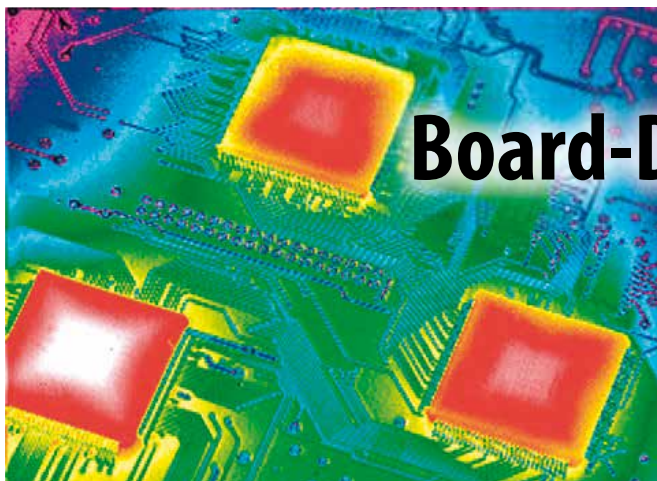


WÄRME-/KÜHLMANAGEMENT



Thermografie bei Board-Designs anwenden

Der Einsatz von Wärmebildkameras ist sowohl bei der Hardware-Entwicklung als auch in der Qualitätssicherung sowie in der Produktion durchaus sinnvoll. Im Service oder bei einer Reparatur kann die Messung mit einer Wärmebildkamera zudem auch Aufschluss über etwaige Störquellen liefern.

Von Frank Riedel und Klaus Höing

Während der Entwicklung einer elektronischen Schaltung und der zugehörigen Platinen wird in der Vorbereitung viel Zeit in das Design und die Anordnung der Bauteile investiert. Zur Kontrolle der thermischen Belastungen wird großer Aufwand z.B. mit Thermoelementen zur Temperaturmessung betrieben, um die Sicherheit und Funktion der Schaltung zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang spielt die Wärmeentwicklung und die Wärmeableitung durch Kühlkörper eine nicht unerhebliche Rolle.

Fragen, die sich jeder Entwicklungsingenieur zu seinem Design stellen muss:

- Passt der Abstand der Leiterbahnen?
- Sind die Bauteile richtig dimensioniert?
- Sind die Kühlkörper richtig berechnet?
- Wo sind Hot Spots auf der Platine?
- Wie sind die Temperaturverläufe?
- Wie wirken sich unterschiedliche Leistungen auf die Bauteile aus?

Diese können mit einer Wärmebildkamera beantwortet oder kontrolliert werden. Nicht auszudenken, welche Konsequenzen eine Fehleinschätzung dieser Fragen hat oder welcher Aufwand zur Korrektur von Auffälligkeiten betrieben werden muss. Das Entwicklungsteam – aber auch die Qualitätssicherung – muss sich jedenfalls spätestens nach dem Prototypenstadium sicher sein, dass das Design auch wärmetechnisch ausgereift ist.

Grundlagen der Thermografie

Das komplette Spektrum für Wärmebildkameras umfasst den Wellenlängen-Bereich der Infrarot-Strahlung von ca. 2 µm bis ca. 13 µm. Die physikalisch-theoretischen Untersuchungen und Ergebnisse lieferte Max Planck (1858 bis 1947). Er stellte eine Gleichung auf, wonach sich die Abstrahlleistung (Leistungsverteilung der Strahlung) in Abhängigkeit von der Wellenlänge eines schwarzen Körpers berechnen lässt, wobei der Parameter die Temperatur des schwarzen Körpers ist. Charakteristisch ist die Verschiebung des Maximums der Abstrahlleistung bei unterschiedlichen Körpertemperaturen; je höher die Temperatur, desto kürzer die Wellenlänge λ_{max} beim Maximum der Abstrahlleistung.

Durch Ableitung nach λ und Extrema-Bildung der Planck'schen Gleichung hat Wilhelm Wien (1864 bis 1928) das nach ihm benannte Verschiebungsgesetz gefunden:

$$\lambda_{max} = 2.898/T [\mu\text{m}],$$

wobei T = absolute Temperatur

Damit lässt sich z.B. für die Sonne berechnen, bei welcher Wellenlänge die maximale Abstrahlleistung abgegeben wird, wenn die Sonne eine Oberflächentemperatur von ca. 6.000 K hat; es errechnet sich zu $\lambda_{max} = 0,480 \mu\text{m} = 480 \text{ nm}$, was wiederum der Orange-Färbung entspricht.

Bild 1 zeigt die Planck'schen Kurven, also die Abstrahl-Leistung im logarith-

mischen Maßstab über der Wellenlänge (linearer Maßstab) für unterschiedliche Temperaturen mit der gestrichelt eingezeichneten Kurve für die Wien-Verschiebung des Abstrahl-Maximums über der Wellenlänge und der Oberflächen-Temperatur als Parameter.

Messungen in der Realität

Bild 2 zeigt einen schematischen Zusammenhang der jeweiligen absorbierten, reflektierten und emittierten Leistung, die dann auf die Linse der Wärmebildkamera trifft. Die Transmission der Messobjekte kann vernachlässigt werden, weil nur die Oberfläche des Messobjektes entscheidend ist.

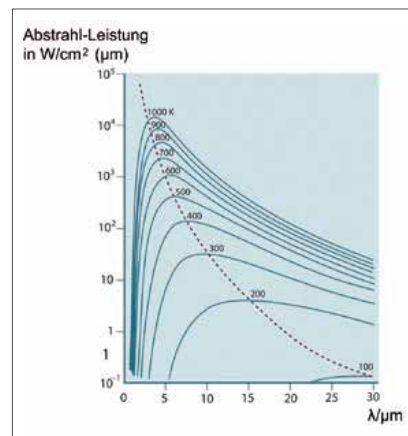


Bild 1. Planck'sche Abstrahl-Leistungs-Kurven in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und mit der Oberflächen-Temperatur als Parameter. Die Wien'sche Verschiebung des λ -Maximums ist gestrichelt dargestellt.

WÄRME-/KÜHLMANAGEMENT

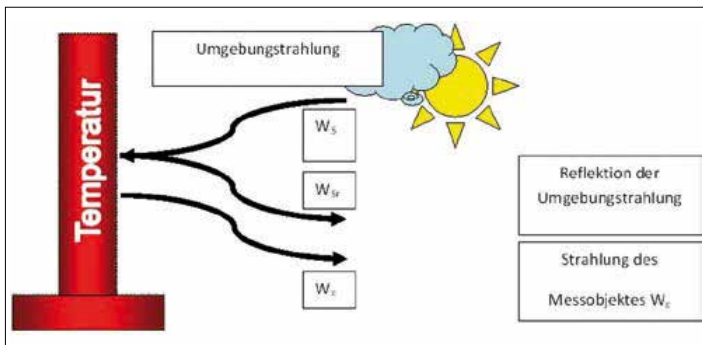


Bild 2. Schematische Darstellung der Bedingungen bei Messaufnahmen mit einer Wärmebildkamera; W_e ist hierbei der emittierte Leistungsanteil (je nach Emissionsgrad) und W_s , der reflektierte Störleistungsanteil. Vernachlässigt sind die Faktoren Luftfeuchte, atmosphärische Temperatur, Entfernung – diese Faktoren spielen allerdings nur eine Rolle z.B. bei Beurteilung der Isolation eines Gebäudes, da hier der Abstand Wärmebildkamera/ beobachteter Gegenstand deutlich größer ist.

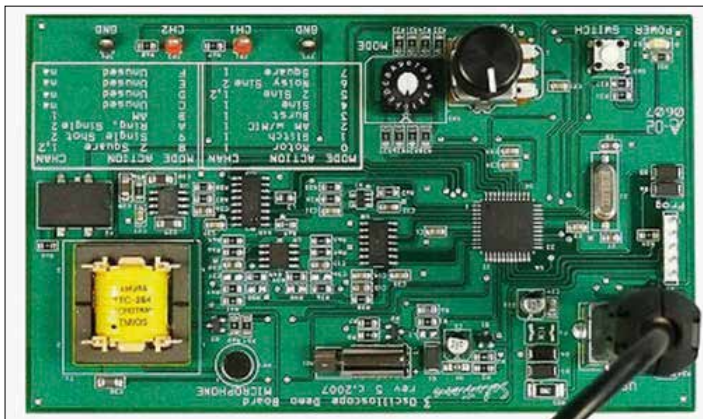


Bild 3. Beispiel einer bestückten Platine (digitales Bild).

Wie eben dargestellt, hängt die Infrarotstrahlung von der Oberflächentemperatur ab. In der Realität hat man es jedoch nicht mit dem idealen schwarzen Körper zu tun. Vielmehr ergibt sich durch die unterschiedlichen Materialien und Oberflächenbeschaffenheiten anhand der Berechnung der Oberflächen-Temperatur der Emissionsgrad ϵ . Eine Störstrahlung W_s aus der Umgebung, die am Objekt reflektiert wird, wird als W_{sr} , das Ergebnis ebenfalls beeinflussen. Selbst die umgebende Lufttemperatur und deren relative Feuchtigkeit haben Einfluss auf die Temperaturmessung des beobachteten Objekts. Ist beispielsweise die Distanz zwischen einem weit entfernten Objekt im Freien (z.B. ein Haus) und der Kamera groß, so muss auch dieser Effekt berücksichtigt werden. Für Objekte wie

eine elektronische Schaltung oder ein Gerät sind die Aufnahmestrecken eher kurz. Ergänzend dazu können für eine erste Bestimmung des Emissionsgrades verschiedene Referenz- oder Vergleichsmessungen mit bekannten Oberflächen- oder Kontaktfühlern erfolgen.

Eine Thermografie-Kamera misst also nicht direkt die Temperatur, son-

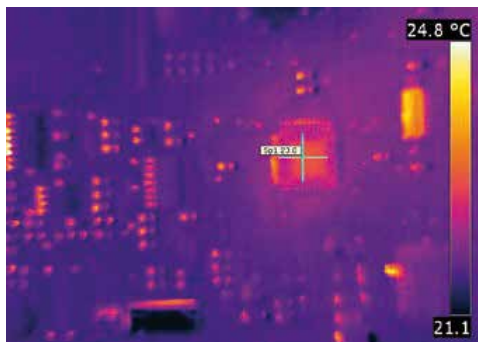


Bild 4. Dieselbe Platine wie in Bild 3 (Ausschnitt), aufgenommen als thermografisches Bild, das Aussagen über die einzelnen Temperaturen auf der Platine zulässt. Man beachte die Temperaturskala am Bildrand: Violett ist nicht unbedingt „kalt“ und Gelb/Weiß nicht zwangsläufig „heiß“, sondern die Temperaturverteilung wird in dem Bild farblich dargestellt. Die Temperaturwerte können sehr von der Realität abweichen, solange der Emissionswert unbestimmt ist.

dern nimmt die ihr angebotene Strahlungsleistung/Strahlungsenergie, die Emissionsstrahlung W_e und den reflektierten Störstrahlungsanteil W_{sr} auf. Die Berechnung der Temperatur findet erst in der Kamera über die eingebaute Elektronik statt. Somit ist die richtige Temperatur ein Ergebnis der Einstellungen durch den Anwender.

Messaufbau für verschiedene Zwecke

Die **Vergleichsmessung** wird typischerweise in der Produktion oder der Qualitätssicherung eingesetzt. Die erste Baugruppe, das „golden device“, wird thermografisch unter festgelegten Rahmenbedingungen vermessen und dokumentiert. Dieses Thermografiebild dient als Erstmuster, oft auch als „Nullmessung“ bezeichnet. Alle Folgemessungen sollten gleich oder sehr ähnlich aussehen – der Farbverlauf und die Farbverteilung dienen als Thermografiemuster, und mit der Kamera oder einer Auswerte-Software lassen sich die Unterschiede zwischen der Nullmessung und einer weiteren realen Messung quantifizieren und darstellen. Je nach Kameramodell sind Temperaturunterschiede bis 35 mK detektierbar.

Quantitative Messungen

Temperaturmessungen der Bauelemente und Baugruppen werden unter festgelegten Rahmenbedingungen vorgenommen, um den Einfluss von unterschiedlichen Störstrahlungsquellen auszuschließen. Zunächst müssen der Emissionsgrad der wichtigen und interessierenden Bauteile und auch die reflektierten Störstrahlungsanteile aus der Raumumgebung bestimmt werden. Daher ist es wichtig, dass immer gleiche Ausgangsbedingungen herrschen, um

unnötige Referenzmessungen zu vermeiden. Die gefundenen Referenzwerte werden in die Kamera eingegeben, aus der diese dann die entsprechenden Temperaturen (Temperatur eines Messpunktes oder einer Messfläche) errechnet und auf dem Display der Kamera anzeigt. Über die mitgelieferte Software können die Temperaturen ausgelesen und in entsprechenden Diagrammen dargestellt werden.

Emissionsgrad-Ermittlung

Es wurde bereits dargestellt, dass für genaue Temperaturbestimmungen der Emissionsgrad des zu messenden Objektes bestimmt werden muss, indem man die Temperatur mittels eines Messfühlers oder einer Referenz misst, ferner den Messpunkt mit der Kamera anpeilt und den Emissionsgrad so einstellt, dass die beiden Temperaturwerte gleich sind. Hilfreich ist oft ein Stück Isolierband oder Thermoband, dessen Emissionsgrad mit ca. 0,9 (oder entsprechend hoch) angenommen wird und das über die Platine oder ein Bauteil geklebt wird.

Die Wärmeentwicklung auf der Platine dient zur einfachen Kontrolle der Berechnungen. Es werden Temperaturverläufe der wichtigen Bauteile über die Zeit aufgezeichnet und miteinander verglichen. Diese Aufnahmen lassen sich dazu heranziehen, um bei auftretenden Fehlern eine effektivere Qualitätsanalyse durchführen zu können. **Bild 3** zeigt eine bestückte Platine und **Bild 4** passend dazu das thermografische Abbild.

Unterschiedliche Oberflächenarten und -beschaffenheiten

Die größte Schwierigkeit bei einer Platine sind die unterschiedlichen Oberflächen. Diese können nicht direkt miteinander verglichen werden. Beim Digitalbild erkennt man die Bauteile, Leiterbahn, Kondensatoren, ICs und die Lötunkte. Somit gibt es für die Temperaturmessung unterschiedliche Emissionsgrade, die einzeln ermittelt werden müssen. Eine Messvereinfachung erreicht man, wenn die Oberfläche der Platine mit einem matten Lack (geschwärzt) oder mit einem Kreidespray gleichmäßig eingesprüht wird. Damit erreicht man, dass über die gesamte Platine ein gleichbleibender Emissions-

grad herrscht; die einzelnen Oberflächen-Arten und -Beschaffenheiten haben damit einen deutlich geringeren Einfluss.

1. Beispiel: Kurzschluss auf einer unbestückten Leiterplatte

Liegt die unbestückte Platine vor, so wird ein Entwicklungsingenieur gleich entweder mit einem Ohmmeter oder mit einem Labornetzgerät nachprüfen, ob Kurzschlüsse zwischen den unterschiedlichen Versorgungsspannungen untereinander bzw. zur Masse vorliegen. Eigentlich wird dieses von entsprechenden Layout-Software-Paketen geprüft – dennoch ist diese schnelle Kontrolle anzuraten. Besteht ein Kurzschluss, kann mit Hilfe einer Wärmebildkamera sehr leicht und schnell erkannt werden, wo er sich befindet.

2. Beispiel: Bestückte Leiterplatte

Wenn die Leiterplatte bestückt vorliegt oder eventuell nur die jeweiligen Baugruppen in Betrieb genommen werden, will ein Ingenieur wissen, ob die Bauelemente thermisch richtig dimensioniert sind – also ob die richtige Leistungsklasse der Widerstände verwendet wurde oder dass die Elektrolyt-Kondensatoren nicht zu warm werden.

Bild 5 zeigt einen Ausschnitt auf einer Platine mit verschiedenen Bauteilen, bei der ein Bauteil aufgrund der Wärmeentwicklung auffällig ist.

3. Beispiel: Leistungselektronik

Auch hier gilt es, zahlreiche Aspekte zu prüfen: Beispielsweise, wie das thermische Verhalten der Bauelemente unter Last ist. Wie erwärmen sich die Leistungshalbleiter, wie ist der zeitliche Temperaturverlauf am Bauteil oder auf der Platine unter Volllast? Gibt es kritische Hot Spots, da Bauteile zu eng gesetzt worden sind? Wie hoch wird die Temperatur an den eingelöteten Anschlüssen der Leistungselemente in der Platine und ist sicher gestellt, dass sie

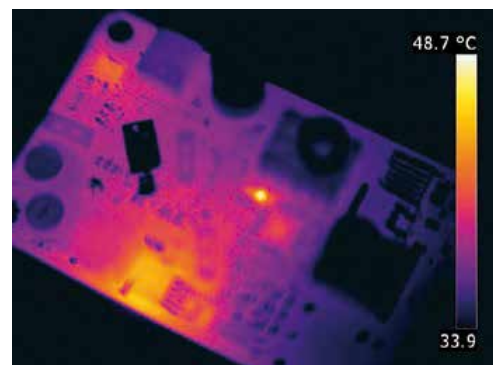


Bild 5. Bild einer Platine, eingebaut ohne Gehäuse und unter Funktion (in Betrieb) – Erkennung der Wärmeverteilung und ein Hot Spot (kleines Bauteil).

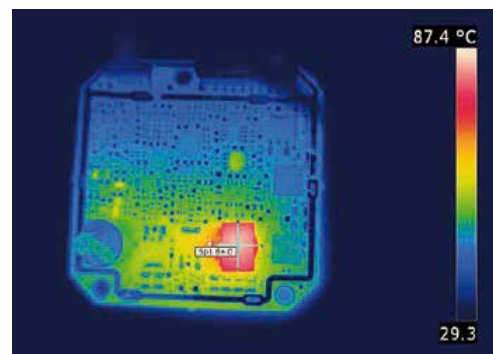


Bild 6. Bild einer Platine in Betrieb, eingebaut in einem Gehäuse – Erkennung der Wärmeunterscheidung mit Messung auf dem IC.

sich nicht von selbst auslöten? **Bild 6** zeigt einige der hier aufgezählten Beispiele, die sehr einfach mit einer Wärmebildkamera aufgenommen werden können. Aus dem Bild wird zudem ersichtlich, dass ein Bauteil (siehe Sp1) bereits auf ca. 87 °C aufgeheizt ist.

4. Beispiel: Zusammenspiel zwischen Soft- und Hardware

Zu testen ist darüber hinaus, ob bei gegebenen Umweltbedingungen beispielsweise die Funktion eines zu testenden ICs nicht nur im Ruhezustand, sondern auch im Betrieb die thermischen Bedingungen erfüllt. Mit Hilfe

WÄRME-/KÜHLMANAGEMENT

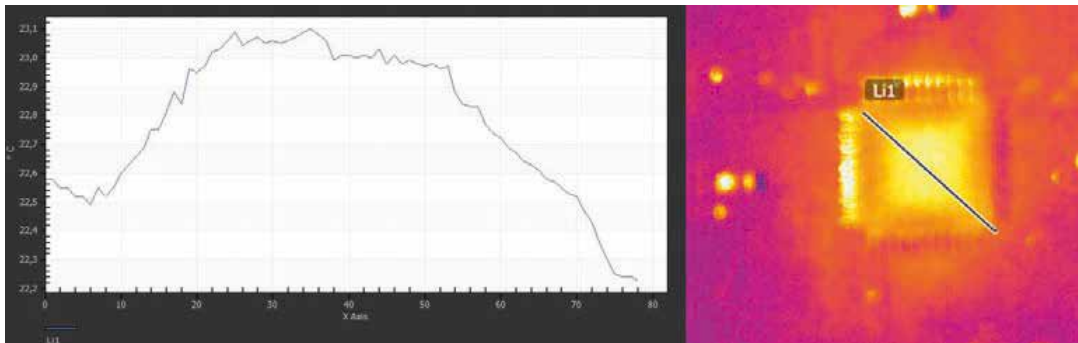


Bild 7. Messlinie als Temperaturverlauf auf einem Bauteil oder Messobjekt ohne zeitliche Veränderung. Temperaturänderungen auf derselben Oberfläche werden sichtbar und deutlich.

der Software zur Wärmebildkamera kann ein Profil der Wärmebelastung des IC unter realen Bedingungen aufgenommen werden. Bild 7 zeigt einen Temperaturverlauf quer über ein IC hinweg. So kann z.B. für einen Prozessor eine Stressbelastung durchgeführt werden, wenn er mit einer fast hundertprozentigen Auslastung beaufschlagt wird.

Sinngemäß kann diese Art der Temperaturuntersuchung auch für eine komplette Platine vorgenommen werden, um nachzuweisen, dass die Temperaturverteilung auf der Platine mit ihren Hot Spots keine kritischen Temperaturpegel erreicht.

Thermografie-Software erweitert den Funktionsumfang

Durch entsprechende Software kann die Messfunktion einer Wärmebildkamera deutlich erweitert werden. So können Temperaturprofile oder zeitliche Abläufe aufgezeichnet werden. Sie werden als „thermales Datenlog-

ging“ (Aufzeichnung ohne Berührung) bezeichnet, auch sind periodische Messungen möglich, z.B. alle 5 Minuten ein Bild, die dann zusammenhängend als Stream dargestellt werden. Zeitliche Temperaturprofile geben Aufschluss über das thermische Verhalten eines Bauteils oder einer Baugruppe unter Last. In Bild 8 wird dies dargestellt: Ein Leistungshalbleiter wird in einer Taktfolge ein- und ausgeschaltet. Der Rhythmus ist sogar aus der thermischen Aufnahme ersichtlich. Die Verwendung unterschiedlicher Kühlkörper oder Änderungen durch konstruktive Maßnahmen werden damit leicht nachweisbar und dokumentierbar und ihre Effektivität kann optimiert werden.

Beim zeitlichen Verlauf wird ein Bauteil oder ein Bereich über der Zeit mit unterschiedlicher Leistungsbeaufschlagung gemessen, und die Werte werden als Trend/ Plot dargestellt.

Mit Hilfe der Software lassen sich noch weitere Darstellungen und Messwertaufnahmen durchführen, die Aufschluss über das thermische Verhalten

von einzelnen Bauteilen, Baugruppen oder Geräten geben. So können auch „thermische Videos“ aufgenommen werden, die mit einer Sequenz von 25 Bildern/s ablaufen. Ein Erwärmungsverhalten einer Schaltung wird damit eindeutig sichtbar und ihr thermisches Einschwingen wird abschätzbar. Ferner lassen sich periodische Aufnahmen mit einer Aufnahme Frequenz von 10 s bis 1 h aufnehmen. Damit ist ein thermisches Langzeitverhalten dokumentierbar. Auch lassen sich Triggerbedingungen nach Datum, Uhrzeit oder Dauer für eine thermische Aufnahme einstellen. Zugriff auf die Daten hat der Anwender durch einen Export via CSV oder als Video-Stream (AVI). go



Frank Riedel

ist Industriemeister Elektrotechnik und seit Mai 2007 bei dataTec in Reutlingen tätig. Er ist im technischen Support Spezialist für Thermografie, VDE-Mess- und Prüfgeräte und Handmessgeräte. Er ist zertifizierter Thermograf (Bereich Elektrotechnik) nach Level 1, EN 473 und leitet im Hause dataTec verschiedene Thermografie-Seminare. frank.riedel@datatec.de



Dipl.-Ing. Klaus Höing

trat nach dem Studium der Elektrotechnik in Stuttgart 1980 bei Hewlett Packard, Böblingen, in den Entwicklungsbereich für Messtechnik ein, der mit der Gründung der Fa. Agilent 1999 ausgegliedert wurde. 1998 wechselte er in den Bereich der Computertechnik bei Hewlett Packard als PR-Manager für die deutsche Niederlassung. Seit dem Frühjahr 2012 ist er bei der Firma dataTec in Reutlingen mit PR-Aufgaben betraut. klaus.hoeing@datatec.de

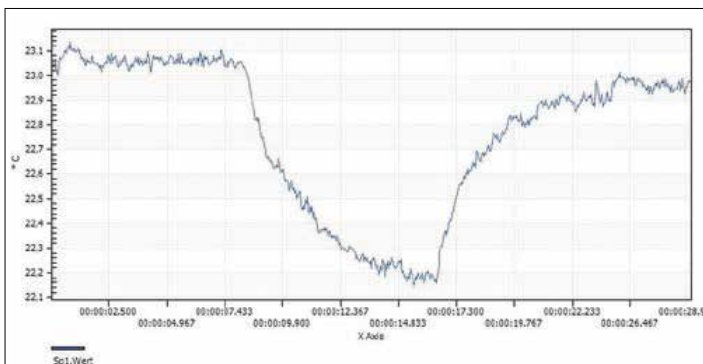


Bild 8. Abkühl- und Erwärmungsphase eines Messpunktes auf einem IC. Zu beachten ist der geringe Temperaturunterschied zwischen dem eingeschalteten Zustand und dem abgekühlten Zustand, der von der Wärmebild-Kamera innerhalb einer kurzen Messzeit erfasst wird.