

μ Watt Wärmequelle zur Kalibration und Benchmark von IR LockIn-Systemen

Daniel MAY^{1,2}, Mohamad ABO RAS², Bernhard WUNDERLE¹

¹ TU Chemnitz, Chemnitz

² Berliner Nanotest und Design GmbH, Berlin

Kontakt E-Mail: daniel.may@etit.tu-chemnitz.de

Kurzfassung. Defekte elektronische Bauelemente zeigen oft eine anormale Verteilung oder zusätzliche Verlustleistungsquellen. Durch Joulesche Wärmeerzeugung führt dies zu lokalen Temperaturerhöhung. Neben stationärer Thermografie, die auf Temperaturänderung größer einiger 100 mK begrenzt ist, nutzt man die IR LockIn-Thermografie (LIT), um Temperaturänderungen bis in den μ K Bereich zu ermitteln. LIT ist eine Form der aktiven IR-Thermografie, die ein wesentlich besseres Signal-Rauschverhältnis, eine erhöhte Empfindlichkeit und eine höhere Auflösung als die stationäre Thermografie bietet. LIT kann in der Bauteilanalyse verwendet werden, um Kurzschlüsse, Oxidschäden, defekte Transistoren und Dioden zu lokalisieren.

Zur Kalibrierung und zum Benchmark derartiger Messsysteme wird mit dieser Arbeit ein Messnormal vorgestellt. Es basiert im Kern auf einem aktiven Siliziumchip, in dem definierte Wärmepulse erzeugt werden können. Die Leistung und Frequenz dieser Pulse wird elektronisch überwacht und geregelt, sodass die Langzeitstabilität selbst für Kalibrierungen über mehrere Stunden gewährleistet ist.

Einführung

Um die Zuverlässigkeit und Sicherheit elektronischer Komponenten dauerhaft sicherzustellen bedarf es während der Fertigungs- und Betriebsphase Kontrollen des Zustandes der Komponenten. Dazu ist ein vielfältiger Apparat von Mess- und Prüfmethode nötig, die vorzugsweise zerstörungsfrei arbeiten. Insbesondere durch die stetige Miniaturisierung der Elektronik steigen auch die Anforderungen an diese Methoden bezüglich Auflösungsvermögen und Empfindlichkeit.

Die Transient Thermischen Methoden (TTM) werden neben den klassischen Prüfmethode wie Ultraschallmikroskopie, Röntgenmethode bzw. Querschliffen erfolgreich bei Fehleranalyse und Qualitätskontrolle eingesetzt [1], [2], [3],[4], [5], [6], [7]. Dabei wird die Interaktion von Fehler und sich ausbreitenden Wärmeströmen bzw. wärmeerzeugende Fehler analysiert und bewertet.

Für die Detektion von typischen Fehlern in elektronischen Bauteilen und Komponenten lassen sich grundsätzlich verschiedene thermische Effekte nutzen. Gemeinsam haben alle, dass sie eine Änderung der Temperaturantwort eines Prüflings auf eine geeignete Eingangsstimulation verursachen. Sie können in aktive bzw. passive Effekte gruppiert werden.



Bei einem thermisch aktiven Effekt fungiert ein konkreter Fehler (ein elektrischer Kurzschluss oder ein Riss) als Wärmequelle, die die Temperaturantwort beeinflusst. Typische aktive Effekte sind hier lokale Temperaturkonzentrationen. Hingegen ist ein passiver Effekt dadurch charakterisiert, dass ein Fehler (Delamination oder Materialeinschlüsse) die Wärmediffusionsraten eines Prüflings verändert und somit auch die Temperaturantwort beeinflusst. Die folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht der gebräuchlichsten Effekte mit Einordnung der Gruppe und der typische Temperaturänderungen.

Tabelle 1 Übersicht genutzter thermischer Effekte in der Fehleranalytik

Effekt	Aktiv/Passiv	Beschreibung	Temperaturänderung
Joulesche Wärme durch elektr. Stromfluss	aktiv	Verlustleistung an elektr. Widerständen bei Stromfluss	K
Optisch modulierte thermische Anregung	passiv	Interaktion von sich ausbreitenden thermischen Wellen mit Fehlstellen und Interfaces	einige 10-100 mK
Thermoelastizität	aktiv	Temperaturänderung durch mechanische Spannungen an z.B. Rissspitzen [7]	einige mK
Mechanische Reibung	aktiv	Reibungswärme von Rissflanken z.B. durch Ultraschall angeregt	μ K

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, verursachen die meisten Effekte nur geringe Temperaturänderungen kleiner einiger Kelvin. Abhängig vom Messsystem können diese Änderungen in der Größenordnung des Eigenrauschen der Systeme liegen und somit zunächst schwer messbar sein. Ausweg bieten hier stetig empfindlicher werdende IR-Systeme, die zusätzlich LockIn-Verstärkung zur Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses anwenden. Zur Entwicklung und Charakterisierung derartiger Systeme werden Kalibriernormale benötigt die langzeitstabil, definierte Wärmepulse erzeugen können.

Rauschen von IR-Systemen

Eine IR-System besteht im Wesentlichen aus einer Optik, einem Detektor und der notwendigen Ausleseelektronik, die alle in einem Gehäuse zusammengefasst sind. Die Strahlungsempfänger (IR-Detektoren) lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen. Die thermischen Detektoren nutzen die Energie der infraroten Strahlung zur Erwärmung der sensitiven Flächen. Im Gegensatz dazu bieten Quanten-Detektoren höhere Empfindlichkeit (< 20 mK) und eine schnellere Reaktionszeit. Jedoch ist die Empfindlichkeit auch abhängig von der Wellenlänge. In der Regel müssen Quanten-Detektoren gekühlt werden um das Eigenrauschen (Generation-Rekombinations-Rauschen) zu reduzieren (Ausnahme hierbei sind Detektoren für den nahen Infrarot-Bereich).

In der radiometrischen Messkette treten hauptsächlich das Photonenrauschen der Objektszene und das Detektorrauschen auf [8]. Bei den thermischen Detektoren ist die Hauptquelle des Rauschens das thermische Rauschen. Eine zweite Quelle ist das Rauschen durch Temperaturschwankungen, die im Detektor entstehen können. Diese Schwankungen werden durch die Variation der thermischen Anbindung der Detektorelemente an die Umgebung verursacht. Die dritte Rauschquelle ist das Hintergrundrauschen, welches sich aus dem Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen dem Detektor und der Umgebung ergibt [9]. Von optisch generiertem Rauschen spricht man, wenn durch Fluktuation des

Strahlungsflusses, z.B. durch spektrale Absorption der Atmosphäre, das ursprüngliche Signal verändert wird. Das Generation-Rekombinations-Rauschen tritt auf, wenn IR-Detektoren nahe der Raumtemperatur betrieben werden. Durch Kühlen der Detektoren auf ca. 80°K lässt sich diese Rauschkomponente stark reduzieren.

Eine wichtige Kennzahl eines IR-Kamerasystems ist die NETD. Sie ist ein Maß für die Empfindlichkeit des Detektors gegenüber thermischer Strahlung. Sie gibt die Menge der Strahlung an, die benötigt wird, um das Eigenrauschen des Detektors zu überwinden und ein entsprechendes Temperaturmesssignal zu erzeugen. Das Signal-Rauschverhältnis S/N ist hier gleich eins. Die NETD kann einerseits durch längere Integrationszeiten, andererseits durch höhere Objekttemperaturen reduziert werden. Ein ASTM Standard definiert, wie dieser Wert ermittelt wird [10]. *Vollmer* [11] schlägt hier eine andere Art der experimentellen Bestimmung vor. Er wertet die Temperaturschwankung einer Bildsequenz aus. Dabei wird die Sequenz mit hoher Bildwiederholungsrate erzeugt, während die IR-Kamera auf eine temperaturstabilisierte Schwarzstrahlerplatte gerichtet ist. Aus dem gemessenen Temperaturwerten (siehe Abb. 1 links) kann die Standardabweichung berechnet werden. Die NETD entspricht der halben Standardabweichung.

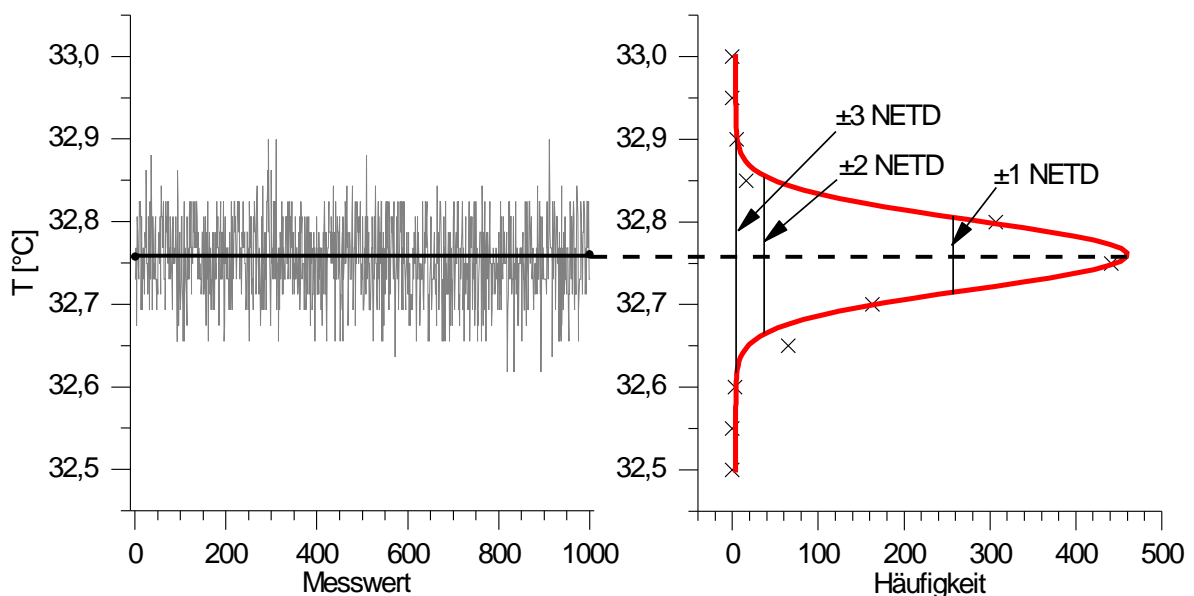


Abb. 1 Bestimmung der NETD nach Vollmer.

Die von *Vollmer* vorgeschlagene Prozedur wurde für zwei IR-Systeme A und B durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Ergebnisse der NETD Analyse nach Vollmer zweier IR-Systeme

SYSTEM	Temperatur	NETD	$\pm 3 \times \text{NETD} = \text{SNR}$
A	22,5 °C	65 mK	195 mK
B	29,0 °C	75 mK	225 mK

2. Analyse der LockIn-Verstärkung mittels Simulationsmodell

Die LockIn-Verstärkung wird eingesetzt, um Nutzsignale mit einer Amplitude kleiner der Rauschamplitude eines Messsignals zu erfassen. Das Nutzsignal muss gezielt periodisch amplitudenmoduliert werden. Dies kann im einfachsten Fall durch Ein- und Ausschalten oder durch sinusförmige Modulation der Speisespannung eines resistiven Elements geschehen. In

beiden Fällen entsteht ein amplitudenmoduliertes Nutzsignal mit fester, bekannter Frequenz, der sogenannten LockIn-Frequenz. Das Verfahren verstärkt bzw. filtert Signale mit dieser Frequenz und dämpft alle anderen Frequenzen. Nach [12] wird dabei die Rauschamplitude mit steigender Anregungsamplitude reduzieren und wird mit Gleichung (1) beschrieben. Wobei N die Anzahl der Anregungsperioden, n die Anzahl der Messwerte je Anregungsperiode sind.

$$A_{\text{rauschen}} = \frac{2}{\sqrt{nN}} NETD \quad (1)$$

Im Folgenden wird das LockIn-Verfahren mit Hilfe eines Simulationsmodells auf seine Leistungsfähigkeit und Grenzen hin untersucht.

Zur Generierung von Daten wird in einem ersten Schritt weißes Rauschen mit einer definierten Rauschamplitude RA und ein rauschfreies Signal mit definierter Frequenz f und Amplitude SA erzeugt. Für jeden Pixel einer ij -Bildmatrix werden diese eindimensionalen Signale entsprechend einer Vorgabematrix eingemischt, sodass in der resultierenden Bildsequenz an bestimmten Orten (hier kreisförmig, zentriert) ein Signal im Rauschen enthalten ist und an anderen Orten nicht. Abb. 2 verdeutlicht das Erzeugen der Bildsequenz, die jeweils als Eingangsdaten für die Untersuchungen verwendet wird.

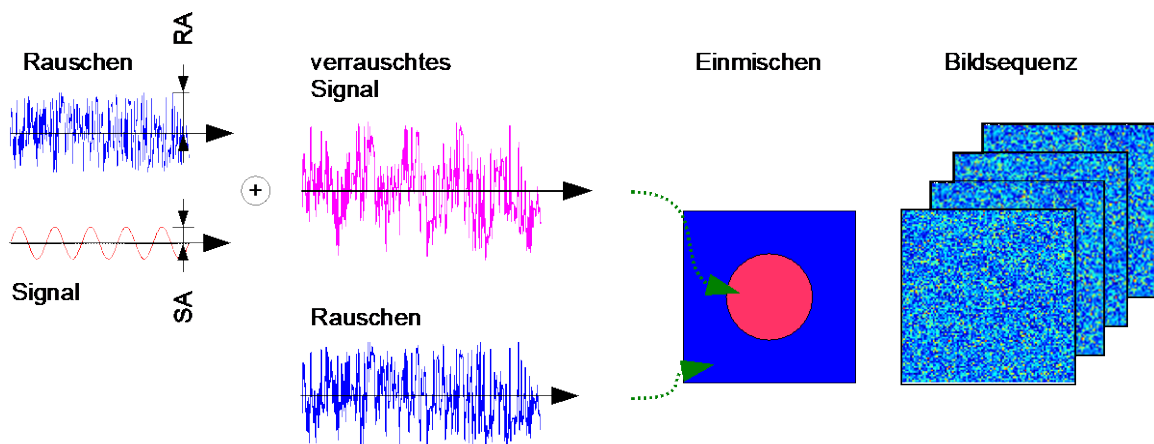


Abb. 2 Erzeugung der Bildsequenz zum Testen des LockIn-Verfahrens. Maskiertes Einmischen eines Signals ins Rauschen. $i \times j$ Pixel ergeben die Einzelbilder, die zu einer Bildsequenz zusammengefasst sind.

Mit den erzeugten Daten lassen sich nun die Abhängigkeit der erzielten Rauschunterdrückung von n und N und dem Verhältnis S/N von Signalamplitude SA und Rauschamplitude RA analysieren. Zur Bewertung, wird die Sichtbarkeit des enthaltenen Signals im Amplitudenbild mit einem Signalsichtbarkeitsalgorithmus bewertet. Der Signalsichtbarkeitsalgorithmus berechnet einen Sichtbarkeitsindex $v_i=0..1$ für ein gegebenes Amplitudenbild. Die im Amplitudenbild enthaltenen Pixel werden mit Hilfe der Vorgabematrix in zwei Gruppen, Signal und Kein Signal aufgeteilt und auf das Intervall $[0:1]$ normiert. Der Abstand der jeweiligen Mittelwerte wird als Index v_i Gleichung (2) definiert.

$$v_i = \text{mean}(\text{Signal} + \text{Rauschen}) - \text{mean}(\text{Rauschen}) \quad (2)$$

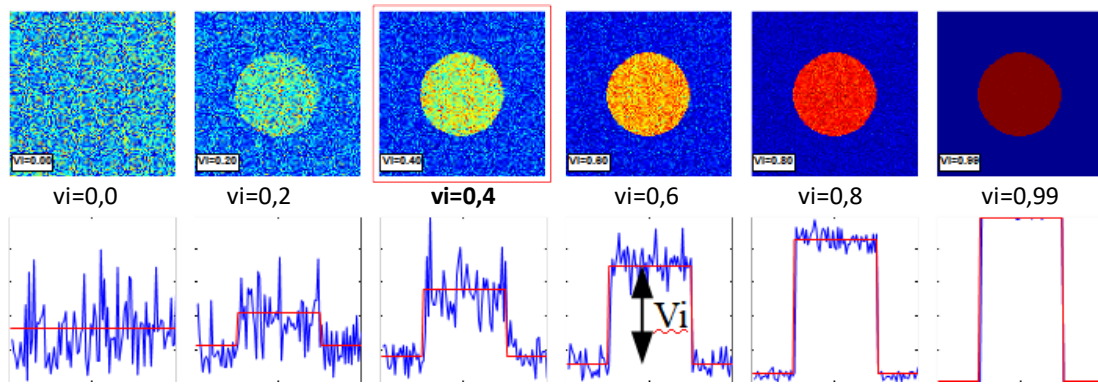


Abb. 3 v_i als Maß für die Sichtbarkeit im Rauschen enthaltener Signale. Entwicklung der Amplitudenbilder für steigende Anzahl von Anregungsperioden (oben). Linienplot durch das Amplitudenbild (unten).

In Abb. 3 sind entsprechende Amplitudenbilder mit verschiedenen Werten v_i aufgezeigt. Die Reduktion des Rauschens und die Zunahme des Abstandes v_i ist sehr gut zu erkennen. Es lässt sich ein subjektiver Schwellwert $v_i = 0,4$ einführen, bei dem sich das Signal deutlich aus dem Rauschen abhebt.

Die Entwicklung von v_i mit zunehmendem N ist für verschieden große Rauschamplituden dargestellt. Bei geringer Rauschamplitude ($S/N = 1/5$, schwarze Kurve) wird bereits nach etwa 30 Perioden ein Index $v_i = 0,4$ und damit eine deutliche Sichtbarkeit des Signals erreicht. Hingegen sind über 5300 Perioden nötig für ein Signal-Rauschverhältnis von $1/100$ (magentafarbene Kurve).

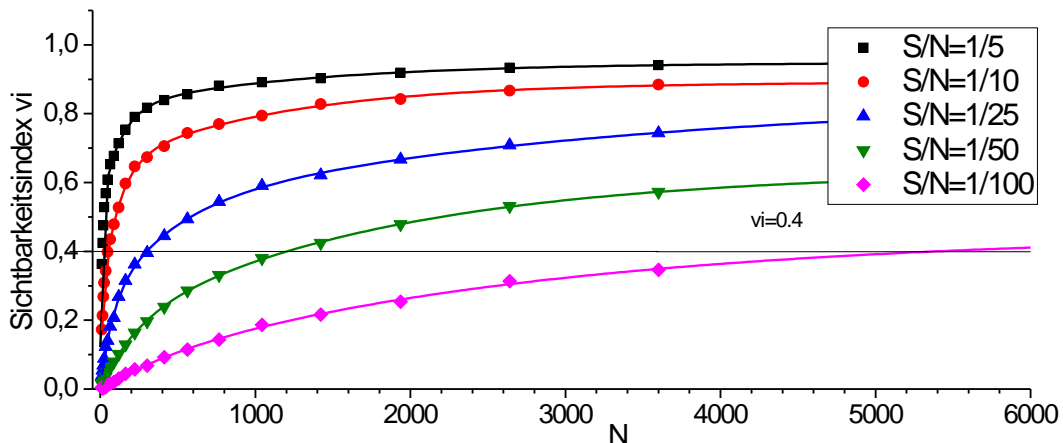


Abb. 4 Entwicklung des Sichtbarkeitsindex (v_i) über die Anzahl der Anregungsperioden (N) für verschiedene Signal zu Rauschverhältnis S/N .

Das Produkt n mal N in Gleichung (1) lässt sich auch als Anzahl der Einzelbilder verstehen. Wie in [13] gezeigt lässt sich ein Zusammenhang zwischen den nötigen Einzelaufnahmen und einem gegebenen Signal-Rauschverhältnis zum Erreichen der Sichtbarkeit eines Signals mit $v_i=0,4$ finden.

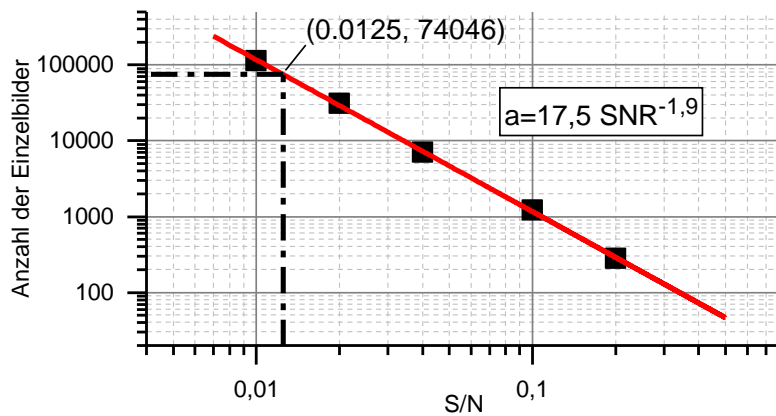


Abb. 5 Nomogramm für den Zusammenhang von nötigen Einzelbildaufnahmen und gegebenen.

Dieser Zusammenhang ist im doppelt logarithmischen Maßstab in Abb. 5 aufgetragen und lässt sich mit Gleichung (3) beschreiben. Wobei $a=n*N$ die Anzahl der Einzelbilder und $SNR=S/N$ das Signal-Rauschverhältnis ist.

$$a = 17,5 SNR^{-1,9} \quad (3)$$

3. Das Kalibriernormal

Die μ Watt Wärmequelle besteht im Kern aus einem mikro-strukturiertem Heizelement, welches sich in einem Silizium Chip befindet. Die in diesem Heizelement erzeugte Verlustwärme wird von einem Regelkreis konstant gehalten. Über eine Software wird die Verlustleistung und die Anregungsfrequenz eingestellt. Die Hauptkomponenten des Kalibriernormal sind in Abb. 6 zusammengefasst.

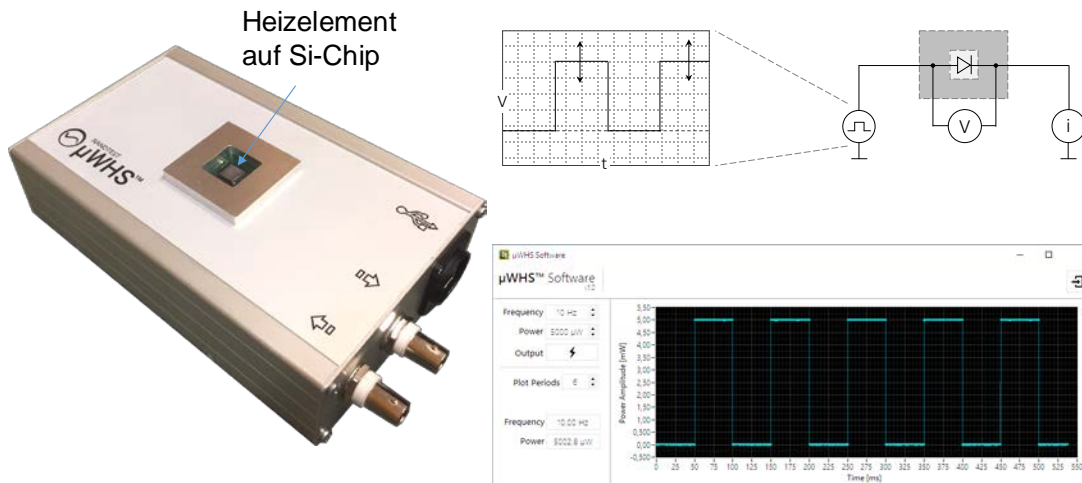


Abb. 6 Kalibrierhardware mit Prinzipschaltbild und Steuersoftware.

Die Hard- und Software ist modular aufgebaut und lässt sich daher einfach erweitern bzw. anpassen. Derzeit kommen pn-Übergänge als Heizelemente mit einer lateralen Ausdehnung von ca. 500 μ m zur Anwendung. Auch denkbar sind dünne (einige 10 nm) ohmsche Metallstrukturen insbesondere mit geringere lateraler Ausdehnung (wenige μ m breit und einige 100 μ m lang) um neben der thermischen Auflösung auch LIT-System bezüglich lateraler Auflösung zu kalibrieren. Der Regelkreis ist in Software realisiert und kann neben der rechteckig gepulsten Leistung auch beliebige andere z.B. sinusförmige

Leistungsmodulation realisieren. Mit der aktuellen Konfiguration lassen sich rechteckige Leistungspulse mit Frequenzen zwischen 1 und 1000 Hz im Leistungsbereich zwischen 10 und 10000 μW frei einstellen. Die wichtigsten technischen Spezifikationen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3 Technische Spezifikation der μW Wärmequelle

Abmessungen	168 x 103 x 42	mm^3
Anschlüsse	PC und Spannungsversorgung über USB, Trigger In/out	
Versorgung	5 V / 0.5 A über USB	
Pulse Ausgangsleistung	10...10000	μW
Frequenz	1...1000	Hz
Heizer Chip Abmessungen	7,68 x 7,68	mm^2
Heizstruktur Abmessungen	500 (Durchmesser)	μm

4. Experiment und Ergebnisse

Nach Abschluss der Hardwareentwicklung wurde die μW Wärmequelle bezüglich Langzeitstabilität, Frequenz- und Pulsleistungstreue überprüft. Für mehrere Stunden konnte die Stabilität bestätigt werden. Das Kalibriernormal ist somit bereit für Experimente an realen, kommerziell verfügbaren LIT-Systemen A und B. Die jeweiligen Aufbauten sind in Abb. 7 dargestellt.

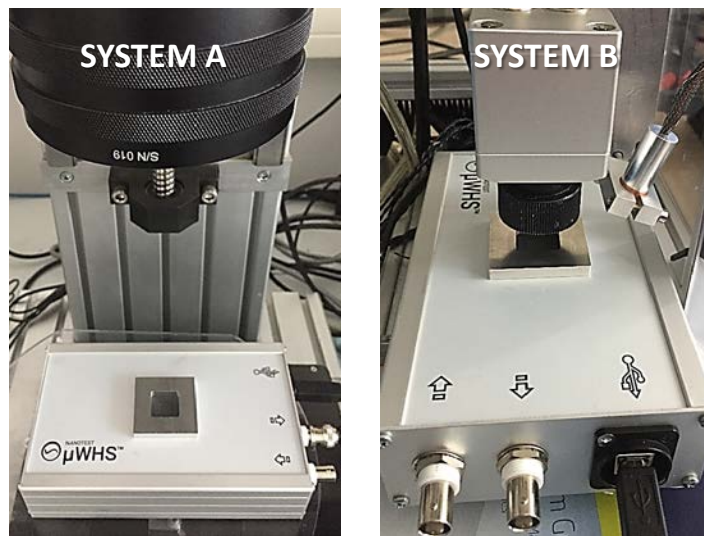


Abb. 7 Experimenteller Aufbau für zwei LIT-Systeme.

Ziel dieser ersten Experimente war es das Kalibriersystem zu demonstrieren und ggf. Unterschiede von LIT-Systemen messtechnisch nachzuweisen. Mit beiden Systemen wurden LIT-Messungen mit 1000 Anregungsperioden, Anregungsfrequenzen zwischen 2 und 10 Hz und Leistungspulsen zwischen 5 und 30 mW durchgeführt. Exemplarisch sind Ergebnisse für 10 Hz Anregung in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt.

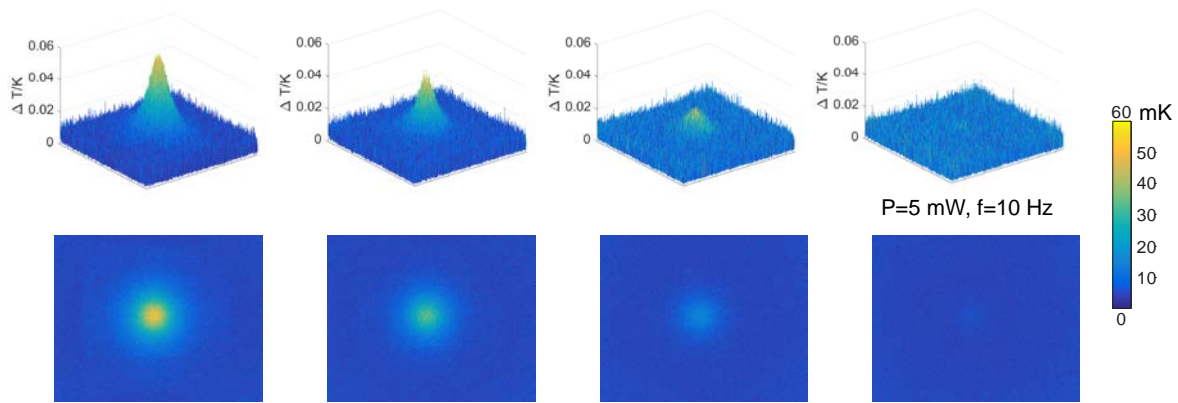


Abb. 8 Ergebnisse für System A nach 1000 Anregungsperioden bei 10 Hz und 5-30 mW Pulsleistung.

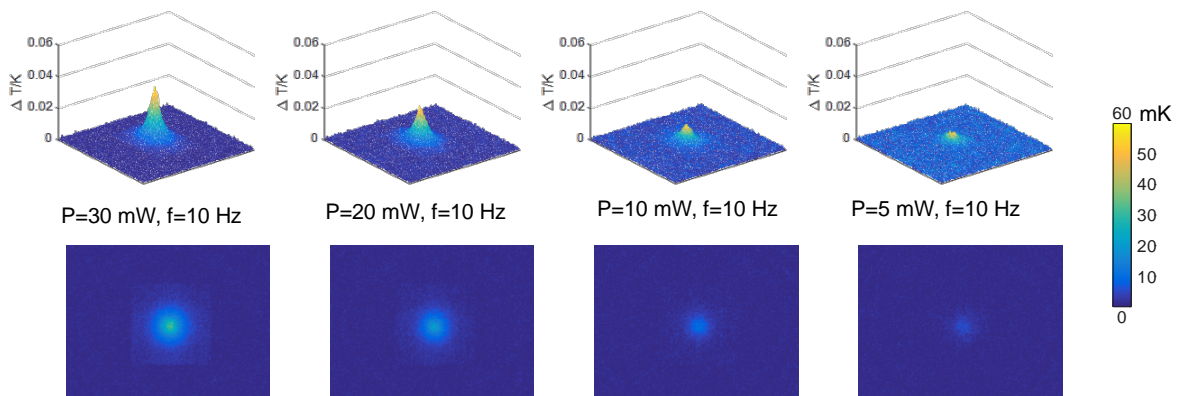


Abb. 9 Ergebnisse für System B nach 1000 Anregungsperioden bei 10 Hz und 5-30 mW Pulsleistung.

Durch den direkten visuellen Vergleich lässt sich festhalten, dass beide LIT-Systeme vergleichbare Ergebnisse liefern. Für die 30 mW Anregung wird eine Temperaturos-zillation von ca. 50 mK gemessen. Dieser Wert liegt bereits unterhalb der NETD beider Systeme (siehe Tabelle 2). Durch weitere Reduzierung der Anregungsleistung sinkt auch die Amplitude auf etwa 15 mK bei 10 mW. Für die hier kleinste Anregungsleistung zeigt sich, dass die resultierende Amplitude von etwa 5 mK nur noch von System B ermittelt wird. Der Vergleich der Rauschamplitude an den Randbereichen zeigt das Problem auf. Die Rauschamplitude wird von System B deutlich besser reduziert als von System A. System A zeigt nach 1000 Perioden noch etwa 10 mK Rauschamplitude. Hingegen wird das Rauschen durch System B auf ca. 1 mK reduziert. Die Ursachen hierfür sind zum Zeitpunkt des Schreibens nicht ermittelbar und werden mit den Herstellern dieser Systeme erörtert.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit wird eine modulierbare μW Wärmequelle vorgestellt, mit der LIT-Systeme kalibriert und miteinander verglichen werden können. LIT-Systeme kommen zum Einsatz, wenn das zu messende Signal kleiner ist als das Rauschen des Messsystems. Die Ursachen für Rauschen von IR-Systemen sind diskutiert worden und ein theoretisches Modell für Vorhersagen der Dauer einer LIT-Messung bei gegebenen Signal-Rauschverhältnis. Künftig werden Experimente mit weiteren LIT-Systemen und vor allem bei deutlich kleineren Leistungen in Richtung μW und längeren Messdauern durchgeführt. Weiterhin wird die Weiterentwicklung zu einem anerkannten, industrietauglichen Kalibrierstandard für LIT-Systeme angestrebt.

Referenzen

- [1] J. P. Rakotoniaina, O. Breitenstein, und M. Langenkamp, „Localization of weak heat sources in electronic devices using highly sensitive lock-in thermography“, *Mater. Sci. Eng. B*, Bd. 91–92, S. 481–485, Apr. 2002.
- [2] C. Spießberger, „Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung“, 2012.
- [3] M. Petzold u. a., „Micro structure analysis for system in package components — Novel tools for fault isolation, target preparation, and high-resolution material diagnostics“, in *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010 Proceedings 60th*, 2010, S. 1296–1302.
- [4] M. Krause, F. Altmann, C. Schmidt, M. Petzold, D. Malta, und D. Temple, „Characterization and Failure Analysis of TSV Interconnects: From Non-destructive Defect Localization to Material Analysis with Nanometer Resolution“.
- [5] D. May, S. Fritzsche, A. Cardoso, R. Schacht, und B. Wunderle, „IR pulse thermography as failure analytical tool applied to die attach processes“, in *2015 21st International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, 2015, S. 1–7.
- [6] D. May, B. Wunderle, R. Schacht, und B. Michel, „Transient thermal response as failure analytical tool – a comparison of different techniques“, in *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2013 14th International Conference on*, 2013, S. 1/8-8/8.
- [7] D. May, B. Wunderle, R. Schacht, und B. Michel, „Einsatz der IR-Thermographie zur Detektion des unterkritischen Risswachstums in Polymerwerkstoffen“, gehalten auf der DGZfP-IR-Kolloquium, Berlin, Germany, 2009.
- [8] V. Kolobrodov, *Infrarotthermographie*. Wiley-VCH, 2000.
- [9] A. Rogalski, *Fundamentals of Infrared Detector Technologies*. CRC Press, 2009.
- [10] E. ASTM, „E1543 - 00 Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems“. American Society for Testing and Materials, 2000.
- [11] M. Vollmer und K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, 2010.
- [12] O. Breitenstein, W. Warta, und M. Langenkamp, *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Springer, 2010.
- [13] D. May, „Transiente Methoden der Infrarot-Thermografie zur zerstörungsfreien Fehleranalytik in der mikroelektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik“, 2015.