



SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

Elektrothermische Vollschaltkreis- Modellierung in 3D

Höhere Genauigkeit durch Messungen und
Kalibrierung

Kurzdarstellung

Die thermische 3D-Simulation von Elektroniksystemen geht typischerweise davon aus, dass die gesamte Leistung im Halbleiter verbraucht wird, wobei der Wert der Leistung vorgegeben ist. Im Falle von Hochstrom-Leistungsmodulen ist die Verlustleistung im elektrischen Energieversorgungsnetzwerk zu einem wichtigen Faktor geworden. Bei kommerziell erhältlichen Komponenten kann die Verlustleistung in den Kupferbahnen im Bereich von 30 Prozent der gesamten Eingangsleistung liegen. Daher ist es unerlässlich, diesen Erwärmungseffekt in der Simulation zu berücksichtigen, da die Betrachtung von Halbleitern als einzige Wärmequelle für aktuelle und zukünftige Anwendungen möglicherweise keinen präzisen Ansatz darstellt.

Robin Bornoff, Andras Vass-Varnai, Byron Blackmore,
Gang Wang, Voon Hon Wong

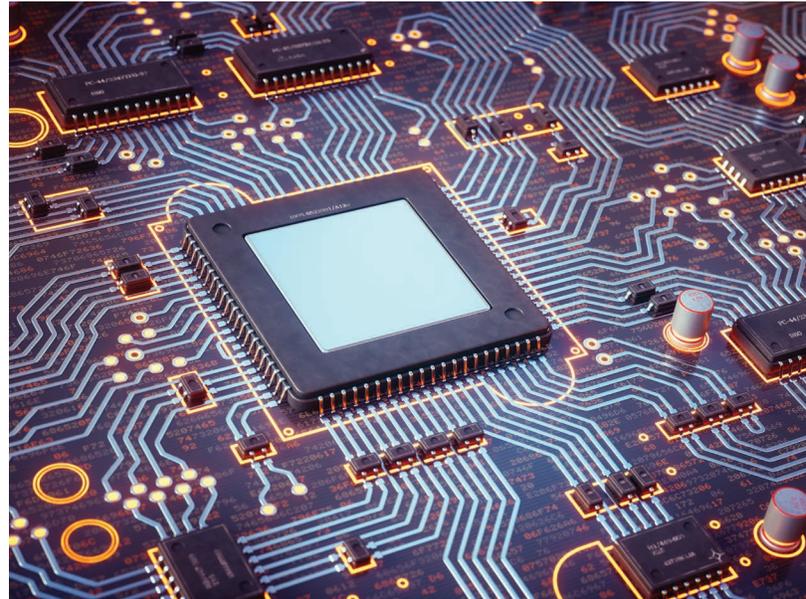
Inhalt

Übersicht	3
Verteilung der Verlustleistung beeinflusst die thermische Simulation	4
Evaluierung elektrothermischer Simulationsansätze ..	5
Durchführung realer Messungen des IGBT	6
Einstellung und Kalibrierung des Modells	7
Erkenntnisse über die Verlustleistung	9
Auswirkungen auf die Leistungsverteilung in der aktiven Schicht.....	10
Vergleich der angenommenen Gesamtverlustleistung im Chip	11
Einschränkungen bei der Verwendung eines linearen elektrischen Modells	12
Überwinden von Einschränkungen bei der Modellierung der Gesamtverlustleistung während des Schaltens	13
Fazit.....	14

Übersicht

Der Verlustleistungswert und die Annahme, dass er ausschließlich im Halbleiter abgeführt wird, kann zu erheblichen Fehlern bei der Vorhersage des Temperaturanstiegs führen. Diese Fehler können durch die Verwendung eines elektrothermischen Simulationsansatzes beseitigt werden, bei dem der gesamte elektrische Schaltkreis simuliert wird, wobei sowohl die Widerstandserwärmung im Stromversorgungsnetz als auch die Verlustleistung im Halbleiter vorhergesagt wird. Die Berechnung sowohl für das elektrische als auch für das thermische Verhalten eines Systems ermöglicht die Vorhersage des Leistungsniveaus und der Verteilung, wodurch die Genauigkeit der Vorhersage des Temperaturanstiegs verbessert wird.

Dieses White Paper beschreibt die Methode am Beispiel eines Bipolartransistors mit isolierter Gate-Elektrode (insulated-gate bipolar transistor, IGBT). Die daraus resultierende elektrothermische Vollschaltkreissimulation sagt die Verlustleistung und die Temperaturschwankungen im gesamten Wechselrichtermodul voraus.



Verteilung der Verlustleistung beeinflusst die thermische Simulation

Die Genauigkeit einer Temperaturanstiegsvorhersage basiert auf einer präzisen Vorhersage der Verlustleistung in Bezug auf das Ausmaß und die Verteilung. Eine weit verbreitete Annahme ist, dass die Leistung nur in der aktiven Schicht des Halbleiterchips abgeführt wird. Bei elektronischen Hochstromanwendungen wird jedoch ein beträchtlicher Teil der Leistung im übrigen Stromversorgungssystem abgeführt. In dem Maße, in dem sich der Rückgang der Drain-Source-Spannung auf den Widerstand ($R_{ds(on)}$) fortsetzt, wird der relative elektrische Widerstand, also die Verlustleistung des Stromversorgungssystems zunehmend bedeutsamer. Wie kann diesem Trend durch Simulation Rechnung getragen werden?

Evaluierung elektrothermischer Simulationsansätze

Ein IGBT ist ein Leistungshalbleiter mit drei Anschlüssen, der in erster Linie als elektronischer Schalter verwendet wird und einen hohen Wirkungsgrad mit schnellem Schalten kombiniert. Schaltkreise mit IGBTs können mit verschiedenen schaltungssimulierenden Computerprogrammen wie SPICE und Saber entwickelt und modelliert werden. Um eine IGBT-Schaltung zu simulieren, muss das Gerät (und andere Geräte in der Schaltung) über ein Modell verfügen, das die Reaktion der Geräte auf verschiedene Spannungen und Ströme an ihren elektrischen Anschlüssen vorhersagt oder simuliert. Um genauere Simulationen zu ermöglichen, kann der Einfluss der Temperatur auf verschiedene Teile des IGBTs in die Simulation einbezogen werden.

Die Leistung kann, potenziell für die Temperaturabhängigkeit der Leistung, vorhergesagt werden, indem sowohl das elektrische als auch das thermische Verhalten eines Systems berechnet wird. Dies geschieht in der Regel mittels eines von zwei Standardansätzen. Beim Relaxationsverfahren werden zwei unabhängige elektrische und thermische Solver gekoppelt, wobei Temperatur und Leistung zwischen ihnen ausgetauscht werden. Das direkte Verfahren berechnet sowohl das elektrische als auch das thermische Verhalten in einem einzigen Solver. Elektrothermische SPICE-Netzwerksolver, die das direkte Verfahren verwenden, sind auf dem Vormarsch.

Wir haben eine Studie durchgeführt, um zu untersuchen, wie gut das direkte Verfahren im Kontext einer vollständigen elektrothermischen 3D-Simulation funktioniert. Der Zweck der Studie bestand darin, die Genauigkeit des Simulationsmodells bei der Vorhersage der Verlustleistungsverteilung und der daraus resultierenden Variationen des Temperaturanstiegs zu überprüfen.

Durchführung realer Messungen des IGBT

Wir haben zunächst ein IGBT-Wechselrichtermodul FS800R07A2E3 von Infineon im Labor über Simcenter T3STER™ laufen lassen, mit dem man genaue Messungen der Vorgänge im Inneren der Chips erhalten kann.

Das Modul enthielt drei Halbbrückenstufen, und wir wählten den Low-Side-IGBT der dritten Phase für die Tests aus. Die Leistung im IGBT wurde zur besseren Energieverwaltung auf zwei identische Chips verteilt. Die Komponente wurde im Sättigungsmodus getestet, d. h. wir legten eine Spannung über ein 15 V-Gate an und schalteten zwischen 500 Ampere (A) Erhitzung und 500 Milliampere (mA) Sensorstrom.

Bei unserem Beispiel wies der Bipolartransistor Stromversorgungsklemmen für den Hochstrom (3 und N3 genannt) und auch separate Sensoranschlüsse (C6 und E6 genannt) auf, die einzeln an den Emitter und den Anschluss des IGBTs angeschlossen waren. Mit diesen separaten Sensoranschlüssen konnten wir einen echten Kelvin-Probe-Aufbau erstellen, bei dem die Versorgungs- und die Messleitungen für die genauere Messung des Spannungsabfalls über dem Chip getrennt waren.

Wir gingen davon aus, dass der Spannungsabfall an der Metallisierung die Ergebnisse des thermischen Prüfverfahrens erheblich beeinflussen könnte. Um dies zu überprüfen, testeten wir den Wärmewiderstand an diesem Beispiel, indem wir die wichtigsten Stromversorgungsanschlüsse (3-N3) mit Strom versorgen und lesen, während wir die dedizierten Sensoranschlüsse C6-E6 erfassen. Da die Temperaturempfindlichkeit des Systems in erster Linie vom getesteten Halbleiter abhängt, waren die gemessenen Temperaturreaktionen in beiden Fällen gleich. Betrachten wir jedoch die interne Metallisierung bei unserer Messung, so erhalten wir etwa 900 Watt (W) Heizleistung, aber nur 700 W, wenn wir direkt auf dem Halbleiter messen.

Die Positionierung der Messanschlüsse hat auch einen starken Einfluss auf die berechneten Strukturfunktionen und auch auf die gemessenen thermischen Widerstände. Um die Wirkung zu prüfen, haben wir ein genaues elektrothermisches 3D-Modell des Aufbaus erstellt und analysiert.

Einstellung und Kalibrierung des Modells

Ein genaues, stationäres elektrothermisches 3D-Modell erfordert klar definierte elektrische und thermische Widerstandseigenschaften, d. h. die Geometrie, der spezifische elektrische Widerstand und die Wärmeleitfähigkeit müssen bestimmt und genau beschrieben werden. Um dies zu erreichen, haben wir das elektrothermische 3D-Modell auf eine Kombination aus der gemessenen Chip-Temperatur, der transienten Ansprechtemperatur des Chips auf einem Leistungsteil (Z_{th} -Kurve) und punktuellen Spannungsabfällen abgestimmt. Wir haben eine 500-A-Randbedingung an Kontakt N3 angelegt, 0V an Kontakt 3 und Kontakt E6 und C6 zur Überwachung des Spannungsabfalls über die IGBT-Chips verwendet.

Der Lagenaufbau durch einen der aktiven IGBTs ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Modell lieferte eine hinreichend detaillierte Darstellung, einschließlich der Chip-Metallisierung, der aktiven Schicht, des Chips, des Lötmittels, des Substrats für die direkte Kupferbindung (Direct Copper Bond, DCB) usw. Wir bezeichneten alle inaktiven IGBT- und Dioden-Aktivschichten sowie die Keramikschicht als Dielektrikum und isolierten den elektrischen Schaltkreis vom Stromversorgungsnetz, den

Metallisierungsschichten, den Verbindungsdrähten sowie den Chip- und Aktivschichten der beiden aktiven IGBTs.

Das IGBT-Modul hatte einen integrierten Stiftkühlkörper an der Unterseite der Grundplatte, der durch einen Wassermantel gekühlt wurde. Wir haben die Anschlüsse und den Wassermantel nicht explizit modelliert. Wir haben stattdessen einen thermischen Kontaktwiderstand an der Unterseite der Grundplatte definiert, zwischen dieser und einer festen Temperaturrandbedingung über dem Bereich der Grundplatte, wo sich die Kühlerlamellen befanden. Die Materialeigenschaften des spezifischen elektrischen Widerstandes aller metallischen Objekte wurden genau definiert, einschließlich der temperaturabhängigen Koeffizienten.

Die beiden wichtigsten Unbekannten waren der spezifische elektrische Widerstand der aktiven Schicht und der des dotierten Chips auf Silikonbasis. Ersterer war der sensibelste Parameter und bildete die Grundlage für die Kalibrierung. Bei letzterem war der Wert von der Dotierungskonzentration abhängig, obwohl er viel kleiner war als der der aktiven Schicht und daher weniger sensibel. Wir gingen von einem Wert von $2e-5$ Ohm m aus.

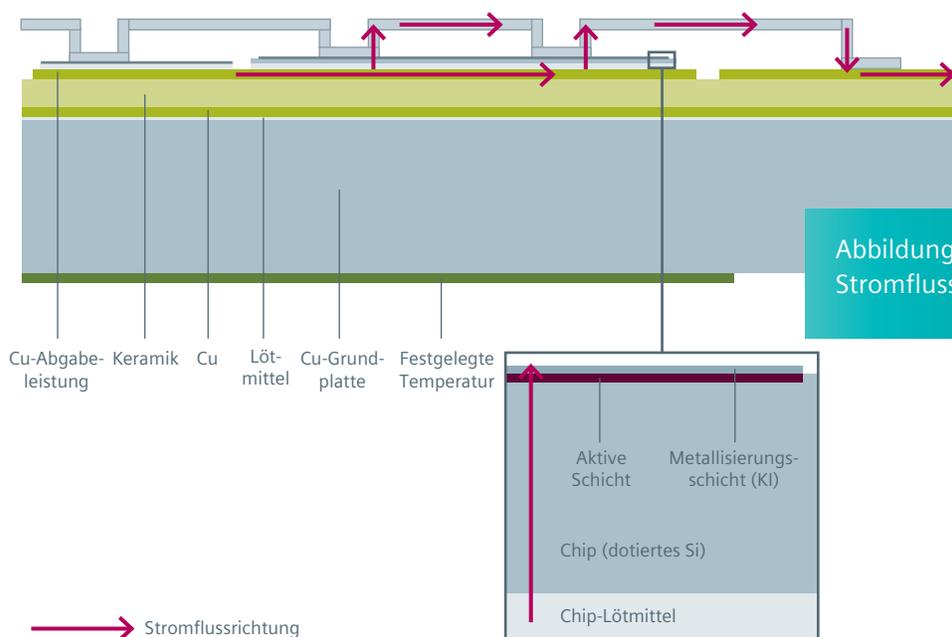


Abbildung 1: Lagenaufbau und Stromflussrichtung.

Bei der Analyse der Materialeigenschaften der Wärmeleitfähigkeit erwiesen sich die beiden Werte, die am sensibelsten auf den vorhergesagten Temperaturanstieg reagieren, als die Keramik und der Kontaktwiderstand, welche die nicht modellierten Anschlüsse darstellen. Unser Kalibrierungsverfahren bestand also darin, den elektrischen Widerstand der aktiven Schicht, die Wärmeleitfähigkeit und Stärke der Keramik sowie den Kontaktwiderstand bei der festgelegten Temperaturrandbedingung zu variieren. Wir variierten die Parameter bis zu unseren T3STER-Messungen für die beiden gemessenen Spannungsabfälle (N3-0 und E6-C6), durchschnittliche stationäre Chip-Temperaturen, Z_{th} und die kumulativen Strukturfunktionen wurden durch das 3D-Modell in der Software Simcenter Flotherm™ nachgebildet.

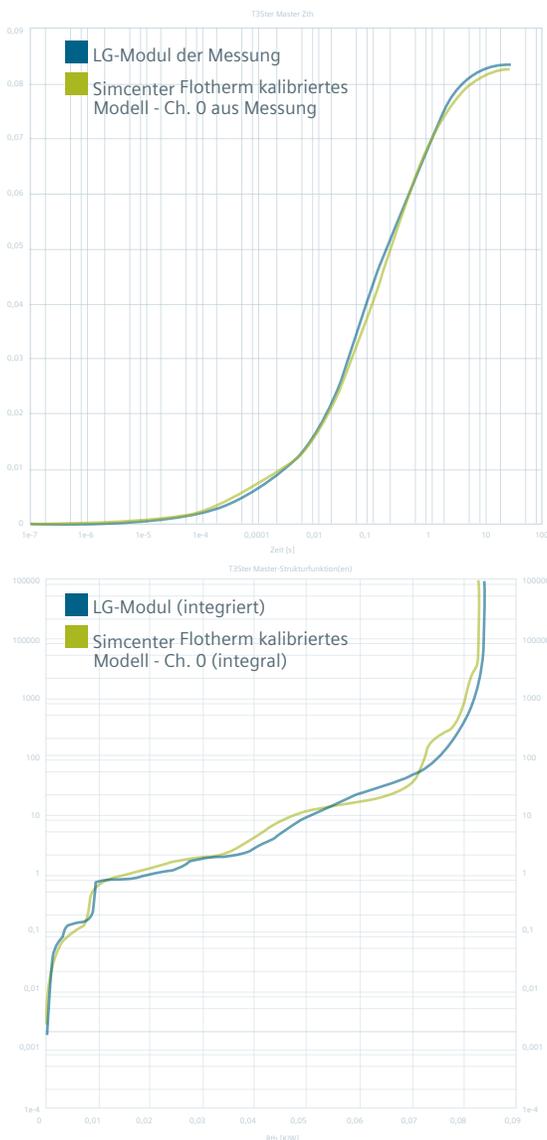


Abbildung 2: Z_{th} und kumulativer Vergleich der Strukturfunktionskalibrierung.

Für unsere endgültige Kalibrierung haben wir die Keramiksicht auf eine Stärke von 740 Mikron mit einer Wärmeleitfähigkeit von 105 Watt (W)/pro Meter Kelvin (mK), den effektiven elektrischen Widerstand der aktiven IGBT-Schicht auf 0,115 Ohm-m und den Kontaktwiderstand, der die Anschlüsse und den Wassermantel darstellt, auf $3,5e-5$ Meter zum Quadrat Kelvin (m^2K)/pro Watt (W) festgelegt. Zwar war es möglich, Messungen aller zugänglichen Geometrien vorzunehmen, wir führten jedoch ausschließlich zerstörungsfreie Messungen durch. Die genauen Werte des effektiven Widerstands der aktiven Schicht und der Wärmeleitfähigkeit sowie der (keramischen) Stärke sind also möglicherweise nicht exakt – die daraus resultierenden effektiven elektrischen und thermischen Widerstände wurden jedoch kalibriert (Abbildung 1).

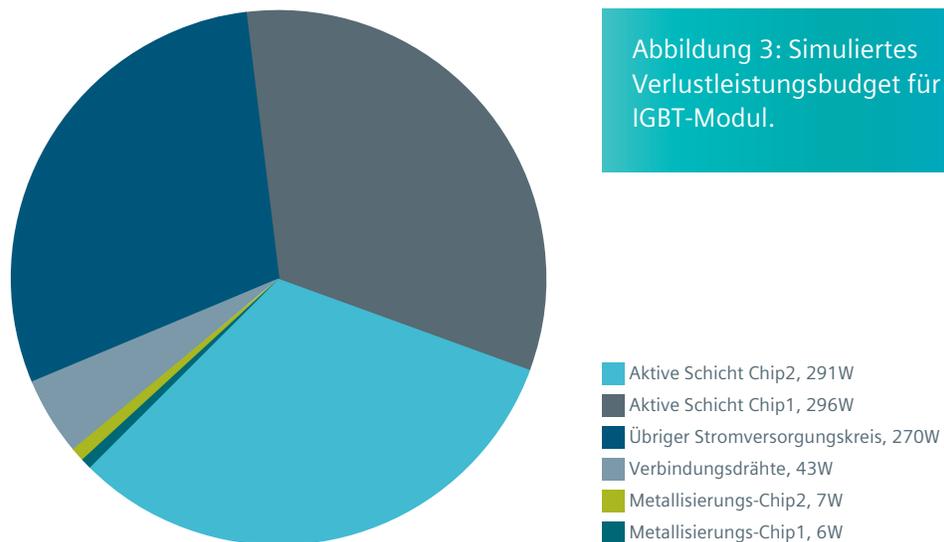
Zur Simulation des transienten Temperaturverhaltens bei einer Leistungserhöhung des Systems (Z_{th}) haben wir den gleichen Ansatz bei der Durchführung der T3STER-Messung gewählt. Ausgehend von einer stationären elektrothermischen Lösung bei $t = 0$ s führten wir eine transiente, rein thermische Simulation durch und zeichneten die resultierende Kurve der durchschnittlichen Chip-Temperatur versus der Zeit auf (Abbildung 2). Auch wenn T3STER de facto zu Beginn der transienten Messung den Strom herunter schaltet, sind solche Ströme ausreichend gering, um unsere Annahme der fehlenden Selbsterwärmung zu bestätigen.

Obwohl die Kalibrierung anhand einer Messung des transienten thermischen Ansprechverhaltens theoretisch das Modell für das transiente thermische Verhalten kalibriert, war es unsere Absicht, die thermischen Materialeigenschaften außerhalb des IGBTs zusätzlich zu belegen. Damit sollte sichergestellt werden, dass der vorhergesagte stationäre Temperaturanstieg aus den richtigen Gründen korrekt war, und nicht als Folge der Summierung fehlerhafter thermischer Widerstände im Stack, die zu einem zufällig korrekten Gesamtwärmeleitwiderstand (R_{th}) führen. Dieser Ansatz hat dazu beigetragen, eine korrekte Temperaturvorhersage durch den Stack zu gewährleisten, nicht nur hinsichtlich der Chip-Temperaturen.

Erkenntnisse über die Verlustleistung

Unter Schwachstrombedingungen (wie etwa bei Sensoren) war der elektrische Widerstand des IGBTs weitaus größer als der der übrigen Schaltung. Der weitaus größte Teil der Verlustleistung trat am Chip auf. Bei hohen Strömen nahm der relative Widerstand des Chips im Vergleich zum Rest der Schaltung ab, und die Annahme, dass die gesamte verbrauchte Leistung am Chip abgeführt wurde, erwies sich als nicht zutreffend. Das simulierte Leistungsbudget bei einer Stromstärke von 500 A ist in Abbildung 3 dargestellt.

Von der gesamten verbrauchten Leistung von 912 W wurden 64 Prozent auf die aktiven Schichten der beiden IGBTs, 4,7 Prozent auf die Verbindungsdrähte, 1,4 Prozent auf die Metallisierungsschichten und die restlichen 29,6 Prozent auf den übrigen Stromversorgungskreis aufgewendet. Das Verhältnis der Spannungsmessungen an den vier Kontakten, N3-0 für die gesamte Schaltung, E6-P6 für die IGBT-Chips und Verbindungsdrähte, $1,4/1,812 \text{ V} = 77 \text{ Prozent}$, lieferte uns einen ersten Anhaltspunkt über die Aufteilung des Leistungsbudgets zwischen den aktiven Bauelementen und der Stromversorgungsschaltung.



Auswirkungen auf die Leistungsverteilung in der aktiven Schicht

Für den durch die aktive Schicht nach oben fließenden Strom bestimmte die Wirksamkeit der Metallisierungsschicht bei der Verteilung des Stroms auf die angeschlossenen Verbindungsdrähte sowie die Nähe der Verbindungsdrähte zum Rückleitungsteil des Stromkreises die Stromverteilung und damit die Leistungsverteilung innerhalb der aktiven Schicht. Die Ungleichmäßigkeit des Stroms, der vom jeweiligen Verbindungsdraht übertragen wird, ist in Abbildung 4 dargestellt.

Verbindungsdrähte, die näher am 0-V-Rückführungsstift (oben links) liegen, führten etwa 20 Prozent mehr Strom als die am weitesten von der Rückführung entfernten (oben rechts). Wir nahmen dies aufgrund des geringeren elektrischen Widerstands zwischen den Verbindungsdrähten an, die näher an der 0-V-Rückleitung liegen als die weiter entfernten.

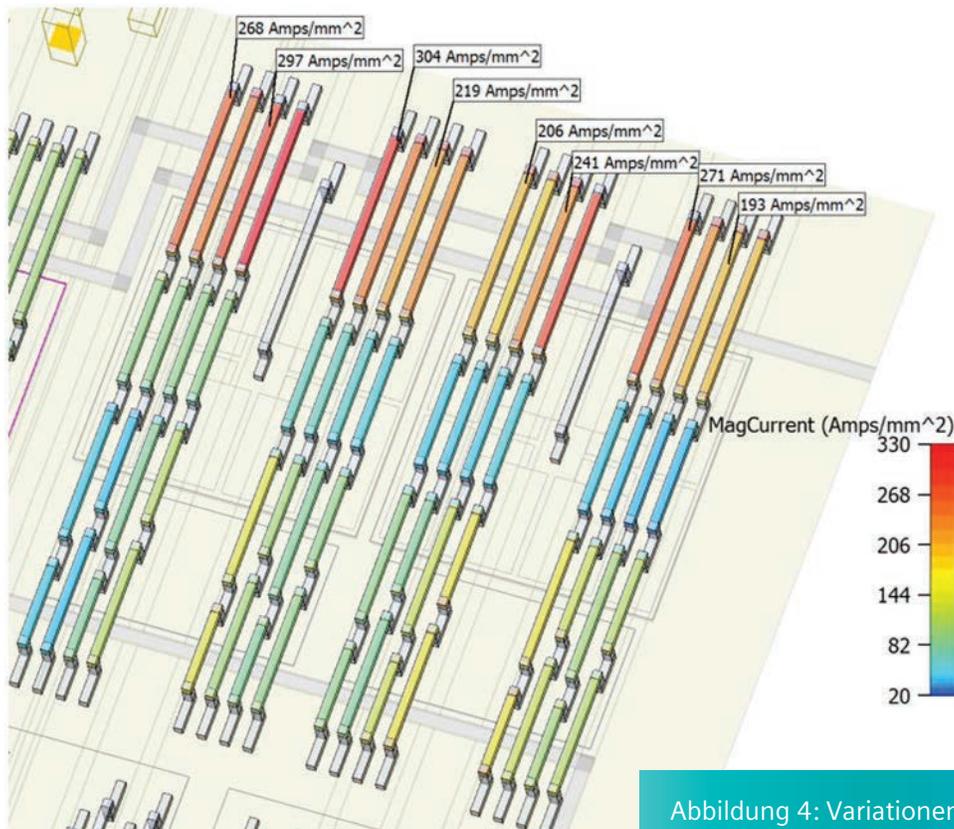


Abbildung 4: Variationen in den Stromflüssen von Verbindungsdrähten.

Vergleich der angenommenen Gesamtverlustleistung im Chip

Eine reine Wärmesimulation würde aus einer Schätzung der Verlustleistung und ihrer Verortung bestehen. Die Gesamtverlustleistung kann bestimmt werden, indem der Spannungsabfall über die gesamte Schaltung gemessen und mit der bekannten Stromstärke multipliziert wird. Vorausgesetzt jedoch, dass die gesamte verbrauchte Leistung in der aktiven Schicht abgeleitet wird und der Leistungsverlust gleichmäßig verteilt ist, würde dies zu erheblichen Abweichungen bei der Temperaturvorhersage führen (Abbildung 5). Wie hier gezeigt, resultiert diese Annahme darin, dass der vorhergesagte maximale Temperaturanstieg um 34 Prozent höher liegt, sich die Stelle der maximalen Temperatur an einem anderen Punkt befindet und die Temperaturschwankung innerhalb der aktiven Schicht um 30 Prozent größer ist.

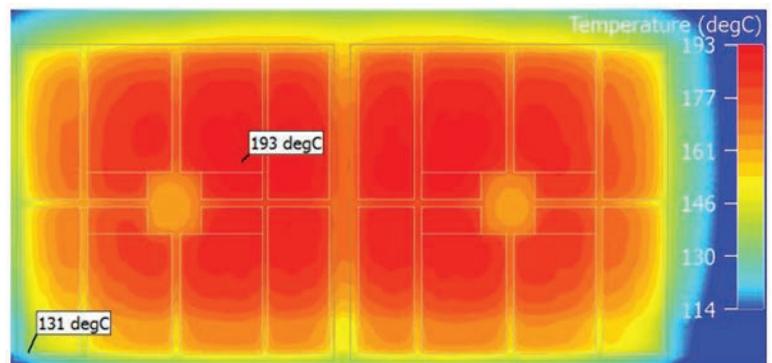
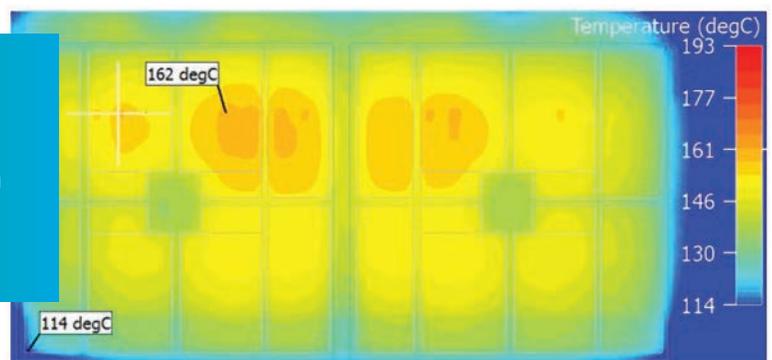


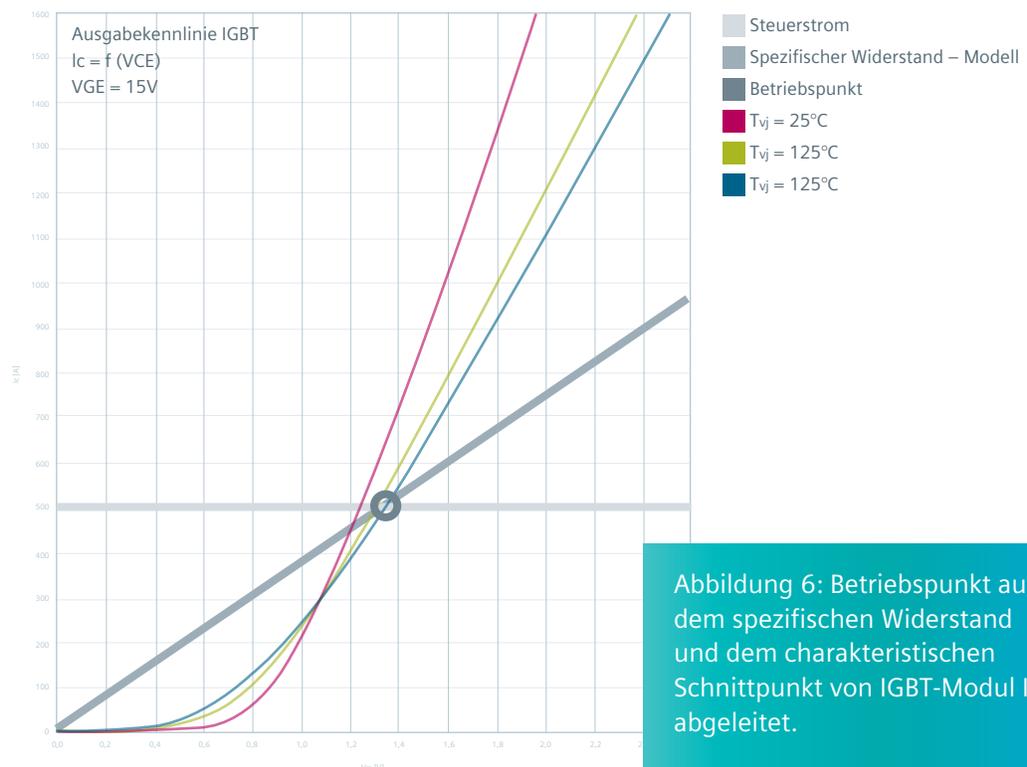
Abbildung 5:
Temperaturvorhersage mit voller Leistung gleichmäßig abgeleitet (oben) und mit einem elektrothermischen Ansatz (unten).



Einschränkungen bei der Verwendung eines linearen elektrischen Modells

Da bei der Nutzung von Simcenter Flotherm von einer einzigen Materialeigenschaft des spezifischen elektrischen Widerstandes ausgegangen wird, während der IGBT eine nichtlineare IV-Zuordnung aufweist, ist die Kalibrierung auf einen einzigen Steuerstrom innerhalb eines Bauteils wie eines IGBTs nur begrenzt möglich, wenn ausschließlich die Simulation verwendet wird. Obwohl ein solcher spezifischer Widerstand (linear) temperaturabhängig sein kann, beschränkt er die allgemeine Anwendung auf Materialien, die eine lineare, direkte IV-Charakteristik aufweisen. Die Gesamtverlustleistung ist leicht messbar (Spannungsabfallmessung der Vollschaltung in Verbindung mit der Kenntnis des Steuerstroms). Die Kalibrierungsmethode bestimmt den (elektrischen) Betriebspunkt durch Anpassung des Widerstands der aktiven Schicht, so dass sich die IV-Kurve mit der Steuerstromlinie schneidet (Abbildung 6).

Die Kalibrierung des effektiven elektrischen Widerstands der aktiven Schicht bei gleichem Steuerstrom und unterschiedlichen Sperrschichttemperaturen (über die Steuerung der Umgebungstemperatur des Wassermantels) würde es ermöglichen, den temperaturabhängigen Koeffizienten des spezifischen elektrischen Widerstands zu bestimmen. Dies könnte auch die Genauigkeit der Vorhersage der Verlustleistung der aktiven Schicht erhöhen, wobei lokale Schwankungen der Chip-Temperatur und des spezifischen elektrischen Widerstands berücksichtigt werden. Eine allgemeinere elektrische Materialeigenschaft, die durch eine I versus V versus T charakterisierte Oberfläche definiert ist, würde es ermöglichen, den gesamten Bereich der Betriebsströme in der Simulation zu handhaben, einschließlich der Temperaturabhängigkeit.



Überwinden von Einschränkungen bei der Modellierung der Gesamtverlustleistung während der Schaltung

Wenn das IGBT-Modul in Betrieb ist, setzt sich die Gesamtverlustleistung aus einem Beitrag aus den Gleichstromverlusten und den Verlusten zusammen, die beim Schalten auftreten. Bezogen auf die transiente 3D-Modellierung ist es nicht tragbar, die Auflösung elektrischer Schaltzeiten gleichzeitig mit den thermischen Zeitskalen des restlichen Systems in Betracht zu ziehen.

Ein alternativer Ansatz wäre die Verwendung eines Schaltungssimulators wie ELDO, um eine vollständige transiente elektrische Stimulation durchzuführen. Vom vorhergesagten Momentanleistungsprofil würde der Gleichstromanteil subtrahiert werden, so dass der Schaltverlustanteil übrig bliebe. Dieser könnte dann zur Ableitung der kumulativen Schaltverlustleistung zeitlich gemittelt werden. Dieser Wert könnte dann als stationäre Stromquelle implementiert werden, die mit den Objekten der aktiven Schicht im elektrothermischen 3D-Modell gemeinsam genutzt wird, so dass die zeitlich gemittelten Schaltverluste zusätzlich zu den elektrothermisch vorhergesagten Gleichstromverlusten berücksichtigt werden können.

Fazit

Veraltete thermische Simulationsansätze, die davon ausgehen, dass die gesamte aufgewendete Leistung im Halbleiter abgeleitet wird, weisen bei der Vorhersage des Temperaturanstiegs bei solchen Leistungselektronik-Anwendungen eine um 34 Prozent höhere Fehlerquote auf. Die Lösung des vollständigen elektrischen Schaltkreises auf einem kalibrierten Simcenter T3STER-Simulationsmodell ermöglicht die Vorhersage der Leistungsverteilung und damit sehr präzise Vorhersagen des Temperaturanstiegs, die zur Beurteilung der thermischen Konformität einer vorgeschlagenen Konstruktion unter Betriebsbedingungen genutzt werden können. Diese kombinierte Test- und Simulationemethode unterstützt eine präzisere Erstellung von digitalen Zwillingen.

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, Hong Kong
+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 Elektronikentwicklung 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)

© 2019 Siemens. Eine Liste wichtiger Warenzeichen von Siemens findet sich [hier](#).
Alle anderen Marken sind Eigentum der jeweiligen Inhaber.
75476-81086-C6-DE 1/20 LOC