

Thermisches Verhalten von piezoresistiven Drucksensoren – Charakterisierung und Modellierung

Dipl.-Ing. Geert Brokmann, CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH,
Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt,

Tel. 0361 663 1431, email: gbrokmann@cismst.de

Dr. sc. nat. Hartmut Übensee, CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH,
Tel. 0361 663 1425, email: huebensee@cismst.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach, TU Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01062 Dresden,
Tel. 0351 463 3 2077, email: Gerald.Gerlach@tu-dresden.de

Zusammenfassung

An Drucksensoren aus einkristallinem Silizium auf der Basis anisotrop nasschemisch geätzter Biegeplatten und diffundierter piezoresistiver Widerstände wurden Untersuchungen zum thermischen Verhalten nach dem Einschalten durchgeführt. Es wurden mit elektrischen Messungen des Einlaufverhaltens und der Lock-in-Thermographie zwei unabhängige Messverfahren zur Charakterisierung des transienten Verhaltens mit einer FE-Modellierung verwendet, die Messergebnisse verglichen und anschließend die RC-Parameter eines SPICE-Modells angefügt. Dieses Teilmodell kann in ein umfassendes Verhaltensmodell für piezoresistive Siliziumdrucksensoren integriert werden.

1. Einleitung

Drucksensoren für die Automatisierungstechnik müssen sehr hohen Anforderungen an die Langzeitstabilität genügen. Vor allem das Einlaufverhalten und die Reaktion auf Änderungen der Umgebungsbedingungen (hauptsächlich Temperatur) sind wichtige, die Stabilität charakterisierende Parameter. Zur Bestimmung der Ursachen für Drifteffekte müssen thermische, mechanische und elektrische Effekte und deren Wechselwirkungen sowohl einzeln als auch miteinander verknüpft betrachtet werden [Die04].

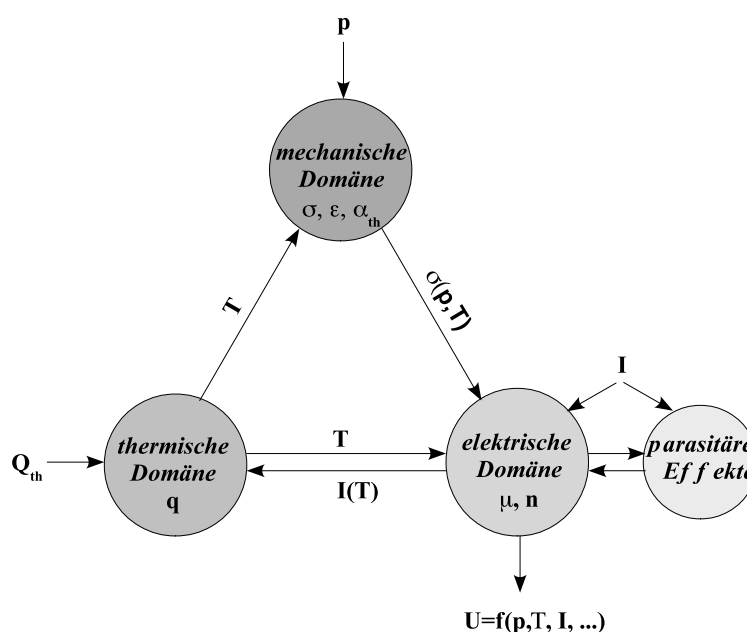


Abb. 1: Physikalische Domänen und deren Verkopplung in einem piezoresistiven Drucksensor

In Abb. 1 sind die relevanten physikalischen Domänen in einem piezoresistiven Drucksensor und deren wichtigsten Verkopplungen dargestellt. Die Temperatur beeinflusst hier alle Teilbereiche und Kopplungen. Gegenstand der hier beschriebenen Untersuchungen sind die Wechselwirkungen zwischen thermischer und elektrischer Domäne. Um diese Wechselwirkungen zu erfassen, wurden elektrische Einlaufmessungen und Lock-in-Thermographie-Messungen durchgeführt. Weiter wurde das thermische Verhalten mit dem FEM-Simulator ANSYS modelliert sowie die Parameter eines Tiefpasses als SPICE-Modell an die ermittelten Messwerte angefügt.

2. Sensorelement

Das Einlaufverhalten von piezoresistiven Drucksensoren wird mit speziellen Sensoraufbauten und Messvorrichtungen geprüft. Um mögliche Einflüsse durch sich verändernde Umgebungsbedingungen zu minimieren, werden Einzelchips oder auf Gegenkörper gebondete Chips an Doppelbonddrahtbrücken frei aufgehängt. Die elektrische Kontaktierung erfolgt über eine Leiterkarte mit weiterführenden Kontaktstiften. Die Kontakte werden durch einen runden Träger aus PBT GK30 (Polybutylterephthalat mit 30 % Glasfasern gefüllt) geführt (Abb. 2a). Bis zu 10 Träger werden so in einem Aluminiumblock platziert, dass die Chips an den Bonddrähten hängen und von einem dünnen Luftspalt umgeben sind. Der gesamte Block wird für die Dauer der Einlaufmessungen in einem Klimaschrank temperiert.

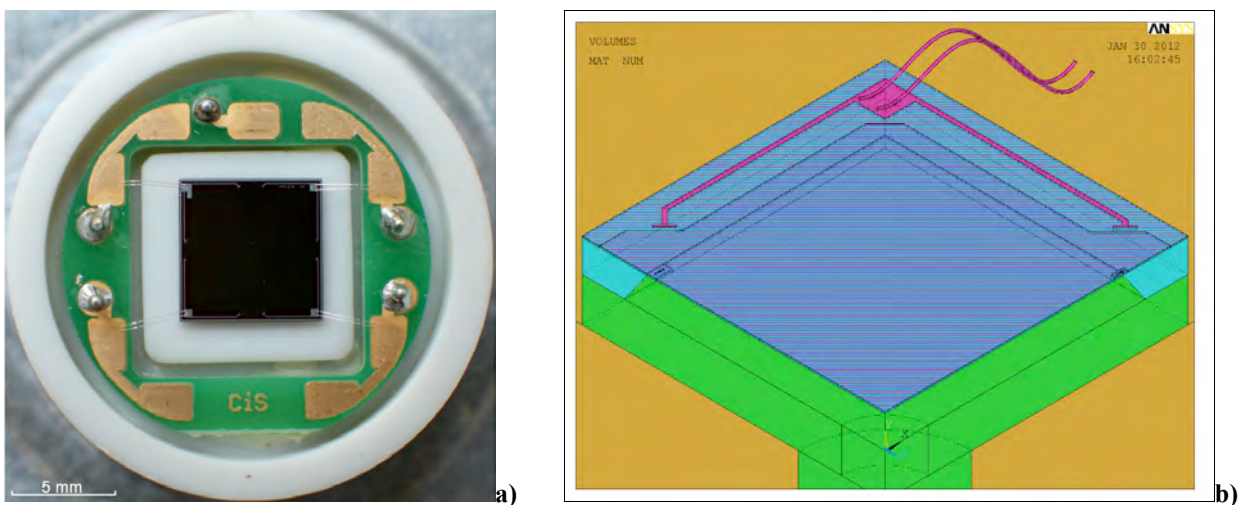


Abb. 2: Piezoresistiver Drucksensor an Bonddrähten aufgehängt

a) Anordnung mit Kunststoffsockel; b) FE-Modell eines Sensorchipviertels mit: gelb – PBT-Träger, grün – Luft, cyan – Silizium, blau – Deckschichten (SiO_2 , Si_3N_4 , Poly-Silizium), rot – Aluminium-Metallisierung

In Abb. 2b sind farblich abgesetzt die unterschiedlichen Materialien der gesamten Anordnung im für die Modellierungen verwendeten FE-Modell dargestellt, wobei aus Symmetriegründen nur ein Viertel des Chips betrachtet werden brauchte.

Im Bereich der Membraneinspannung sind an den Symmetriekanten die Widerstandselemente erkennbar.

3. Mess- und Modellierungsergebnisse

Die Mess- und Modellierungsergebnisse beziehen sich auf den in Abb. 2 dargestellten Sensorchip in der Messanordnung mit den zugehörigen Geometrie- und Materialparameter.

3.1. Messung des Brückenwiderstandes

Mit den beschriebenen Messobjekten und –anordnungen wurden Einlaufeffekte für den die Erwärmung des Chips charakterisierenden Brückenwiderstand R_i untersucht.

Das Einlaufverhalten des Brückenspeisestromes wurde für ca. 1200 s und ca. 10 Messwerte pro Sekunde erfasst.

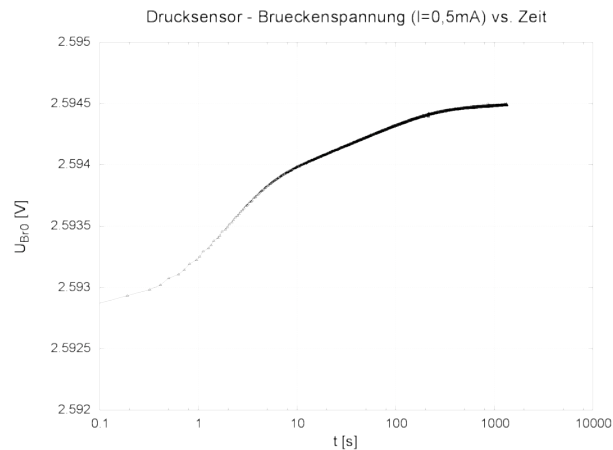


Abb. 3: Verlauf der Brückenspeisespannung vs. Zeit bei Konstantstromspeisung

In Abb. 3 ist der Verlauf der Brückenspeisespannung über der Zeit für Konstantstromspeisung mit 0,5 mA dargestellt.

Anhand der Messdaten und des Temperaturkoeffizienten der Messbrücken von $0,0025 \text{ K}^{-1}$ kann die Temperaturüberhöhung im Bereich der Piezo-Widerstände für das Einlaufen zu ca. 0,3 K bei einer Einlaufzeit von ca. 10 s abgeschätzt werden. Es schließt sich die Erwärmung der gesamten Anordnung an, die offenbar nach 1200 s noch nicht abgeschlossen ist.

Für weitere Untersuchungen wurde die berechnete Eigenerwärmung der Widerstände verwendet.

3.2. Lock-in-Thermografie

Eine weitere unabhängige Messung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturverteilung im Sensor erfolgte mittels Lock-in-Thermographie (LIT) [Hut02]. Die elektrischen Anschlüsse wurden mit dem Lock-In-Thermographie-System TDL 640 (Thermosensorik GmbH) verbunden. Durch gepulste elektrische Anregung und ein spezielles Phasenkorrelationsverfahren der einzelnen Thermographiebilder ist es mittels LIT möglich, sehr schwache thermische Emissionen im μK -Bereich auch auf Materialien mit vergleichsweise hoher Wärmeleitfähigkeit wie Silizium zu bestimmen und mit hoher Ortsauflösung bis zu $1 \mu\text{m}$ genau den entsprechenden Strukturen zuzuordnen. Als Ergebnis können Amplitudenbilder mit qualitativer Darstellung des Temperaturhubs und Phasenbilder mit Darstellung der Phasenverschiebung zwischen Anregung und thermischer Antwort ermittelt und ausgewertet werden.

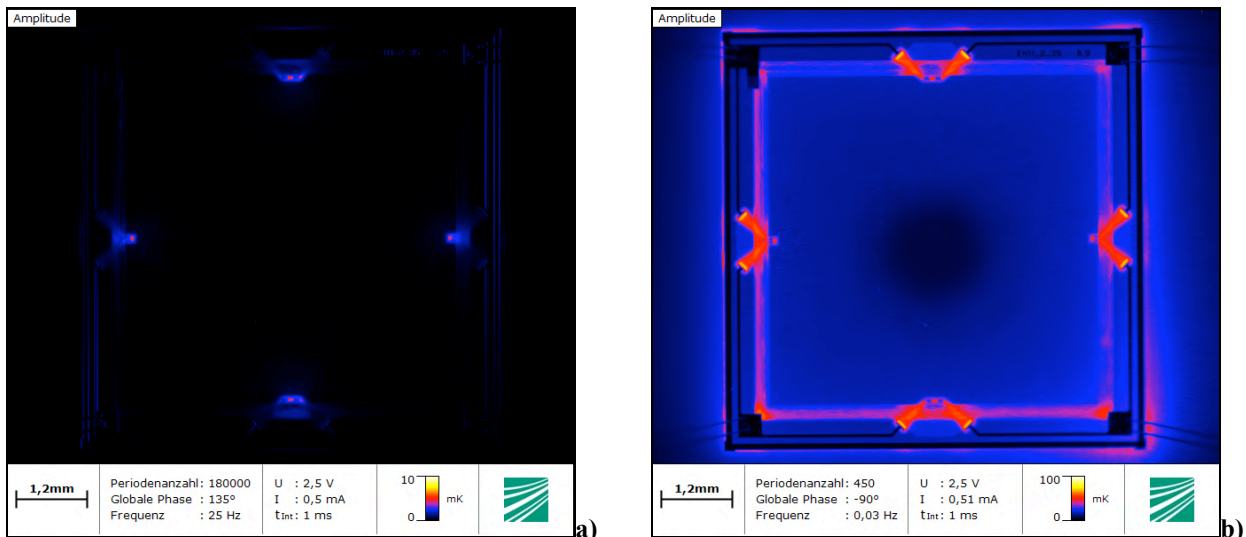


Abb. 4: Lock-in-Thermografiebild eines Silizium-Drucksensors mit piezoresistiver Messbrücke
 a) nach 20 ms Messzeit; b) nach 20 s Messzeit.

In Abb. 4a ist eine LIT-Aufnahme eines piezoresistiven Drucksensors nach 20 ms Messdauer dargestellt. Dies stellt die mit dem verfügbaren LIT-Messsystem kleinste mögliche Messzeit dar. Das größte, noch sinnvoll messbare LIT-Intervall betrug 20 s (Abb. 4b) [Gro10].

Für diese Untersuchungen wurden Messungen bei fünf verschiedenen Anregungsfrequenzen (25 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,2 Hz und 0,025 Hz) durchgeführt. Die angelegte Spannung wurde so eingestellt, dass ein Strom von etwa 500 μ A fließt.

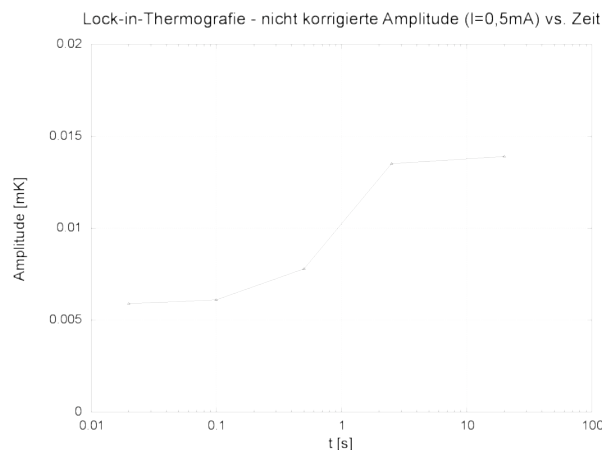


Abb. 5: Lock-in-Thermografie-Messergebnisse – Signalamplitude der Temperaturmessung vs. Impulsdauer

In Abb. 5 sind die nicht korrigierten Amplitudenwerte der Temperaturerhöhung für die verschiedenen Anregungsfrequenzen über der Dauer des Anregungsimpulses aufgetragen. Bei Messungen mit niedrigerer Anregungsfrequenz steht für die Erwärmung des Sensorelements eine längere Zeit zur Verfügung. Die gemessene Signalamplitude wird in diesem Bereich maximal. Die Auswertung der Amplituden im Widerstandsbereich erfolgt mit der Auswertesoftware durch vertikale oder horizontale Linescans. Im Fall einer unveränderten Lage des Sensors sind die Amplitudenwerte reproduzierbar.

Aufgrund nicht bekannter Emissivitäten der verschiedenen Sensormaterialien kann aus den Signalamplituden keine Temperatur berechnet werden. Bei gleichem Sensor und variierender thermischer Last ist der qualitative Verlauf der Amplituden allerdings reproduzierbar.

3.3. Modellierung des thermischen Verhaltens

Der Messaufbau zur Erfassung der Eigenerwärmung und der LIT-Messaufbau wurden mit dem FEM-Simulator ANSYS Multiphysics V13.0 modelliert. Die Geometrien von Chip, Sockel und Sensoraufbau wurden realitätsnah abgebildet, indem unter Nutzung von Modellsymmetrien ein Viertelmodell des Drucksensor verwendet wurde, das jeweils ein Bahnelement des radialen und des transversalen Widerstandes enthält (siehe Abb. 2b). Das Schichtsystem der Druckplatte des Sensorchips aus SiO_2 , Si_3N_4 , Poly-Si und Al wurde berücksichtigt. Die Widerstände wurden mit 0,5 mA Strom beaufschlagt und wiesen bei technologisch bedingten Abmessungen von 9 μm Breite, 100 μm Länge und 3 μm Tiefe Nennwiderstände von 2500 Ω auf. Die Geometrieparameter von Luftspalten und die Konvektionsparameter der Oberflächen und Wärmesenken wurden im Rahmen von in der Fachliteratur genannten Grenzen parametrisiert [Ger06]. Auf der Unterseite der in das Modell integrierten Rückplatte wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von $400 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und für die inneren Flächen in ruhender Luft und für alle Aussenflächen ein Wärmeübergangskoeffizient von $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angenommen. In [Str04] wird bei freier Konvektion ein Wärmeübergangskoeffizient von $5 \dots 25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und für Wärmestrahlung bei ca. 30°C Umgebungstemperatur ein zusätzlicher Wärmeübergangskoeffizient von $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angegeben.

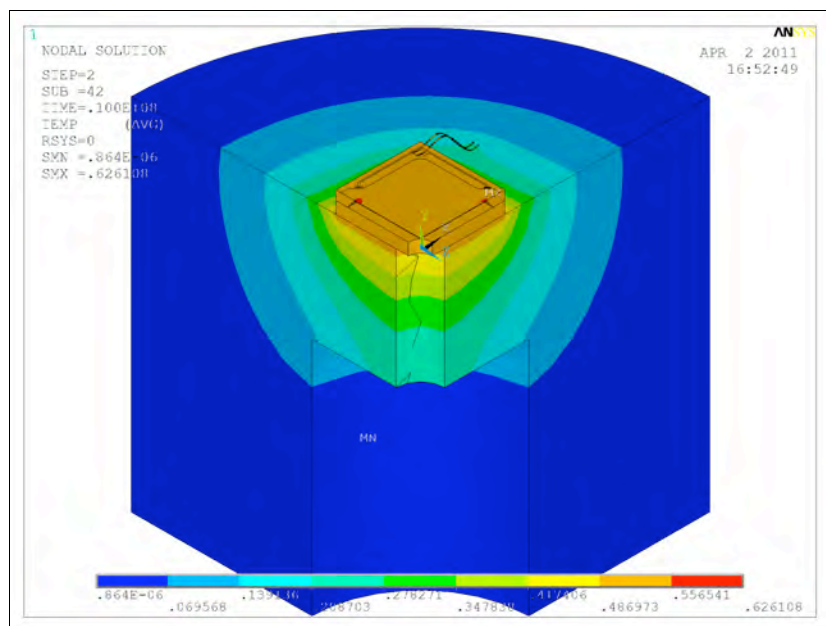


Abb. 6: Temperaturverteilung im FE-Viertelmodell nach 10000 s

In Abb. 6 ist die Temperaturverteilung im FE-Viertelmodell nach 10000 s dargestellt, was praktisch dem thermischen Gleichgewicht entspricht. Der Wärmefluss zwischen zwei Widerstandsbahnelementen erfolgt zu einem Teil über die Membran und zu einem anderen Teil über den Bondrahmen. Die genaue Verteilung der Wärmeflüsse ist von den Parametern Plattendicke, Deckschichtdicken und –material,

Bondrahmenbreite (bei gebondetem Gegenkörper) und Luftspaltbreite bzw. dem Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung abhängig.

3.4. Modellierung des transienten thermischen Verhaltens

Für eine Integration in ein Verhaltensmodell des piezoresistiven Drucksensors wurde ein SPICE-Modell mit Widerstands- und Kapazitäts-Ersatzelementen entwickelt, mit dem die Temperaturverteilung und die Wärmeströme im Sensoraufbau abgebildet werden können. Dabei werden thermisch-elektrische Analogien genutzt, die sich aus der Ähnlichkeit von Wärme- und Stromtransport ergeben [Ger06]. Für die weiteren Betrachtungen werden dann die in Tabelle 1 dargestellten Analogien genutzt.

Tabelle 1: Thermisch-elektrische Analogien

Thermische Größe		Elektrische Größe	
Wärmestrom	P [W]	Strom	I [A]
Temperaturdifferenz	ΔT [K]	Spannung	U [V]
Thermischer Widerstand	R_{th} [KW ⁻¹]	Widerstand	R [Ω]
Wärmekapazität	C_{th} [WsK ⁻¹]	Kapazität	C [AsV ⁻¹]

Die Widerstände der Messbrücke mit ihrer Verlustleistung werden einzeln als "Stromquellen" modelliert.

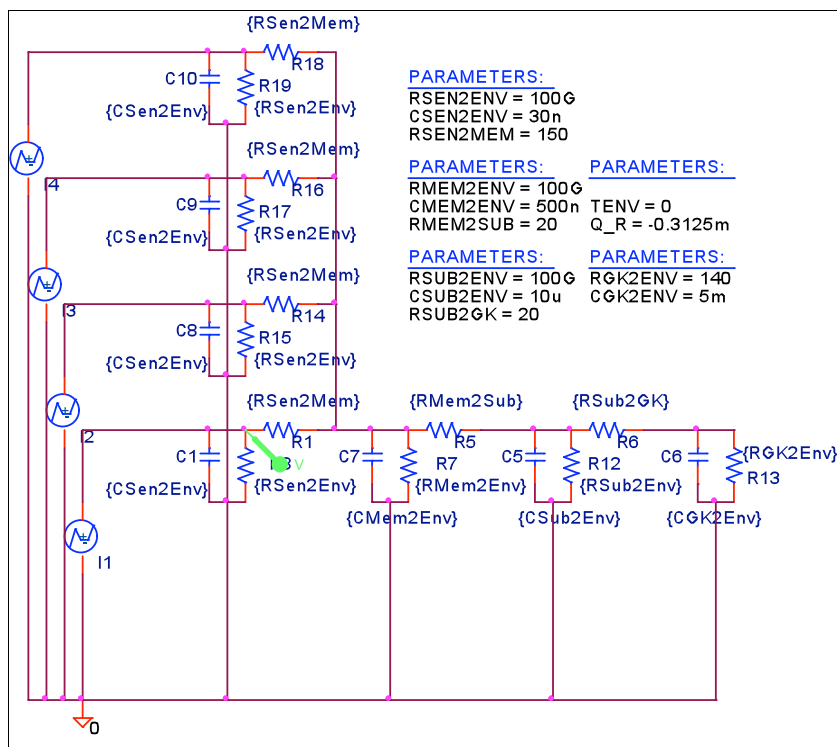


Abb. 7: SPICE-Ersatzschaltbild des Silizium-Drucksensor zur Modellierung des transienten thermischen Verhaltens

Die RC-Glieder in Abb. 7 beschreiben folgende Effekte:

- Index „Sen2Env“: von den Widerständen direkt in die Umgebung abfließende Wärmeströme,
- Index „Sen2Mem“: Wärmübergang von den Widerständen in die Membran,

- Index „Mem2Env“: von der Membran direkt in die Umgebung abfließende Wärmeströme,
- Index „Mem2Sub“: Wärmübergang von der Membran in das Substrat,
- Index „Sub2Env“: vom Substrat direkt in die Umgebung abfließende Wärmeströme,
- Index „Sub2GK“: Wärmübergang vom Substrat in den Gegenkörper und
- Index „GK2Env“: vom Gegenkörper in die Umgebung abfließende Wärmeströme.

Der Spannungsabgriff am Widerstand R1 beschreibt die Temperatur am piezoresistiven Widerstand.

3.5. Vergleich der Ergebnisse

Für den Vergleich der Ergebnisse der beiden Messverfahren und der Modellierung wurden die aus dem Widerstandsverlauf berechneten Übertemperaturen der piezoresistiven Messbrücke verwendet. Die nur eine qualitative Aussage ermöglichenden Amplitudensignale der LIT-Messungen wurden an den Verlauf der Übertemperatur der piezoresistiven Widerstände angefüttet.

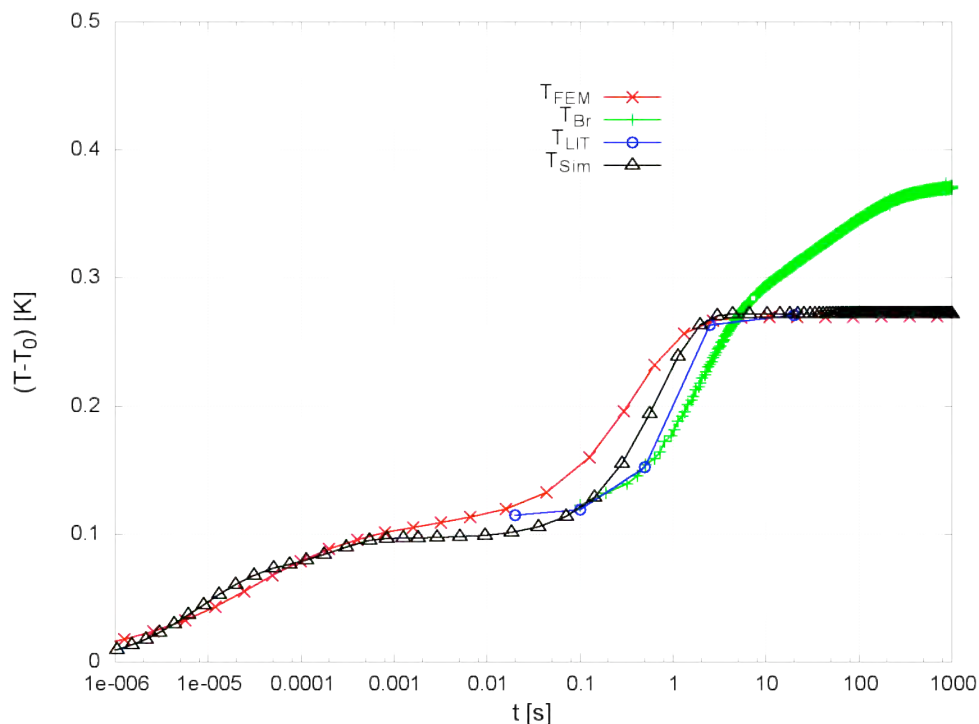


Abb. 8: Vergleich des transienten Verhaltens der Übertemperatur eines piezoresistiven Widerstandes, T_{FEM} berechnete Temperatur aus FE-Modell, T_{Br} berechnete Temperatur aus elektrischer Messung, T_{LIT} aus Signalamplitude der Lock-in-Thermografie angefüttete Temperatur, T_{Sim} mit PSPICE-Simulation angefüttete Temperatur

Der Vergleich der angepassten gemessenen, berechneten und modellierten Temperaturerhöhungen am Widerstand nach Einschalten der Messbrücke in Abb. 8 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergebnissen.

Es lassen sich vier Bereiche unterscheiden:

- $t \leq 0,001$ s: Erwärmung der Widerstände (nicht messbar),
- $0,001$ s $\leq t \leq 0,1$ s: Erwärmung der Membran,
- $0,1$ s $\leq t \leq 10$ s: Erwärmung von Chip und Sensoraufbau und

- $10 \text{ s} \leq t$: thermisches Gleichgewicht bzw. Erwärmung der Umgebung des Sensoraufbaus.

Die elektrischen Messungen T_{Br} sind ab einem Zeitpunkt von ca. 10 s durch einen zusätzlichen Erwärmungsprozess in der Umgebung der Messanordnung überlagert. Die Umgebungstemperatur bleibt trotz einer Temperierung im Klimaschrank nicht konstant, da sich der Aluminiumblock erwärmt. Diese Wechselwirkung mit der Umgebung kann in den Modellen über Konvektionskoeffizienten nur ungenau berücksichtigt werden. Die LIT-Messung T_{LIT} erfolgt unter Laborbedingungen mit optisch frei zugänglichem Sensor und wird hier mit der FEM-Simulation nachgebildet bzw. mit dem PSPICE-Modell angefüttet.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für Präzisionsdrucksensoren auf der Basis einer piezoresistiven Widerstandsmessbrücke wurden Messungen und Simulationen zum thermischen Einlaufverhalten durchgeführt. Die beiden voneinander unabhängigen Messverfahren zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ eine gute Übereinstimmung, die mit den verwendeten realitätsnahen Geometrie- und Materialparametern auch mit einer FE-Modellierung erreicht werden konnte. Das transiente Temperaturverhalten zeigt einen charakteristischen Verlauf, der auf Wärmetransportprozesse in Chip und Sensoraufbau hinweist. Für dieses beschriebene transiente Verhalten wurden die Parameter eines RC-SPICE-Ersatzmodells angefüttet.

Im Ergebnis der Untersuchungen liegt ein SPICE-Modell für das transiente thermische Verhalten dieses Siliziumdrucksensors vor, das durch zwei unabhängige Messungen und eine Simulation mit ANSYS Multiphysics verifiziert wurde.

Das SPICE-Modell kann als Teil-Modell in ein umfassenderes Verhaltensmodell für Langzeitdriftvorgänge in Präzisionsdrucksensoren integriert werden.

Literatur

- [Bro08] G. Brokmann, S. Reitz, H. Übensee, K.-H. Diener, G. Gerlach: *A procedure to obtain mechanical parameters of stacked thin films*, EUROSENSORS XXII, 2008, Dresden
- [Die04] K.-H. Diener, S. Reitz, G. Brokmann, P. Schneider, H. Übensee, H. Bartuch: *Modellierung und Simulation zur Entwurfsunterstützung Integrierter Piezoresistiver Druckmesssysteme*, 10. GMM-Workshop "Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen", 2004, Cottbus
- [Ger06] G. Gerlach und W. Dötzel: *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2006
- [Gro10] C. Große, C. Schmidt: *Lock-In Thermographie Untersuchungen an Drucksensor-Chips*, Messbericht Fraunhofer IWM Halle, 2010
- [Hut02] S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber, D. Dantz, U. Lambert and F. Altmann: *Lock-in IR-thermography - A novel tool for material and device characterization*, Solid State Phenomena 82-84, pp 741-746 (2002)
- [Str04] M. Strasser: *Entwicklung und Charakterisierung mikrostrukturierter thermoelektrischer Generatoren in Silizium-Halbleitertechnologie*, Diss. TU München, 2004