

■ Wärmemanagement

Virtuelles Team

Gekoppelte Simulation: Ganzheitliche Analyse des thermischen Pfades

Bisher wurden bei Simulationen die Bereiche Thermik, Mechanik und Elektrik isoliert betrachtet, was zu Fehlprognosen oder Überdimensionierungen der Bauteile führte. Ein ganzheitlicher Ansatz berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen und bildet den mechanischen, elektrischen und strömungsmechanischen Bereich optimal ab. Das Resultat ist eine hohe Prognosesicherheit.

Thomas Vogel, Michael Probst, Wilhelm Pohl*

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-(Computational-Fluid-Dynamics-)Simulationen der Wärmehaushalt strömungsmechanisch analysiert, wobei auch die Effekte der Wärmeleitung und -strahlung dargestellt werden können. Diese etablierte Methode erlaubt eine sinnvolle Prognose der Wärme- und Strömungsbedingungen unter vorgegebenen (konstanten) Parametern wie Luftmassenstrom oder Verlustleistung.

*Dipl.-Ing. Thomas Vogel ist Projektingenieur bei der ISKO engineers AG und zuständig für die Schwerpunkte nicht lineare Berechnung, Optimierung, Methodenentwicklung und Mechatronik. Dipl.-Ing. Michael Probst ist Mitgründer und Vorstand der ISKO engineers AG, die sich auf die virtuelle Produktabsicherung mittels Simulation spezialisiert hat. Dr. Wilhelm Pohl ist Geschäftsführer von HALA Contec, einem weltweit aktiven Unternehmen auf dem Gebiet des thermischen Managements in der Leistungselektronik.

Die Schaltkreissimulation ist Stand der Technik und aus der modernen Entwicklung nicht mehr weg zu denken. Alle Größen, die das elektrische Systemverhalten beschreiben, werden hierdurch einer Computer gestützten Optimierung zugänglich gemacht. Mögliche thermisch mechanische Effekte werden dabei nur sehr zögernd oder gar nicht berücksichtigt. Aufgrund dieser Tatsache bleiben u.a. folgende Fragestellungen weit gehend unbeantwortet:

- Nicht lineares Verhalten der Leistungshalbleiter hinsichtlich Verlustleistung in kritischen Arbeitsbereichen,
- mechanische Einflüsse durch temperaturbedingte Verformungen, damit z.B. Entkopplung des Wärmepfades durch Geometrieänderung (Gap-Bildung),
- nicht lineares Verhalten der thermischen Widerstände und Kapazitäten,
- Abhängigkeiten im thermischen Pfad von Druck oder (Wärmeaus-) Dehnung,
- virtuelle Abbildung thermischer Interface-Materialien und Einbinden ins Gesamtsystem.

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 allerdings bislang im Markt noch keinen Eingang gefunden.

Die aufgezeigten Lücken bedingen für den Ansatz der virtuellen Entwicklung eine ganzheitliche, mechatronische Betrachtung. Die jeweils relevanten Disziplinen müssen mit den optimal geeigneten Tools unterstützt und in einer frühen Phase der Produktentwicklung gekoppelt eingesetzt werden.

Eine gängige Maßnahme bei Auftreten von Grenzbelastungen im thermischen Pfad war bisher eine Leistungsreduzierung. Ziel ist es jedoch, den Gesamtwirkungsgrad eines mechatronischen Systems zu optimieren (Bild 1, links).



Wärmemanagement

azität C_{th} sind von der Kontaktfläche, dem Anpressdruck, der Materialdicke, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifischen Wärmekapazität und dem Volumen abhängig, die wiederum hochgradig nicht linear sein können. Die Annahme konstanter Werte oder lediglich linearer Abhängigkeiten führt bei üblichen „Worst-Case“-Betrachtungen schnell zu unwirtschaftlichen 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 wesentliche thermische Brücken fungieren. Bild 2 zeigt das Verhalten eines virtuell abgebildeten, unter einer Viasleiterplatte liegenden Wärmeleitmaterials unter Temperatureinfluss.

Thermisch mechanische Wechselwirkungen

Es ergibt sich hieraus 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 vollständig in sich geschlossenes, nicht lineares Wirksystem inklusive der thermisch mechanischen Rückkopplungen (Bild 3).

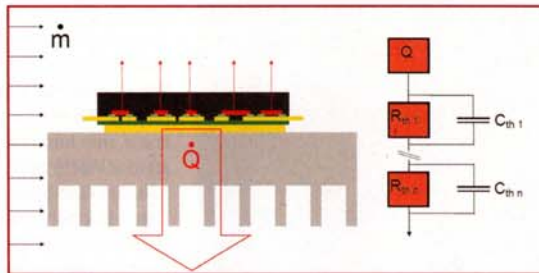
Zum Beschreiben des mechatronischen Systemverhaltens sollten zudem die folgenden Effekte berücksichtigt werden:

-  die nicht linearen thermischen und mechanischen Materialeigenschaften wie E-Modul, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Wärmeleitzahlen, Dichten,
-  die horizontale thermische Kopplung der einzelnen Bauteile auf der Platine durch anisotrope Wärmeleitung,
-  die Wechselwirkung der einzelnen Elemente der Kühlkette durch vertikale Wärmeleitung,
-  äußere, ggf. rückgekoppelte Einflüsse wie Anpressdruck durch Montageelemente, Wärmeausdehnung und damit
-  Verformung unter Temperatur und mögliche Spaltbildung (Bild 4) sowie
-  Rückkopplung auf die Subsysteme. Diese Methode vollständig thermisch mechanisch gekoppelt zu rechnen erlaubt ein detailliertes Systemverständnis der Kühlkette. Unter Annahme sinnvoller Leistungseinträge (Schaltkreissimulation) und Wärmeabfuhrbedingungen 

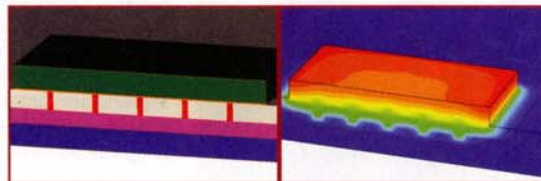
Die Simulation der Wärmeabfuhr durch strömende Medien (Luft, Wasser), Wärmestrahlung in die Umgebung und Wärmeleitung in angrenzende Bauteile ist mit vielen etablierten CFD-Simulationsprogrammen Stand der Technik und soll hier nicht weiter vertieft werden.

Bei der herkömmlichen Entwicklung werden Nichtlinearitäten und Rückkopplungen der einzelnen Glieder der Kühlkette nicht oder nur parziell bei der Simulation berücksichtigt. Die Systembetrachtung ist gemäß Bild 1, rechts eindimensional statisch bzw. bei Betrachtung der Kapazitäten und der sich ergebenden Zeitkonstanten max. zweidimensional transient. Der thermische Widerstand R_{th} und die thermische Kapazität C_{th}

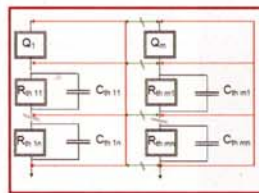
Wärmemanagement



■ Bild 1:
Thermischer Pfad des Gesamtsystems (links) und einfache Abbildung des thermischen Pfades (rechts)



■ Bild 2:
3D-Abbildung der Kühlkette mit berechnetem Temperaturfeld

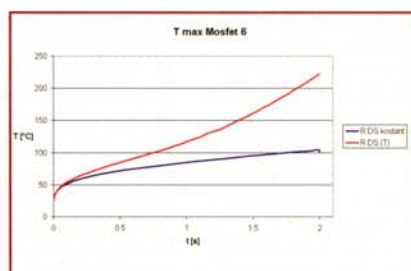
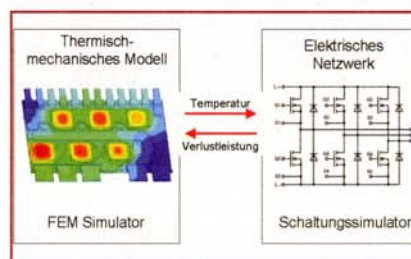


■ Bild 3:
Vollständiger und rückgekoppelter thermischer Pfad



■ Bild 4:
Spaltbildung durch thermische Verformung

■ Bild 5:
Schematische Darstellung der Kopplung



■ Bild 6:
Temperaturverlauf eines FET mit (rot) und ohne (blau) Rückkopplung