluss auf die mögliche Verbindungstechnik, die Kosten, die Zuverlässigkeit und die Auswahl möglicher Komponenten. Die Substratmaterialien lassen sich grundsätzlich in organische und anorganische Basismaterialien unterteilen. Tabelle 6 zeigt eine Übersicht und einen Vergleich der wichtigsten physikalischen Eigenschaften der verfügbaren Substrate. Die Substrate sollten mit gängigen Verbindungstechnologien wie Weichlöten, Sintern und leitfähigen Klebstoffen kompatibel sein. Anorganische Basismaterialien sind in der Regel in Bezug auf ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften überlegen, haben aber Einschränkungen bei der Verarbeitung.

Organische Basismaterialien bilden die Grundlage für Leiterplatten und können in verschiedenen Ausführungen verwendet werden. Es gibt sie als starre, starr-flexible und flexible Ausführungen und ein Mehrlagenaufbau mit Durchkontaktierungen ist möglich. Bei Betriebstemperaturen zwischen 200 °C und 250 °C ist die Lebensdauer stark eingeschränkt. Polyimid-Lamine sind zwar für höhere Temperaturen geeignet, ihre dielektrischen Eigenschaften

nehmen jedoch bei Dauerbelastungen über 225 °C erheblich ab. Studien haben gezeigt, dass PTFE- und kohlenwasserstoffbasierte Lamine in Bezug auf Delaminationen, Schälfestigkeit, Oberflächenisolationswiderstand und Durchgangssicherheit besser für hohe Temperaturen geeignet sind.

Die häufig verwendeten Al₂O₃-Keramiken erfordern bspw. angepasste Pastensysteme zur Strukturierung und Funktionalisierung in Dickschichttechnik. Zudem ist die Verarbeitung von Mehrschichten und Durchkontaktierungen mit hohen Kosten verbunden. Dennoch ist die Dickschichttechnologie auf Al₂O₃ ein etabliertes und robustes Verfahren zur Herstellung keramikbasierter Substrate.

Tabelle 6: Überblick gängiger Substrate für den Aufbau von Verdrahtungsträgern

Typ	Bezeichnung	Max. Betriebstemperatur [°C]	Thermischer Ausdehnungskoeffizient [ppm/K]	Thermische Leitfähigkeit [W/mK]
anorganisch	Al ₂ O ₃	> 1500	6 – 8	20
	AlN	> 1600	2,6 – 4,5	150
	BeO	> 1800	5,4 – 9	230 – 325
	LTCC / HTCC	850 / 1500	4 – 7	2 – 20
organisch	FR4	130 – 160	12 – 18	< 0,2
	PTFE	230 – 260	10 – 25	< 0,3
	Polyimid	225	40 - 60	0,35
	Kohlenwasserstoff-Keramik	250	12 – 14	0,7

Die Auswahl richtete sich nach den in den Spezifikationen genannten Anforderungen sowie nach den technologischen Möglichkeiten. Um für zukünftige Aufgaben und Schaltungsträgerlayouts flexibel zu sein, wurden ein anorganisches (Ceramtec Rubalit® 708S / 96 % Al₂O₃) und ein organisches (Rogers RO4003 / Kohlenwasserstoff-Keramik-Laminat) Substrat ausgewählt. Die Auswahl der Pad-Metallisierung auf der Substratseite richtet sich weitgehend nach der Anschlussmetallisierung der zu verarbeitenden Bauteile.

Verbindungstechnologie:

Die max. Dauergebrauchstemperatur von normalen bleifreien Weichloten liegt bei ca. 150 °C. Optionale Hochtemperaturlote für spezielle Anwendungen gibt es auf Basis von Pb-Sn, Pb-Ag, Sn-Sb, Au-Sn, Au-Si und einigen anderen Legierungssystemen. Legierungen auf Au-Basis sind wegen ihrer Edelmetalleigenschaften vorteilhaft, jedoch sehr preisintensiv. Sn- und Bi-basierte Legierungen bilden spröde Lötstellen, was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt.

Die Verbindungstechniken für den dauerhaften Einsatz oberhalb 200 °C adressieren im Allgemeinen den Die-Attach, sprich die Verbindung des Si des Halbleiters zum Substrat. Hier finden sich vor allem Lösungen für das Silber- bzw. Kupfersintern, das Diffusionslöten sowie für den Einsatz von gold- bzw. bleihaltigen Lotpasten. Die entsprechende Anwendung dieser Optionen für Standardbauelemente im Bereich der Durchsteck- (THT) bzw. Oberflächenmon-

tage (SMT) ist nicht für industrielle Fertigungen qualifiziert und findet sich eher im akademischen Umfeld wieder.

Die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Verbindungstechniken umfassten das Weichlöten mit bleifreien Standard-Lötlegierungen als Referenz (Heraeus F645 SA30C5), den Einsatz von Innolot (Heraeus F645 Innolot®-89M3) und einer bleihaltigen Lötpaste (Heraeus DA5118 D / PbSn5Ag2.5) mit einer höheren Schmelztemperatur. Darüber hinaus wurde der Einsatz von drucklosem Silbersintern (Heraeus mAgic PE338) und leitfähigem Klebstoff (Duralco 124) untersucht. Die zugehörigen Prozessparameter fasst Tabelle 7 zusammen.

Tabelle 7: Überblick zu den gewählten Verbindungstechnologien und verbundene Prozessparameter

Verbindungswerkstoff	Vorbehandlung	Verbindungstechnik	Max. Temperatur [°C]	Zeitbedarf [min]
Sn96.5Ag3Cu0.5	-	Reflow-Löten (Konvektion)	245	8
Innolot	-	Reflow-Löten (Konvektion)	245	8
PbSn5Ag2.5	-	Reflow-Löten (Wärmeleitung)	390	12
Ag-Sinter (drucklos)	Vortrocknen 3 min @ 50 °C	Heizen (Konvektion)	250	45
Ag-Leitkleben	Vorhärten 4 h @ 125 °C	Heizen (Konvektion)	177	240

Der Meilenstein 1.3.1 „Konzeptentwicklung für temperaturfeste Elektronik abgeschlossen“ wurde somit erfolgreich erreicht.

1.3.3 Vorbereitung des Layouts und Auswahl der Bauelemente

Nachfolgend musste die Fragestellung der bevorzugten Montagetechnologie geklärt werden. Hier stehen prinzipiell die THT und SMT zur Auswahl, welche in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Bauelemente sowie der Verbindungstechnologien vereinbart werden müssen. Auf Basis der ermittelten Spezifikationen ergaben sich die Anforderungen für die Vorbereitung eines Schaltungslayouts und die Auswahl geeigneter Bauelemente. Diese Arbeiten wurden in enger Kooperation mit der Teletronic Rossendorf GmbH, als Hersteller der Gittersensorsysteme, durchgeführt. Das gesamte Hochtemperatursystem wurde als Ergänzungsbaugruppe zu einem „WMS200“ Messsystem von Teletronic konzipiert, über welches das HZDR verfügt. Die Schaltungen dazu sind in Abbildung 22a, c dargestellt.

Sender / Buffer-Schaltung:

Bei der Buffer-Schaltung handelt es sich grundsätzlich um einen Differenzverstärker (mit OPA-211 – Verstärkung 1), der die beiden Eingangsspannungen (eigentlich Signal und Masse) subtrahiert. Dieser wird als Puffer genutzt und bietet damit einen hohen Eingangswiderstand womit der Strom von der Signalquelle begrenzt wird. Die am Verstärkerausgang befindliche Gegentakt-B Endstufe (Bipolartransistoren) sorgt für den notwendigen Ausgangsstrom, der

nicht vom OPA bereitgestellt werden kann. Für die Spannungsversorgungen sind Pufferkapazitäten notwendig, um Spannungsschwankungen auf Grund der Strom-Wechselbelastung auszugleichen. Das Anregungssignal wird differentiell über eine Twisted-Pair Leitung mit 100 Ohm Wellenwiderstand an den Empfänger geführt.

Empfänger / TIA-Schaltung:

Es ist das Ziel, den Ausgangsstrom des Sensors zu verstärken, in eine Spannung zu wandeln und möglichst unverfälscht an den Eingang der Auswerteeinheit zu übertragen. Die Schaltung besteht somit im Wesentlichen aus zwei Teilen, einem Transimpedanzverstärker (TIA – OPA-211) und einem differentiellen Treiber (THS4521). Das Signal wird dementsprechend differentiell und damit weniger anfällig für externe Störungen zur Auswerteelektronik auf der Kaltseite übertragen.

Aktive Bauelemente:

Herkömmliche kommerziell verfügbare Elektronik auf Siliziumbasis (IC wie OPA oder THS) und regulärer AVT ist maximal bis zu einer Temperatur von 125 °C erhältlich. Dies liegt primär an der zunehmenden Ladungsträgerdichte, wodurch die Eigenleitung mit steigender Temperatur dominiert und die Dotierung zunehmend unwirksam wird. Es gibt jedoch hochtemperaturfähige Varianten auf Basis keramischer Trägerpackages, die bis zu einer Temperatur von 210 °C betrieben werden können. Die vorhergesagte Betriebslebensdauer ($\geq 1.000\text{h}$) in Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur basiert auf Zuverlässigkeitsmodellen, die die Elektromigration als den dominierenden Fehlermechanismus berücksichtigen.

Passive Bauelemente:

Für notwendige Widerstände fordert die Spezifikation nebst der Einsatztemperatur von 200 °C auf möglichst kommerzielle Bauelemente zurückzugreifen. Weiterhin wurde eine Temperaturabhängigkeit von maximal 25 ppm/K gefordert. Auf dem Markt verfügbare Widerstände in Dünnschichttechnik erfüllen diese Anforderungen, liegen als Chip-Bauelemente vor und verfügen meist über vergoldete Anschlüsse.

Für die Auswahl der Kondensatoren gelten ebenfalls die genannten Spezifikationen. Die Temperaturabhängigkeit der Kapazitäten wird durch den TCC-Wert beschrieben (TCC, engl. für (linear) Temperature Coefficient of Capacitance). Kapazitäten können auf verschiedene Arten klassifiziert werden. Keramikkondensatoren werden somit nach der max. Einsatztemperatur sowie der prozentualen Abweichung der Nennkapazität unterteilt. Verfügbare Kondensatoren im schaltungsrelevanten Bereich von 10 pF bis 1 μF liegen als Multi-Layer-Chip-Capacitors (MLCC) mit Toleranzen von $\pm 10\%$ vor. Die Anschlüsse liegen entweder mit Silber-Palladium oder Nickel-Zinn Terminierung vor.

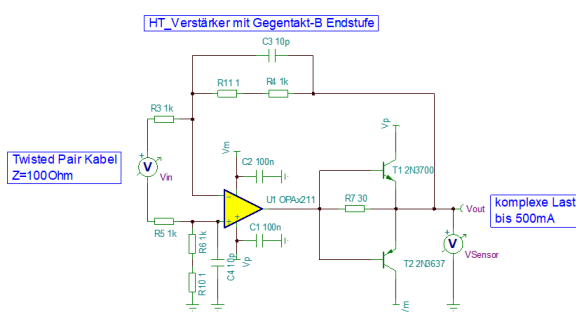
1.3.4 Herstellung der Substrate für Funktionsmuster

Im diesem Arbeitspaket wurden die Schaltungsentwürfe für ein 1-Kanalmuster simuliert, aufgebaut und getestet. Zur Überprüfung der Funktionalität wurde entschieden, den Aufbau

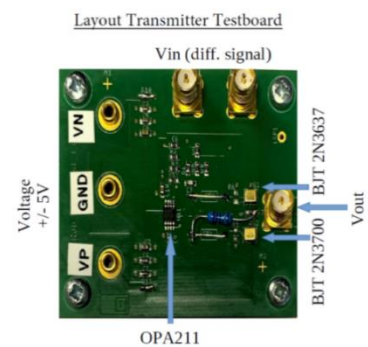
mit konventionellen Substraten und Bauelementen zu realisieren und zu testen (siehe Abbildung 22b,d).

Sowohl die Simulation der Schaltungen (Abbildung 22a,c) als auch die realisierten Testaufbauten mit konventioneller Elektronik (Abbildung 22b,d) zeigten, dass beide Baugruppen wie angedacht funktionieren. Basierend darauf wurde die gesamte Baugruppe als 16-Kanal System aufgebaut (Abbildung 22e), um die Funktion direkt an einem Gittersensor zu testen. Aus Effizienz und Kostengründen wurde, in Zusammenarbeit mit TUD-PBM, beschlossen, die Elektronik zunächst vollständig als Niedertemperaturversionen aufzubauen. Hierfür wurden die Hochtemperaturbauelemente durch äquivalente Typen für den Normaltemperaturbereich ersetzt.

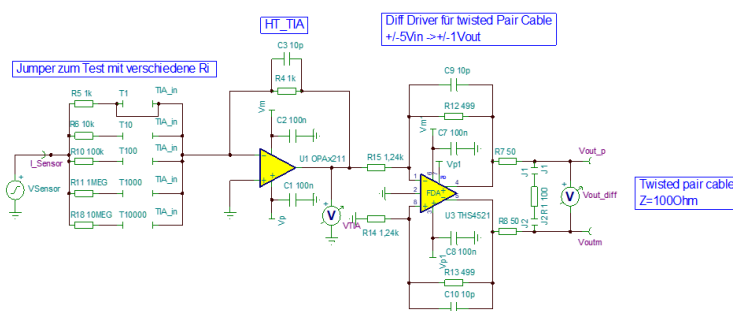
Die Schaltung wurde in Betrieb genommen und erfolgreich an einem 16x16 Gittersensor bei Raumtemperaturumgebung getestet. Für diesen Funktionsnachweis wurde als die Schnittstelle zur anschließenden Auswertelektronik (WireMeshSystem200) und der dazugehörigen Software im Außenauftrag eine Kopplungselektronik entworfen und erfolgreich getestet. Damit ist sichergestellt, dass sich die neue Elektronik problemlos in das vorhandene Messsystem einfügt und die gesamte Auswertestrecke funktioniert.



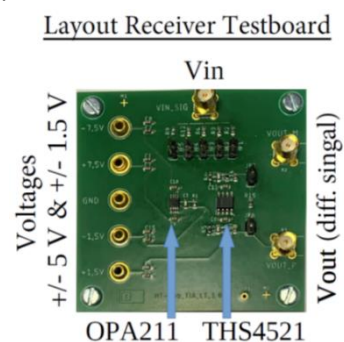
a) Schaltung des Transmitters (1-Kanal)



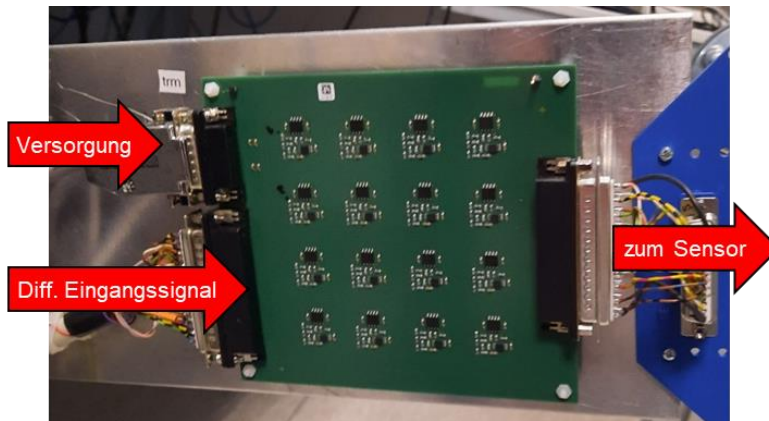
b) Realer Aufbau Transmitter



c) Schaltung des Receivers mit Sensorphantom am Eingang



d) Realer Aufbau Receiver (TIA)



e) Testaufbau für die 16-Kanal Senderbaugruppe (Transmitter)

Abbildung 22: Schematischer Aufbau der beiden Schaltungen (a,c). Weiterhin sind die 1-Kanal Funktionsmuster (b,d) und die 16-Kanal Realisierung des Transmitters (e) dargestellt.

1.3.5 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für temperaturfeste Elektronik

Die vorangegangenen Analysen haben gezeigt, dass für den Aufbau der Hochtemperaturvariante verschiedene Aufbautechnologien zur Verfügung stehen, die in erster Linie mit der Auswahl der Substrate definiert werden. Die Auswahl der Pad-Metallisierung auf der Substratseite ist von der Anschlussmetallisierung der Bauelemente und der verfügbaren Verbindungstechnik abhängig. Da für Letztere keine gesicherten Erkenntnisse zur Lebensdauer im Temperaturbereich bis 200 °C vorliegen bedurfte es einer eingehenden Untersuchung ausgewählter AVT-Variationen aus AP 1.3.2. Die Auswahl an verfügbaren, hochtemperaturtauglichen Bauelementen (bis 200 °C) ist begrenzt, weshalb folgende zwei Multi Layer Chip Capacitors (MLCC) aus der Schaltung als Testobjekte gewählt wurden:

- MLCC1206 / 100 nF / 10% / AgPd-Finish
- MLCC0603 / 15 pF / 5% / NiSn-Finish

Die Aufbauvarianten wurden entsprechend Tabelle 8 gefertigt. Das Layout der ZV-Testboards wurde so entworfen, dass die elektrische und mechanische Charakterisierung (Schertest) zu jedem Testzeitpunkt möglich ist und darüber hinaus auch Proben für Schlifffanalysen vorhanden sind (siehe Abbildung 23).

Tabelle 8: Übersicht der Aufbauvarianten für die Lebensdauerersuche bei 200 °C

ZV-Testboard	Substrat	Oberflächen-Metallisierung	Verbindungswerkstoff
DS01	Al ₂ O ₃ (Rubalit® 708S)	AgPd (Heraeus C2030)	Sn96.5Ag3Cu0.5
DS02			Innolot
DS03			PbSn5Ag2.5
DS04			Ag-Sintern (drucklos)
DS05			Ag-Adhesive
LP01	Kohlenwasserstoff- Keramik (RO4003)	ENIG	Sn96.5Ag3Cu0.5
LP02			Innolot
LP03			PbSn5Ag2.5
LP04		iAg	Ag-Sintern (drucklos)
LP05			Ag-Adhesive

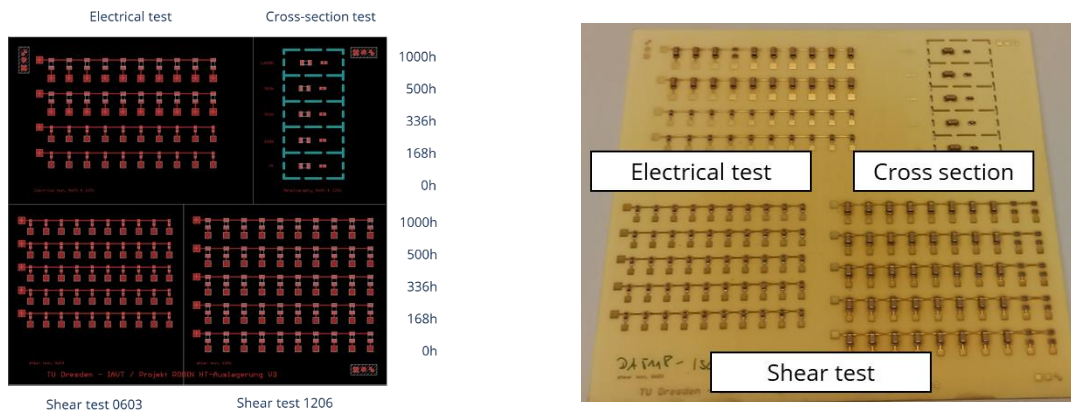


Abbildung 23: Layout und realer Aufbau eines ZV-Testboards.

1.3.6 Charakterisierung der AVT (PFA und zerstörungsfreie Prüfung)

Nach der Fertigung:

Der elektrische Test nach der Fertigung der ZV-Testboards zeigte eine gute Ausbeute. Es gab lediglich für einzelne Baugruppen eine Fehlerhäufung (DS4, DS5), die jedoch überwiegend auf den Herstellprozess zurückgeführt werden konnte. Eine weitere Häufung von Ausfällen wurde bei DS03 und LP03 in Form von sogenannten Tombstones des MLCC0603 festgestellt. Dieses Lötproblem ist auf den experimentellen Lötprozess zurückzuführen, da die Lötpaste primär für Die-Attach-Lötungen entwickelt wurde.

Die initialen Scherfestigkeiten zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von Bauelement, Substrat und Verbindungstechnik. Die gelöteten Bauelemente weisen generell höhere Werte im Bereich zwischen 10 und 20 MPa aus. Bei den MLCC0603-Bauteilen waren die ermittelten Scherfestigkeiten meist mit einem Pad-Lifting verbunden. Die gesinterten oder mit Leitleber bestückten Versuchsträger zeigen deutlich geringere Scherfestigkeiten. Wichtigste Erkenntnisse waren: MLCC0603 weist insgesamt höhere Scherfestigkeiten als MLCC1206 auf; Komponenten auf Leiterplatten mit ENIG-Finish erreichen höhere Scherfestigkeiten als die auf Keramik mit AgPd-Finish; Weichgelötete Komponenten auf Leiterplattensubstraten (LP01 bis LP03) zeigen die höchsten initialen Scherfestigkeiten (siehe Abbildung 24).

Nach 1.000 h Auslagerung bei 200 °C:

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Bauelemente und die Verbindungen eine Auslagerung von 1.000 h bei 200 °C prinzipiell überstehen. Mit steigender Belastung erhöhte sich jedoch die Anzahl von abgefallenen Bauelementen bei DS04, DS05 und LP03. Diese Testboards wurden bereits nach der Montage als unzureichend eingestuft.

Die Scherfestigkeitsanalyse nach isothermer Lagerung zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Kombinationen von Bauteil, Substrat und Verbindungstechnik. Die leiterplattenbasierten Versuchsträger zeigen im Allgemeinen höhere Scherfestigkeiten, wobei es einige deutliche Unterschiede zwischen der Kombination und der Bauteilmetallisierung und Verbindungstechnik gibt (siehe Abbildung 24). Die Lötlegierung Sn96,5Ag3Cu0,5 ist durch eine konstante

Abnahme der Scherfestigkeit gekennzeichnet, zeigte jedoch die höchsten Werte für den MLCC1206 auf LP01 und für das MLCC0603 auf DS01. Das bleihaltige Lot erreichte konstant niedrige Scherfestigkeiten für beide Komponenten auf Leiterplatten mit ENIG-Oberfläche. Das Innolot® zeichnete sich bei allen Kombinationen durch eine starke Abnahme der Scherfestigkeit aus. Im Gegensatz dazu zeigten die gesinterten oder mit leitfähigem Klebstoff bestückten Versuchsträger deutlich geringere Scherfestigkeiten, welche sich nach der Auslagerung kaum verändern. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsstudie sind im Detail in [22] veröffentlicht.

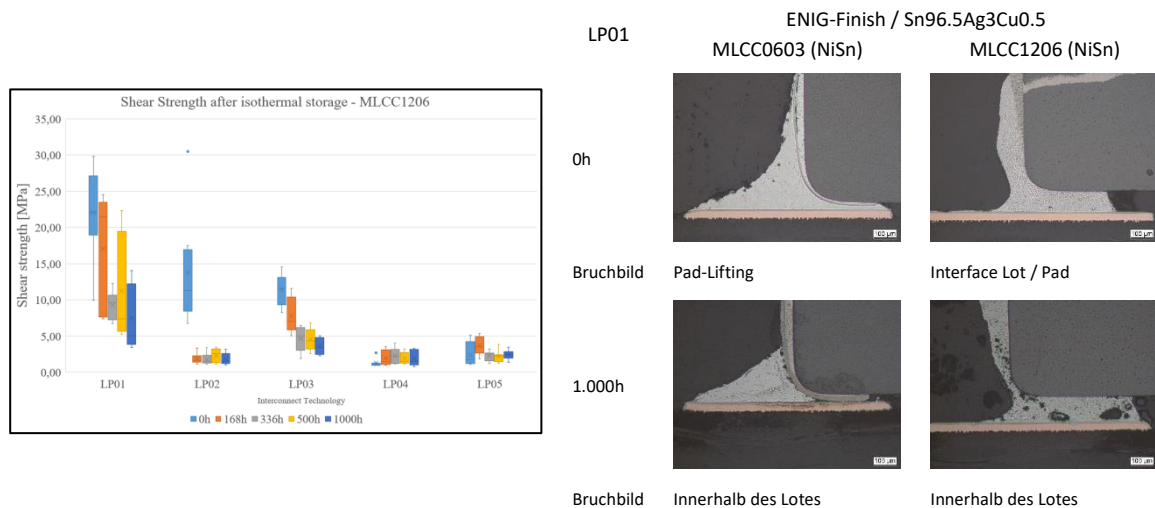


Abbildung 24: Ausgewählte Ergebnisse der Scherfestigkeits- und Schlibbildanalyse.

1.3.7 Auswertung der Ergebnisse und Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen

Die Projektergebnisse zeigen, dass das angestrebte Messverfahren für den 16x16-Kanal Gittersensor schaltungstechnisch umsetzbar ist. Eine entsprechende Raumtemperaturbaugruppe wurde erfolgreich an einem Gittersensor getestet. Zudem wurde eine erfolgversprechende AVT für die Hochtemperaturvariante erprobt. Der Meilenstein 1.3.2 „Funktionsmuster für temperaturfeste Elektronik aufgebaut und erprobt“ wurde somit zwar nicht vollumfänglich, aber überwiegend erreicht.

Aufgrund der Verfügbarkeit von Material und Technologie ist hier die Umsetzung mit bleifreien Lot auf keramikverstärkten Leiterplatten zu empfehlen. Die ausstehende Adaption der Schaltung in einer Hochtemperaturvariante konnte leider nicht innerhalb der Projektlaufzeit realisiert werden, wird aber im Nachfolgeprojekt ROBINIE angestrebt. Entsprechende Vorarbeiten, wie die Anpassung des Layouts sowie ein Gehäusekonzept zur hermetischen Kapselfung der Elektronik in der Messumgebung (bis max. 200 °C Wasser/Wasserdampf) wurden bereits in Zusammenarbeit zwischen TUD-IAVT und TUD-PBM erarbeitet (siehe Abbildung 25).

Der Gehäuseentwurf besteht aus einem 500 mm langen Rohrstück mit zwei Endflanschen und beinhaltet den inneren Baugruppenträger für je vier Transmitter- und Receiverbaugruppen, die druckfesten Einzeldurchführungen für die je 16 Sender- und Empfängerdrähte im unteren Deckel sowie vier Wellschläuche für die 32 symmetrischen Sender-

/Empfängersignale sowie die Spannungsversorgungsleitungen. Am unteren Ende wird der eigentliche Tauchgittersensor (TUD-PBM) montiert.

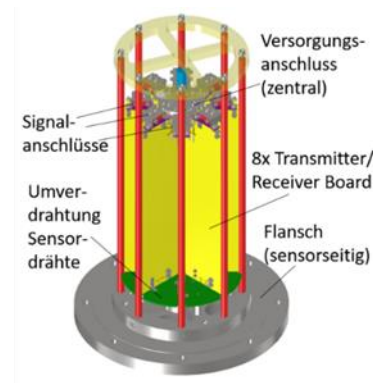
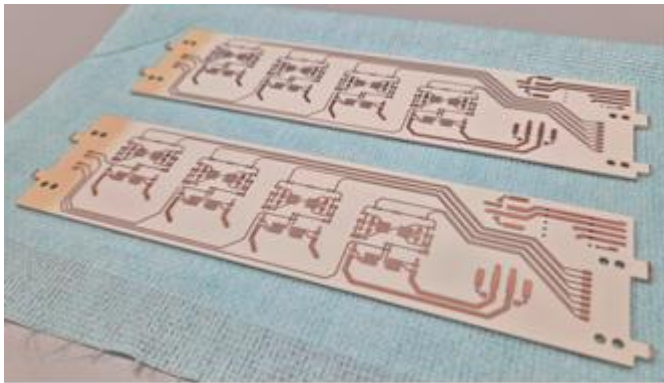


Abbildung 25: Leiterplatten-Layout (links) für die Integration in das hermetische Gehäuse (Entwurf -rechts).

Arbeitspaket 2: Entwicklung und Qualifizierung elektrischer Mess- und Bildgebungstechnik für Thermohydraulikversuchsanlagen

TP 2.1: Elektrische Impedanztomographie (FAU, FRAM)

Beschreibung:

Es wird ein bestehender EIT-Sensor bzgl. der Elektrodenstruktur und des elektronischen Schemas bzgl. Anregung, Signalmultiplexing und Elektrodenanordnung weiterentwickelt. An einem Messstand werden Daten eines Zweiphasen-Phantoms, bestehend aus Hohlräumen in einer leitfähigen Flüssigkeit, gewonnen. Die Platzierung der Hohlräume erfolgt mit Hilfe eines Roboterarms präzise und reproduzierbar, um somit eine große Datenmenge als Datenpool für das maschinelle Lernen zu schaffen. Entwickelt werden spezielle Datenvorverarbeitungsalgorithmen, um die Auswirkung von Störeinflüssen weiter zu unterdrücken oder herauszufiltern. Es werden schnelle Bildrekonstruktionsverfahren auf Basis deterministischer Ansätze sowie Algorithmen auf Basis maschinellen Lernens für zylindrische und axiale Geometrien (TP 2.2.) entwickelt und mit Hilfe der Phantomdaten sowie Gittersensordaten von TUD-PBM validiert. Auf Grundlage des KI-basierten Verfahrens werden nachfolgend EIT-Daten, die vom Kooperationspartner FRAM an einer großtechnischen Versuchsanlage gewonnen wurden, analysiert. Zielstellungen sind die 1) Bestimmung von Strömungsformen und Phasengeschwindigkeiten und die 2) Quantifizierung des Dampfgehalts.

Die Bearbeitung des Arbeitspaketes erfolgte beim Partner FAU (s. Abschlussbericht FAU).

TP 2.2: Axiale Bildgebung in Rohren (TUD-WKET, FAU, TUD-PBM)

Beschreibung:

Bildgebende Sensoren (EIT, WMS) liefern Schnittbilder des Strömungsquerschnitts. Daraus ergibt sich das Problem, dass axial veränderliche Strömungsmuster nicht dreidimensional erfasst werden können. Dies trifft zum Beispiel auf instabile Zweiphasenströmungen in Steigleitungen zu (GENEVA), bei denen es lokal bei Kondensation großer Dampfblasen zu Strömungsinversionen kommen kann. Dafür wird das Konzept eines „bildgebenden Rohres“ entwickelt. Elektroden eines EIT-Sensors bzw. Drähte eines Gittersensors werden in axialer Anordnung ausgeführt. Für diese neuwertige Sensortopologie werden Datenanalysemethoden gemeinsam mit TP 2.1 erarbeitet. Zielstellung ist die Ermöglichung der Untersuchung von Zweiphasenströmungsstrukturen mit bis zu 1 kHz Bildrate in langen Rohren, wie zum Beispiel Steigleitungen (GENEVA), sowie die Parameterextraktion für Strömungsform und Dampfgehalt.

Gittersensoren [24] sind mittlerweile weltweit anerkannte Sensoren zur Charakterisierung mehrphasiger Strömungen. Durch die Vielzahl an Kreuzungspunkten sowie die hohe zeitliche Abtastrate können Strömungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung visualisiert werden. Aus den primären Daten zum lokalen, instantanen Phasengehalt lassen sich im Anschluss physikalische Parameter wie Phasenverteilungen, Phasengrenzflächengeschwindigkeiten oder auch Blasengrößenverteilungen errechnen. Bislang wurden Gittersensoren jedoch mehrheitlich eingesetzt um über dem Querschnitt von Rohrströmungen orts aufgelöste Phaseninformationen zu gewinnen. Wollte man jedoch die Evolution einer Strömung entlang der Rohrachse beobachten, müssten die Sensoren i. d. R. an vielen verschiedenen axialen Positionen hinter Gaseinspeisern, Hindernissen, Rohrbögen o. ä. installiert werden, was einen hohen Umbauaufwand mit sich bringt. Um die Entwicklung und den Verlauf, z. B. von Großblasen oder Flüssigkeitspfropfen direkt in Echtzeit zu beobachten, sind jedoch zeitlich hoch aufgelöste Längsschnitte u. U. von höherem Informationsgehalt. Zu diesem Zweck wurde das Konzept eines axialen Gittersensors entwickelt, welcher zunächst in einer DN50 Testsektion validiert werden soll (vgl. Abbildung 26).

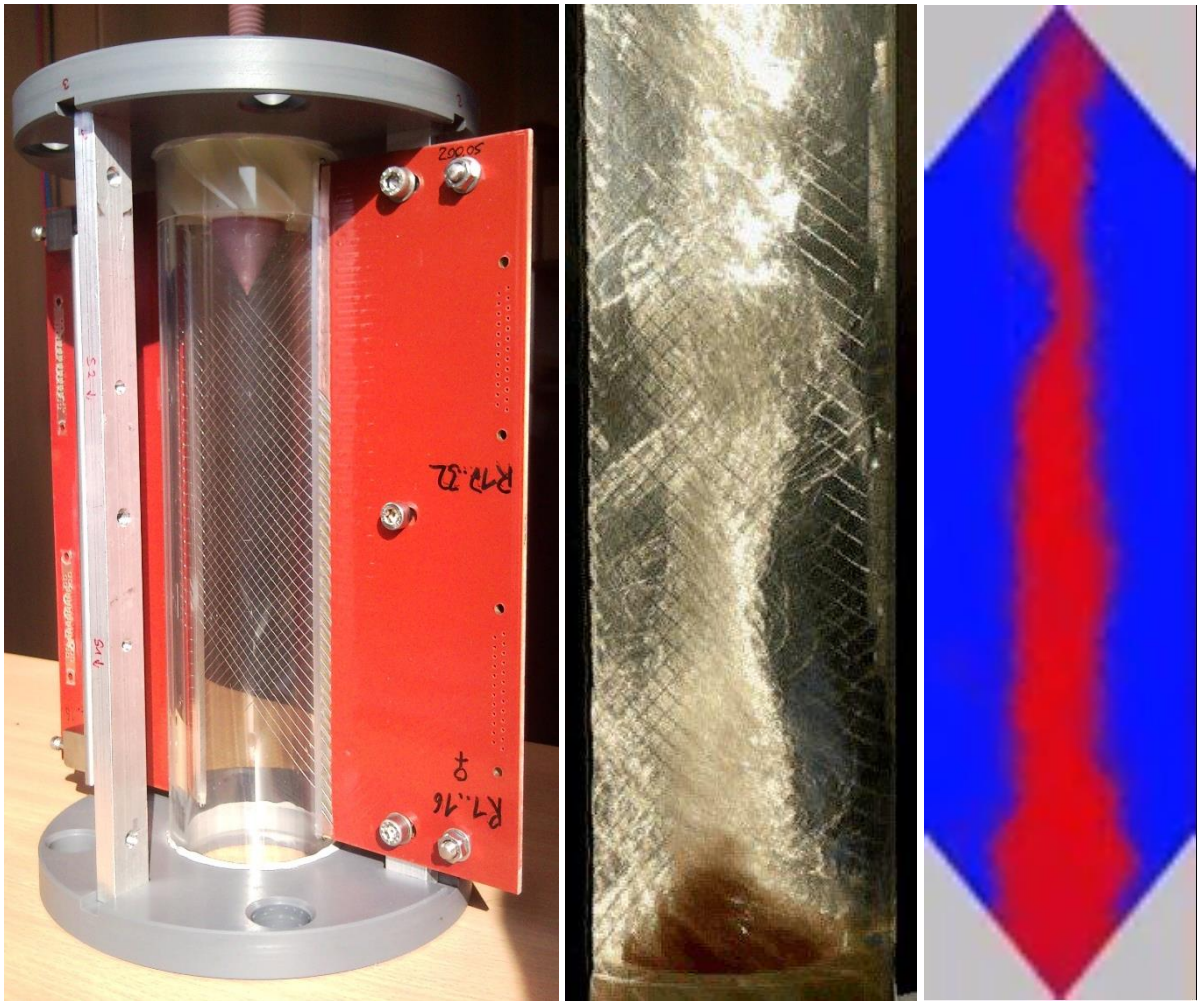


Abbildung 26: Prototyp eines axialen Gittersensors zur Visualisierung einer rotierenden Strömung hinter einem Swirl-Element, Sensorsegment (links), Foto der Swirl-Strömung (Mitte) und Gittersensoreinzelbild (rechts), Wasser in blau, Gasbläschen in rot.

Für den in AP2.2 geplanten Einsatz eines axialen Gittersensors wurde die räumliche Auflösung mit einem lateralen Drahtabstand von 10 mm bewusst grob gewählt, da zu einem späteren Zeitpunkt für den Einsatz in thermohydraulischen Experimenten eine druck- und temperaturfeste Durchführung (siehe AP 1.1.1) unerlässlich ist. Für den skizzierten Aufbau wäre ein axialer Abstand der druck- und temperaturfesten Durchführungen von 6,8 mm erforderlich. Mit den insgesamt 64 x 64 Drahtelektroden kann theoretisch ein Messbereich von 850 mm Länge abgedeckt werden (vgl. Abbildung 27). Kleine Gasblasen könnten hiermit jedoch nicht aufgelöst werden.

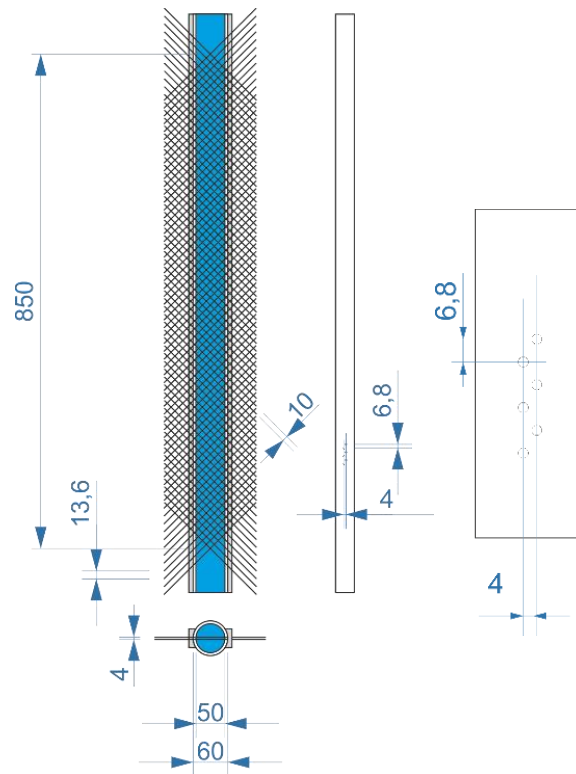


Abbildung 27: Konzept eines axialen Gittersensors für ein DN50 Rohr (links) und Detail der Durchführungsanordnung (rechts).

Eine noch engere Maschenweite hätte aber eine weitere Perforation der Rohrwand zur Folge, ist sicherheitstechnisch bedenklich und würde einer TÜV-Prüfung nicht standhalten. Da die Ortsauflösung ohnehin sehr grob wäre und zudem die GENEVA Anlage durch Umzug in ein neues Gebäude zur Projektlaufzeit nicht zur Verfügung stand, wurde das Konzept des axialen Gittersensors für das ROBIN Projekt verworfen. Stattdessen sollte ein auf elektrischer Impedanz-Tomographie basierendes Messsystem mit wandbündigen Sensoren (FAU) entworfen werden.

TP 2.3: TAGS zur orts- und zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung für Dampf/Wasser-Zweiphasenströmungen (TUD-PBM, BECKER)

Beschreibung:

Das Prinzip des Thermoanemometrie-Gittersensors (TAGS) wurde bereits für Gasströmungen in einem Vorgängervorhaben (BMBF 02NUK027E) umfassend erprobt. Dabei wurden auch theoretische Konzepte für die bidirektionale Gasgeschwindigkeitsmessung sowie eine Mehrkomponentengeschwindigkeitsmessung erarbeitet. Diese sollen in Zusammenarbeit mit TUD-IAVT technisch umgesetzt und erprobt werden. Weiterhin ist eine Qualifizierung des Sensorprinzips für Wasser als Fluid sehr wünschenswert. Dafür muss das Sensorkonzept hinsichtlich Querbefluss und Medienbeständigkeit untersucht werden. Zudem ist eine neue Kalibrierprozedur zu erarbeiten. Für Zweiphasen-

strömungen ist eine Miterfassung des Phasenindikators erforderlich. Dafür soll einerseits ein datenanalytischer Ansatz (Auswertung von Signalspitzen bei Gasblasenkontakt) sowie ein sensorischer Ansatz (getrennte Erfassung der Medienleitfähigkeit über Zweifrequenzmessung) untersucht werden. Es erfolgt der Aufbau eines Prototyps mit hoher Abtastrate (≥ 100 Hz).

Thermohydraulische Großversuchsanlagen sind für den Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung nach wie vor von entscheidender Bedeutung. Sie werden unter realistischen Bedingungen bei hohem Druck und bei hohen Temperaturen betrieben, um die Zweiphasenströmung von Dampf und Wasser, einschließlich Phasenwechsel, realitätsnah untersuchen zu können. Die Messsysteme für diese rauen Bedingungen sind jedoch begrenzt und stützen sich hauptsächlich auf Temperatur- und Drucksensoren und Einphasen-Durchflussmesser [23]. In weniger extremen Laborumgebungen werden nicht-invasive Techniken wie Videokameras, Gamma-Densitometrie und Computertomografie zur Strömungsanalyse eingesetzt. Der erstmals von et al. [24] eingeführte Gittersensor (WMS) bietet hochauflösende Querschnittsbilder der Phasenverteilungen von Gas- und Flüssigphasen in Zweiphasenströmungen. Mit Hilfe von Kreuzkorrelationsalgorithmen kann ein Paar dieser Sensoren auch zur Berechnung von Grenzflächengeschwindigkeiten aus den WMS-Daten verwendet werden. Mit dieser Technik ist es jedoch nicht möglich, die Gas- oder Flüssigkeitsgeschwindigkeiten selbst zu messen, es sei denn, es werden Leitfähigkeitstracer verwendet, was in Versuchsanlagen oft unmöglich oder unpraktisch ist.

Zur Untersuchung einphasiger Fluidgeschwindigkeiten gibt es mehrere etablierte Methoden, wie Flügelradanemometer, die Ultraschallanemometrie [25] oder Systeme auf Differenzdruckbasis mit Blende oder Venturidüse. Alle diese Verfahren stören entweder das Strömungsfeld erheblich (Flügelrad, Blende) und/oder sind Prinzip bedingt nur einphasig einsetzbar, da z. B. mögliche Mehrfachreflexionen, z. B. an vielen Gasblasenoberflächen, die Messunsicherheit des Systems verstärken. Letzteres gilt auch für die Particle-Image-Velocimetry (PIV) und die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [26]. Zudem sind diese für zweiphasige Strömungsuntersuchungen sehr eingeschränkt, da ein optischer Zugang erforderlich ist und für dreidimensionale Strömungsfeldmessungen das System axial durchfahren werden muss.

Eine weitere etablierte Messtechnik zur Bestimmung der Phasenströmungsgeschwindigkeit ist die thermische Anemometrie, bei der ein selektiver Wärmeübergang von einem kleinen Sensor in ein Fluid genutzt wird, um die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids zu berechnen [27]. Bislang sind nur lokale Anemometriesensoren mit bis zu drei Geschwindigkeitsvektoren verfügbar. Außerdem können sie nur für einphasige Strömungsuntersuchungen eingesetzt werden. Ein erster Ansatz, diese Lücke zu schließen, wurde von Arlit et al. [28] vorgestellt, die einen so genannten thermischen Anemometrie-Gittersensor zur Messung von Dampfgeschwindigkeitsverteilungen zwischen einem elektrisch beheizten Brennstabbündel-Mock-up während der Verdampfung in der Versuchsanlage mit einem simulierten Modell eines Nass-

lagerbeckens präsentierten. Die Arbeit wurde durch Untersuchungen zur Austrocknung von Nasslagern motiviert, wie sie beim Reaktorunfall in Fukushima auftraten [29]. Der Sensor besteht aus einer Matrix von Anemometrie-Sensorelementen in einem Querschnitt und ermöglicht die verteilte Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in gasförmigen Medien. Arlit et al. implementierten die Betriebsart der Konstantspannungsanemometrie (CVA) und erweiterten die Datenerfassungselektronik um ein spezielles Multiplexing-Schema zur Bestimmung der Widerstandswerte in der Matrixstruktur. Dieser TAG-Sensor ist jedoch weiterhin nur für einphasige Strömungsuntersuchungen geeignet. Der Grund dafür ist hauptsächlich die angewandte konstante Heizleistung, die die in das Fluid zu übertragende Wärmemenge begrenzt. Dies ist ein Problem, da gasförmige Medien eine wesentlich geringere Wärmeübertragungsfähigkeit aufweisen als Flüssigkeiten.

Ziel des Arbeitspaketes war es daher, das Prinzip des TAGS so weiterzuentwickeln, dass auch in zweiphasigen Strömungen die lokalen Fluidgeschwindigkeiten in thermohydraulischen Großversuchsanlagen räumlich aufgelöst mit bis zu 4 bar Druck bei Sättigungstemperaturen bestimmbar sind. Der neuartige zweiphasige TAGS zur Messung von Phase und Geschwindigkeit in zweiphasigen Medien soll folgende Eigenschaften aufweisen:

- wasserdicht,
- einsetzbar unter erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck (bis zu 150 °C / 4 bar),
- Unterscheidung der Strömungsrichtung,
- hohe zeitliche Abtastrate (≥ 100 Hz).

2.3.1 Grundkonzept für zweiphasig einsetzbares Thermisches Anemometer

Im Gegensatz zu den bisher erprobten TAGS-Systemen soll das neu zu entwickelnde System in einer zweiphasigen Strömung eingesetzt werden und die Geschwindigkeitskomponenten möglichst phasenaufgelöst erfassen. Da die Wärmeübergangskoeffizienten von Dampf und Wasser jedoch sehr unterschiedlich sind, muss ein komplett neuer elektronischer Ansatz gefunden werden, um zum einen die Sensoren (aus AP 1.2.1) im Gas nicht zu überhitzen und zum anderen eine genügende Empfindlichkeit in der Flüssigphase zu garantieren. Dafür wurde ein neues Konzept auf Basis der thermischen Transienten-Methode (TTM) entwickelt (vgl. Abbildung 28).

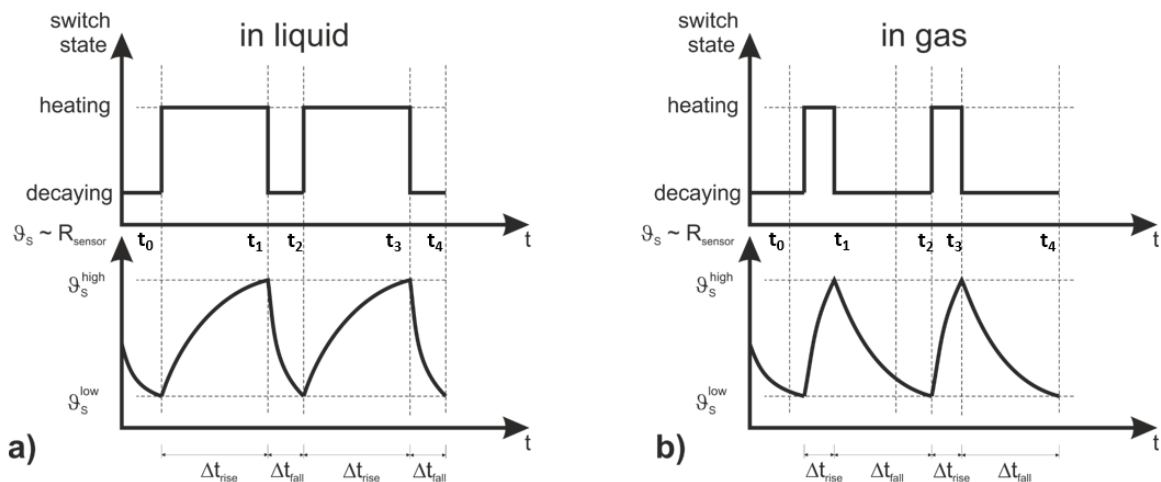


Abbildung 28: Messprinzip der thermischen Transienten-Methode (TTM). Temperaturzyklus eines selbstgeregelten beheizten und abgekühlten Sensors in a) Flüssigkeits- und b) Gasströmen.

Das Messprinzip basiert auf den stark unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlzeiten der Sensorelemente in Gasen bzw. Flüssigkeiten infolge der großen Unterschiede in den Wärmeübergangskoeffizienten. Lässt man das System zwischen zwei definierten Zuständen (Temperatur-Niveaus) selbständig schwingen, so sind die Aufheiz- und Abkühlzeiten zum Erreichen der beiden Schwellen ein Maß für die Mediengeschwindigkeit. Da sich Zeiten dank extrem schneller Prozessoren sehr leicht und präzise messen lassen, ist eine hohe Genauigkeit auch bei geringen Schwellwertunterschieden zu erwarten, was hohe zeitliche Abtastraten verspricht. Die matrixförmige Verschaltung nach dem Gittersensorprinzip, also ($M \times N$) örtliche Abtastpunkte mit M Transmitter- und N Empfängerkanälen ist für dieses Messprinzip jedoch äußerst komplex. Aus diesem Grund wurden zunächst theoretische Vorbetrachtungen und experimentelle Untersuchungen an einer einkanaligen Geometrie durchgeführt.

Das Betriebsverfahren des Sensors umfasst wie bereits beschrieben verschiedene Aufheiz- und Abklingphasen, die durch eine bestimmte Anstiegszeit Δt_{rise} und eine bestimmte Abfallzeit Δt_{fall} seines Temperaturverhaltens gekennzeichnet sind. Die Prinzipskizze eines Einkanal-Anemometers ist in Abbildung 29a dargestellt. Das Diagramm in Abbildung 29b veranschaulicht den Spannungsabfall und die Selbstregulierung der Spannung über dem thermischen Sensor. Die vereinfachte Elektronik besteht aus einer Spannungsquelle U_e , einem Widerstandssensor, einem Heiz- und Abklingwiderstandspaar, einem Schalter, zwei Komparatoren mit vordefinierten oberen (U_{decay}) und unteren (U_{heat}) Schwellenwerten, einem RS-Flip-Flop und einem Hochgeschwindigkeitszähler zur Messung der Heiz- und Abklingzeiten, die von einem Datenerfassungsgerät (z. B. einem PC) aufgezeichnet werden.

Wenn der Sensor mit einer Quellspannung U_e versorgt wird, beträgt die Spannung über dem Sensor zunächst U_1 , durch den erhöhten Stromfluss durch den kleineren Heizwiderstand steigt die Spannung R_{heat} allmählich an (s. Spannungsteilergleichung in Abbildung 29b), dies ist die Aufheizphase. Die Komparatoren spielen bei diesem Prozess eine zentrale Rolle, indem

sie die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers $U_S(t)$ - die der Sensortemperatur entspricht - kontinuierlich mit dem unteren (U_{heat}) und oberen (U_{decay}) Schwellwert vergleichen. Wenn die Ausgangsspannung $U_S(t)$ den Wert U_{decay} übersteigt, wird das RS-Flip-Flop ausgelöst und schaltet sofort den Widerstand von R_{heat} auf R_{decay} um. Dieser Übergang reduziert effektiv die Spannung über dem Sensor von U_2 auf U_3 und beginnt dann von U_3 auf U_4 abzufallen (Abklingphase), da die Heizleistung aufgrund eines viel höheren Shunt-Widerstands R_{decay} kleiner ist als die konvektive Wärmeübertragung. Die Abklingphase dauert an, bis der Spannungswert $U_S(t)$ den unteren Schwellwert U_{heat} erreicht. Dann setzt der zweite Komparator das RS-Flip-Flop zurück, wodurch der niedrigere Widerstand (R_{heat}) wiederhergestellt wird. Die Spannung am Sensor steigt von U_4 auf U_5 an und der Zyklus wiederholt sich.

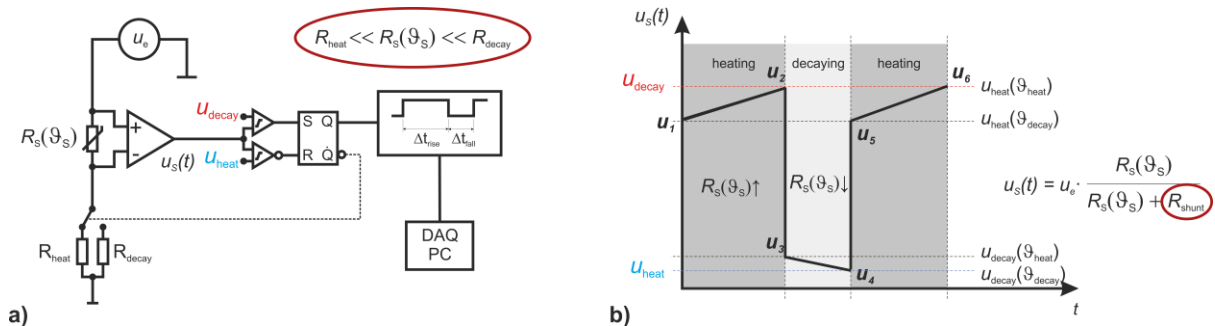


Abbildung 29: a) Prinzipskizze eines einkanaligen TTA und
b) das entsprechende Verfahren zur Selbstregulierung von Temperatur und Spannung.

Ein detaillierteres Diagramm der Schaltzustände der Sensortemperatur in Flüssigkeit und Gas ist in Abbildung 28 dargestellt. Aufgrund des hohen Wärmeübergangs in der Flüssigkeit ist die Aufheizzeit des Sensors länger als die Abklingzeit. Bei einer Gasströmung hingegen ist die Aufheizung des Sensors (t_2 bis t_3) schneller als die Abklingzeit (t_1 bis t_2). Der geringere Wärmeübergangskoeffizient von Gas führt zu einer schnelleren Anstiegszeit Δt_{rise} des Sensors im Vergleich zu Flüssigkeiten. Umgekehrt ist die Abklingzeit Δt_{fall} bei Gas aufgrund des geringeren Wärmeübergangskoeffizienten langsamer. Die Unterschiede in den Aufheiz- und Abklingzeiten zwischen Flüssigkeit und Gas sind auf die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten zurückzuführen. Diese Varianz in den Temperaturreaktionszeiten der Sensoren ermöglicht eine Unterscheidung zwischen den Phasen in Zweiphasenströmungsszenarien.

2.3.2 Theoretische Analysen, Wärmebilanz der TTA

Der Widerstand des Sensorelements eines Anemometers hängt direkt von seiner Temperatur ab. Die Beziehung zwischen dem Widerstand R_s und der Temperatur des Sensors ϑ_s wird durch Gleichung 1 beschrieben. Diese lineare Annäherung ist für einen begrenzten Bereich von Temperaturänderungen gültig. Für größere Bereiche, z. B. 0...800 °C, werden Polynome höherer Ordnung verwendet.

$$R_s = R_r [1 + \alpha_r (\vartheta_s - \vartheta_r)] \quad (1)$$

Dabei ist R_r der Referenzwiderstand bei dessen Referenztemperatur ϑ_r und α_r der Temperaturkoeffizient des Sensormaterials. Der Temperaturkoeffizient ist die Rate der Wärmeübertragung zwischen seiner Oberfläche und der umgebenden Flüssigkeit, die von verschiedenen Parametern der Flüssigkeit beeinflusst wird. Wenn der Sensor mit einer elektrischen Spannung U versorgt wird, erwärmt sich das Sensormaterial aufgrund des Ohmschen Gesetzes, und die Wärme wird vom Sensor an das Fluid übertragen. Die übertragene Wärmemenge hängt von den Strömungsparametern wie dem Wärmeübergangskoeffizienten, der Strömungsgeschwindigkeit und natürlich von der zugeführten Heizleistung ab.

Im eingeschwungenen Gleichgewichtszustand gilt dabei die folgende Gleichgewichtsbeziehung:

$$0 = P_{El} - \dot{Q}_k - \dot{Q}_l - \dot{Q}_s \quad (2)$$

mit der eingetragenen elektrischen Heizleistung $P_{El} = U_h \cdot I = R_s \cdot I^2 = \frac{U_h^2}{R_s}$, welche sich über dem Sensorwiderstand R_s durch Anlegen einer Heizspannung U_h einstellt, dem konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_k , dem Wärmestrom durch Leitung (zu den Anschlusselektroden) \dot{Q}_l und dem Wärmestrom durch Abstrahlung \dot{Q}_s .

Bei der thermischen Transienten-Methode (TTA) handelt es sich aber gerade nicht um den eingeschwungenen Zustand, sondern um eine zeitlich verlaufende Temperaturänderung des Sensorelements mit dem Gradienten der Sensortemperatur $\dot{\vartheta}$.

Unter Vernachlässigung der Wärmeverluste durch Strahlung (zu geringe Temperatur) und Wärmeleitung (Minimierung durch Sensorgeometrie vgl. AP1.2) reduziert sich die Leistungsbilanzgleichung (2) des Systems auf die Differenz aus eingetragener elektrischer Heizleistung P und der konvektiv abgegebenen Wärmeenergie \dot{Q} auf der einen und der Rate der Energieänderung innerhalb des Systems durch Temperaturänderung des Sensorelements.

$$P - \dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \dot{\vartheta} \quad (3)$$

mit der Masse des Sensors m , der spezifischen Wärmekapazität c_p des Sensors und den zeitlichen Gradienten der Sensortemperatur $\dot{\vartheta}$.

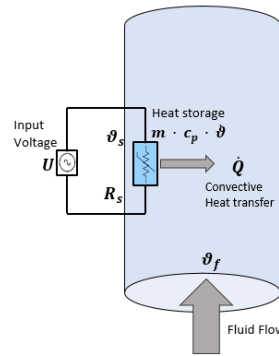


Abbildung 30 : Schematische Darstellung der Wärmebilanz eines thermischen Anemometersensors in einer Fluidströmung.

Mit $P = \frac{U^2}{R_s}$ und $\dot{Q} = h \cdot A \cdot (\vartheta_s - \vartheta_f)$ und unter der Annahme, dass R_s zeitinvariant ist (was innerhalb eines kleinen Temperaturbereichs zutrifft), kann die Wärmebilanzgleichung (3) wie folgt geschrieben werden

$$m \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta_s}{dt} = \frac{U^2}{R_s} - h \cdot A \cdot (\vartheta_s(t) - \vartheta_f), \quad (4)$$

mit der angelegten elektrischen Spannung U , dem Sensorwiderstand R_s , dem Wärmeübergangskoeffizienten h , der Sensoroberfläche A , der Sensorelementtemperatur ϑ_s und der Flüssigkeitstemperatur ϑ_f .

Durch Lösen der obigen Differentialgleichung erster Ordnung ergibt sich die Lösung für den Einschwingvorgang der Sensortemperatur $\vartheta_s(t)$ für $t = 0$ s und $\vartheta_s(t = 0) = \vartheta_f$ wie folgt

$$\vartheta_s(t) = \frac{U^2}{R_s \cdot h \cdot A} \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t}\right) + \vartheta_f. \quad (5)$$

Und die Lösung für $\vartheta_s(t)$ für $t = 0$ s und $\vartheta_s(t = 0) \neq \vartheta_f$ ergibt sich zu

$$\vartheta_s(t) = \vartheta_f + \frac{U^2}{R_s \cdot h \cdot A} \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t}\right) + (\vartheta_s(t) - \vartheta_f) \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t}, \quad (6)$$

In Gleichung (6)

- steht ϑ_f für die Anfangstemperatur der Flüssigkeit, sie wird als konstant angenommen.
- Der zweite Term $\frac{U^2}{R_s \cdot h \cdot A} \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t}\right)$ stellt den Beitrag der Leistungsaufnahme zum Temperaturentrend des Sensors dar. Die Leistungsaufnahme ist direkt proportional zur Temperatur des Sensors. Dieser Term definiert den Temperaturanstieg des Sensors als Funktion der Heizleistung und der Wärmespeicherung. Er ist 0 für $t = 0$ und nimmt mit der Zeit zu, bis er für unendlich lange Zeit einen stationären Zustand erreicht.

- Der dritte Term $(\vartheta_s(t) - \vartheta_f) \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t}$ steht für die Anpassung der Sensortemperatur an die Fluidtemperatur aufgrund des Temperaturgradienten entlang der Grenzfläche, d. h. den Wärmeverlust vom Sensor an das Fluid. Der Exponentialterm bewirkt, dass sich die Sensortemperatur $\vartheta_s(t)$ der Fluidtemperatur ϑ_f annähert. Dieser Term ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Sensor und Fluid, was dazu führt, dass die Temperatur des Sensors mit der Zeit abnimmt, bis sich beide Temperaturen angeglichen haben.

Das Gesamtverhalten von $\vartheta_s(t)$ im Laufe der Zeit hängt vom Gleichgewicht zwischen dem Wärmeeintrag in den Sensor und dem Wärmeverlust vom Sensor an das umgebende Fluid ab. Wenn der Wärmeeintrag überwiegt (d. h. die Leistungsaufnahme ist im Vergleich zum Wärmeverlust erheblich), steigt die Temperatur des Sensors mit der Zeit an und umgekehrt. Halten sich beide Bedingungen die Waage, bleibt die Temperatur des Sensors über die Zeit konstant.

Die Korrelation zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten h und der Strömungsgeschwindigkeit u kann durch die dimensionslose Nusselt-Zahl bestimmt werden, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluids mit einer charakteristischen Länge l ist:

$$N_u = h \cdot \frac{l}{\lambda} \quad (7)$$

Normalerweise wird die Nusselt-Zahl nicht direkt zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten mit einem thermischen Anemometer verwendet. Stattdessen spielt sie eine Rolle bei der theoretischen Analyse der Wärmeübertragung in der Grenzschicht um das beheizte Element des Anemometers, insbesondere bei konvektiver Wärmeübertragung. Sie hängt von mehreren Strömungsparametern wie Geschwindigkeit, charakteristische Länge, Fluideigenschaften (wie Wärmeleitfähigkeit und Viskosität) und der spezifischen Geometrie der Strömung ab, z. B. Kanalströmung, Rohrströmung, Grenzschichtströmung. Gegen Ende des Projektes wurden Anstrengungen unternommen, die Wärmetransportvorgänge zwischen Sensor und Fluid detailliert in COMSOL® Multiphysics nachzubilden um ein umfassendes Wärmeübertragungsmodell für TTA in verschiedenen Strömungsumgebungen zu entwickeln und dabei die reale Geometrie der in AP1.2 entwickelten Sensorelemente von TUD-IAVT zu verwenden (vgl. Abbildung 31).

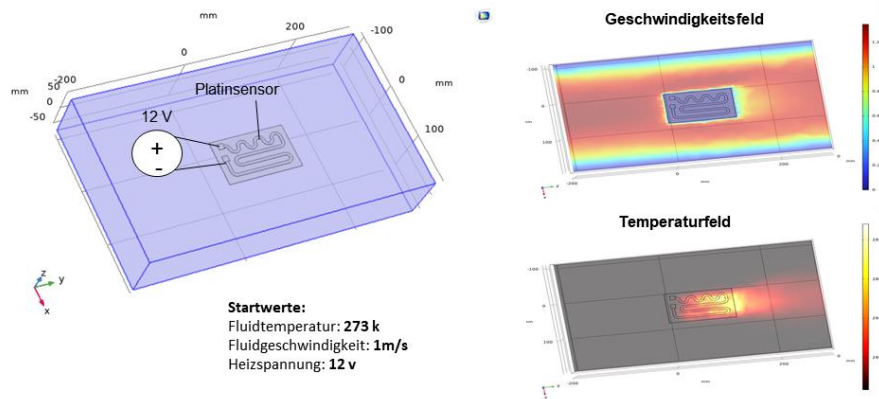


Abbildung 31: Erste Ergebnisse der COMSOL-Simulation eines Heizelements.

Leider konnten diese Arbeiten aus Zeitgründen nicht zu einem erfolgreichen Abschluss geführt werden.

2.3.3 Simulationsergebnisse

Auf der Grundlage der zuvor beschriebenen theoretischen Berechnungen wird eine typische Sprungantwortfunktion für ein einkanaliges thermisches Anemometer bei Einschalten der Heizleistung in einer flüssigen und einer gasförmigen Umgebung abgeleitet. Die Kurven geben Aufschluss über das unterschiedliche Einschwingverhalten des Heizprozesses in den beiden Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der zuvor abgeleiteten Wärmebilanzgleichungen (5) und (6). Die für diese Untersuchung verwendeten Parameter sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Für die Berechnungen der Sprungfunktion berücksichtigte Parameter und Werte

Menge	Einheiten	Wert
Leistung (P)	W	0,4
Masse (m)	mg	4
Spezifische Wärmekapazität (C_p)	J/kg·K	880
Oberfläche (A)	mm ²	2
Flüssigkeitstemperatur (ϑ_f)	K	300 (~ 27 °C)
Wärmeübergangskoeffizient (h)	W/m ² -K	2000 (Flüssigkeit) 50 (Gas)

Abbildung 32 zeigt das Temperaturverhalten eines Sensorelements über der Zeit (sowohl für stehende Flüssigkeit als auch für stehendes Gas) für eine elektrische Eingangsleistung von 0,4 W, die bei $t = 0$ eingeschaltet wird. Bei dieser Heizleistung würde das Gleichgewicht in der Gasatmosphäre nach 200 s erreicht, und der Sensor könnte sich theoretisch auf 3000 °C aufheizen, während in der Flüssigkeit (aufgrund des höheren Wärmeübergangskoeffizienten) das Gleichgewicht viel schneller erreicht wird, z. B. nach 5 s bei ~227 °C. Aufgrund des Faktors 200 zwischen den beiden Wärmeübertragungsraten für Flüssigkeit und Gas ist es offensichtlich, dass eine konstante Spannung oder eine konstante Strömungsgeschwindigkeit nicht anwendbar ist. Entweder bräuchte das System in Flüssigkeit Minuten, um ein Gleichgewicht zu erreichen (im schlimmsten Fall wäre die Leistung zu gering für eine nachweisbare Tempera-

turänderung), oder höhere Heizleistungen würden den Sensor im Falle von Gas möglicherweise beschädigen.

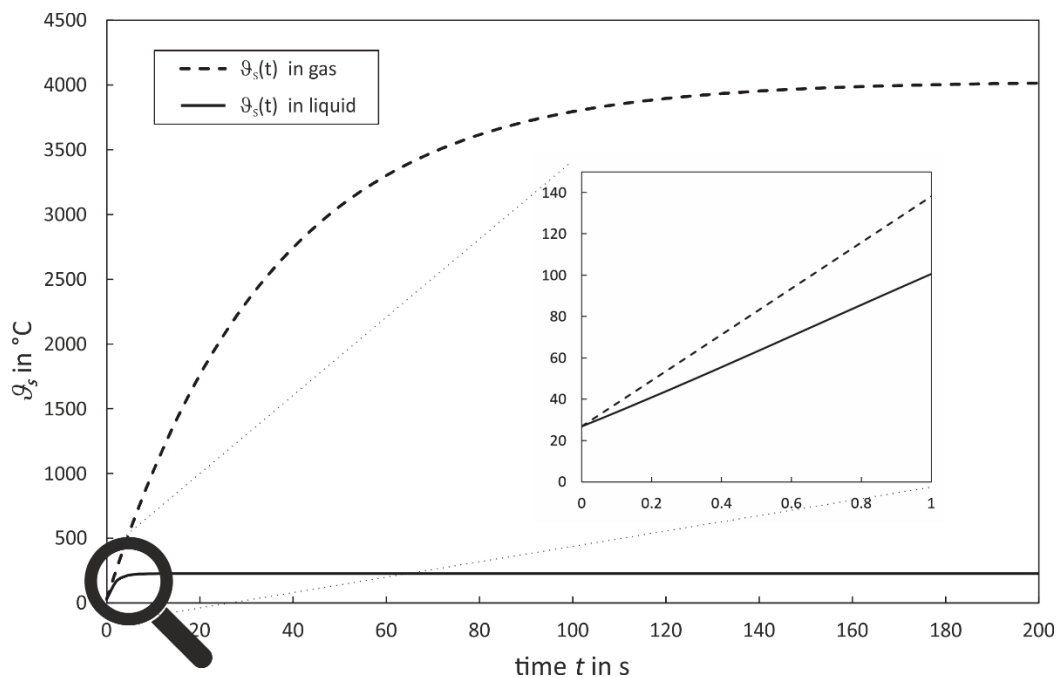


Abbildung 32: Theoretische Temperaturanalyse $\vartheta_s(t)$ des gleichen Sensors in Flüssigkeit und Gas (stagnierende Bedingungen) für die in Tabelle 1 angegebenen Spezifikationen.

Anstatt also das Sensorelement mit einer konstanten Leistung zu beheizen und auf das Gleichgewicht zu warten, wie es in früheren TAGS-Arbeiten der Fall war [28], schaltet unser Ansatz die Heizleistung wie beschrieben sequentiell ein und aus, indem er einen oberen und einen unteren Temperaturschwellenwert festlegt und die Anstiegs- und Abfallzeiten sowie deren Verhältnisse misst. Dieser schnell wiederholte transiente Vorgang des Wechsels zwischen Heiz- und Abklingzeiten kann sowohl Phasen- als auch Geschwindigkeitsinformationen liefern.

Des Weiteren wurde eine Studie über das Temperaturverhalten des TTA bei Phasenwechsel durchgeführt, um zu beobachten, wie sich verschiedene Parameter auf die Wärmeübertragungsrate in Flüssigkeiten und Gasen mit einer Temperatur von ~ 27 °C auswirken. Die Abbildungen 22, 23 und 24 zeigen beispielhafte Diagramme für die Temperaturänderung eines einzelnen TTA-Sensors $\vartheta_s(t)$ über die Zeit für das transiente Aufheizen und Abkühlen mit einem anschließenden Flüssigkeits-Gas-Phasenwechselintervall von zwei Sekunden. Die grauen Bereiche in den Diagrammen symbolisieren Zeiten mit Flüssigkeit am Sensor. Abbildung 33 zeigt $\vartheta_s(t)$ über die Zeit für verschiedene Temperaturhysteresen von 0,5 K, 1 K bzw. 2 K bei einem konstanten Überhitzungswert von 50 K. Wie zu erkennen ist, reagiert der Sensor in Flüssigkeit und Gas schneller, wenn die Hysterese klein ist, wie z. B. 0,5 K, und verlangsamt sich allmählich, wenn die Hysterese auf 2 K erhöht wird. Das bedeutet, dass für eine schnelle Sensorreaktion und die entsprechend erforderliche Schaltfrequenz des TTA die Hysterese so niedrig wie möglich sein sollte.

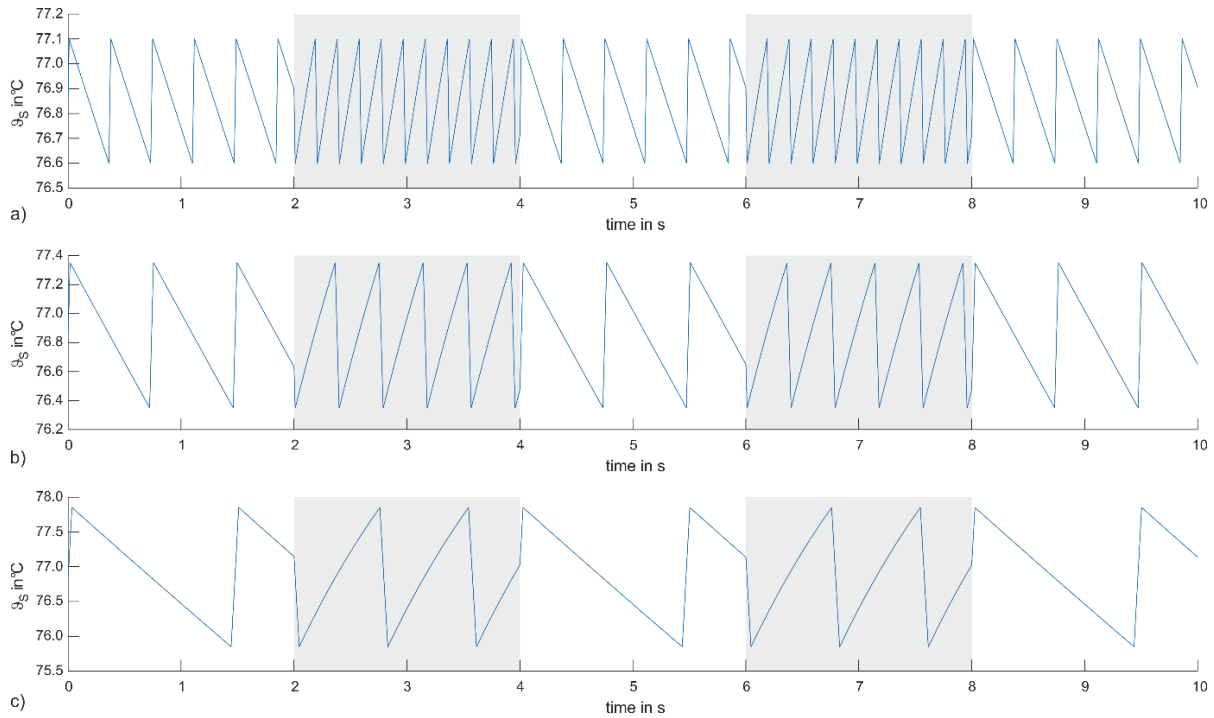


Abbildung 33: Parameterstudie für einen einzelnen TTA-Sensor, bei der die Temperaturhysterese zwischen a) 0,5 K, b) 1 K und c) 2 K variiert wird. Die Fluidphase wechselt alle zwei Sekunden von Gas zu Flüssigkeit (grauer Bereich = Wasser). Weitere Parameter sind eine Überhitzung von 50 K gegen das Fluid bei Raumtemperatur (300 K) und eine Heizleistung von 0,11 W.

Eine kleine Hysterese bedeutet jedoch auch sehr geringe Schwankungen der Sensortemperatur und damit des Spannungsabfalls am Widerstand. Es ist zu beachten, dass die derzeitige theoretische Analyse das elektrische Signal-Rausch-Verhältnis außer Acht lässt. Daher könnten unzuverlässige Schalteffekte auftreten, wenn die Rauschspitzen höher sind als das tatsächliche Signal.

Abbildung 34 zeigt die Reaktion von $\vartheta_s(t)$ für drei verschiedene Heizleistungen, nämlich 0,1 W, 0,11 W und 0,2 W, bei einer konstanten Hysterese von 1 K und einer Überhitzung von 50 K. Bemerkenswert ist, dass der Sensor bei einer Eingangsleistung von 0,1 W keine ausreichende Erwärmung im Flüssigkeitsstrom erreicht, was in starkem Kontrast zum Gasstrom steht, bei dem eine schnelle Erwärmung und ein langsames Abklingen der Sensortemperatur beobachtet werden kann. Mit höheren Leistungswerten nimmt die Heizdauer deutlich ab (Abbildung 34b und c), während die Temperaturabfallraten konstant bleiben. Diese Beobachtungen unterstreichen den signifikanten Einfluss der elektrischen Eingangsleistung auf das Sensorverhalten, wie in Gleichung (6) beschrieben. Die Analyse zeigt, dass das Systemverhalten stark von der elektrischen Heizleistung abhängt. Eine unzureichende Leistung verhindert das Aufheizen des Sensors in der Flüssigkeit, während eine zu hohe Leistung die Messung der Anstiegszeiten unmöglich macht, da sich der Sensor sofort erwärmt.

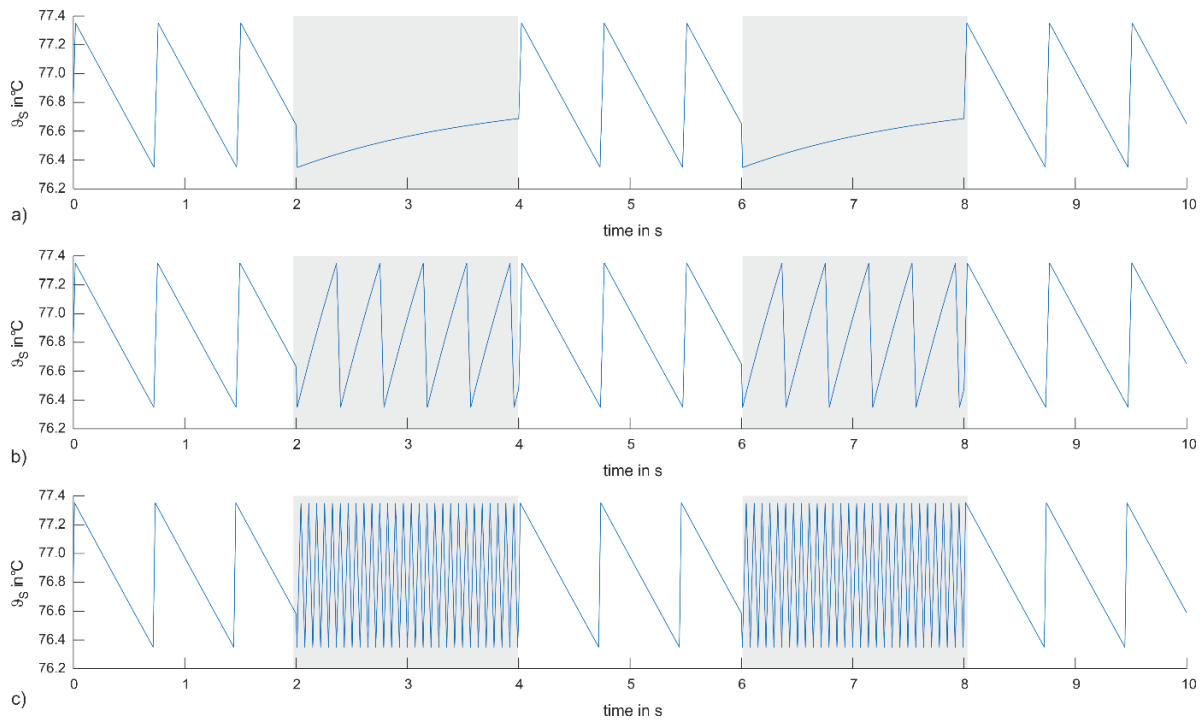


Abbildung 34: Parameterstudie für einen einzelnen TTA-Sensor durch Variation der Heizleistung zwischen a) 0,1 W, b) 0,11 W und c) 0,2 W. Der Phasenwechsel des Fluids von Gas zu Flüssigkeit erfolgt alle zwei Sekunden (graue Unterschicht = Wasser). Weitere Parameter sind eine Überhitzung von 50 K gegen Flüssigkeit bei Raumtemperatur (300 K) und eine Hysterese von 1 K.

In Abbildung 35 werden die Auswirkungen einer unterschiedlichen Überhitzung des Sensors untersucht, d. h. der Einfluss der Temperaturdifferenz zum umgebenden Fluid auf das Temperaturverhalten des Sensors $\vartheta_s(t)$ in Flüssigkeits- und Gasströmungen. Es wurden drei Überhitzungsstufen von 10 K, 50 K und 100 K untersucht, die Aufschluss über das Temperaturverhalten des Sensors geben. Bei einer Überhitzung von 10 K zeigt sich im Gasstrom eine schnelle Erwärmung und ein langsamer Abfall der Sensortemperatur (Schaltschwelle wird auch in 2 s nicht erreicht), während die flüssige Umgebung den entgegengesetzten Trend verursacht. Wenn die Überhitzung auf 50 K ansteigt, bleibt die Temperaturreaktion allmählich im Einklang mit dem erwarteten Verhalten. Die Erwärmung verlangsamt sich und das Abklingen beschleunigt sich, beides aufgrund des höheren Temperaturgradienten zwischen Sensor und umgebenden Flüssigkeiten. Bei einer Überhitzung von 100 K kommt es jedoch zu einer drastischen Abweichung, bei der sich der Sensor im Flüssigkeitsstrom nicht mehr erwärmt, sondern weiter abkühlt, da der konvektive Wärmeverlust deutlich die eingetragene Heizleistung übersteigt. Diese Beobachtungen machen deutlich, wie wichtig es ist, optimale Überhitzungswerte einzuhalten, um ein zuverlässiges Einschwingverhalten sowohl in Flüssigkeits- als auch in Gasströmungen zu gewährleisten.

Die bereitgestellten Informationen und Diagramme zeigen anschaulich den erheblichen Einfluss von Eingangsleistung, Hysterese und Überhitzung auf das Sensorverhalten. Darüber hinaus können sich Parameter wie Masse und Dichte des Sensors auf die Wärmekapazität auswirken, während die Geometrie (d. h. die Oberfläche) des TTA-Sensors das Potenzial hat, die Wärmeübertragungsdynamik sowohl in Flüssigkeiten als auch in Gasen tiefgreifend zu

verändern. Indem untersucht wird, wie sich Änderungen der Sensorgeometrie auf die Wärmeableitung, -leitung und -konvektion auswirken, sollen auch Konstruktionsparameter ermittelt werden, die die Effizienz und Genauigkeit des Sensors über einen Bereich von Betriebsbedingungen hinweg verbessern.

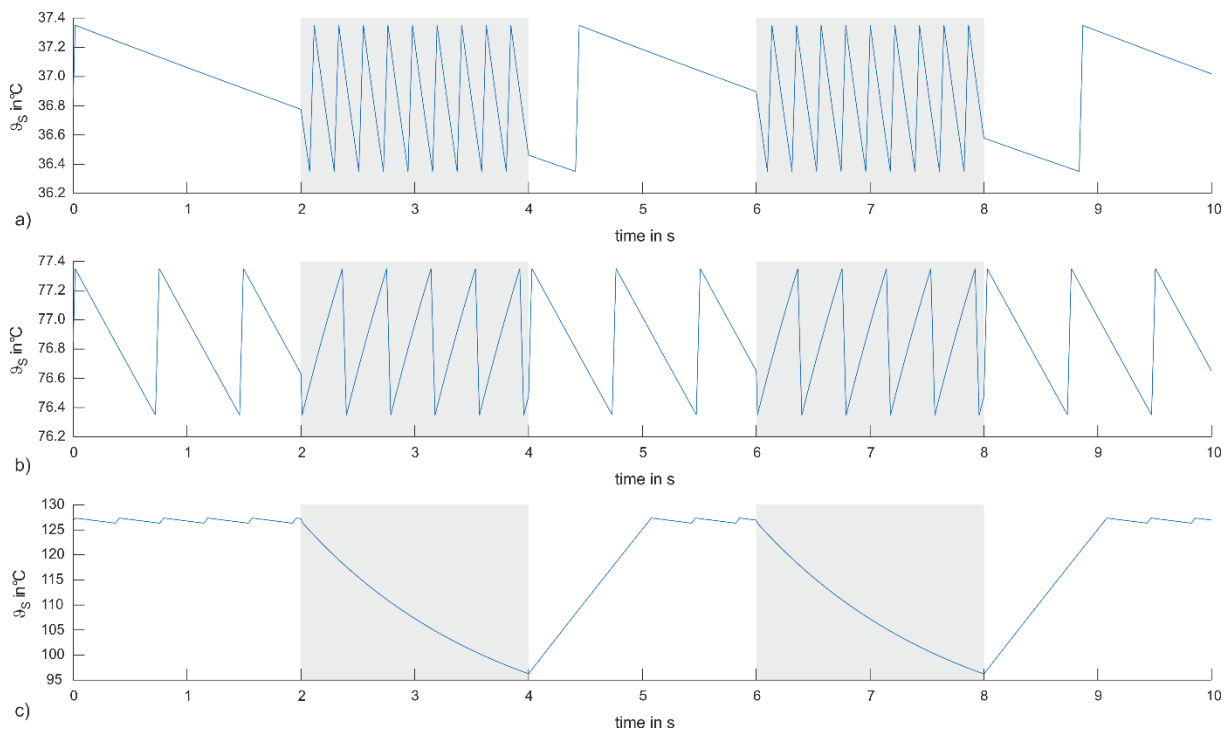


Abbildung 35: Parameterstudie für einen einzelnen TTA-Sensor, wobei die Überhitzung des Sensors gegen Flüssigkeit bei Raumtemperatur (300 K) zwischen a) 10 K, b) 50 K und c) 100 K liegt. Die Flüssigkeitsphase wechselt alle zwei Sekunden von Gas zu Flüssigkeit (graue Unterschicht = Wasser). Weitere Parameter sind eine Hysterese von 1 K und eine Heizleistung von 0,11 W.

2.3.4 Experimentelle Arbeiten

Das entwickelte Schaltungskonzept zur phasenaufgelösten thermischen Anemometrie auf Basis des TAGS-Konzeptes unter Nutzung der thermischen Transienten Methode (TTM) wurde zunächst einkanlig aufgebaut und in Betrieb genommen. Im Anschluss wurden erste experimentelle Untersuchungen zur TTM durchgeführt, um Heiz- und Ansprechzeiten verschiedener Widerstandthermometer zu bestimmen.

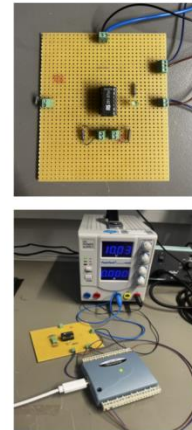
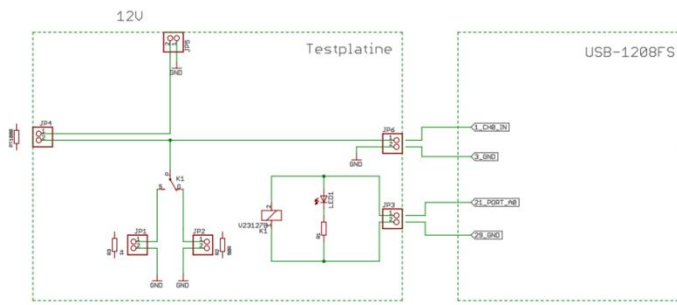


Abbildung 36: Schaltplan, Testschaltung und Experiment zur einkanaligen thermischen Anemometrie nach der thermischen Transientenmethode (TTM).

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse eines ersten Experimentes zum Einschwingverhalten in einer Luftströmung bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten von 0..20 SL/min für einen bedrahteten Standard Pt1000.

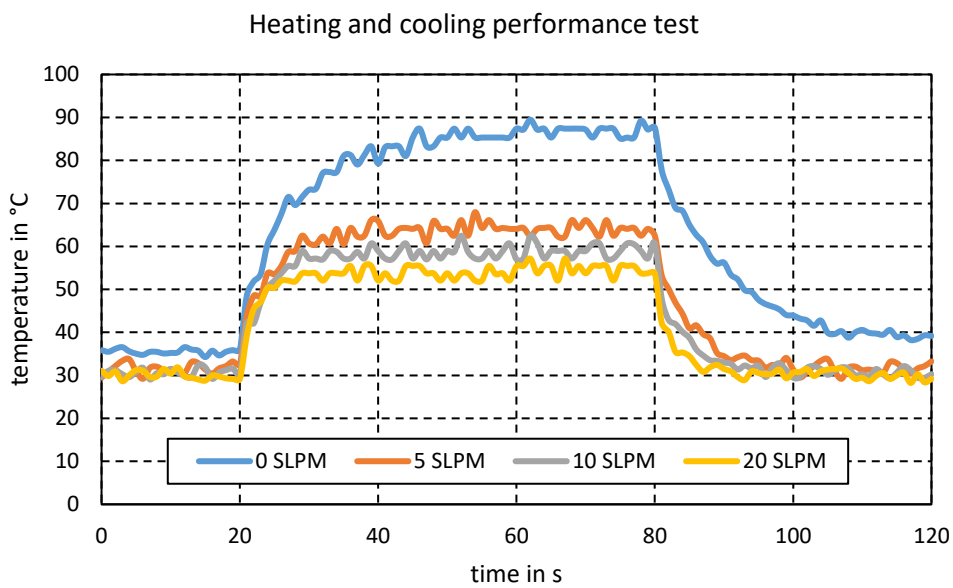


Abbildung 37: Aufheiz- und Abkühlkurven eines Pt-100 Elementes bei 20 V Heizspannung bei verschiedenen Luftströmungen (SLPM = Standard Liter pro Minute) bis zur Gleichgewichtsbedingung.

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde die Schaltung nach Abbildung 29 aufgebaut und in Betrieb genommen. Dazu wurde der kleinste kommerziell verfügbare Pt1000 Widerstand verwendet. Im Anschluss wurden die Kontaktdrähte isoliert, um in Wasser messen zu können. Die Ergebnisse dieses Schlüsselexperiments sind in Abbildung 38 dargestellt.

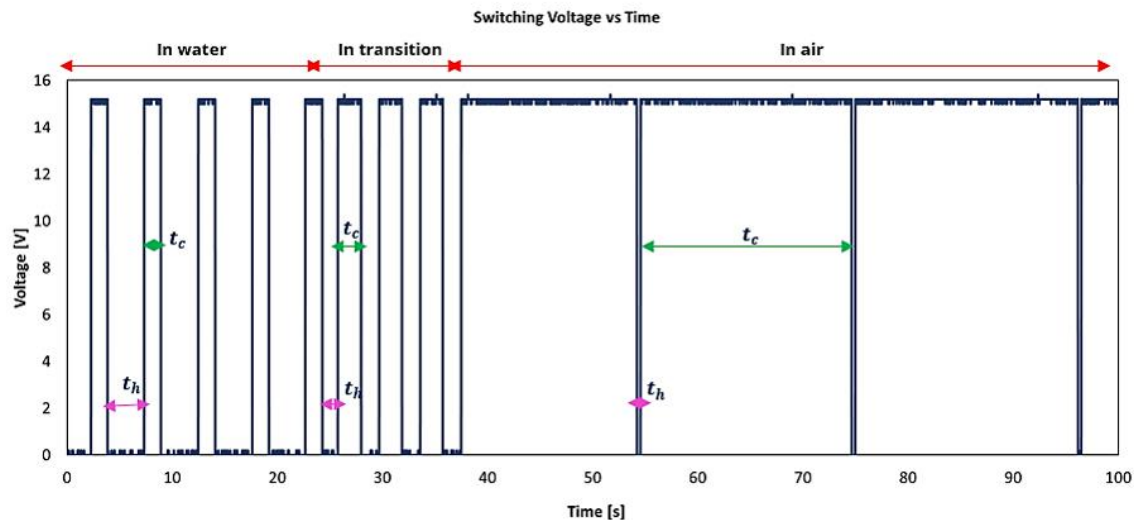


Abbildung 38: Veränderung der Heiz- und Abkühlphasenzeiten der Messschaltung nach Abbildung 29 beim Herausziehen des Sensors aus Wasser nach ca. 25 Sekunden.

Deutlich zu sehen ist, dass das Verhältnis der Heiz- und Abkühlzeiten sehr stark vom umgebenden Fluid abhängig ist. Bei den hier gewählten Parameterkombinationen aus Heizleistung, Hysterese und Überhitzung ist die Heizphase in Wasser circa doppelt so groß wie die Abkühlphase. Während an Luft die Heizzeit extrem kurz und die Abkühlphase etwa 20-mal länger ist. In der Transitionsphase (22...38 s) befindet sich noch ein Tropfen Wasser und danach ein dünner Flüssigkeitsfilm am Sensor. Dies führt zu verkürzten Heiz- und verlängerten Abkühlzeiten. Das Schlüsselexperiment zeigt, dass das Konzept wie theoretisch vorhergesagt funktioniert. Für den realen Einsatz muss aber eine deutlich kleinere Hysterese gewählt werden. Außerdem muss das Sensorelement deutlich verkleinert werden, um die thermische Trägheit zu reduzieren, da ansonsten die angestrebte zeitliche Auflösung von 100 Hz oder besser nicht erreicht werden kann. Phasenwechsel stellen auf Grund der Be- und Entnetzungseigenschaften und der damit verbundenen nicht eindeutigen Zuordnung des Zustandes eine besondere Herausforderung dar. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten wird der Effekt aber mit hoher Wahrscheinlichkeit verringert werden. Die Ergebnisse von Arbeitspaket 2.3 wurden auf dem SWINTH (Specialist Workshop on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics and Severe Accidents) Workshop vom 17.-20.06.2024 in Dresden vorgestellt und in den Proceedings [30] publiziert.

Damit ist der **Meilenstein** M2.3.1 „Qualifizierung des TAGS-Sensorprinzips für Wasser“ teilweise abgeschlossen. Es konnte die Eignung für den zweiphasigen Betrieb sowohl theoretisch als auch experimentell unter Beweis gestellt werden, allerdings steht die Umsetzung des Multiplexingkonzeptes für ortsaufgelöste Messungen noch aus. Das Schaltungskonzept hierfür ist abschließend in Abbildung 39 dargestellt.

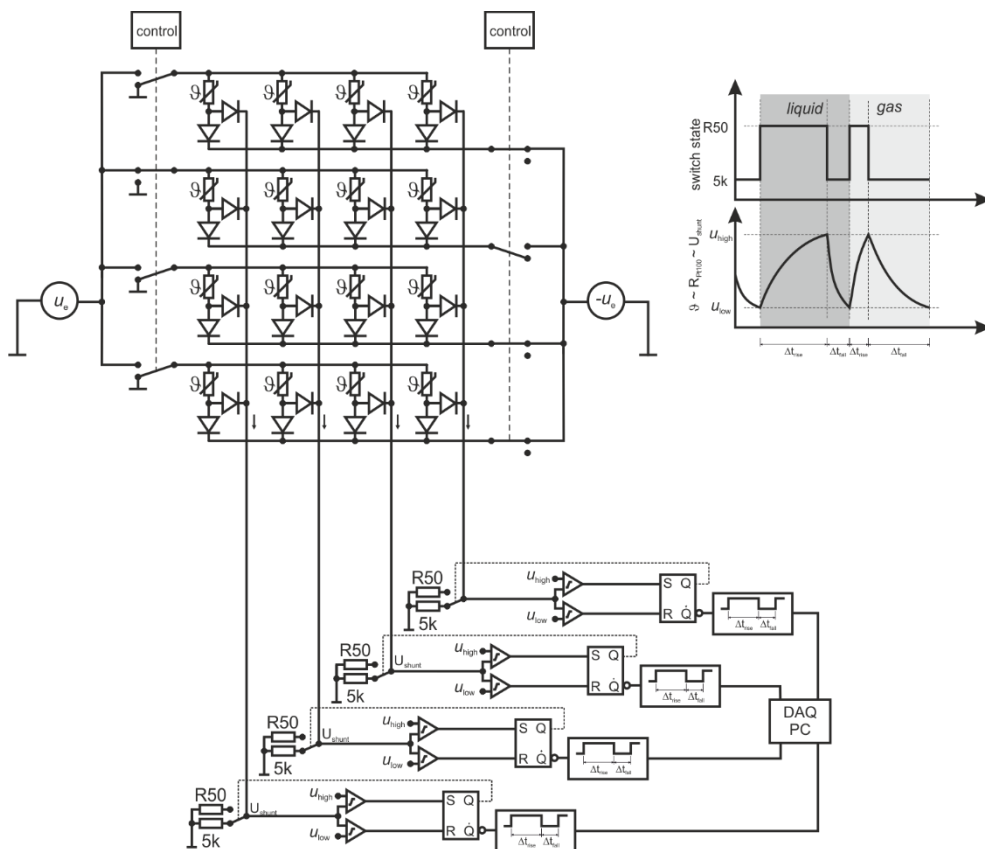


Abbildung 39: Schaltungskonzept für einen 4x4 TAGS nach der thermischen Transienten-Methode. Die Dioden sind erforderlich, um Querströme zwischen den einzelnen Sensorelementen zu vermeiden. Um eine komplette Abkühlung zu verhindern werden die Elemente einer inaktiven Zeile mittels einer negativen zweiten Spannungsquelle auf einer vordefinierten mittleren Heizleistung gehalten.

Arbeitspaket 3: Einsatz der neuen Mess- und Bildgebungstechnik in thermohydraulischen Studien

Auf Grund der Corona-Pandemie und deren Nachwirkungen kam es leider im Rahmen des ROBIN-Projektes zu erheblichen Zeitverzögerungen – vor allem bei der Rekrutierung. Die ausgeschriebenen Stellen konnten zum Teil erst mit einer Verzögerung von 12 Monaten besetzt werden. Aber auch dann war das Einarbeiten zum Teil sehr aufwändig. Zusätzlich ergaben sich Schwierigkeiten durch größere (auch z. T. coronabedingte) Umbrüche, die den Einsatz an realen Versuchsanlagen im Projektzeitraum unmöglich machten. Details hierzu sind in Kürze in den einzelnen Arbeitspaketen dargelegt.

TP 3.1: Experimentelle Studien mit EIT-Sensoren (FRAM, FAU)

Beschreibung:

Es werden zwei EIT-Prototypen in die Heißleitung des PKL-Loops eingebaut. Es werden Experimente zu transienten Störfallversuchen mit den EIT-Sensoren durchgeführt und analysiert. Dazu werden die unter TP2.1 entwickelten Datenerfassungs- und Auswerte-

algorithmen angewendet und die gewonnenen Ergebnisse auf Plausibilität geprüft. Von besonderer Bedeutung ist die Erkennung von Strömungsregimen sowie die genaue Quantifizierung des zeitabhängigen Dampfgehalts in der Leitung. Dies ermöglicht zukünftig die Erkennung von Reflux-Szenarien sowie eine exakte Massestrombilanzierung.

Auf Grund des Rückbaus der PKL Anlage waren die Messungen nicht wie geplant durchführbar. Es ist geplant, im Nachfolgeprojekt ROBINIE auf die SECA Anlage bei TUD-WKET auszuweichen.

TP 3.2: Experimentelle Studien zu Zweiphaseninstabilitäten im Steigrohr des Gebäudekondensators an GENEVA (TUD-WKET, TUD-PBM)

Beschreibung:

Das in TP2.2 entwickelte Konzept eines „bildgebenden Rohres“ wird am Steigrohr der Versuchsanlage GENEVA umgesetzt. Mit den so generierten axialen Phasengehaltsprofilen werden Strömungsformen entlang des Steigrohres analysiert. Darüber hinaus werden mit den Phasengehaltsprofilen die Entstehung und der Verlauf der Strömungsinstabilitäten bei adiabatem Sieden (Flashing) und Geysering detailliert untersucht. Die mit diesen experimentellen Studien generierten Daten ergänzen die Daten vorhergehender Untersuchungen des Vorhabens GENEVA (E.ON Kernkraft GmbH) und des Vorhabens PANAS (BMBF 02NUK041A). Durch den Doktoranden werden im Rahmen des Vorhabens verbesserte Modelle für Systemcodes (ATHLET) sowie verbesserte CFD-Modelle entwickelt.

Aus genannten Gründen (vgl. AP2.2) wurde beschlossen keinen axialen Hochdruck-Gittersensor zu entwickeln, sondern die axiale Bildgebung mit nichtinvasiver elektrischer Impedanztomographie zu entwickeln.

Durch bautechnische Maßnahmen an der TU Dresden war ein Umzug des thermohydraulischen Labors von TUD-WKET in eine neue Experimentalhalle notwendig. Die GENEVA-Anlage, in der ursprünglich der Einsatz der axialen Bildgebung geplant war, konnte nicht wieder in Betrieb genommen werden. Als Alternative für die Experimente im vorliegenden Projekt ist die thermohydraulische Anlage SECA vorgesehen, die im Vergleich zu GENEVA die Möglichkeit bietet, Untersuchungen mit breiteren Parametersätzen durchzuführen.

Die Anlage SECA wurde im Projektzeitraum am bisherigen Standort abgebaut und in den neuen Technikräumen an der TU Dresden (AP 2) wiederaufgebaut. Die Arbeiten beinhalteten den elektrischen Anschluss, die Dichtheitsprüfung sowie die Bestückung mit Thermoelementen und Sensoren. Aus dem Einsatz dieser Anlage ergibt sich zudem eine geänderte Rohrgeometrie. Damit wird eine Modifikation der Sensor konstruktion erforderlich.

Das Arbeitspaket 3.2.1 (Umbau der Versuchsanlage GENEVA, Aufbau und Einbau axialer Sensoren) kann mit dem Aufbau der Versuchsanlage SECA als teilweise erfüllt betrachtet werden. Der Meilenstein M3.2.2 (Experimente und Datenauswertung an GENEVA abgeschlossen) konnte nicht abgeschlossen werden, da es aufgrund verschiedener Hemmnisse im Projektablauf nicht möglich war, Experimente an der SECA-Anlage durchzuführen. Diese Arbeiten sind in einem möglichen Anschlussprojekt (ROBINIE) vorgesehen.

TP 3.3: Experimentelle Studien zur Hochdruck-Dampfkondensation in liegenden Rohren an TOPFLOW (TUD-PBM, ETHZ)

Beschreibung:

Der in TP1.2 entwickelte wandbündige Filmdickensensor wird in fünf azimuthalen Positionen in der COSMEA-Anlage im leicht geneigten Kondensationsrohr eingebaut. Dazu werden im Bereich der vorhandenen Wärmestromsonde eine leichte Ausfräsung der Rohrrinnenwand vorgenommen und der Sensor bündig integriert. Die mineralisierten Kabel werden stromabwärts durch den Separator geleitet und dort nach außen geführt. Weiterhin wird eine Vergleichssonde installiert, die über eine innenliegende, ca. 5 mm von der Wand entfernte, Elektrode die Kapazität zur Rohrwand misst. Es werden ausgewählte Hochdruckexperimente bis 45 bar im Bereich hoher Kondensationsraten (Dampfmassenstrom bis 1 kg/s) durchgeführt. Dabei werden erstmalig Kondensatfilmdicken im Submillimeter-Bereich vermessen, was zur Validierung eines neu entwickelten CFD-Wandsiedemodells für den Hochdruckbereich erforderlich ist. Diese Daten ergänzen Daten vorheriger Experimente des Vorhabens PANAS (BMBF 02NUK041B).

Zum Abschluss des Projektes stand leider noch kein funktionsfähiger Wandfilmdickensensor zur Verfügung. Die Realisierung von Filmdickenmessungen an horizontalen Kondensationsrohren musste daher auf einen späteren Zeitpunkt im Rahmen des Nachfolgeprojektes ROBINIE verschoben werden.

TP 3.4: Experimentelle Studien zur Pool-Hydrodynamik an THAI (BECKER, TUD-PBM, TUD-IAVT)

Beschreibung:

Es wird ein tauchbarer TAGS-Gittersensor mit Hochtemperaturelektronik aufgebaut, der bei Experimenten in der THAI-Anlage eingesetzt wird. Mit diesem werden Blasengrößenverteilungen und Flüssigphasengeschwindigkeiten in einem Pool unter anlagentypischen Bedingungen analysiert. Die Studien sind für Fragestellungen des Pool-Scrubbings von Interesse, die innerhalb des internationalen IPRESCA-Projektes adressiert werden. Hierfür werden hochaufgelöste Hydrodynamikdaten für die verbesserte Modellierung

der Rückhaltung von Aerosolen und Jod in begasten Pools benötigt. Der Gittersensor liefert dabei Informationen über die Großblasenstruktur und Schwarmturbulenz, mit denen Modelle der Partikelabscheidung in Dampfblasen parametrisiert werden.

Leider war im Rahmen der Projektlaufzeit die komplette Fertigstellung der Hochtemperatur-elektronik (vgl. AP1.3) nicht möglich. Darüber hinaus musste Becker Technologies die ThAl-Anlage auf Grund des Standortwechsels der Firma für längere Zeit außer Betrieb nehmen. Die Realisierung der Messkampagnen ist im Nachfolgeprojekt ROBINIE geplant.

III. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Ein Großteil der geleisteten Arbeiten im Projekt beschäftigte sich mit der Technologieentwicklung für neuartige Sensoren und Messsysteme für hohe Temperaturen und Druck in Satttdampfumgebungen bis 300 °C. Diese Arbeiten waren notwendig, weil kommerziell verfügbare Sensoren unter diesen Bedingungen versagen. So sind beispielsweise Chipwiderstände in der Regel mittels Glaspasten elektrisch passiviert. Die Glasschicht löst sich in Satttdampfumgebung jedoch auf. Es existieren bislang ebenso wenig für Satttdampf geeignete isolierende Durchführungen für Drücke bis 70 bar. In der Praxis wird hier bislang stets auf Graphit zurückgegriffen, welches elektrisch leitfähig ist. Auch wandbündige Sensoren zur Filmdickenmessung sind bislang nur als Niederdruck- und Niedertemperaturvarianten verfügbar. Aus diesem Grund existieren auch noch keine komplexen Sensoren für die axiale Bildgebung, weil die multiple druckfeste Durchführung und Abdichtung bislang technisch nicht umsetzbar war. Gleiches gilt für die Messung von Geschwindigkeitsfeldern in zweiphasigen Strömungen. Die im Projekt geleisteten Arbeiten waren daher im vollen Umfang notwendig und angemessen, um die Technologie der bildgebenden Messverfahren für die nukleare Sicherheitsforschung voran zu treiben.

IV. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erzielten technologischen Fortschritte haben direkte Auswirkungen auf zukünftige Sensoren und Messsysteme der nuklearen Sicherheitsforschung. Sie können aber ebenso auf andere Hochtemperaturprozesse übertragen werden wie die Solarthermie oder Anlagen mit CO₂ oder Kältemitteln als Wärmeträger. Die neu entwickelten Technologien sollen in zukünftigen Sensorgenerationen zum Einsatz kommen und die bisherigen komplizierten Verfahren der getrennten elektrischen Isolation und Abdichtung ablösen. Die Vermarktung der Technologie geschieht über die HZDR-Innovation GmbH als Lizenznehmer.

V. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen eines anderen vom BMBF geförderten Projektes der nuklearen Sicherheitsforschung „DAQUA - Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der Nassdampfqualität“, FKZ: 13FH163PX8, wurden ebenfalls Anstrengungen unternommen, wandbündige Sensoren zur Filmdickenmessungen mit keramisch/metallischen Verbänden zu realisieren. Die beteiligte Firma, die Hilgenberg Ceramics GmbH hat hier ebenfalls vielversprechende Ansätze, die in einem weiteren Vorhaben vorangetrieben werden sollen.

VI. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden folgende Publikationen, Konferenzbeiträge und Patente erstellt:

Publikationen:

Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Direct laser active brazing of 316Ti to alumina. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 14980 (2024).

Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Toughening ceramic joints through strategic fracture path control. *Adv. Mater. Technol.*, 2400535 (2024).

Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Active Brazing for Energy Devices Sealing. *J. Exp. Theor. Anal.*, 2(1), 1-27 (2024).

Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Optimizing Interfaces in Laser-Brazed Ceramic-Stainless Steel Joints for Hydrothermal Sensors through Finite-Element Modeling. *J. Mater. Eng. Perform.*, 33(13), 6372–6379 (2024).

Mamedov, T.; Schleicher, E.; Dias, F. D.A.; Schubert, M.; Ehlert, T.; Kenig, E. Y.; Hampel, U., A conductivity-based sensor for the measurement of liquid film thickness and surface wetting in structured packing columns. *Flow Measurement and Instrumentation*, 105(9), 102929, 2025.

Konferenzbeiträge:

Albrecht, O.; Müller, M.; Petersen, L.; Nowotnik, L. F. T.; Panchenko, J., Reliability Analysis of Surface Mount Interconnect Technologies Suitable for Temperatures Up to 200°C. 2024 IEEE 10th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, 11-13 September 2024.

Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Optimizing Ceramic Sensor Sealing with Nanosecond Pulsed Laser Ablation. 13th International Summer School – Trends and New Developments in Laser Technology, Fraunhofer IWS, Dresden, 26-30 August 2024.

Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Deterministic processing of alumina with nanosecond laser pulses for energy applications. In *Proceedings of the EuroMat 2023*, Frankfurt, Germany, 3–7 September 2023.

Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Interface optimization for thermal residual stress reduction at laser-brazed ceramic-stainless steel joints for miniaturized energy sensors. In *Proceedings of the EuroMat 2023*, Frankfurt, Germany, 3–7 September 2023.

Müller, M.; Saakyan, S.; Luniak, M.; Pietruske, H.; Schleicher, E.; Panchenko, J., Study of the Water and Steam Resistance of Thick Film Materials for Sensor Application Up to 300°C. 2024 IEEE 10th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, 11-13 September 2024.

Valupadasu, S.; Hampel, U.; Schleicher, E.; Bieberle, A., Development of a Thermal Anemometry Grid Sensor for Steam-Water Two-Phase Flow. Specialist Workshop on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics and Severe Accidents - SWINTH, Dresden, Germany, 17.-20.06.2024.

Patente:

Feng, J., Hurtado, A., Lippmann, W., Herrmann, M., Schleicher, E., „Signaldurchführung“, Deutsche Patentanmeldung 10 2024 102 097.0

Im Rahmen des Projektes wurden folgende studentische Arbeiten durchgeführt:

Hu, B., Studienarbeit: Löten unter Schutzgas von Keramik-Metall-Verbindungen mit verschiedenen Loten für Energieanwendungen, TU Dresden, 2023.

Kuhfahl, H., Diplomarbeit: Innovatives Laserlöten von Keramik-Metall-Verbindungen für Energieanwendungen, TU Dresden, 2023.

Nowotnik; L. F., Studienarbeit: Lebensdauerevaluation von Aufbau- und Verbindungstechniken elektronischer Bauelemente für den Dauereinsatz bis 200 °C, TU Dresden, 2024.

Petersen, L., Studienarbeit: Konzepte für eine hochtemperaturtaugliche Elektronik bis 200 °C, TU Dresden, 2023.

Saakyan, S., Studienarbeit: Entwicklung umgebungsresistenter Aufbau- und Verbindungstechniken für anemometrische Sensoren in Wasser/Wasserdampf Strömungen, TU Dresden, 2023.

Shao, B., Diplomarbeit: Laseraktivlöten von Aluminiumoxid-Inconel-Verbindungen für Energiesensoren, TU Dresden, 2024.

Zhang, B., Diplomarbeit: Optimierung der Präzision bei der Nanosekunden-Laserablation von Aluminiumoxid durch Deep Learning, TU Dresden, 2024.

VII. Literatur

- [1] Haferkamp, H.; Bach, F.; von Alvensleben, F.; Kreuzburg, K., Lasers as Tools for Manufacturing of Durable Goods and Microelectronic. SPIE, vol. 2703, chap. PW (1996).
- [2] Südmeyer, I.; Rohde, M., Investigations on the wetting and joining behavior of Ag-based braze fillers on silicon carbide, Lasers and Applications in Science and Engineering. SPIE, vol. 6880 (2008).
- [3] Südmeyer, I.; Hetteshheimer, T.; Rohde, M., On the shear strength of laser brazed SiC-steel joints: Effects of braze metal fillers and surface patterning. Ceram. Int., 36, 1083-1090 (2010).
- [4] Südmeyer, I. et al., Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly., SPIE, vol. 7921, chap. PWL (2011).
- [5] Rohde, M.; Südmeyer, I.; Urbanek, A.; Torge, M., Joining of alumina and steel by a laser supported brazing process. Ceram. Int., 35, 333-337 (2009).
- [6] Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Deterministic processing of alumina with nanosecond laser pulses for energy applications. In Proceedings of the EuroMat 2023, Frankfurt, Germany, 3–7 September 2023.
- [7] Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Active Brazing for Energy Devices Sealing. J. Exp. Theor. Anal., 2(1), 1-27 (2024).
- [8] Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A. Interface optimization for thermal residual stress reduction at laser-brazed ceramic-stainless steel joints for miniaturized energy sensors. In Proceedings of the EuroMat 2023, Frankfurt, Germany, 3–7 September 2023.
- [9] Feng, J.; Herrmann, M.; Reinecke, A.-M.; Hurtado, A., Optimizing Interfaces in Laser-Brazed Ceramic-Stainless Steel Joints for Hydrothermal Sensors through Finite-Element Modeling. J. Mater. Eng. Perform., 33(13), 6372–6379 (2024).
- [10] Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Optimizing Ceramic Sensor Sealing with Nanosecond Pulsed Laser Ablation. 13th International Summer School – Trends and New Developments in Laser Technology, Fraunhofer IWS, Dresden, 26-30 August 2024.
- [11] Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Toughening ceramic joints through strategic fracture path control. Adv. Mater. Technol., 2400535 (2024).
- [12] Feng, J.; Herrmann, M.; Hurtado, A., Direct laser active brazing of 316Ti to alumina. Int. J. Appl. Ceram. Technol., 14980 (2024).
- [13] TitaniumBrazing. pp. http://www.titanium-brazing.com/BrzngNwsltr_003.htm.
- [14] Kyocera. pp. <https://shop.kyocera-solutions.de/storage/downloads/kyocera-degussital23-al22o23-deutsch.pdf>.
- [15] Hidnert, P., Thermal expansion of titanium. J. Res. Natl. Bur., Stand 30, 101 (1943).
- [16] Bach, F.-W.; Doege, E.; Kutlu, I.; Huskic, A., Aktivlöten von keramischen Segmenten für den Einsatz in verschleißkritischen Bereichen von Schmiedegesenken. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., 33, 673-678 (2002).

- [17] Shi, G. P.; Zhang, L.; Wang, Z., Modelling the elements reaction–diffusion behavior on interface of Ti/Al₂O₃ composite prepared by hot pressing sintering. *Metals* 10, 259 (2020).
- [18] Zheng, J. C.; Hu, X. J.; Ren, Z. S.; Xue, X. X.; Chou, K., Solid-state reaction studies in Al₂O₃–TiO₂ system by diffusion couple method. *ISIJ Int.*, 57, 1762-1766 (2017).
- [19] Tishchenko, Y. S.; Lakiza, S. M.; Red’ko, V. P.; Dudnik, O. V., Isothermal Sections of the Al₂O₃–TiO₂–Y₂O₃ Phase Diagram at 1550 and 1400°C. *Powder Metall. Met. Ceram.*, 55, 698-706 (2017).
- [20] Müller, M.; Saakyan, S.; Luniak, M.; Pietruske, H.; Schleicher, E.; Panchenko, J., Study of the Water and Steam Resistance of Thick Film Materials for Sensor Application Up to 300°C. 2024 IEEE 10th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, 11-13 September 2024.
- [21] Mamedov, T.; Schleicher, E.; Dias, F. D.A.; Schubert, M.; Ehlert, T.; Kenig, E. Y.; Hampel, U., A conductivity-based sensor for the measurement of liquid film thickness and surface wetting in structured packing columns. *Flow Measurement and Instrumentation*, 105(9), 102929, 2025.
- [22] Albrecht, O.; Müller, M.; Petersen, L.; Nowotnik, L. F. T.; Panchenko, J., Reliability Analysis of Surface Mount Interconnect Technologies Suitable for Temperatures Up to 200°C. 2024 IEEE 10th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, 11-13 September 2024.
- [23] Leyer, S.; Wich, M., The Integral Test Facility karlstein. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1-12 (2012).
- [24] Prasser, H. M.; Böttger, A.; Zschau, J., A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 9(2), 111-119 (1998).
- [25] Yadav, V. P.; Sinha, A.; Khosla, A., Design and implementation of ultrasonic anemometer. 2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems, 2017.
- [26] Maru, K., Laser Doppler cross-sectional velocity distribution measurement combining 16-channel spatial encoding and non-mechanical scanning. *Optics Communications*, 349, 164-170 (2015).
- [27] Bruun, H. H., *Hitzedraht-Anemometrie: Principles and Signal Analysis*. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [28] Arlit, M.; Schleicher, E.; Hampel, U., Thermal Anemometry Grid Sensor. *Sensors*, 17(7) (2017).
- [29] Amano, Y. The Fukushima Daiichi accident (Der Unfall in Fukushima Daiichi). Internationale Atomenergiebehörde, verfügbar unter: <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1710-reportbythedg-web.pdf> (Zugriff: 24. April 2024), 2015.
- [30] Valupadasu, S.; Hampel, U.; Schleicher, E.; Bieberle, A., Development of a Thermal Anemometry Grid Sensor for Steam-Water Two-Phase Flow. Specialist Workshop on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics and Severe Accidents - SWINTH, Dresden, Germany, 17.-20.06.2024.