



**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

Siemens Digital Industries Software

# Thermische Charakterisierung komplexer Elektronik: Eine Einführung zu Strukturfunktionen

Mechanische Analyse

Prof. Andras Poppe, PhD und Dr. John Parry, CEng.

# Die Evolution von Leistung, Größe und Temperatur bei der Elektronikonstruktion

Die Hauptursache für Systemausfälle war für gewöhnlich die Überhitzung wesentlicher Komponenten. An den wärmsten Punkten können die Sperrschichten der Halbleiter einiger dieser Systeme 150° C erreichen und kommen dabei nah an die Grenzen ihres Betriebs. Diese hohen Temperaturen verändern und zerstören unter Umständen sogar den Schaltkreisbetrieb, wenn überschüssige Wärme nicht vom Chip abgeführt wird. Dabei zeigt die Fehleranalyse, dass dies bei heutigen Systemkonstruktionen nicht das einzige Problem ist.

Ein typischer Komponentenausfall kann auch durch wiederholte thermische Transienten hervorgerufen werden. Durch Erwärmen und Abkühlen entstehen Schubspannungen an den Materialübergängen in der Gehäusestruktur (Chipbefestigung, Lötstelle), die zu Delamination, Abrissen usw. führen. Daraus resultiert ein kleinerer Kontaktbereich, über den weniger Wärme abgeführt werden kann, was thermisches Durchgehen zur Folge haben kann.

## Kühlung hat eine dreidimensionale Wirkung

Lange Zeit wurden gehäuste elektronische Komponenten im Datenblatt durch einen einzigen thermischen Widerstand dargestellt. Leistungsgeräte wurden für gewöhnlich mit einer speziellen Kühlfläche in Gehäuse integriert, dem sogenannten „Case“. In diskreten Halbleitern (Dioden, Transistoren) stellte der pn-Übergang den wärmsten Teil des Geräts dar. Der Ingenieur nahm zunächst an, dass der Temperaturanstieg der Sperrschicht über der Fläche, auf der das Gehäuse montiert war, dem gelieferten Widerstand multipliziert mit der angewandten Leistung entsprach.

Bei herkömmlicher Elektronik und beim Solid-State-Lighting (Festkörper-Beleuchtung) hat die Sperrschichttemperatur ( $T_j$ ) die größten Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer des Systems. Die Sperrschichttemperatur einer LED ist ein Leistungsindikator der thermischen Konstruktion, und viele Eigenschaften der Lichtleistung einer LED hängen von der absoluten Sperrschichttemperatur ab.

Einzelne Wärmewiderstandswerte, wie von der Sperrschicht zum Gehäuse ( $R_{thJC}$ ), sind noch immer Bestandteil von Datenblättern, die für die Komponentenauswahl und in frühen Konstruktionsphasen verwendet werden. Allerdings kann die komplexe dreidimensionale Beschaffenheit der Kühlung nur vorhergesagt werden, wenn ausgereifte Simulationswerkzeuge in Kombination mit thermischen Messungen verwendet werden.

Die thermisch-transiente Messmethode wurde entwickelt, um diese Probleme bewältigen zu können und eine bessere Lösung als den Einsatz thermischer Sensoren zu bieten. Heute ist eine genaue thermische Charakterisierung erforderlich, um eine optimale Konstruktion für elektronische Systeme zu erstellen. Die Techniken der thermischen Charakterisierung sorgen dafür, dass bei der Modellentwicklung für die Simulation bessere Ergebnisse erzielt werden. Der kombinierte Einsatz von thermischer Charakterisierung, thermisch-transienten Tests und thermischer 3D-Modellierung spart Zeit und Kosten, indem die Anzahl erforderlicher physikalischer Prototypen, nachträglicher Änderungen während der Produktion und Rückrufe fehlerhafter Produkte reduziert werden.

Grundsätzlich versteht man unter thermisch-transienten Tests, dass ein Gerät kontinuierlich einem geringen Leistungspegel ausgesetzt wird, und dass dieser Pegel dann plötzlich erhöht wird, sodass eine vorübergehende Erwärmung festzustellen ist. Gleichermaßen kann beim Wechsel von einem hohen zu einem niedrigen Leistungspegel das Abkühlen des Geräts beobachtet werden. Diese Transienten können bis zum Erreichen des stationären Zustands vollständig erfasst werden. Weitere Einzelheiten zu den mathematischen, theoretischen und technischen Hintergründen der Entwicklung thermisch-transienter Testmethoden, ausgehend von dieser Grundannahme bis hin zu dem, was heute gängig ist, finden Sie im Buch *Thermal Management for LED Applications*<sup>1</sup> sowie im Anhang am Ende dieses White Papers.

# Strukturfunktionen: Die Revolution der Auswertung

Die Entwicklung thermisch-transienter Messungen zur Modellerstellung hat das Cauer-Netzwerkmodell hervorgebracht. Dieses Modell ist hilfreich, um Schaltkreiselemente mit physikalischen Bereichen zu verbinden. Das im Modell beschriebene Verhalten ist Ausgangspunkt für das Identifizieren des Wärmeflusspfads mithilfe der „Strukturfunktionen“. Wissenschaftler der Universität Budapest haben Analysemethoden für Strukturfunktionen entwickelt, um die Notwendigkeit einer besseren Auswertung des Gehäuseinneren zu erfüllen<sup>2</sup>. Székely hat Methoden für Wärmetests von gehäusten Halbleitergeräten eingeführt<sup>3</sup>, die die Interpretation thermischer Messungen radikal verändert haben. Als Ergebnis wurde die thermisch-transiente Analysesoftware Simcenter T3STER™ entwickelt.

Strukturfunktionen wandeln das Ergebnis der thermisch-transienten Messung in ein Profil um, das den thermischen Widerstand im Gegensatz zur thermischen Kapazität darstellt, das detaillierte thermische Informationen für jede von Wärme durchflossene Schicht anzeigt, von der Sperrschicht zur Umgebung. So können physikalische Eigenschaften der Schichten, wie Chipbefestigung, Basis, Gehäuse, Kühlkörper und sogar Kühlgeräte, wie beispielsweise ein Lüfter, identifiziert werden.

Mit dieser Methode können Ingenieure jetzt Chipbefestigungsfehler bei Einzel-Chip-Gehäusen identifizieren<sup>4</sup>, ein dynamisches, kompaktes Modell der Befestigung der Kühlung zum schnelleren Entwerfen von Platinen herstellen<sup>5</sup>, thermische Zuverlässigkeitstests für ein LED-Gehäuse durchführen<sup>6</sup> und sogar die thermische Leistung auf Systemebene evaluieren, wie bei einem Laptop oder einem Laserdrucker. Die Mathematik hinter der Transformation der Temperatur- versus Zeitkurve in Strukturfunktionen wird im Anhang beschrieben.



# Beispiele für Anwendungen von Strukturfunktionen: Charakterisierung von Schnittstellenwiderständen

Manche Bereiche eines LED-Gehäuses sind sehr stabil (wie der Chip, der Submount, der Wärmeverteiler). Dennoch können die TIM-Schichten (Thermisches Interface-Material), die zum Füllen der kleinen Lücken zwischen Befestigungsflächen eingesetzt werden, selbst bei Stichproben aus demselben Fertigungslos große Unterschiede aufweisen. Das Testen des TIMs selber gibt keine Hinweise auf den tatsächlichen thermischen Widerstand, der in der erzeugten TIM-Schicht erzielt wurde. Diese unvermeidlichen Abweichungen des Produkts können am besten mit Strukturfunktionen untersucht werden.

Abbildung 1 zeigt die typischen thermischen Schnittstellen einer LED-Anwendung. Ihre Qualität kann anhand ihrer Länge entlang der Achse für den thermischen Widerstand, wie auf Abbildung 2 zu sehen, gemessen werden. Es kann viele Gründe dafür geben, warum sich der thermische Widerstand zwischen zwei Flächen ändert: Temperaturänderungen beim Härten/Löten, Abweichungen der Stärke der TIM-Schichten, Alterung oder eine absichtliche Änderung der Qualität.

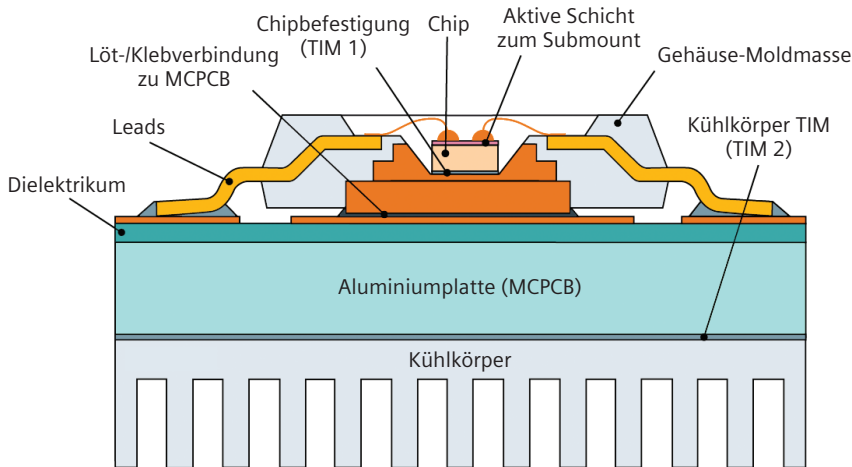


Abbildung 1: Verschiedene thermische Schnittstellen im Wärmeflusspfad von der Sperrschicht zur Umgebung bei einer typischen LED-Anwendung.

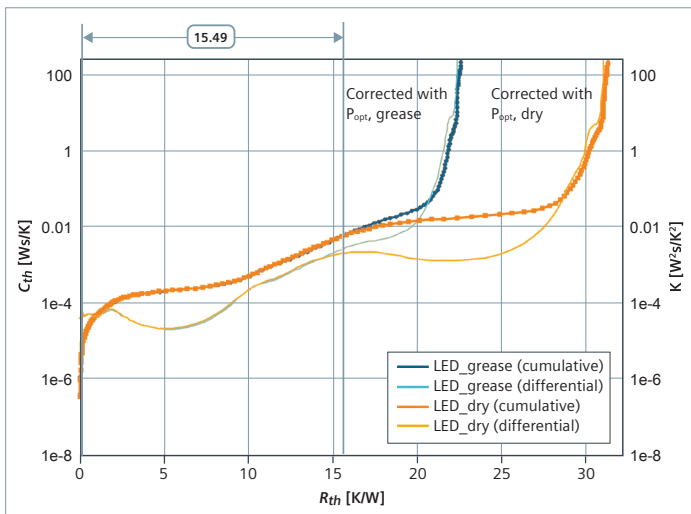


Abbildung 2: Differentielle (dünne Linie) und kumulative (dicke Linie) Strukturfunktionen für eine LED-Komponente.  $R_{th}$  basierend auf Wärmeleistung (Leistung berichtigt für Lichtleistung)<sup>1</sup>.

# Messen der thermischen Leitfähigkeit des Interface-Materials

In dem in Abbildung 3 gezeigten Aufbau wird die Sperrschichttemperatur-Transiente  $\Delta T_J(t)$  der Leistungsdiode an einer genau festgelegten Materialdicke gemessen (BLT, Bondline Thickness). Beim Erhitzen der Leistungsdiode fließt die generierte Wärme durch die Stichprobe in die darunterliegende Kühlplatte.

Da die Stärke der Stichprobe über ein genaues, dezidiertes mechanisches System geändert wird, verändert sich der insgesamt gemessene thermische Widerstand des kompletten Testaufbaus. Die Strukturfunktionen in Abbildung 4 zeigen, dass die Änderung des gesamten Widerstands von der Sperrschicht zur Kühlplatte des Testaufbaus nur durch die Abänderung der Materialdicke hervorgerufen wurde. Man sieht, dass das Wärmeverhalten der Leistungsdiode unverändert bleibt, wie auch die Schnittstellenwiderstände auf beiden Seiten der getesteten Stichprobe.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Stichprobe lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\lambda = \frac{1}{A} \times \frac{\Delta L}{\Delta R_{th}}$$

wobei  $A$  die Querschnittsfläche des Wärmeflusspfads der Stichprobe ist,  $\Delta L$  die Änderung der Materialdicke und  $\Delta R_{th}$  die entsprechende Änderung des gesamten thermischen Widerstands des Testaufbaus.

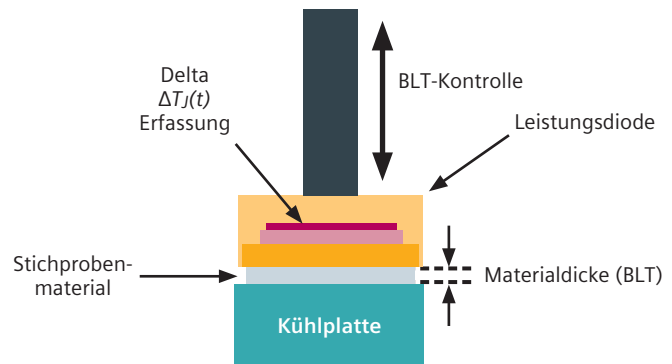


Abbildung 3: Dynamische TIM-Testeinrichtung basierend auf der transienten Messung der Sperrschichttemperatur<sup>1</sup>

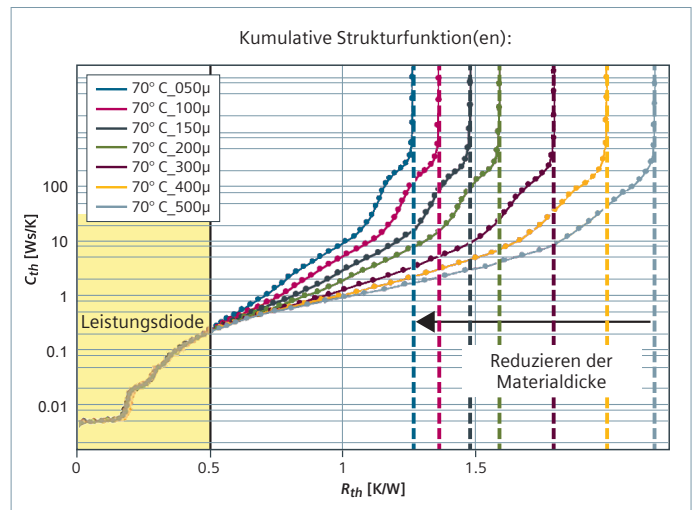


Abbildung 4: Strukturfunktionen der dynamischen TIM-Testeinrichtung mit Messungen unterschiedlicher und vorher festgelegter Materialdicken des Testmaterials<sup>1</sup>.

Gemäß der Gleichung ist die thermische Leitfähigkeit der getesteten TIM-Probe direkt proportional zur Neigung des von der Stichprobe erhaltenen  $R_{th}$ -BLT-Diagramms (Abbildung 5).

Diese TIM-Testmethode bietet im Vergleich zu anderen Techniken einige Vorteile. Beispielsweise wird die Messunsicherheit durch den differentiellen Ansatz reduziert. Die Testmethode ist praktisch eine In-situ-Technik, da die Testvorrichtung reale Anwendungsbedingungen von TIM-Materialien widerspiegelt. Nicht zuletzt beinhaltet jede Messung einen Selbsttest des Messsystems. Basierend auf den erzielten Strukturfunktionen kann die strukturelle Integrität der Testvorrichtung immer überprüft werden. Dieser Ansatz ist in die Software Simcenter DYNTIM™ implementiert<sup>8</sup>, die unter Verwendung der Strukturfunktions-Methode automatisch TIM-Tests mit transient thermischer Analyse durchführt.

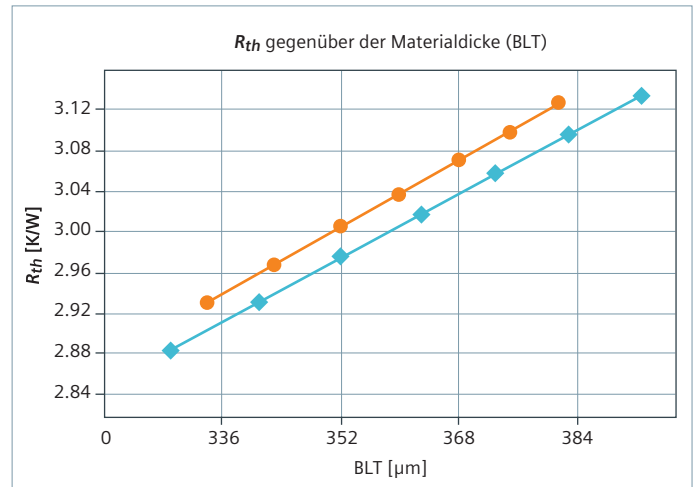


Abbildung 5: Thermischer Widerstand versus Materialdicke für eine gegebene Materialart, gemessen in einem dynamischen TIM-Testaufbau wie in Abbildung 3<sup>1</sup>.

# Verbessern der Genauigkeit thermischer Modelle durch Kalibrierung

Ein Simulationsmodell ist nur so gut wie die verfügbaren Eingabedaten, das heißt, die Gerätegeometrie und Materialeigenschaften. Dies stellt generell ein Problem dar, wenn detaillierte Modelle für ein CFD-Simulationswerkzeug erzeugt werden, und dies sogar für Anbieter von Halbleitern, die im Prinzip mindestens die Gerätegeometrie kennen müssten. Oft werfen Materialparameter und die tatsächlichen Volumen oder Bereiche Fragen auf. Wie bereits erwähnt, stellt der thermische Schnittstellenwiderstand bei detaillierten thermischen Simulationsmodellen sowohl bei TIM1 (Chipbefestigung) als auch TIM2 (zum Beispiel Wärmeleitpaste) eine mögliche Unsicherheitsquelle dar.

Die Idee hinter der Verwendung von Strukturfunktionen für detaillierte Modellkalibrierung/Validierung ist die, dass keine Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten thermischen Widerstandskurven auftreten sollen, wenn sowohl die Geometrie/Materialeigenschaften im Simulationsmodell als auch die Randbedingungen realen Gegebenheiten entsprechen. Der kleinste Unterschied, der durch die Geometrie oder nicht übereinstimmende Materialien entsteht, sollte daher in den entsprechenden Strukturfunktionen sichtbar sein.

Die folgende Fallstudie zeigt, wie ein Leistungshalbleiter-Gehäusemodell mithilfe von Strukturfunktionen feinabgestimmt werden kann<sup>9</sup>: Durch das Erstellen des kalibrierten detaillierten Modells des Bipolartransistors BD-242 integriert in ein TO-220 Gehäuse.

Die Abbildungen 6 bis 8 zeigen die größten Iterationsschritte, die bei der Anpassung des Simulationsmodells unternommen wurden. Bei den frühen Iterationsschritten wurden die Größe des Chips und der Bereich der aktiven (zerstreuenden) Chip-Oberfläche angepasst. Mit dieser Änderung wurde der erste Abschnitt des Wärmeflusspfad-Modells korrigiert (Abbildung 6). Die Übereinstimmung zwischen dem simulierten thermischen Widerstand und dem gemessenen thermischen Widerstand war bis zu einem kumulativen Widerstandswert von ungefähr 2,5 K/W perfekt.

Nachdem die Eigenschaften der Chipbefestigungsschichten ebenfalls modifiziert worden waren (der

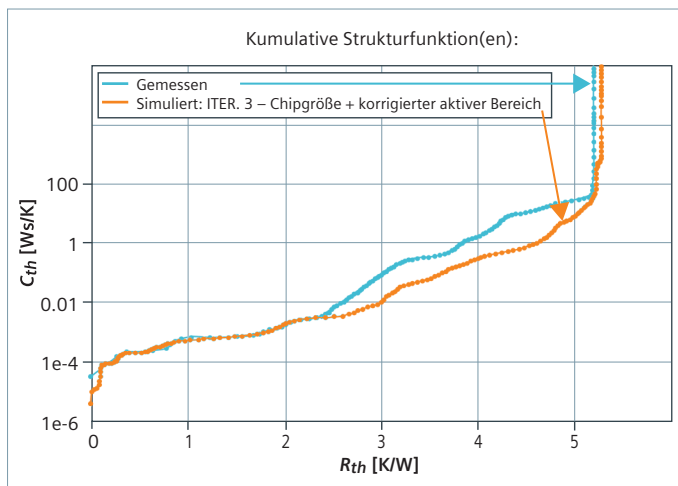


Abbildung 6: Anpassung der Chipgröße und des Bereichs des aktiven (zerstreuenden) Bereichs<sup>9</sup>.

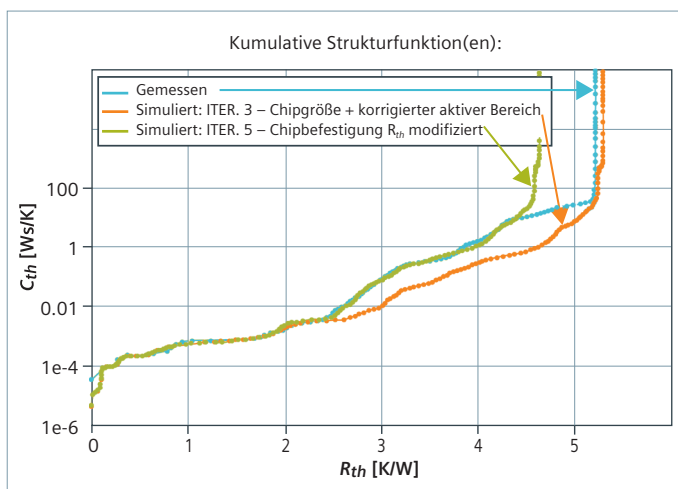


Abbildung 7: Thermischer Widerstand der Chipbefestigung ebenfalls korrigiert<sup>9</sup>.

Schnittstellenwiderstand wurde durch Anpassen der thermischen Leitfähigkeit des TIM1-Materials richtig eingestellt), stimmten die Strukturfunktionen bis zu ungefähr 4,4 K/W perfekt überein (Abbildung 7).

In einem letzten Schritt der Modellkalibrierung wurde der thermische Widerstand der angewendeten TIM2-Schichten festgelegt (Abbildung 8). Damit war die Kalibrierung des Modells abgeschlossen. Die verbleibende Differenz wurde der Modellierung der verwendeten Kühlplatte zugeschrieben.

Dieser Vorgang kann mit dem CFD-Simulationswerkzeug Simcenter Flotherm™ Software Command Center, der Daten des transienten thermischen Testers Simcenter T3STER verwendet, automatisch durchgeführt werden.

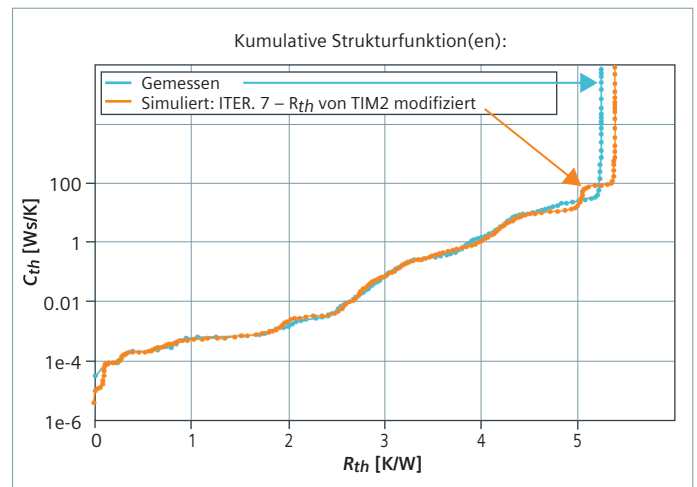


Abbildung 8: Final kalibriertes Modell mit abgestimmtem thermischen Widerstand TIM2<sup>9</sup>.



# Fazit

Es wurden nur zwei Beispiele bezüglich der Frage behandelt, wie Strukturfunktionen eingesetzt werden können, um zu analysieren, was thermisch gesehen in einem gehäuseten Halbleiter passiert, bzw. in jedem komplexen elektronischen System dieser Art. Strukturfunktionen können auch für andere Anwendungen verwendet werden, wie zum Beispiel, um thermische Messungen in Multi-Chip-Gehäusen vorzunehmen, In-Situ-Tests von TIMs in einem Gehäuse unter verschiedenen Umweltbedingungen durchzuführen, um Daten für verlässliche Analysen unter Verwendung von Temperatur und Power Cycling bereitzustellen, sowie AC-betriebene LEDs zu testen.

Diese Möglichkeiten stehen heute mit dem thermisch-transienten Analysesystem Simcenter T3STER, der Software Simcenter TERALED™ zum Analysieren der LEDs, Simcenter DYNTIM zum Testen der TIMs und der Software Simcenter POWERTESTER™ 1500A für Power Cycling und Testgehäuse im Labor oder auf der Fertigungsebene zur Verfügung.

## Referenzen

1. *Thermal Management for LED Applications*, Clemens J.M. Lasance and Andras Poppe, Eds., Springer, New York, 2014.
2. Lasance C J M, den Hertog D., Stehouwer P., "Creation and evaluation of compact models for thermal characterisation using dedicated optimisation software," *Proceedings of the 15th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMITHERM' 99)*, San Diego, USA, 9.-11. März 1999, S. 189-200.
3. Székely V., Bien T.V., "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method," *Solid-State Electronics* 31(9): 1363-1368 (1988).
4. Farkas G., Poppe A., Kollár E., Stehouwer P., "Dynamic Compact Models of Cooling Mounts for Fast Board Level Design," *Proceedings of the 19th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'03)*. San Jose, 11.-13. März 2003. S. 255-262 (2003).
5. Szabó P., Poppe A., Rencz M., "Studies on the possibilities of in-line die attach characterization of semiconductor devices," *Proceedings of the 9th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC'07)*, 10.-12. Dezember 2007, Singapore, S. 779-784 (ISBN: 978-1-4244-1324-9).
6. Szabó P., Rencz M., Farkas G., Poppe, A. "Short time die attach characterization of LEDs for in-line testing application," *Proceedings of the 8th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC'06)*: Erster Band. Singapore, 6.-8. Dezember 2008, S. 360-366 (ISBN: 1-4244-0664-1).
7. ASTM Standard D 5470, 2012, *Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thin Thermally Conductive Solid Electrical Insulation Materials*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2012, DOI: 10.1520/D5470-12; www.astm.org.
8. <http://www.mentor.com/products/mechanical/micred/dyntim/>
9. Vass Várnai A., Bornoff R., Sárkány Z., Ress S., Rencz M., "Measurement Based Compact Thermal Model Creation – Accurate Approach to Neglect Inaccurate TIM Conductivity Data," *Proceedings of the 13th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC'11)*, 7.-9. Dezember 2011, Singapore, S. 67-72.

# Anhang: Die Mathematik hinter kumulativen und differentiellen Strukturfunktionen

Strukturfunktionen werden über direkte mathematische Transformationen von den gemessenen oder simulierten thermisch-transienten Antwortfunktionen des Systems gewonnen. Sie bilden eine „grafische“ Darstellung des RC-Modells eines thermischen Systems. Im Falle von primär eindimensionalem Wärmefluss (wie Längsströmung in einem Stab oder radialer Ausbreitung in homogenen Materialschichten oder sogar bei zylindrischer oder sphärischer Ausbreitung) können Strukturfunktionen als direkte Modelle des thermischen Systems angesehen werden.

Dem Cauer-Modell gleichwertige Modelle thermischer Widerstände können auch aus dem zeitlich konstanten Spektrum generiert werden (mehr Einzelheiten und Hintergründe finden Sie in: *Thermal Management for LED Applications*<sup>1</sup>).

In der Praxis besteht das Problem eines solchen Netzwerks darin, dass 150-200 einzelne Werte thermischer Widerstände und thermischer Kapazitäten nicht interpretiert werden können. Durch das Einführen von zwei einfachen Definitionen kann das dem Cauer-Modell gleichwertige Modell grafisch dargestellt werden. Der kumulative thermische Widerstand wird als der thermische Widerstand zwischen dem n-ten Element des Netzwerkmodells und der Wärmequelle (Ausgangspunkt) definiert<sup>7</sup>:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i$$

und die kumulative thermische Kapazität ist

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i$$

wobei  $R_i$  und  $C_i$  die Elementwerte der  $i$ -ten Phase des Cauer-artigen Netzwerkmodells bezeichnen.

Von diesem Ausgangspunkt aus (Sperrschicht-Wärmequelle) kann die Summe der Werte der partiellen thermischen Widerstände und der partiellen thermischen Kapazitäten für alle folgenden Wärmeflusspfade berechnet werden.

Durch die Interpretation der kumulativen thermischen Kapazität als einer Funktion des kumulativen thermischen Widerstands, kann die sogenannte kumulative Strukturfunktion (CSF) gewonnen werden:

$$CSF = C_{th\Sigma}(R_{th\Sigma})$$

Es kann nachgewiesen werden, dass die Ableitung von  $C_{\Sigma}(R_{\Sigma})$ , die differentielle Strukturfunktion,  $k = dC_{\Sigma}/dR_{\Sigma}$  proportional zum Quadrat der Querschnittsfläche des Leitungspfades ist. Cauer-Modelle werden aus Foster-Modellen erzielt<sup>1</sup>, die direkt aus dem diskretisierten zeitlich konstanten Spektrum des thermischen Systems berechnet werden.

Der Ursprung der Funktion entspricht der Sperrschicht. Da alle thermischen Kapazitätswerte positiv sind, folgt daraus, dass die kumulativen Strukturfunktionen monoton steigende Funktionen sein müssten. Der Wärmeleitpfad endet in der Umgebung, die eine unbegrenzte Kühlkapazität besitzt; daher muss die kumulative thermische Kapazität ins Unendliche gehen. Das bedeutet, dass die kumulative Strukturfunktion mit einer Singularität enden sollte (an der entsprechenden Stelle der Umgebung). Als weitere Folge entspricht die Entfernung zwischen der Singularität und dem Ursprung dem thermischen Widerstand von der Sperrschicht zur Umgebung ( $R_{thJA}$ ).

Bei einem Wärmefluss in einem kleinen Teil von Material können zwei Auswirkungen beobachtet werden.

Die erste Auswirkung ist ein Temperaturabfall zwischen zwei (isothermischen) Flächen des Materials (eine adiabatische Bedingung auf den vier Flächen des Quaders vorausgesetzt).

Besitzt das Material thermische Leitfähigkeit ( $\lambda$ ) und besteht ein Leistungsfluss ( $P$ ) durch die Flächen  $a$  und  $b$ , weisen sie die Temperaturen  $T_a$  und  $T_b$  auf, die in der Umgebung gemessen werden. Wenn also der Schnitt eine geringe Länge ( $dx$ ) und eine Oberfläche mit einem Querschnittsbereich ( $A$ ) hat, kann der Temperaturabfall zwischen den beiden Seiten wie folgt ausgedrückt werden:

$$T_a - T_b = P \left( \frac{1}{\lambda} \frac{dx}{A} \right)$$

wobei der Ausdruck in den Klammern auf der rechten Seite den thermischen Widerstand  $R_{th}$  zwischen den beiden Punkten  $a$  und  $b$  darstellt, der den beiden Flächen entspricht:

$$R_{th} = \left( \frac{1}{\lambda} \frac{dx}{A} \right)$$

Die zweite Auswirkung entsteht, weil derselbe Materialschnitt thermische Energie speichern kann. Findet ein Wärmefluss in das Material statt, ist in einem kurzen Zeitintervall  $dt = t_2 - t_1$  die Energieänderung  $dQ = Pdt = C_{th}(T_2 - T_1)$ . Wenn  $T_1 = T(t_1)$  ist die Temperatur des Materials zum Zeitpunkt  $t_1$  und  $T_2 = T(t_2)$  ist die Temperatur des Materials zum Zeitpunkt  $t_2$ .

Jetzt kann der Schnitt als einfachste Lösung durch einen einzigen Punkt dargestellt werden. Wenn die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  wieder in der Umgebung gemessen werden, definiert die folgende Gleichung eine thermische Kapazität ( $C_{th}$ ) zwischen einem Punkt, der den Materialteil und die Umgebung darstellt. Der Wert dieser thermischen Kapazität  $C_{th}$  kann auch durch Materialparameter dargestellt werden:  $C_{th} = cm = cpdxA$  oder  $C_{th} = c_vV = c_vdxA$ , wobei  $c$  für eine bestimmte Wärmekapazität steht,  $m$  für Masse,  $\rho$  für die Dichte,  $c_v$  für volumetrische (spezifische) Wärmekapazität und  $V$  für Volumen.

### Wie diese Ergebnisse ausgewertet werden können

Die kumulative Strukturfunktion ist ein grafisches Werkzeug, das sich als nützlich für die Analyse der physikalischen Struktur erwiesen hat.

In Abschnitten mit geringem Gefälle zeigt sich, dass eine kleine Menge an Material mit geringer Kapazität zu großen Änderungen beim thermischen Widerstand führen kann. Diese Bereiche haben eine geringe thermische Leitfähigkeit und/oder eine kleine Querschnittsfläche.

Steile Bereiche entsprechen Materialbereichen mit hoher thermischer Leitfähigkeit oder einer großen Querschnittsfläche. Plötzliche Brüche der Neigung beruhen auf Änderungen des Materials oder der Geometrie. Auf diese Weise können die Werte des thermischen Widerstands und der Kapazität, geometrische Abmessungen, Wärmeübertragungskoeffizienten und Materialparameter indirekt über die kumulativen Strukturfunktionen interpretiert werden.

In einer realen Umgebung kann der Wärmefluss verschiedene Formen annehmen – längs entlang eines Balkens, radial in einer Platine oder konisch in einem Kühlkörper unter einem kleineren Gehäuse. In den meisten Fällen kann ein „geeigneter“ Schnitt des Materials auf den isothermischen Flächen durchgeführt werden, senkrecht zur Flussrichtung. Diese Schnitte müssen schmal sein, aber nicht unbedingt eine sehr kleine Querschnittsfläche aufweisen (Abbildung A1), und die Flächen sind für gewöhnlich nicht eben.

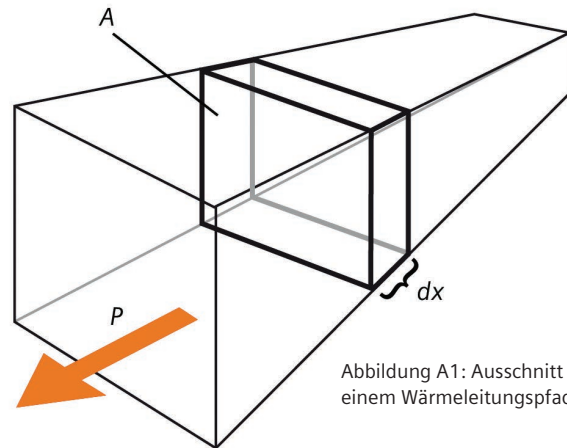


Abbildung A1: Ausschnitt von einem Wärmeleitungs Pfad

Manchmal ist es einfacher, die Schnittstelle zwischen den Bereichen zu identifizieren, indem das Derivat der kumulativen Kurve, bekannt als die differentielle Strukturfunktion (DSF), verwendet wird. Höhepunkte entsprechen hier Bereichen mit hoher thermischer Leitfähigkeit, wie dem Chip oder einem Kühlkörper, und Tiefpunkte zeigen Bereiche mit niedriger thermischer Leitfähigkeit, wie bei der Chipbefestigung oder Luft. Schnittstellenflächen werden als Beugepunkte zwischen Höhe- und Tiefpunkten dargestellt.

Die differentielle Strukturfunktion, abgeleitet von den zwei vorherigen Gleichungen, liefert auch Informationen zur Querschnittsfläche entlang des Wärmeleitungs Pfads:

$$DSF = \frac{dC_{th\Sigma}}{dR_{th\Sigma}} = c_v \times dx \times A \times \left( \frac{1}{\lambda} \frac{dx}{A} \right)^{-1} = c_v \times \lambda \times A^2$$

Betrachten Sie zum Beispiel einmal den homogenen Stab mit thermischen Randbedingungen aus Abbildung A2. Dieser Stab kann als eine Reihe von winzig kleinen Materialbereichen betrachtet werden. Folglich wäre auch das Netzwerkmodell seines thermischen Widerstands eine Hintereinanderschaltung von einzelnen RC-Stufen. Mit diesen Schnitten entlang des Wärmeleitungs Pfads wird eine Leiter von lateralen thermischen Widerständen zwischen zwei thermischen Knoten und thermischen Kapazitäten zwischen einem Knoten und der Umgebung erstellt.

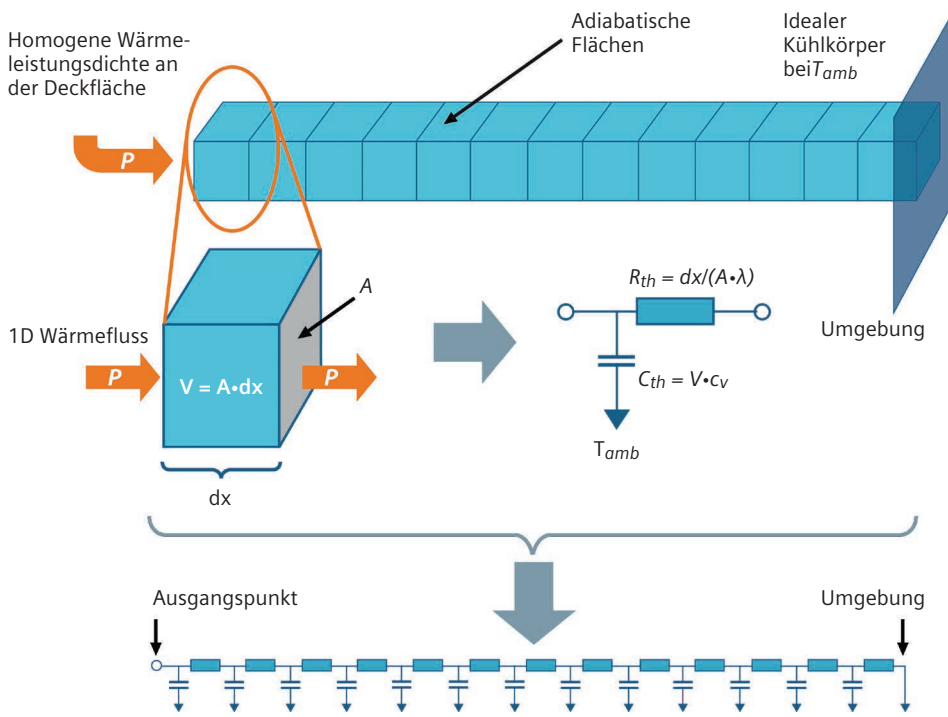


Abbildung A2: Das RC-Modell des schmalen Schnitts des Wärmeleitungs-pfads mit perfektem eindimensionalem Wärmefluss und dem Cauer-artigen Netzwerkmodell des thermischen Widerstands des gesamten Wärmeflusspfads<sup>1</sup>.

Geht man von Homogenität aus, ist das Verhältnis von elementaren thermischen Kapazitäten und thermischen Widerständen im Netzwerkmodell wie in Abbildung A2 zu sehen, konstant. Wie in Abbildung A3 gezeigt wird, bedeutet das, dass die kumulative Strukturfunktion des Stabs eine gerade Linie wäre – ihre Neigung wird durch

das Verhältnis von  $C_{th}/R_{th}$  des Netzwerkmodells bestimmt, und ihre differentielle Strukturfunktion ein konstanter pn-Übergang  $C_{th}/R_{th}$  der Elementwerte wäre. Dieses Beispiel zeigt, dass sich die Eigenschaften der Strukturfunktionen und die Eigenschaften des Wärmeleitungs-pfads eins zu eins entsprechen.

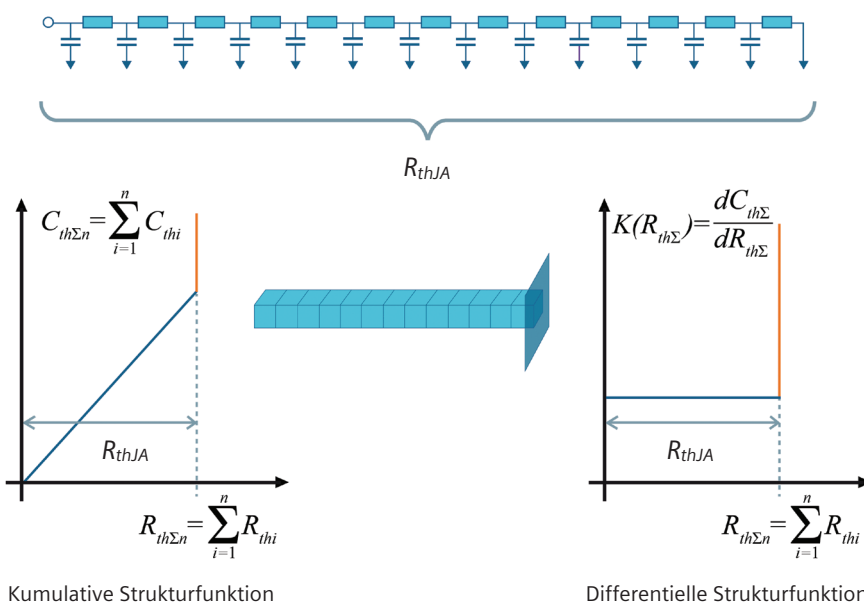


Abbildung A3: Die kumulativen und differentielle Strukturfunktionen eines homogenen Stabs.

Nehmen wir an, dass in einem bestimmten Abschnitt in der Mitte des Stabs das Verhältnis von  $C_{th}/R_{th}$  halbiert wird. Wie in Abbildung A4 zu sehen, führt dies zu einem flacheren mittleren Bereich in der kumulativen Strukturfunktion (mit halber Neigung) und einem entsprechenden Abfall in der differentiellen Strukturfunktion (halb so hoch wie die Abschnitte auf beiden Seiten).

Daher ist die differentielle Strukturfunktion ein leistungsstarkes Werkzeug, um kleine Änderungen in der kumulativen Strukturfunktionskurve festzustellen, was hilfreich für die Interpretation der Ergebnisse ist.

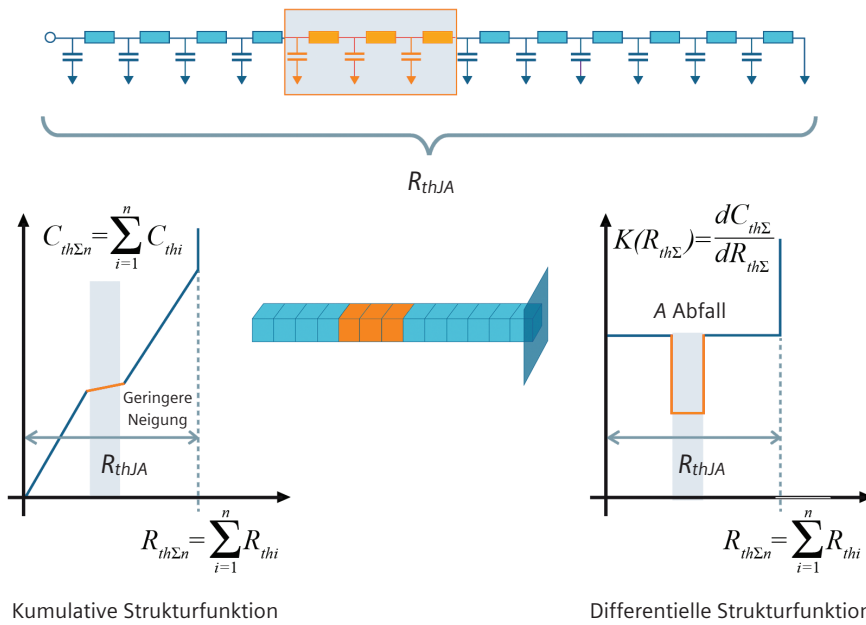


Abbildung A4: Strukturfunktionen geben die Änderungen im Verhältnis  $C_{th}/R_{th}$  entlang des Wärmeleitungs-pfads an.



## Siemens Digital Industries Software

### Hauptsitz

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 972 987 3000

### Nord-, Mittel- und Südamerika

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 314 264 8499

### Europa

Stephenson House  
Sir William Siemens Square  
Frimley, Camberley  
Surrey, GU16 8QD  
+44 (0) 1276 413200

### Asien-Pazifik

Unit 901-902, 9/F  
Tower B, Manulife Financial Centre  
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong  
Kowloon, Hongkong  
+852 2230 3333

## Über Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software fördert die Transformation von Unternehmen auf ihrem Weg in Richtung „Digital Enterprise“, in dem Engineering, Fertigung und Elektronikdesign bereits heute den Anforderungen der Zukunft entsprechen. Unsere Lösungen unterstützen Unternehmen jeder Größe bei der Entwicklung digitaler Zwillinge, die ihnen neue Einblicke, Möglichkeiten und Automatisierungsgrade bieten, um Innovationen voranzutreiben. Weitere Informationen über die Produkte und Leistungen von Siemens Digital Industries Software finden Sie unter [siemens.com/software](https://www.siemens.com/software) oder folgen Sie uns über [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) und [Instagram](#). Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow.

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© Siemens 2018. Eine Liste wichtiger Warenzeichen von Siemens findet sich [hier](#).  
Alle anderen Marken sind Eigentum der jeweiligen Inhaber.

75464-81200-C5-DE 11/19 LOC