

# Modulare Sensor-Testplattform für Hochtemperaturanwendungen bis 300 °C

*Björn Bieske, Tom Reinhold, Marco Reinhard*  
 IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH),  
 Ehrenbergstr. 27, 98693 ILMENAU, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Dauertemperatureinsatzbereiche von Halbleiterbauelementen sind bis 125 °C als Standards definiert. Für spezielle elektronische Schaltungen in den Bereichen Automotive und Sensorik werden aber Einsatztemperaturen bis zu 300 °C verlangt. Zur Evaluierung dieser Schaltungen wird eine innovative Hochtemperatur-Testplattform vorgestellt, die am IMMS entwickelt wurde und als Kernstück eine Schaltkreisfassung mit Heizung und Temperaturregelung beinhaltet. Als Demonstrator wird ein Drucksensor-ASIC damit charakterisiert.

**Keywords:** Hochtemperaturtest; Testmethodik; IC-Fassung; Evaluierung, Sensorik.

## Einleitung

In vielen Industrieanlagen und im Automobilbereich [1] werden Sensoren eingesetzt, die über einen großen Temperaturbereich korrekte Messwerte unterschiedlichster Messgrößen liefern müssen. Die Sensoren und deren Sensorelektroniken zur Aufbereitung der Messwerte sollen in ein gemeinsames Gehäuse integriert werden. Dadurch entstehen Anforderungen an Schaltkreise, welche die bisher definierten Temperaturbereiche weit übersteigen. Als Standard wurden vier Einsatztemperaturbereiche für den Dauerbetrieb elektronischer (Halbleiter)-Bauelemente definiert:

- Kommerzieller Temperaturbereich:  
0 °C bis +70 °C:  
Unterhaltungs- und „Consumer-Elektronik“,  
Radio, TV, Computer, Smart Home
- Industrieller Temperaturbereich:  
–40 °C bis +85 °C:  
Industrielle Elektronik, Steuerungen, Regelungen,  
Sensorik, Maschinen
- Automobil-Temperaturbereich:  
–40 °C bis +125 °C:  
Motornahe Elektronik, Steuergeräte, Klima-  
geräte, Sensoren, Abgasüberwachung
- Militärischer Temperaturbereich:  
–55 °C bis +125 °C:  
Luftfahrtindustrie, Funkgeräte, Messgeräte

Für spezielle Anwendungen liegen die Anforderungen jenseits dieser Temperaturbereiche. So werden in der Nähe von Hitzequellen integrierte Schaltungen benötigt, die im Temperaturbereich bis 300 °C zuverlässig funktionieren

müssen, z.B. an Verbrennungsmaschinen oder an Bohrköpfen für Tiefenbohrungen. Derartige Schaltungen funktionieren bei diesen Temperaturen aufgrund physikalischer Grenzen nicht mehr in Standard-CMOS-Technologien [2].

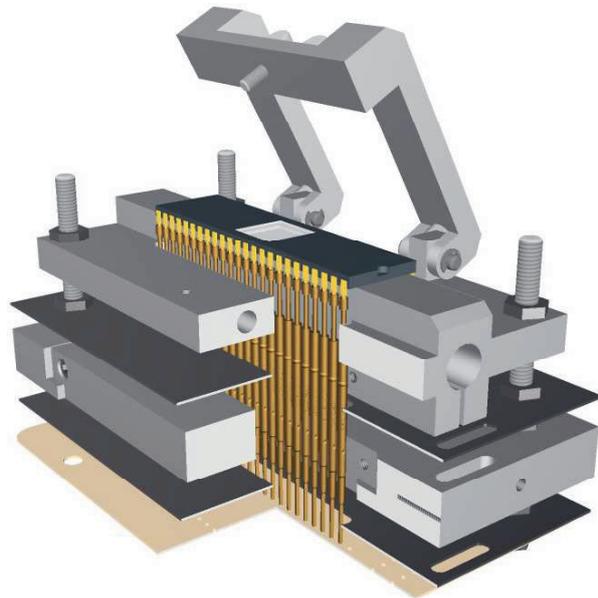


Abb. 1: Design der Hochtemperatur- Schaltkreis-Fassung für DIL-Gehäuse

## Hochtemperatur-Schaltungen

Als Alternative werden spezielle Silicon-On-Insulator-Technologien (SOI) verwendet, die im Temperaturbereich bis 300 °C einsetzbar sind [3]. Voraussetzung für die Realisierung komplexer integrierter Strukturen und Schaltungen sind genaue Modelle der verwendeten

Elemente. Grundlage für eine genaue Modellierung sind genaue Messwerte über den kompletten Temperaturbereich. Entsprechend wird eine Hochtemperatur-Testplattform benötigt, die es ermöglicht, das Testobjekt („Device under Test“ - DUT) bis 300 °C reproduzierbar zu temperieren. Die umgebende Testschaltung mit externen Komponenten darf in vielen Fällen nur in den Standard-Temperaturbereichen betrieben werden und muss vom DUT separiert werden.

Zur Realisierung, Evaluierung und Charakterisierung von Hochtemperaturschaltungen gibt es folgende Möglichkeiten:

- Wafermessung, nötige externe Bauelemente werden auf einer Probecard platziert [4]
- Hybridschaltung auf Keramik mit externen Komponenten (Dickschichttechnologie)
- IC im Keramik-Gehäuse und externe Komponenten auf abgesetzter Platine

Die Keramik-Gehäuse zur Aufnahme der Hochtemperatur-Schaltung [5] sind bis 300 °C einsetzbar (Abb. 2). Die abgesetzte Platine zur weiteren Signalverarbeitung mit den externen Bauelementen wird nicht den hohen Temperaturen ausgesetzt und kann damit als konventionelle Lösung auf herkömmlichen Substratmaterialien realisiert werden [7]. Dieser Ansatz stellt einen guten Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen dar und wird mit einer Hochtemperaturfassung für DIL-Gehäuse (Dual in Line) realisiert, was im Folgenden detailliert beschrieben wird.

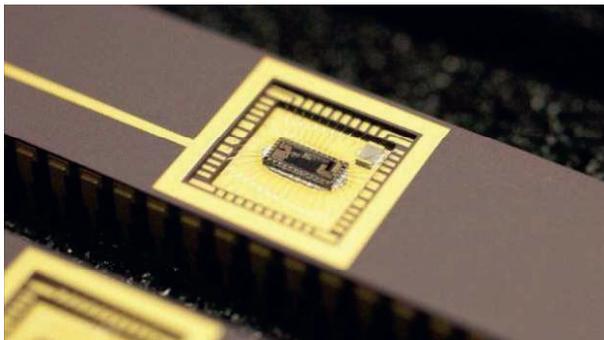


Abb. 2: ASIC D2040A und Temperatursensor im Keramikgehäuse DIL-40

Im Gegensatz dazu benötigt man für die Wafermessung einen Waferprober mit Thermochuck und Probecard bzw. Einzelnadeln zur Kontaktierung des DUT [4], was einen erheblichen technischen Aufwand darstellt.

Die Variante mit einer Hybridschaltung auf Keramiksubstrat ist eine sehr kompakte Lösung, die aber zusätzlichen Aufwand an Aufbau- und Verbindungstechnik voraussetzt. Die umgebende Applikationsschaltung mit den

externen Komponenten ist dann aber fest definiert und nicht flexibel an die jeweiligen Bedingungen anpassbar.

Bei entsprechender Größe könnte diese aber auch in ein passendes DIL-Gehäuse zur Kontaktierung mit der vorgestellten Hochtemperaturfassung eingebettet werden.

Für konfigurierbare Tests zur Evaluierung und Charakterisierung von Sensor-Schaltkreisen wurde eine portable Testplattform entwickelt, welche Messungen an ASICs (Application Specific Integrated Circuit) unter Verwendung einer applikationsspezifischen Schaltung bis 300°C ermöglicht. Diese Testplattform wurde modular gestaltet, um Schaltungselemente flexibel an verschiedene Testanforderungen anpassen zu können. Das zentrale Element der Plattform bildet die spezielle Hochtemperaturfassung, die als Aufnahme für das Testobjekt (DUT) dient (Abb. 1).

### Hochtemperatur-Fassung mit Heizung

Die am IMMS entwickelte Hochtemperaturfassung für DIL-Gehäuse (Abb. 1) wurde im Rahmen der Entwicklung der Testplattform für Evaluierungs- und Demonstrationszwecke von Sensorschaltungen konstruiert. Dabei spielt die optische und mechanische Erreichbarkeit des Testobjekts eine wichtige Rolle, was sich in den Eigenschaften der Fassung widerspiegeln muss.

Durch die deutlich höheren Temperaturen im Vergleich zu den aufgeführten Standard-Temperaturbereichen ergeben sich neue Anforderungen, die beim herkömmlichen Test von Bauelementen keine Rolle spielen. Die Auswahl der passenden Materialien [5] ist eine wesentliche Voraussetzung für eine stabile und robuste Testplattform. Kommerziell verfügbare Hochtemperaturfassungen [6,9] waren für den geplanten Demonstratoraufbau nicht einsetzbar, da sie zur Temperierung des Testobjekts (DUT) eine externe Wärmequelle oder Klimakammer benötigten und die Kontaktierung des DUT nicht in gewünschter Weise realisierbar war.

Folgende Anforderungen sollen von der neu entwickelten Hochtemperatur-Testfassung erfüllt werden:

- Elektrische Kontaktierung:  
DUT ist einfach wechselbar
- Temperierung des DUT:  
Aufbau ohne eine zusätzliche externe Wärmequelle z.B. Ofen oder Thermostream®
- Messung der DUT-Temperatur für Regelung:  
Temperatursensor oder Infrarotthermometer
- Testlösung als Demonstrator bzw. Referenz-Applikationsschaltung
- Kompakter und transportabler Aufbau

Daraus ergibt sich, dass direkt in die Hochtemperaturfassung ein Heizelement und ein Temperatursensor integriert sein müssen. Die Heizleistung muss ausreichend groß sein, um ein schnelles Aufheizen zu ermöglichen. Die Abkühlung soll durch einfache Konvektion erfolgen. Erste Tests mit verfügbaren Heizelementen ergaben, dass mindestens 100 W erforderlich sind, wenn von einer Aufheizzeit von maximal zehn Minuten ausgegangen wird. Die Temperaturverläufe beim Aufheizen sind in Abb. 3 dargestellt.

Die Heizelemente müssen mit Gleichspannung unter 60 V betrieben werden, da ansonsten der Grenzwert für Kleinspannungen überschritten wird und die erforderlichen Maßnahmen für Isolation und Berührungsschutz einen praktikablen Betrieb des Testsystems verhindern würden. Außerdem werden durch den DC-Betrieb Störquellen vermieden, die durch kapazitive Einkopplung zu einer Beeinträchtigung der Messergebnisse führen können.

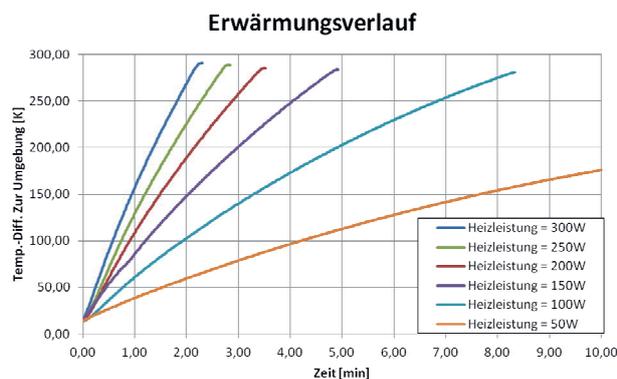


Abb. 3: Aufheizkurve der Hochtemperaturfassung ohne DUT [11]

Daher kommt eine Heizpatrone mit einer Leistung von 160 W bei einer Betriebsspannung von 24 V zum Einsatz. Diese bildet zusammen mit einem Aluminiumblock und einem integrierten Temperatursensor das Heizelement der Fassung. Die Regelung erfolgt digital. Die Genauigkeit der Temperierung liegt im Bereich von +/- 5 K bei 300 °C.

### Kontaktierung des DUT

Die elektrische Isolation der Pins des DUT und die thermische Isolation des DUT zur Umgebung und zu externen Bauteilen müssen gewährleistet sein. Als Gehäuse für die zu untersuchenden integrierten Schaltungen wurden einfach verfügbare keramische DIL-Gehäuse mit maximal 48 Pins und einem Reihenabstand von 600 mil = 15,24 mm ausgewählt.

Diese bieten auch genügend Platz für größere Schaltkreise und haben eine ausreichend gro-

ße Fläche im Gehäuseboden zur thermischen Kopplung zum Heizelement der Fassung. Der Abstand der Pins ist ausreichend groß, um eine sichere Kontaktierung sowie eine gute Isolation und eine stabile Führung der Kontaktierungsvorrichtung zu realisieren (Abb. 4).

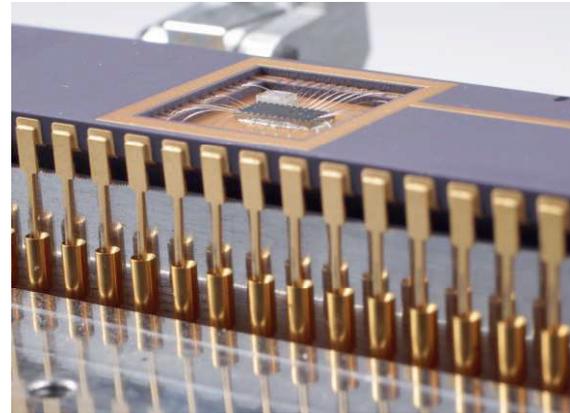


Abb. 4: Federkontakte zur Kontaktierung der Pins des DIL-Gehäuses in der Hochtemperaturfassung [8]

Die beschriebenen Ansätze und Gesichtspunkte können auf Vorrichtungen für weitere präzisere Messungen direkt übertragen werden. Falls sich diese Notwendigkeit ergibt ist allerdings ein anderes Design des Heizelementes zu verwenden, um Verfälschungen der Messergebnisse zu vermeiden und die Toleranzen der Temperierung zu verringern. Alternativ kann die Heizung während der Messung abgeschaltet werden.

Außerdem stellen die hohen Temperaturen hohe Ansprüche an die Aufbau- und Verbindungstechnik. So überschreitet die Maximaltemperatur den Schmelzpunkt herkömmlicher Lote. Herkömmliche kostengünstige Leiterplattenmaterialien sind bereits ab 125 °C nicht mehr einsetzbar, Hochtemperaturmaterialien sind bis 230 °C einsetzbar [7].

Die Kontaktierung der Pins erfolgt mit Federkontakten (Abb. 5), die folgende Eigenschaften aufweisen müssen:

- Abstand von 100 mil (2,54 mm), Breite < 2,4 mm
- Kopf: Innenkegel zur Ausrichtung der Pins
- Länge = Fassungshöhe (Realisierung der thermischen Isolation durch Abstand)
- Temperaturbeständigkeit

Die Maximaltemperatur der verfügbaren Federkontakte beträgt 200 °C [8]. Daher müssen diese nicht nur elektrisch, sondern auch thermisch vom Heizelement isoliert gehalten werden. Die zwei Federkontaktreihen werden mit hitzefestem Isolierschlauch überzogen und in



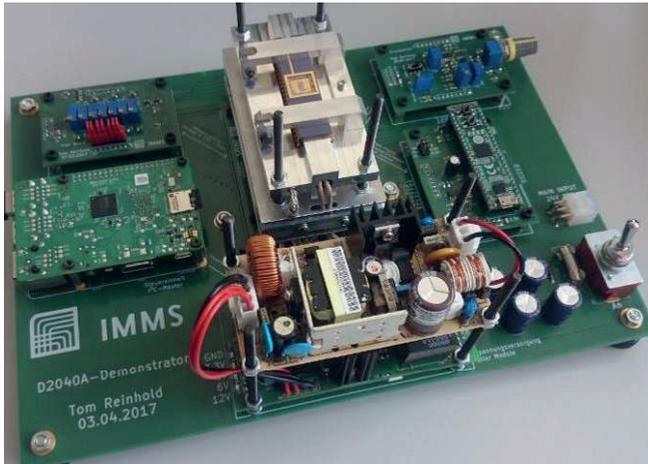


Abb. 8: Finaler Demonstrator der Hochtemperatur Testplattform mit Interface- und Messmodulen für den ASIC D2040A

### Modulare Testplattform als Demonstrator

Die entwickelte Hochtemperaturfassung wird zur Testplattform als Demonstratoraufbau mit modularem Konzept erweitert (Abb. 7). Auf einer Grundplatine werden die benötigten Module angeordnet und kontaktiert [11]. Diese können anwendungsspezifisch ausgeführt werden.

Die Stromversorgung erfolgt über ein Schaltnetzteil, woraus die 24 V für die Heizung und verschiedene Spannungen zwischen 3,3 und 12 V für die Steuerungselektronik bereitgestellt werden. Durch dieses externe Schaltnetzteil erfolgt gleichzeitig die Schutzisolation vom Stromnetz für den gesamten Demonstrator.

Die Temperaturregelung der Fassung erfolgt mit Hilfe eines Einplatinen-Computers vom Typ Raspberry Pi® mit Linux-basiertem Betriebssystem. Dieser kann zur Ansteuerung der Messhardware verschiedene serielle Bussysteme (I2C, SPI) und Interfaceleitungen (GPIOs) als konfigurierbare Steuerleitungen bedienen. Die Programmierung erfolgt in C++ oder Python™.

Das Systemkonzept ist dafür ausgelegt, dass die gewonnenen Messdaten und der Temperaturverlauf auf einem externen Monitor grafisch dargestellt werden können (Abb. 7).

Die DUT-spezifische Messhardware wird in Form verschiedener Module auf die Grundplatine (Motherboard) aufgesetzt (Abb. 8). In diesen wird die Signalauswertung im FPGA realisiert.

Um verschiedene Eingangssignale und Fehlerfälle des ASICs und der Messbrücke (Kurzschlüsse bzw. offene Verbindungen) emulieren zu können, wird der Sensor als resistive Brücke aus einzelnen Widerständen nachgebildet. Einige Teilwiderstände sind einstellbar ausge-

führt, um die Messbrücke gezielt verstimmen zu können. Mit Hilfe eines Oszilloskops können die Signalverläufe überprüft und weitergehend analysiert werden [11].

Der gesamte Demonstrator nimmt etwa die Fläche eines DIN A4 Blattes ein und kann dadurch einfach transportiert werden.

### Ergebnisse und Ausblick

Es wurde eine modulare Hochtemperatur-Testplattform entwickelt, in der Bauelemente im keramischen DIL-Gehäuse bis 300 °C charakterisiert werden können. In der Hochtemperaturfassung werden die Bauelemente kontrolliert temperiert und sicher elektrisch kontaktiert. Die Gehäuse werden mit Deckeln verschlossen, um die Schaltungsfunktion nicht mit Licht zu beeinträchtigen. Durch eine Aussparung im Deckel der Fassung können die Testobjekte auch optisch überwacht werden.

Die notwendigen zusätzlichen Module zur Verarbeitung der Messwerte für das jeweilige DUT werden auf einer Grundplatine als kompakter Aufbau zusammengefasst.

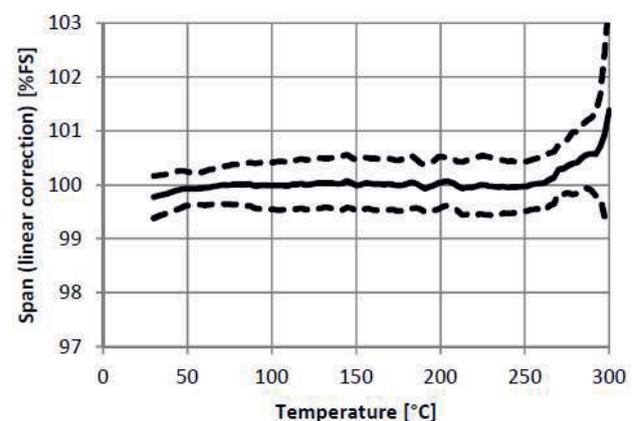
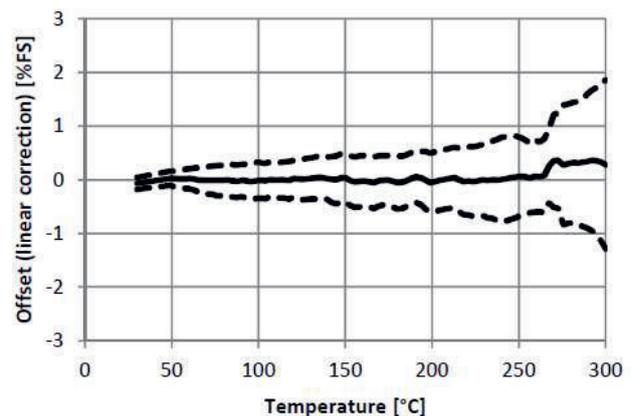


Abb. 9: Abweichungen von Nullpunkt und Vollausschlag der Messergebnisse des ASICs D2040A über der Temperatur nach der Kalibrierung [10]

Mit der vorgestellten innovativen Hochtemperatur-Testplattform konnte die Funktionsfähigkeit des Drucksensor-ASICs D2040A [10] im Temperaturbereich bis 300 °C nachgewiesen werden. Hierzu wurde relative Änderung der ausgegebenen Messwerte im Nullpunkt und bei Vollaussteuerung nach einer notwendigen Kalibrierung für verschiedene Schaltkreise aufgetragen. Die Daten der Brückenelektronik (Nullpunkt und Verstärkung) blieben über der Temperatur stabil.

Im Diagramm sind die Mittelwerte und maximalen Abweichungen dargestellt (Abb. 9).

Die gemessenen Daten können auf einem externen Monitor in Echtzeit dargestellt werden. Die grafische Aufbereitung und Anzeige der Daten erfolgt mit der Software im Steuerungs-Rechner.

Das Aufheizen des DUT auf 300 °C erfolgt in einer Zeit von sechs Minuten. Der Abkühlvorgang verläuft exponentiell durch freie Konvektion mit einer Zeitkonstante von etwa zehn Minuten [11].

Der modulare Aufbau erlaubt eine einfache Anpassung der Testplattform an andere Testobjekte bzw. Testschaltungen und ist als transportable Lösung ausgeführt. Die Visualisierung der Messergebnisse kann durch den verwendeten Einplatinen-Computer Raspberry Pi® weiter ausgebaut werden. Durch den Austausch der entsprechenden Module kann die Testplattform als Demonstrator für verschiedene DUT-ASICs eingesetzt werden.

Auf Grund des modularen Konzepts der Messplattform kann die Hochtemperaturfassung außerdem für andere Gehäusevarianten ausgelegt werden. Weiterhin könnten Hybrid-Schaltungen auf hochtemperaturfesten Keramiksubstraten bei entsprechender Fixierung ebenfalls für Hochtemperaturmessungen temperiert werden. Damit sind die Messmöglichkeiten auf einfache Weise erweiterbar.

Mit der neuen modularen Hochtemperatur-Testplattform wurde der Messbrücken-ASIC D2040A untersucht [12], der bereits im Projekt HoTSens vom IMMS erarbeitet worden war. Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ unter den Kennzeichen 16ES0008 gefördert.

## Literaturnachweis

- [1] J. Agostino, Ch. Schweizer: „Hochtemperatur Elektronik,“ *Auto & Elektronik* 3/2004, S 42-43.
- [2] P. Rolfes, Hochtemperaturschaltungstechnik, Aachen: Shaker Verlag, 1999. ISBN-13: 9783826563072
- [3] St. Richter, W. Göttlich, D. Nuernbergk, V. Nakov, S. Bormann: „Hitze fest - Design von Mixed-Signal-Hochtemperatur-ICs“, *Design & Elektronik*, Sonderdruck, März 2002, S. 56ff
- [4] M. Reinhard, U. Liebold, A. Richter, I. Gryl: „Hochtemperatur-Wafertest bis 300 °C“, 28. GMM/GI/ITG Workshop, TuZ 2016, 06.03.2016 - 08.03.2016, Siegen, Germany
- [5] R. Klieber; R. Lerch: „Evaluation of materials for high temperature IC packaging“, 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, 2009, page 117-120.
- [6] Reliability System Test SOLUTIONS Inc., „RS Solutions,“ <http://rssolutionsinc.com/high-temperature-sockets/>. (31 Januar 2017)
- [7] Multi-CB Leiterplatten GmbH: „Hoch-TG-Leiterplatten (HTG)“, <https://www.multi-circuit-boards.eu/produkte/leiterplatten/hoch-tg.html> (18.01.2018)
- [8] INGUN Prüfmittelbau GmbH, „ingun,“ <http://www.ingun.com> (24.04.2019)
- [9] Janis Research Company, LLC, „Janis - Products - CryogenicAccessories“, <https://www.janis.com/Products/AccessoriesandAncillaryEquipment/CryogenicAccessories.aspx>. (20. 04. 2019).
- [10] G. Gläser, D. Kirsten, A. Richter, M. Reinhard, G. Kropp, D. Nuernbergk: „High-Precision Mixed-Signal Sensor Interface for a Wide Temperature - Range [0 °-300 °C]“, *High Temperature Electronics Network (HiTEN 2017)*, S. 36-41, Cambridge, UK, July 10-12, 2017
- [11] T. Reinhold: „Konzeption und Realisierung eines Demonstrator-Aufbaus für einen integrierten Hochtemperaturschaltkreis“, BA TU Ilmenau 2017
- [12] B. Bieske. T. Reinhold, M. Reinhard.: „Modulare Hochtemperatur-Testplattform bis 300 °C“, 30. GMM/GI/ITG Workshop Test und Zuverlässigkeit, TuZ 2018, 04.03.2018 - 06.03.2018, Freiburg (Breisgau), Germany