

BASISWISSEN

Hart am Wind

Virtuelle Entwicklung im thermischen Pfad durch gekoppelte Simulation



Ein ganzheitlicher Simulationsansatz berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen physikalischen Disziplinen

Dr. Wilhelm Pohl,
Michael Probst,
Thomas Vogel



Dr. Wilhelm Pohl ist Geschäftsführer von HALA Contec GmbH & Co. KG in Ottobrunn, einem weltweit aktiven Unternehmen auf dem Gebiet des thermischen Managements.
www.hala-tec.de



Dipl.-Ing. Michael Probst ist Vorstand der ISKO engineers AG in München, deren Schwerpunkt die virtuelle Produktabsicherung mittels Simulation ist.
www.isko-engineers.de



Dipl.-Ing. Thomas Vogel ist Projektingenieur bei der ISKO engineers AG in München, und zuständig für die Schwerpunkte nichtlineare Berechnung, Optimierung, Methodenentwicklung und Mechatronik.
www.isko-engineers.de

Simulationen sind bei der Entwicklung elektronischer Geräte heute nicht mehr wegzudenken. Bisher wurden die Bereiche Thermik, Mechanik und Elektronik isoliert betrachtet, was gegebenenfalls zu Fehlprognosen, Überdimensionierungen und Ausfällen der Bauteile führte. Ein ganzheitlicher Simulationsansatz berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen physikalischen Disziplinen und bildet Thermodynamik, Mechanik, Elektronik und auch Strömungsmechanik optimal ab. Das Resultat ist eine hohe Prognosesicherheit.

Leistungselektronische Schaltungen und Bauelemente unterliegen stark wachsenden Anforderungen, die Leistungsdichte der Komponenten steigt zunehmend. Die Schaltungen und Bauelemente werden bis in den Grenzbereich hinein betrieben, wodurch das Risiko temperaturbedingter Ausfälle steigt. Eine Beschreibung des Systems als Ganzes erfordert es, mechanisch-thermisch-elektrische Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

Bisher betrachtet man vornehmlich elektrische, thermische und mechanische Disziplinen und Systeme isoliert. Beispielsweise wird mittels CFD-Simulationen der Wärmehaushalt strömungsmechanisch analysiert, wobei auch die Effekte der Wärmeleitung und -strahlung dargestellt werden können. Diese etablierte Methode ermöglicht eine sinnvolle Prognose der Wärme- und Strömungsbedingungen unter vorgegebenen (konstanten) Parametern wie Luftmassenstrom oder Verlustleistung. Die Schaltkreissimulation ist Stand der Technik. Alle Größen,

die das elektrische Systemverhalten beschreiben, werden hierdurch einer rechnergestützten Optimierung zugänglich gemacht. Mögliche thermisch-mechanische Effekte werden dabei nur sehr rudimentär oder gar nicht berücksichtigt.

Deshalb bleiben unter anderem folgende Fragestellungen weitgehend unbeantwortet:

- ▶ Nichtlineares Verhalten der Leistungshalbleiter hinsichtlich Verlustleistung in kritischen Arbeitsbereichen
- ▶ mechanische Einflüsse durch temperaturbedingte Verformungen, damit zum Beispiel Entkopplung des Wärmepfades durch Geometrieänderung (Gap-Bildung)
- ▶ nichtlineares Verhalten der thermischen Widerstände und Kapazitäten
- ▶ Abhängigkeiten im thermischen Pfad von Druck oder (Wärmeaus-) Dehnung
- ▶ virtuelle Abbildung thermischer Interface-Materialien und Einbindung ins Gesamtsystem
- ▶ Unterscheidung robuster und empfindlicher Systeme

Dabei existieren schon seit langem die technischen Voraussetzungen, um die Wechselwirkung zwischen Thermik und Mechanik zu simulieren. In den etablierten Programmen der FEM (Finite Elemente Methode) ist die Kopplung der thermischen mit der mechanischen Physik und den relevanten Rückkopplereffekten bereits vollständig realisiert. Eine weiterführende Kopplung mit einem Schaltkreissimulator hat bislang im Markt noch keinen Eingang gefunden. Eine ganzheitliche mechatronische Prozessbetrachtung ist für

den Ansatz der integrierten virtuellen Entwicklung wesentlich, um die aufgezeigten Lücken zu schließen.

Thermisch-mechanische Wechselwirkungen

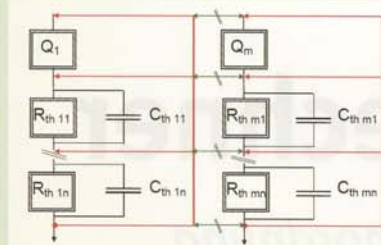
Eine gängige Maßnahme beim Auftreten von Grenzbelastungen im thermischen Pfad war bisher eine Leistungsreduzierung. Diese Hilfsmaßnahme ist mit diversen Nachteilen verbunden. Ziel ist es jedoch, den Gesamtwirkungsgrad eines mechatronischen Systems zu optimieren. Die Simulation der Wärmeabfuhr durch strömende Medien (Luft, Wasser), Wärmestrahlung in die Umgebung und Wärmeleitung in angrenzende Bauteile ist in vielen etablierten Simulationsprogrammen Stand der Technik und soll hier nicht weiter vertieft werden.

Bei der herkömmlichen Entwicklung werden Nichtlinearitäten und Rückkopplungen der einzelnen Glieder der Kühlkette nicht oder nur partiell bei der Simulation berücksichtigt. Die Systembetrachtung ist eindimensional statisch oder bei Berücksichtigung der Kapazitäten und der sich ergebenden Zeitkonstanten maximal zweidimensional transient. Der thermische Widerstand R_{th} und die Kapazität C_{th} sind von der Kontaktfläche, dem Anpressdruck, der Materialdicke, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifischen Wärmekapazität

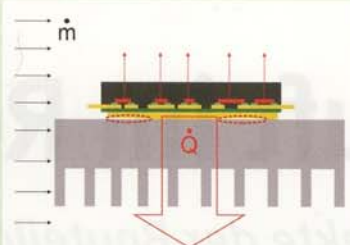


FE-berechnete Temperaturverteilung eines Wärmeleitlastomers

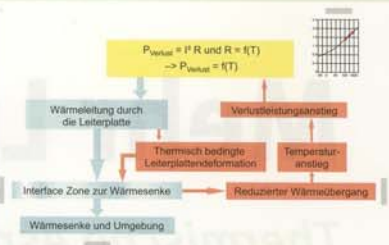
BASISWISSEN



Nichtlineares geschlossenes System n-ter Ordnung



Spaltbildung im thermischen Pfad durch Verformung



Geschlossenes Gesamtsystem mit Arbeitspunktveränderung

und dem Volumen abhängig, die wiederum nichtlinear sein können. Die Annahme konstanter Werte oder lediglich linearer Abhängigkeiten führt bei Worst-Case-Betrachtungen schnell zu Fehldimensionierungen des Gesamtsystems. Hierbei besteht jederzeit die Gefahr, dass der Worst Case aufgrund der vom Entwickler getroffenen Annahmen nicht die tatsächlich im Betrieb auftretende Extremsituation beschreibt. Dieses betrifft auch thermische Interface-Materialien, die als thermische Brücken fungieren. Das Bild oben zeigt das Verhalten eines virtuell abgebildeten und unter einer Through-Hole Viasleiterplatte liegenden elastomeren Wärmeleitmaterials unter Temperatureinfluss. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine dreidimensionale Abbildung des elektro-mechanischen Gesamtsystems vom Halbleiter bis zum Kühlkörper/Kühlmedium vorzunehmen. Hierbei müssen alle wesentlichen thermischen und mechanischen Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Es ergibt sich ein vollständiges, in sich geschlossenes, nichtlineares Wirksystem n-ter Ordnung inklusive der thermisch-mechanischen Rückkopplungen. Zum Beschreiben des mechatronischen Systemverhaltens sollten zudem die

folgenden Effekte berücksichtigt werden:

- ▶ die nichtlinearen Materialeigenschaften wie E-Modul, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Wärmeleitzahlen, Dichten
- ▶ die horizontale thermische Kopplung der einzelnen Bauteile auf der Platine durch anisotrope Wärmeleitung
- ▶ die Wechselwirkung der Elemente der Kühlkette durch vertikale Wärmeleitung
- ▶ äußere, gegebenenfalls rückgekoppelte Einflüsse wie Anpressdruck durch Montageelemente, Wärmeausdehnung und damit Verformung unter Temperatur und mögliche Spaltbildung sowie
- ▶ die Rückkopplung auf die Subsysteme.

Die Methode, vollständig thermisch-mechanisch gekoppelt zu rechnen, erfordert ein detailliertes Systemverständnis der Kühlkette. Unter Annahme sinnvoller Leistungseinträge (Schaltkreissimulation) und Wärmeabfuhrbedingungen (CFD-Simulation) lässt sich das System *Wärmepfad* belastbar simulieren.

Schaltkreissimulation mit Rückführung

Alle elektronischen Bauelemente sind unabhängig von ihrem Typ

temperaturesensitiv und verändern ihre Eigenschaften bei Erwärmung. Die Temperatur hat unmittelbaren Einfluss sowohl auf die thermisch-mechanischen als auch auf die elektrischen Zustände. Damit kann sie als „Koppelgröße“ für weiterführende Überlegungen dienen.

Über die oben genannte Abhängigkeit der Verlustleistung von der Temperatur stehen zwei signifikante Größen für die Kopplung zur Verfügung. Das System lässt sich durch die Rückführung dieser verlustleistungsbedingten Temperaturwerte in die elektronische Schaltkreissimulation vollständig beschreiben. Die dadurch veränderten Arbeitspunkte der Halbleiter, zum Beispiel bei Leistungs-MOSFETs, haben ihrerseits Einfluss auf Wirkungsgrade und Verlustleistungen, die wiederum thermisch auf das Gesamtsystem wirken. Somit entsteht, wie im Bild oben gezeigt, ein Wirkkreislauf zwischen dem thermisch-mechanischen und dem elektronischen System. Bei ungünstigen Betriebsbedingungen, die vorher nicht durch eine Reihe aufwändiger Tests oder eine Vielzahl, die Einsatzbedingung beschreibende Prototypen validiert wurden, können sich diese Rückkopplungen zur Instabilität bis zum thermisch bedingten Systemversagen aufschaukeln. Und alle diese Maßnahmen führen nicht unbedingt zum umfassenden und tiefen Verständnis des Gesamtsystemverhaltens.

Diese Wechselwirkungen wurden erfolgreich an Beispielen mit gekoppelter elektrisch-thermisch-mechanischer Simulation analysiert. Im ungünstigsten Fall kann das thermische System instabil werden, woraus sich ein vorzeitiger Ausfall eines oder mehrerer Bauelemente prognostizieren lässt. Das Bild unten zeigt die auf die diskutierten

mechatronischen Effekte zurückzuführenden Geometrieänderungen einer Metallsubstratleiterplatte sowie die mit der veränderten Kühlsituation einhergehende dynamische Temperaturverteilung mit und ohne vollständige Rückkopplung bei Last.

Hauptanwendungsbereiche dieses geschlossenen Systemansatzes sind unter anderem IMS-Substrate, Leistungsmodule mit DCB-Substraten (*Direct-Copper-Bond*), AMPs (*Active-Metal-Plates*) und leistungs-elektronische Schaltungen auf FR4-Leiterplatten mit thermischen Anbindungen durch Vias-Strukturen und nachgeschalteten thermischen Interface-Materialien sowie die Dickkuperleiterplattentechnologie.

Die exemplarischen Berechnungen zeigen, dass eine gekoppelte Analyse die elektrisch-thermisch-mechanischen Abhängigkeiten abbilden kann. Der elektronische Schaltkreissimulator wird hierzu über ein Steuerprogramm an die FE-Simulation angeschlossen.

Damit lassen sich alle wesentlichen physikalischen Disziplinen der Thermodynamik, Mechanik, Elektronik, Strömungsmechanik vereinen und das Gesamtsystem umfassend analysieren und verstehen.

Fazit

Auf dem Markt gibt es zahlreiche Werkzeuge für elektrische, mechanische, thermodynamische und strömungstechnische Simulationen. Die Grenzen der einzelnen Tools werden durch eine sinnvolle Kopplung aller Disziplinen beim Design von elektronischen Geräten erweitert. Damit werden die Wechselwirkungen der verschiedenen Parameter aufeinander gezielt zurückgeführt und das Gesamtsystem optimal abgebildet, was zu einer erhöhten Prognose-sicherheit führt.

