

Jörn Stolle und Sven Reitz

---

## 5.1 Einleitung

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben, ergibt sich bei der 3D-Integration durch den geringen Abstand verschiedener Funktionsblöcke eine große Zahl möglicher physikalischer Wechselwirkungen innerhalb des 3D-Systems. Besonders der Einfluss von Integrations-, Packaging- und Verbindungstechnologien auf das Systemverhalten muss möglichst frühzeitig im Entwurfsprozess berücksichtigt werden.

Um die Gesamtfunktionalität des Systems gewährleisten zu können, muss einerseits das Hochfrequenzverhalten der Verbindungsstrukturen in die Betrachtungen einbezogen werden, welches Signalintegrität, Übersprechverhalten und Verzögerungszeiten beeinflusst. Andererseits spielen thermische Interaktionen innerhalb der Stapelstruktur eine wichtige Rolle. Durch die hohe Packungsdichte können verlustleistungserzeugende und temperaturempfindliche Blöcke sehr eng beieinander liegen, ebenso können thermische Gradienten bzw. Temperaturwechsel im System durch die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien einen großen Einfluss auf die mechanische Zuverlässigkeit haben.

Durch die Vielfalt der zu berücksichtigenden physikalischen Effekte und der benötigten Entwurfswerkzeuge ist eine ebenenübergreifende Methodik für die multiphysikalische Modellierung und Simulation sowohl für Verbindungsstrukturen als auch für den kompletten Stack des 3D-Systems notwendig. Ein modularer Modellierungsansatz ermöglicht es, effizient und ebenenübergreifend – sowohl hinsichtlich der Modellabstraktionsebenen als auch der physikalischen Domänen – Effekte in 3D-Strukturen zu modellieren.

---

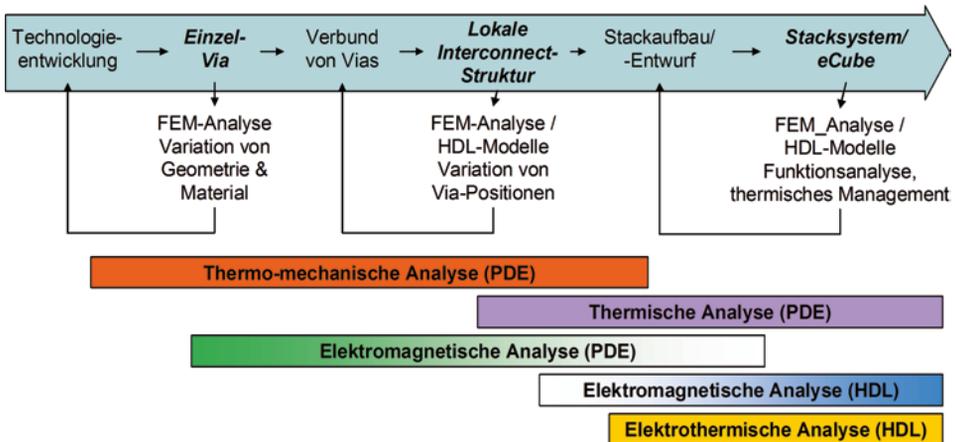
J. Stolle (✉) · S. Reitz

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwurfsautomatisierung,  
Dresden, Deutschland

E-Mail: joern.stolle@eas.iis.fraunhofer.de

S. Reitz

E-Mail: sven.reitz@eas.iis.fraunhofer.de



**Abb. 5.1** Analysearten für die Entwurfsunterstützung von 3D-Systemen

Mit Hilfe von Feldsimulationen im HF-Bereich können parasitäre Schaltelementwerte für Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten der Verbindungsstrukturen ermittelt und später für die Schaltungs- und Systemsimulation bereitgestellt werden. Lösungsverfahren für partielle Differentialgleichungen werden ebenfalls für die Analyse der Wärmeausbreitung sowie als Basis für die Generierung von Verhaltensmodellen eingesetzt. Die genannten Verhaltensmodelle können mit Modellen für die elektrische Funktion kombiniert und somit für Gesamtsystemsimulationen genutzt werden.

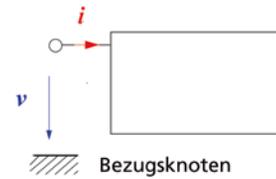
## 5.2 Modellierungsmethoden

In Abhängigkeit vom jeweiligen Schritt im Entwurfsprozess müssen unterschiedliche Modelle verwendet und unterschiedliche Arten von Simulationen ausgeführt werden (Abb. 5.1). So werden z. B. thermomechanische Analysen mit Hilfe von PDE-Lösern (Partial Differential Equations, partielle Differentialgleichungen) zur Untersuchung der Zuverlässigkeit von einzelnen Vias oder kleinerer Gruppen durchgeführt. Variationen geometrischer Parameter und der Einfluss unterschiedlicher Materialien können so untersucht und Informationen für eine Optimierung der Vias abgeleitet werden.

Mit Hilfe von elektrostatischen und elektromagnetischen Simulationen im HF-Bereich, z. B. mit Methoden der Finiten Integrations Theorie (FIT), lassen sich parasitäre Schaltelementwerte für Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten der Vias ermitteln und später für die Schaltungs- und Systemsimulation bereitstellen.

Lösungsverfahren für partielle Differentialgleichungen, z. B. durch Methoden der finiten Elemente (FE), werden ebenfalls für die Analyse der Wärmeausbreitung von lokalen Interchip-Verbindungen und der gesamten gestapelten Struktur sowie als Basis für die Ableitung von Verhaltensmodellen in HDL (Hardware Description Language) eingesetzt. Die

**Abb. 5.2** Klemmengrößen eines Teilsystems (Fluss- und Differenzgrößenvektoren  $i$  bzw.  $v$ )



genannten Verhaltensmodelle können mit Modellen für die elektrische Funktion kombiniert werden und somit für Gesamtsystemsimulationen genutzt werden. Dabei können einerseits der Einfluss des elektrischen Verhaltens der Vias auf das Systemverhalten und andererseits thermisch-elektrische Wechselwirkungen untersucht werden.

Eine Modellierungsmethodik, die diese sehr unterschiedlichen Arten von Analysen effizient unterstützt, umfasst:

- einen modularen Modellierungsansatz
- Methoden für die rechnerunterstützte Modellgenerierung
- die Modellvalidierung sowie
- die Integration von Netzwerk- oder Verhaltensmodellen in den Entwurfsablauf

Auf die ersten beiden Punkte wird in den nachfolgenden Abschnitten genauer eingegangen.

### 5.2.1 Verhaltensmodelle und Verhaltensbeschreibung

Es wurde weiter oben bereits mehrfach von Verhaltensmodellen gesprochen, aber um was handelt es sich hier?

Das Kernstück moderner Systemsimulationsprogramme und Spice-kompatibler Schaltungssimulatoren sind numerische Verfahren zur Lösung von Algebra-Differentialgleichungssystemen. Diese Gleichungssysteme werden aus Netzlistenbeschreibungen der zu simulierenden Probleme aufgebaut. Ursprünglich wurden diese Programme für die Simulation elektronischer Schaltungen entwickelt. Die Netzlisten mussten unter Verwendung vorgegebener Grundelemente (Widerstände, Kapazitäten, Induktivitäten, unabhängige und einfache gesteuerte Quellen, ...) aufgebaut werden. Aber auch nichtelektrische Systeme sind durch Netzwerke beschreibbar. Wegen der seit langem bekannten Analogien zu den elektrischen Netzwerken (s. z. B. [SMR67], [RS76] und die dort zitierte Literatur) lassen sich daher Spice-kompatible Programme [K95] auch für die Behandlung nichtelektrischer Probleme einsetzen.

Durch die Verfügbarkeit von Verhaltensbeschreibungssprachen wie VHDL-AMS, Verilog-AMS, Modelica u. a. können vom Anwender moderner Schaltungs- und Systemsimulationsprogramme wie Spectre und Dymola eigene Modelle erstellt werden. Dabei sind Bedingungen für mögliche Signale (Fluss- und Differenzgrößenvektoren) an den Klemmen des Modells festzulegen (Abb. 5.2).

Die allgemeine Form für die Beschreibung einer linearen (mechanischen) Komponente ist durch

$$M \frac{d^2 v}{dt^2} + D \frac{dv}{dt} + K v = F \quad (5.1)$$

gegeben.  $F$  ist hierbei der Vektor der Flussgrößen in einem festen (globalen) Referenzkoordinatensystem und  $v$  der Vektor der Differenzgrößen. Für einen Balken z. B. besteht der Vektor  $F$  aus den (Schnitt-) Kräften und Momenten, in  $v$  sind die Verschiebungen und Verdrehungen zusammengefasst.  $M$ ,  $D$  und  $K$  sind Masse-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen im lokalen Koordinatensystem. Diese Matrizen können über entsprechende Transformationsmatrizen in das globale Referenzkoordinatensystem transformiert werden. Das System (5.1) kann direkt in Verhaltensmodellen mit entsprechenden Verhaltensbeschreibungssprachen abgebildet werden.

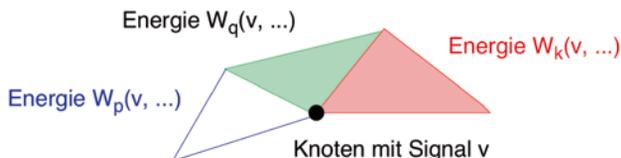
Die von FE-Simulatoren aufgestellten Gleichungen für die Simulation einer (linearen) Komponente oder eines Systems haben im Prinzip dieselbe Struktur wie Gl. (5.1). Auf Basis von Beschreibungen der Grundelemente, der Geometrie und Materialien von Komponenten und der Verbindungen der Grundelemente werden im Simulator die Koeffizientenmatrizen (Systemmatrizen) aufgestellt und mit festen numerischen Werten belegt. Einige FE-Simulatoren wie beispielsweise ANSYS [A10] erlauben den Zugriff auf die numerischen Werte dieser Matrizen, die dann verwendet werden können, um das Klemmenverhalten von Verhaltensmodellen für Schaltungs- und Systemsimulatoren abzuleiten. Wie dies erfolgt, wird in Abschn. 5.4 dargestellt. Vorteile bietet dieser Weg bei Strukturen, die sich nicht leicht aus Grundelementen (wie z. B. Balkenelementen), für die bereits Verhaltensmodelle vorhanden sind, zusammensetzen lassen.

## 5.2.2 Methode der Finiten Elemente

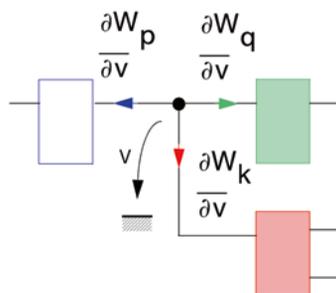
Es wurde soeben festgestellt, dass die Gleichungssysteme von FE-Simulatoren denen ähnlich sind, mit denen das Klemmenverhalten von Verhaltensmodellen beschrieben wird. Wie ist dies möglich?

Der Grundgedanke der Finiten-Elemente-Methode ist die Zerlegung des betrachteten Gebietes in hinreichend kleine Teilgebiete (z. B. Dreiecke in 2D oder Tetraeder in 3D) sowie die Zuordnung eines Variationsproblems zu einer partiellen Differentialgleichung. Dabei ist ein Funktional, interpretierbar als Energie des Gesamtsystems, zu minimieren. Die Gesamtenergie des Systems wird aus der Summe der Energien der Teilsysteme bestimmt, deren Wert von den Signalgrößen in vorgegebenen Knotenpunkten abhängt (Abb. 5.3). Die Werte in den Knotenpunkten werden so bestimmt, dass die Gesamtenergie minimiert wird [TGK85]. Das Vorgehen entspricht dem Ritz-Verfahren zur Minimierung des ursprünglichen Funktionals in einem endlich dimensionalen Teilraum [B97].

**Abb. 5.3** Teilsysteme eines Gesamtsystems (Prinzipdarstellung)



**Abb. 5.4** Kirchhoff'scher Knotensatz (Beispiel)



Für die Minimierung der Energie  $W$  des Gesamtsystems ist es notwendig, dass die Ableitung von  $W$  nach allen Knotensignalen Null ist. Abbildung 5.3 zeigt eine Situation, in der das Signal  $v$  nur die Energien  $W_p$ ,  $W_q$  und  $W_k$  der benachbarten Teilsysteme beeinflusst. Es gilt

$$W_S = \dots + W_p(v, \dots) + W_q(v, \dots) + W_k(v, \dots) + \dots \quad (5.2)$$

Damit ergibt sich

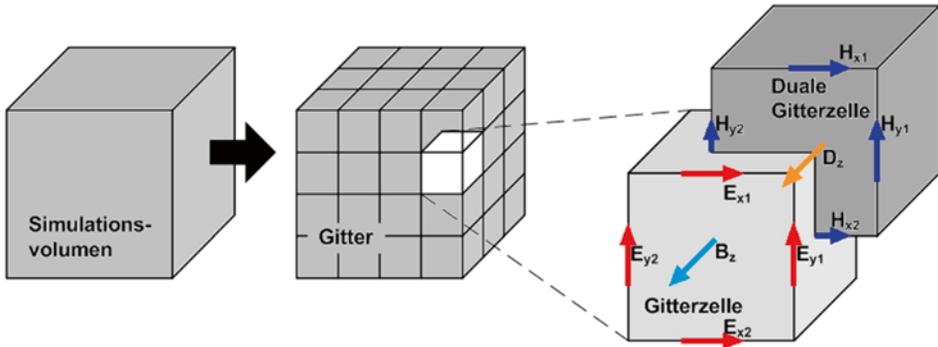
$$\frac{\partial W_S}{\partial v} = 0 = \frac{\partial W_p}{\partial v} + \frac{\partial W_q}{\partial v} + \frac{\partial W_k}{\partial v} \quad (5.3)$$

Diese Gleichung kann als Kirchhoff'scher Knotensatz interpretiert werden (s. Abb. 5.4).

Damit kann im Prinzip dieselbe Beschreibung für die Finiten Elemente und die Ableitung des Klemmenverhaltens der Modelle für einen Schaltungs- und Systemsimulator verwendet werden (s. dazu auch [A10]). Sei  $W(v, \dots)$  die Energie eines Teilsystems in Abhängigkeit von der Klemmengröße  $v$ , die dem Signalwert am Knoten bei Zusammenschaltung entspricht, so gilt für die zugehörige Flussgröße (s. auch Abb. 5.2)

$$i = \frac{\partial W}{\partial v} \quad (5.4)$$

Die Beziehung (5.3) lässt sich als Ausgangspunkt für die Implementierung eines Verhaltensmodells verwenden. Im konkreten Fall sind eventuell noch einige Modifikationen vorzunehmen. Zu beachten ist beispielsweise, dass im Fall einer elektrischen Klemme die Ableitung nach der Klemmenspannung die Ladung ergibt. Um den Strom als Klemmengröße verwenden zu können, macht sich eine Ableitung der Ladung nach der Zeit erforderlich. Des Weiteren könnte in (5.3) auch die negative Ableitung verwendet werden. Das



**Abb. 5.5** Darstellung dualorthogonaler Gitter der FIT-Methode, nach [CST05].

würde nichts an der Gültigkeit von (5.3) bei der Zusammenschaltung ändern, hätte aber Auswirkungen auf die Zählrichtung eingepprägter Größen (z. B. externer Kräfte im Fall mechanischer Modelle).

Außerdem haben die Gleichungssysteme von FE-Modellen schnell eine Ordnung von über einer Million, d. h. 1 Mio. Unbekannte. Dies ist natürlich nicht direkt in Verhaltensmodelle umsetzbar. Die Ordnung des Ausgangssystems muss mathematisch so reduziert werden, dass zum einen das statische und dynamische Verhalten des Ausgangssystems weiterhin (sehr) gut nachgebildet wird und zum anderen die Größe des reduzierten Systems möglichst klein ist. Die Ordnungsreduktion wird in Abschn. 5.4 beschrieben.

### 5.2.3 Methode der Finiten Integrations Theorie

Die Methode der Finiten Integrations Theorie (FIT) wurde bereits 1977 erstmals von T. Weiland beschrieben und stellt seitdem eine der wichtigsten Grundlagen zur Entwicklung numerischer Algorithmen für die dreidimensionale elektromagnetische Feldberechnung dar [TUD]. Sie ist hier gebräuchlicher als die Methode der Finiten Elemente.

Die FIT-Methode berechnet die diskretisierten Maxwell-Gleichungen in Integralform im Zeitbereich. Hierfür ist zunächst das Modell, welches grundsätzlich aus Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten, Permittivitäten und Permeabilitäten bestehen kann, sowie der umgebende Raum (meist Luft oder Vakuum) zu diskretisieren. Das Simulationsvolumen wird in ein System aus zwei zueinander dualorthogonalen Gittern unterteilt, das aus einer Vielzahl von Elementarzellen besteht (s. Abb. 5.5).

Die elektrischen Feldstärken werden mittels der FIT-Methode auf den Kanten des primären Gitters berechnet. Senkrecht auf diesen Flächen, die durch die Seiten des Gitterwürfels gebildet werden, stehen die magnetischen Flussdichten, die aus einer numerischen Lösung des Induktionsgesetzes (s. auch Gl. (5.5)) der Maxwell-Gleichungen resultieren.

$$\operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \quad (5.5)$$

Hierzu wird die Rotation über die elektrische Feldstärke durch die Summe der vier diskreten Feldkomponenten ersetzt. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Berechnung der Felder auf den Gitterkanten im Zeitbereich. Die Ableitungen bezüglich der Zeit in den Maxwell-Gleichungen werden durch zentrale Differenzen ersetzt. Das bedeutet, dass man zur Berechnung einer aktuellen Feldgröße sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Feldwerte des vorangegangenen Zeitschrittes verwendet. Im Folgenden soll kurz anhand der in Abb. 5.5 dargestellten Gitterzelle diese Vorgehensweise verdeutlicht werden:

- Das Induktionsgesetz (5.5) wird zunächst auf dem Gitter diskretisiert

$$(E_{x2} + E_{y1} - E_{x1} - E_{y2})ds = -\frac{d}{dt}B_z dA \quad (5.6)$$

wobei  $ds$  die Kantenlänge und  $dA$  eine Seitenfläche des Würfels sind.

- Der Differential-Operator bezüglich der Zeit auf der rechten Seite wird durch einen Differenzenquotienten ersetzt. Dabei werden die Felder an den aufeinander folgenden Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  betrachtet:

$$(E_{x2}^{t_1} + E_{y1}^{t_1} - E_{x1}^{t_1} - E_{y2}^{t_1}) ds = -\frac{B_z^{t_2} - B_z^{t_1}}{\Delta t} \quad (5.7)$$

- Die obige Gleichung lässt sich nun so umstellen, dass man den aktuellen Wert der magnetischen Flussdichte erhält:

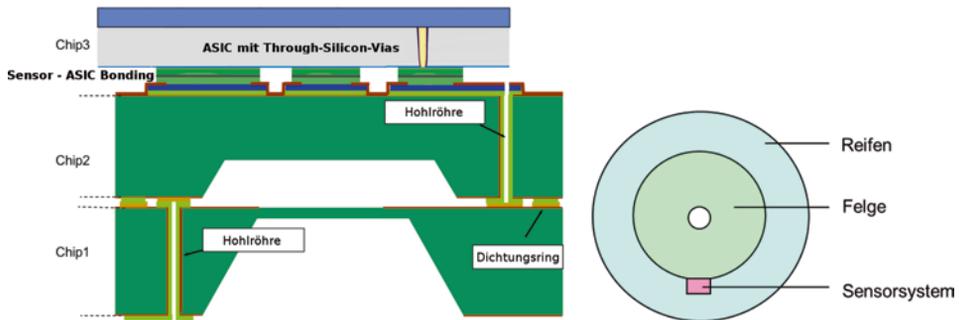
$$B_z^{t_2} = B_z^{t_1} - \Delta t (E_{x2}^{t_1} + E_{y1}^{t_1} - E_{x1}^{t_1} - E_{y2}^{t_1}) ds \quad (5.8)$$

Diese Vorgehensweise der numerischen Integration wird als Leap-Frog Algorithmus bezeichnet. Ebenso wie bei der elektrischen Feldstärke  $E_{in}$  und der magnetischen Flussdichte  $B_i$  sind auf den Kanten des dualen Gitters die magnetischen Feldstärken  $H_{in}$  definiert. Die Verschiebungsflussdichte  $D_i$  steht auch hier senkrecht auf den Gitterflächen. Mit dieser Vorgehensweise erhält man schließlich ein System von sogenannten Maxwell-Gittergleichungen (Maxwell-Grid-Equations). Bei einer Anregung mit einem gaußförmig modulierten Sinussignal kann mit diesem Verfahren, verbunden mit einer Fourier-Transformation, eine breitbandige Berechnung der elektromagnetischen Felder erfolgen. Da in der Praxis das Simulationsgebiet immer räumlich und zeitlich begrenzt ist, müssen daher am Rand des Simulationsvolumens zuvor definierte Randbedingungen von den elektrischen und magnetischen Feldern erfüllt werden.

---

### 5.3 Modularer Modellierungsansatz

Um Simulationen zur Unterstützung des Entwurfs von 3D-Systemen durchführen zu können, wird für die geometrische Modellierung der Ansatz einer werkzeugunabhängigen Methodik verfolgt. Ziel dieser Methodik ist es, einen modularen Modellierungsansatz zur

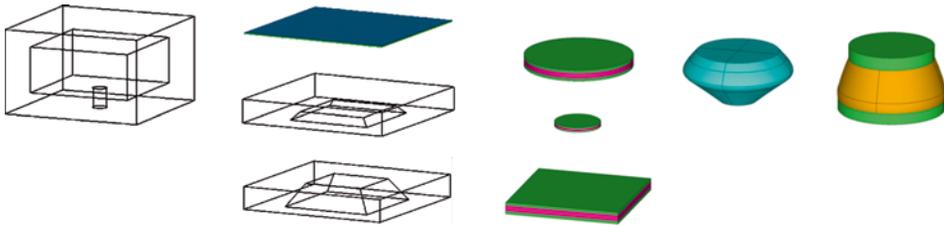


**Abb. 5.6** Links: Prinzipskizze der 3D-Struktur eines intelligenten Drucksensors. (Quelle: Sintef, Norwegen), rechts: Montage des Sensorsystems an der Felge

Unterstützung der Technologieentwicklung und Analyse physikalischer Effekte bereitzustellen [SRW07]. In Abhängigkeit vom jeweiligen Schritt im Entwurfsprozess werden unterschiedliche Modelle verwendet und unterschiedliche Arten von Simulationen ausgeführt. So werden z. B. thermische Analysen zur Vermeidung lokaler Erwärmungen, sog. Hotspots, elektrothermische Analysen zu Wechselwirkungen in gestackten 3D-Systemen und elektromagnetische Analysen zur Untersuchung des elektrischen Verhalten im Hochfrequenzbereich von einzelnen Vias oder kleinerer Gruppen durchgeführt [ESR06, SKB06]. Die Grundidee ist, parametrische Modelle von Grundstrukturen des 3D-Systems bereitzustellen, die hinsichtlich ihres geometrischen Aufbaus, ihrer Materialparameter sowie des betrachteten physikalischen Effekts variabel sind. Weiterhin ist die räumliche Lage der Grundstrukturen im Gesamtsystem frei wählbar. Wesentlicher Baustein dieses Ansatzes ist eine werkzeugunabhängige Strukturbeschreibung, die eine teilweise automatisierte Generierung von FE- bzw. FIT-Modellen sowie die Ableitung von Modellen für die Systemsimulation unterstützt. Die Strukturrepräsentation kann dabei mit Hilfe von XML-Dateien realisiert werden. Dieser modulare Modellierungsansatz erlaubt somit die detaillierte Analyse des Verhaltens einzelner Grundstrukturen und andererseits die Untersuchung komplexer zusammengesetzter Strukturen, wie sie in 3D-System zu finden sind.

### 5.3.1 Methode der Finiten Elemente

Die Anwendung dieser Methodik im Bereich der Finiten Elemente wird am Beispiel eines Drucksensorsystems für Autoreifen demonstriert. Abbildung 5.6 links zeigt die komplexe Struktur des 3D-Systems. Es besteht im Wesentlichen aus drei Chips. Chip 1 und Chip 2 bilden einen Drucksensor mit Membranstruktur, in Chip 3 (ASIC) wird die Signalverarbeitung realisiert.



**Abb. 5.7** Links: Gehäuse und 3 Chipvarianten (ASIC und 2 Chips des Drucksensors), rechts: 3 mögliche Bondvarianten (SLID in verschiedenen Formen und Größen, Au-Stud-Bump, Micro-Flip-Chip)

Die Lage des Sensorsystems wird in Abb. 5.6 rechts veranschaulicht. Das Sensorgehäuse ist mit seiner Oberseite direkt mit der Felge verbunden, die anderen Oberflächen des Gehäuses sind von der Luft des Reifens umgeben.

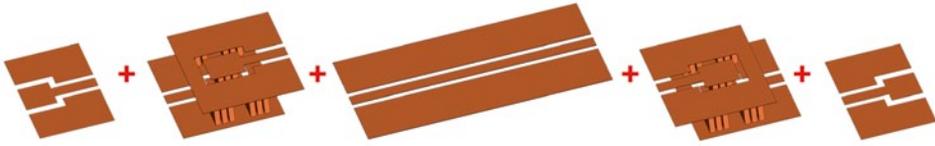
Für thermische Untersuchungen wird das FE-Modell des Gesamtsystems mit Hilfe einer Bibliothek von Grundstrukturen erstellt. Grundstrukturen bzw. Basismodule sind in diesem Fall das Gehäuse, die drei gestapelten Chips, Through-Silicon Vias (TSVs), Verbindungsstrukturen zwischen den Chips, verschiedene Leitbahnen, ein Sealing u. v. a. Eine Auswahl zeigt Abb. 5.7. Die Generierung des Gesamtmodells läuft teilautomatisiert ab, so dass bei Änderung der geometrischen bzw. Materialparameter der Einzelmodule das zusammengesetzte Modell sehr einfach aktualisiert werden kann.

### 5.3.2 Methode der Finiten Integrations Theorie

Ebenso kann der Ansatz der modularen Modellierung auf die Methode der Finiten Integrations Theorie angewendet werden. Die FIT-Methode berechnet die diskretisierten Maxwell-Gleichungen im Zeitbereich und eignet sich daher besonders für die Analyse des elektrischen Verhaltens im Hochfrequenzbereich.

Für die Gesamtsystemsimulation ist es sinnvoll, komplexe Verbindungsstrukturen aus einfachen Grundmodellen zusammensetzen. Hierzu wird zunächst die komplexe 3D-Struktur in einzelne parametrische Modelle von Grundstrukturen zerlegt. Diese Grundmodelle erlauben zum einen eine detailliertere Simulation hinsichtlich parasitärer Eigenschaften wie Skin- und Proximity-Effekt sowie Wellenausbreitung. Zum anderen lassen sich diese Modelle in Bibliotheken ablegen und später einfach hinsichtlich Geometrie oder Materialien modifizieren und erneut simulieren. Ebenso wird der zur Simulation benötigte Speicher- und Rechenzeitbedarf erheblich reduziert.

Im Folgenden soll am Beispiel einer Koplanarleitung mit zwei TSV-Arrays mit jeweils  $3 \times 5$  Vias sowie Kontaktstellen das prinzipielle Vorgehen beschrieben werden. Die betrachtete Koplanarleitung kann durch eine Serienschaltung von fünf Grundmodellen dargestellt werden, die aus den beiden Anschluss pads, den Durchkontaktierungen sowie der Leitung besteht (s. Abb. 5.8).



**Abb. 5.8** Aufteilung der Koplantarleitung in fünf Teilelemente (außen Anschlusspads, Durchkontaktierungen und Leitung in der Mitte)

Mit Hilfe von FIT-Simulatoren lassen sich die Einzelstrukturen leicht aus der Gesamtstruktur extrahieren und simulieren. Diese Ergebnisse sind aber nicht direkt experimentell überprüfbar, da die Einzelstrukturen keine Anschlusspads besitzen, welche mit Messspitzen kontaktiert werden können. Außerdem ist die Wahl der Schnittflächen bei der Auftrennung der Gesamtstruktur nicht trivial, weil die Voraussetzung für die anschließende Verbindung von Einzelstrukturen ist, dass der E-Feld-Vektor in der Schnittfläche liegt, d. h. dass nahezu reine TE-Wellen in der Schnittebene vorliegen. Um die Simulationsergebnisse einerseits einer experimentellen Überprüfung zugänglich zu machen, andererseits aber auch die Modellierung, d. h. die Wahl der Schnittstellen, zu überprüfen, wird daher im Folgenden das formale Vorgehen des sog. Embeddings betrachtet.

Bei der FIT-Simulation werden Streuparameter, sog. S-Parameter, berechnet. Diese erhält man zum einen für die Gesamtstruktur, zum anderen für jede der fünf Einzelstrukturen aus Abb. 5.8.

Sind jedoch die Transmissionskoeffizienten zweier Systeme A und B bekannt, folgt die Transmissionsmatrix (T-Matrix) des Gesamtsystems [A04]:

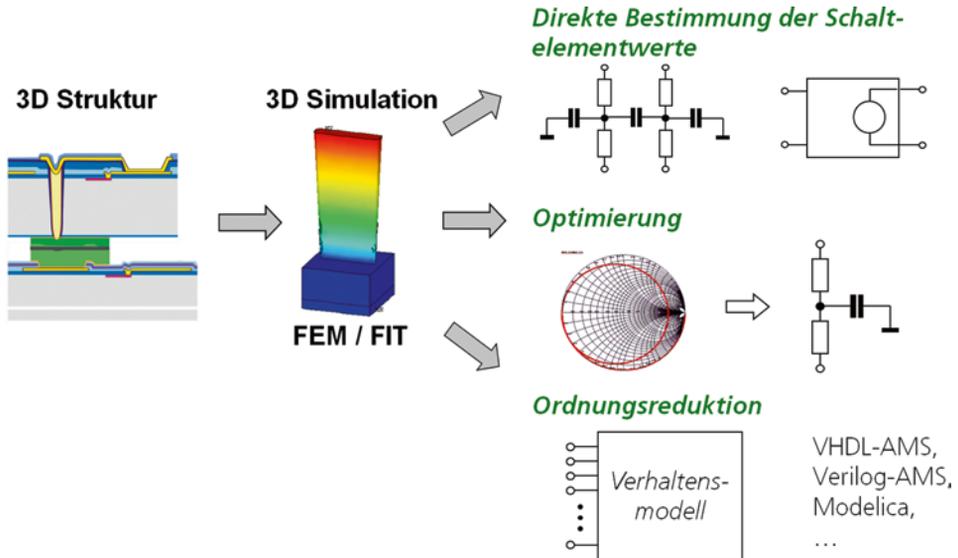
$$[T] = [T_A][T_B] \quad (5.9)$$

Der Vorgang der Multiplikation mehrerer Transmissionsmatrizen zu einem Gesamtsystem wird Embedding genannt. Demnach kann für unser Beispiel der Koplantarleitung die T-Matrix wie folgt berechnet werden:

$$[T_{SIM}] = [T_{Pad}^A][T_{Vias}^A][T_{Leitung}][T_{Vias}^B][T_{Pad}^B] \quad (5.10)$$

Generell kann man zwischen den Streu- und Transmissionsmatrizen wie folgt umrechnen:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{21}} & \frac{S_{11}}{S_{21}} \\ -\frac{S_{22}}{S_{21}} & \frac{1}{S_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{T_{12}}{T_{22}} & \frac{T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}}{T_{22}} \\ \frac{1}{T_{22}} & -\frac{T_{21}}{T_{22}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.11)$$



**Abb. 5.9** Ansätze zur Ermittlung von Ersatzschaltungen und Verhaltensmodellen von 3D-Strukturen

So ist es möglich, aus den berechneten S-Parametern der Einzelstrukturen, welche in T-Parameter umgerechnet werden, die T-Parameter des Gesamtsystems und somit letztendlich wieder dessen gesuchte S-Parameter zu bestimmen und so das elektrische Verhalten des zusammengesetzten Gesamtsystems zu ermitteln.

## 5.4 Methoden für die rechnerunterstützte Modellgenerierung

Um die Ergebnisse der 3D-Simulationen in den verschiedenen physikalischen Domänen effizient in Ersatzschaltungen bzw. Verhaltensmodelle überführen zu können, werden Methoden zur rechnergestützten Modellgenerierung benötigt. Hierbei verwendet man abhängig vom jeweiligen Simulationstool unterschiedliche Methoden. Die Modelle können anschließend Schaltungssimulatoren zur Verfügung gestellt und somit in die Gesamtsystemsimulation integriert werden.

In Abb. 5.9 ist ersichtlich, wie von einer 3D-Struktur über 3D-Simulationen (z. B. Finite-Elemente-Methode oder Finite Integrations Theorie) über drei verschiedene Arten der Modellgenerierung die Ersatzschaltungen bzw. Verhaltensmodelle erzeugt werden können.

Zum einen ist es möglich, die Bauelementwerte von Ersatzschaltungen direkt aus den berechneten Feldenergien oder S-Parametern zu bestimmen. Ein anderer Weg ist die Nutzung generischer Ersatzschaltungen, deren Bauelementwerte sich durch Optimierungsverfahren so anpassen lassen, dass das Verhalten der Ersatzschaltung möglichst ähnlich zum Verhalten des Ausgangssystems ist. Der dritte Weg ist, die durch den 3D-Simulator

**Tab. 5.1** Methoden zur rechnerunterstützten Ableitung von Verhaltensmodellen

Methode	Vorteile	Nachteile
Direkt (CST/IdEM)	Schneller und genauer Ansatz	Ersatzschaltungen mit gesteuerten Quellen Dadurch nicht für jeden Schaltungssimulator geeignet
Optimierung (MOSCITO Simon)	Passive, physikalische Ersatzschaltungen Eignung für sämtliche Schaltungssimulatoren	Lange Optimierungszyklen Händische Ableitung der Topologie der Ersatzschaltungen
Ordnungsreduktion (MORMS)	Toolunabhängig Output in Vielzahl von Verhaltenssprachen	Händische Ableitung der Topologie der Ersatzschaltungen

aufgestellten und meist sehr großen Systemmatrizen über Ordnungsreduktionsverfahren so zu reduzieren, dass das reduzierte System möglichst klein ist und dennoch ein vergleichbares Übertragungsverhalten hat. Aus diesen Systemmatrizen lassen sich dann automatisch Verhaltensmodelle in verschiedenen Beschreibungssprachen generieren.

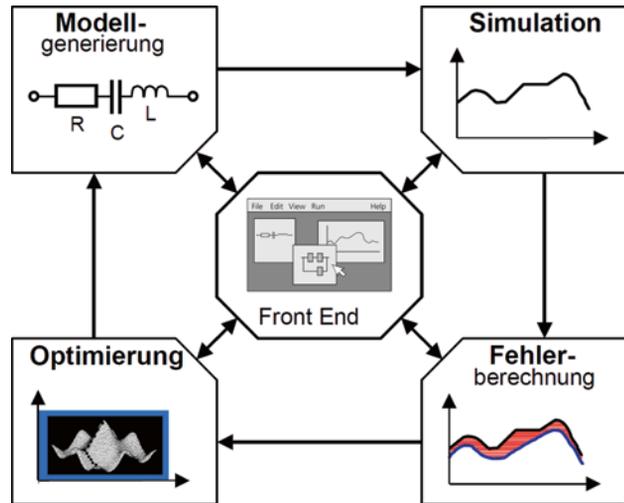
Die Vor- und Nachteile der genannten Methoden sind in Tab. 5.1 kurz gegenüber gestellt. Auf die Methoden der Optimierung und der Modellordnungsreduktion wird in den nächsten Unterpunkten ausführlicher eingegangen.

### 5.4.1 Optimierung mit MOSCITO Simon

Unter dem Namen MOSCITO Simon ist eine allgemeine Integrationsplattform zu verstehen, mit der unter anderem die simulationsgestützte Optimierung zur Unterstützung des 3D-Entwurfs durchgeführt werden kann [SI03]. Der Kerngedanke besteht darin, dass das Optimierungsprogramm und der Simulator zwei für sich eigenständige Module darstellen, die über eine Softwareinfrastruktur (MOSCITO Simon) flexibel gekoppelt werden.

Vorteil dieses Ansatzes ist die Flexibilität. Sowohl auf Seite der Optimierungsalgorithmen als auch auf Seite der Simulationswerkzeuge können jeweils die für das Problem angepassten Programme ausgewählt und mit Hilfe von MOSCITO Simon zu einem Simulations-Optimierungs-Zyklus kombiniert werden. In Abb. 5.10 ist der Gesamtzyklus und die sich daraus ergebende Softwarearchitektur dargestellt. Sie eignet sich neben der Designoptimierung unter anderem auch für die Parameteranpassung bei Modellen. Für diesen Zweck wurde zur Parameteroptimierung auf der Basis von S-Parametern das Tool um ein grafisches Front-End erweitert, das dem Entwerfer die Optimierung von Bauelementparametern (RLCG) in einer gewählten Ersatzschaltung erlaubt. Als Spezifikation bzw. Optimierungsziel werden dabei die Ergebnisse einer S-Parameterberechnung, z. B. einer Full-Wave-Simulation mit Microwave Studio, vorgegeben. Als Optimierungsmodul wird das am Fraunhofer IIS/EAS entwickelte Programm OPAL verwendet. OPAL stellt

**Abb. 5.10** Prinzip der simulationsgestützten Optimierung [BHS04]



ein weites Spektrum von deterministischen und stochastischen Optimierungsalgorithmen (Powell, Nelder Mead, Simulated Annealing, FSCP, ...) zur Verfügung [SSB02]. Für die Simulation der Ersatzschaltung kommt ein frei verfügbarer SPICE-Simulator zum Einsatz. Darüber hinaus lassen sich an dieser Stelle auch noch weitere Simulatoren (ANSYS, Matlab, Saber, ...) einbinden.

Zu Beginn einer Parameteranpassung werden die gewählte Ersatzschaltung als SPICE-Subcircuit sowie die S-Parameter der Full-Wave-Simulation als Spezifikation an MOSCITO Simon übergeben. Über eine Parameterdatei können die anzupassenden Parameter inklusive unterer und oberer Schranke definiert und der Optimierungsalgorithmus gewählt werden. Danach wird die Optimierung gestartet. Der Optimierungsschritt und die Simulationsergebnisse werden online in verschiedenen Diagrammen visualisiert. Der Optimierungsprozess kann somit beobachtet, gegebenenfalls angehalten und mit einem anderen, erfolgsversprechenderen Optimierungsalgorithmus erneut gestartet werden. Als Ergebnis liefert das Tool eine optimal parametrisierte Ersatzschaltung (s. auch Abschn. 5.6). MOSCITO Simon wurde in Java implementiert und steht – zusammen mit OPAL und SPICE – als Komplettprogramm für Windows und diverse UNIX/Linux-Systeme zur Verfügung.

## 5.4.2 Modellgenerierung mit Modellordnungsreduktion

Bei der Modellierung mikromechanisch-elektrischer Systeme (MEMS) werden die zugehörigen partiellen Differentialgleichungen in der Regel mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode räumlich semidiskretisiert. Als Ergebnis erhält man lineare Deskriptorsysteme „zweiter Ordnung“ [BH03]

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx &= B^{in}u \\ y &= B_1^{out}x + B_2^{out}\dot{x} \end{aligned} \quad (5.12)$$

mit den konstanten, dünn besetzten Systemmatrizen  $M$ ,  $D$ ,  $K$ . Dabei wird die Vektorfunktion  $u = u(t)$  als Eingang bezeichnet,  $x = x(t)$  beschreibt den inneren Zustand des Systems und  $y = y(t)$  ist der Ausgangsvektor. Die Extraktion der Systemmatrizen aus den FE-Tools erfolgt mit dem Inhouse-Tool MORMS des Fraunhofer IIS/EAS.

Die Anzahl  $N$  der Komponenten von  $x$  nennt man auch Zustandsraumdimension. Diese erreicht typischerweise Größenordnungen von  $10^4 \dots 10^8$ . Dadurch sind Zeitbereichssimulationen extrem rechenintensiv, insbesondere wenn größere Teilsysteme für eine Simulation auf Systemebene gekoppelt werden sollen. Bei einem mechanischen System entspricht  $M$  der Massematrix,  $D$  der Dämpfungsmatrix und  $K$  der Steifigkeitsmatrix. Bei einem Wärmeleitungsproblem bzw. bei der modifizierten Knotenspannungsanalyse von linearen elektrischen Netzwerken treten ebenfalls Systeme der Form wie Gl. (5.12) auf. Jedoch handelt es sich dann um ein System erster Ordnung, d. h.  $M=0$ .  $D$  und  $K$  beinhalten dann die Wärmekapazitäten und -leitwerte bzw. die elektrischen Kapazitäten, Induktivitäten und Leitwerte.

Durch Anwendung der Laplace-Transformation auf (5.12) erhält man die Übertragungsfunktion

$$H(s) := (B_1^{out} + sB_2^{out})(s^2M + sD + K)^{-1}B^{in} \quad (5.13)$$

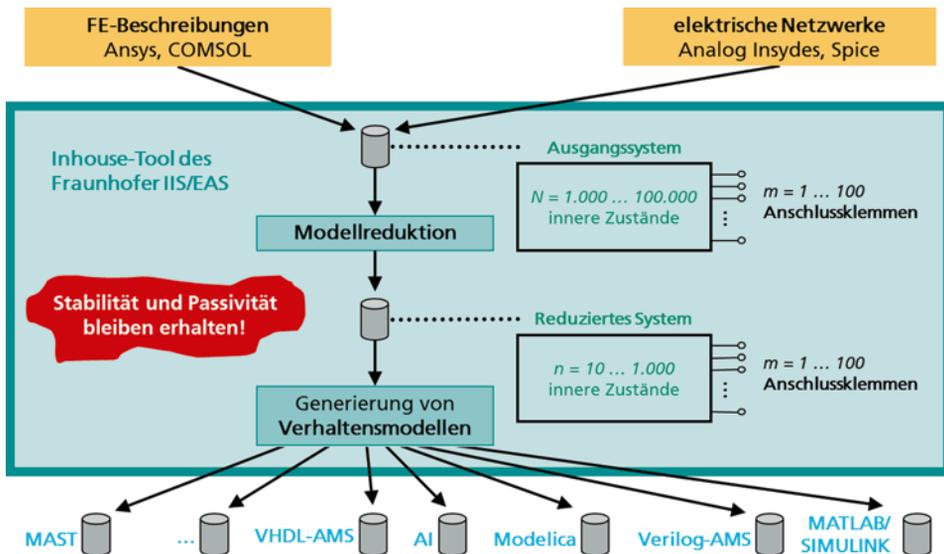
Sie beschreibt im Frequenzbereich die Wirkung des Systems auf ein Eingangssignal  $U(s)$ , d. h. das zugehörige Ausgangssignal  $Y(s)$  ergibt sich zu:

$$Y(s) = H(s)U(s) \quad (5.14)$$

Ziel der Modellordnungsreduktion (MOR) ist nun die Reduktion der Zustandsraumdimension, d. h. die Approximation von (5.12) durch ein reduziertes System mit einer deutlich kleineren Anzahl innerer Zustände  $n \ll N$  ( $n < 100$ ) und dennoch ähnlichem Übertragungsverhalten. Die Anzahl der Ein- und Ausgänge  $p$  bzw.  $q$  soll sich dabei nicht ändern, so dass das Ausgangssystem nahtlos durch das reduzierte System ersetzt werden kann. Hierbei ist anzumerken, dass sich jedes System  $k$ -ter Ordnung äquivalent in ein System erster Ordnung mit Zustandsraumdimension  $N_1 = k \cdot N$  transformieren lässt, weshalb die Begriffe Dimension und Ordnung gegeneinander austauschbar sind. Jedoch meint Modellordnungsreduktion in der Regel die Reduktion der Zustandsraumdimension  $N$ . Mit Hilfe einer rechteckigen Projektionsmatrix  $V$  erhält man durch folgende Projektion der Systemmatrizen aus (5.12) ein reduziertes System:

$$\begin{aligned} \tilde{M} &:= V_n^T M V_n & \tilde{D} &:= V_n^T D V_n \\ \tilde{K} &:= V_n^T K V_n & \tilde{B}^{in} &:= V_n^T B^{in} \\ \tilde{B}_1^{out} &:= B_1^{out} V_n & \tilde{B}_2^{out} &:= B_2^{out} V_n \end{aligned} \quad (5.15)$$

Für die Erzeugung einer geeigneten Projektionsmatrix haben sich in der Praxis rationale Block-Krylov-Unterraumverfahren bewährt [F00, K06], mit deren Hilfe eine gewisse Anzahl von Momenten der Übertragungsfunktion des reduzierten Systems mit denen des Ausgangssystems übereinstimmt. Dieser Ansatz wird auch als implizite Momentenanpassung (implicit moment matching) für mehrere Entwicklungspunkte bezeichnet. Schließ-



**Abb. 5.11** Tool (MORMS) zur Extraktion der Systemmatrizen, Ordnungsreduktion sowie Generierung von Modellen in verschiedenen Verhaltensbeschreibungssprachen

lich wird das reduzierte System über ein entsprechendes Inhouse-Tool (MORMS) in ein Verhaltensmodell exportiert und kann entsprechend mit anderen Systemen gekoppelt werden (Abb. 5.11).

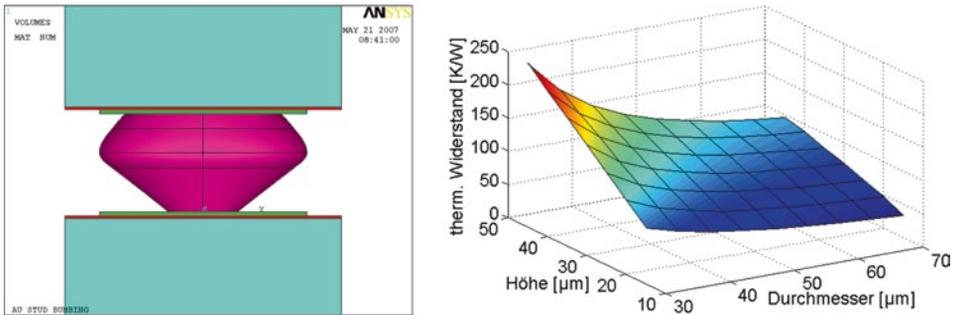
Dabei ist anzumerken, dass die verwendete Projektionsmatrix  $V_n$  in jedem Fall ortho-normiert sein sollte, um die positive Semidefinitheit der Systemmatrizen  $M$ ,  $D$  und  $K$  zu erhalten. Dadurch ist bei passivem Ausgangssystem auch das reduzierte System passiv [S99]. Passivität besagt, dass das System keine Energie erzeugen kann sondern lediglich Energie verbraucht. Diese Eigenschaft ist bei der Kopplung von Systemen wichtig, weil dadurch die Stabilität des Gesamtsystems garantiert werden kann [AV73].

## 5.5 3D-Simulation des thermischen Verhaltens

Als Beispiele für 3D-Simulationen mit dem Finite-Elemente-Simulator ANSYS sollen thermische Untersuchungen sowohl an einer Einzelstruktur als auch an einer komplexen 3D-Struktur durchgeführt werden.

### 5.5.1 Einzelstruktur

Der modulare Ansatz erlaubt zum einen die Analyse thermischer Eigenschaften von Einzelstrukturen, sogenannter modularer Grundelemente, aus denen komplexe Strukturen aufgebaut werden können. Durch die Parametrisierbarkeit können einfach Studien



**Abb. 5.12** Links: Finite-Elemente-Modell eines Au-Stud-Bump in ANSYS, rechts: dessen thermischer Widerstand als Funktion von Durchmesser und Höhe der Struktur

zum Einfluss von Geometrie- und Materialparametern erfolgen. Durch die relativ geringe Komplexität der Strukturen sind solche Studien mit relativ geringem Speicher- und Rechenzeitbedarf machbar. In Abb. 5.12 sind exemplarisch das FE-Modell in ANSYS als auch der thermische Widerstand eines Au-Stud-Bump als Funktion von Durchmesser und Höhe der Struktur dargestellt.

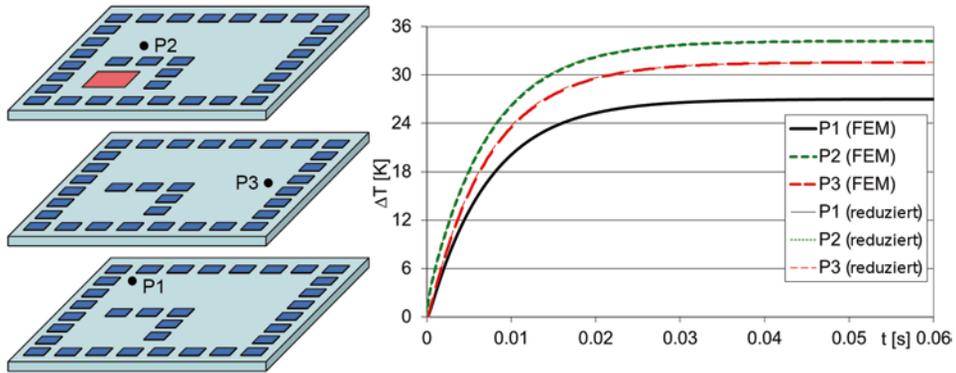
### 5.5.2 Komplexe 3D-Struktur

Andererseits erlaubt der modulare Modellierungsansatz die Untersuchung des thermischen Verhaltens von aus modularen Grundelementen aufgebauten komplexen 3D-Systemen. Speziell zur Vermeidung lokaler Erwärmungen, sog. Hotspots, können thermische Simulationen des gesamten Stacks sehr hilfreich sein. Für die Analyse elektrothermischer Wechselwirkungen in elektrischen Schaltungen sind neben der elektrischen Systembeschreibung, z. B. in Form von Netzlisten, auch Modelle des thermischen Verhaltens als thermisches Netzwerk oder Verhaltensmodell nötig.

Hierzu werden elektrothermische Modelle der Halbleiterbauelemente benötigt, die einerseits eine Berechnung der lokal umgesetzten Verlustleistung und andererseits die Einbeziehung der lokalen Temperatur in die Modellgleichung des Bauelementes realisieren.

**Stackstruktur** Als Beispiel wurde ein Stack, bestehend aus drei Dies (Abb. 5.13 links) gewählt, welche über Vias miteinander verbunden sind sowie zusätzliche thermische Vias zur Wärmeableitung enthalten. In der obersten Schicht des Stapels befindet sich ein Leistungsbaulement (quadratischer Bereich). Aufgabe ist, ein Verhaltensmodell abzuleiten, welches die Temperatur an den temperaturempfindlichen Bauelementen, die sich an den Punkten P1, P2 und P3 befinden, in ihrem dynamischen Verhalten als Funktion der Verlustleistung des Leistungsbaulements beschreibt.

Zunächst wurde der Stapel in ANSYS modelliert. Die Dimension der sich ergebenden Systemmatrizen betrug ca. 95.000. Nach Export und Ordnungsreduktion stand ein Glei-



**Abb. 5.13** Links: Schichtstruktur des dreilagigen Stacks: Lage des leistungsintensiven Bauelements (quadratischer Bereich in oberer Schicht) und der temperatursensitiven Bauelemente in den Schichten (P1, P2 und P3), rechts: Temperaturverlauf an den temperatursensitiven Bauelementen – vergleichende Darstellung der Ergebnisse aus FEM- und Systemsimulation

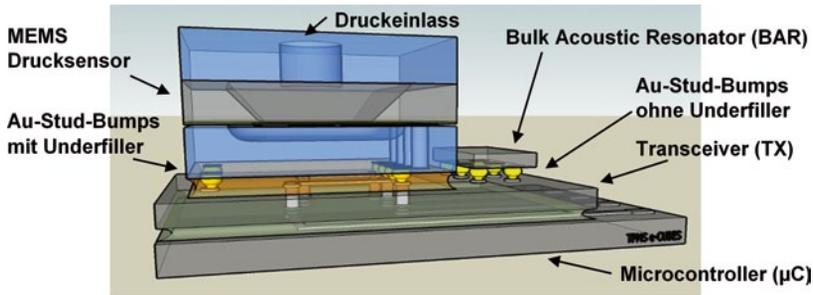
chungssystem der Ordnung 40 zur Verfügung. Aus diesem wurde ein Verhaltensmodell in der Sprache VHDL-AMS erzeugt. Zur Überprüfung der Modellgenauigkeit wurden vergleichende Simulationen mit ANSYS und AdvanceMS durchgeführt.

Dazu wurde zum Zeitpunkt  $t = 0$  ein Verlustleistungssprung von 0 auf 100 mW im Leistungsbaulement in der oberen Schicht eingepreßt und der zeitliche Verlauf der Temperatur an den Punkten P1, P2 und P3 berechnet. Wie in Abb. 5.13 rechts dargestellt, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen FE-Modell (ANSYS), welches im Minutenbereich rechnet, und dem im Sekundenbereich laufenden reduzierten Verhaltensmodell für die Systemsimulation. Das so generierte Verhaltensmodell kann nun in gekoppelten elektrothermischen Simulationen verwendet werden.

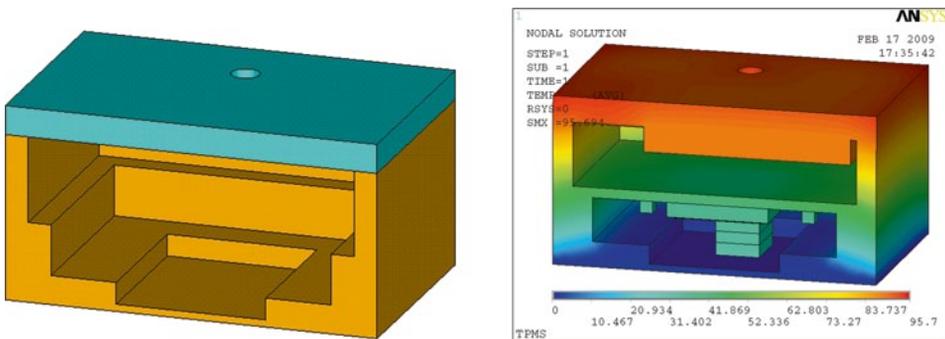
**Komplexer Stack eines Reifendrucksensorsystems** Abbildung 5.14 zeigt ein innovatives 3D-integriertes Sensorsystem, welches eine komplexe 3D-Struktur enthält. Durch die Integration von Drucksensor, ASIC, Mikrocontroller und Bulk Acoustic Resonator (BAR) wird ein Reifendrucksensorsystem (Tire pressure monitoring system, TPMS) gebildet, welches in der Automobilbranche eingesetzt wird [FDH08].

Ziel der Modellierung und Simulation war es, Hotspots und Temperaturverteilungen im gesamten 3D-System als Funktion der Randbedingungen (z. B. Temperatur von Felge und Luft im Reifen) und der regelmäßigen Aktivitäten der Elektronik für mehrere Betriebsarten zu ermitteln.

Durch Verwendung des modularen Modellierungsansatzes konnte das thermische FE-Modell des gesamten und komplexen TPMS sehr bequem in ANSYS erstellt werden. Sämtliche der mehr als 100 Basismodule, welche zum Aufbau des Geometriemodells dieser Struktur erforderlich sind, sind voll parametrierbar und ermöglichen so eine einfache Geometrie- und Materialvariation. Dies sind Module für Verbindungsstrukturen wie Au-Stud-Bumps



**Abb. 5.14** Reifendrucksensor (Tire pressure monitoring system, TPMS), welcher verschiedene Technologien zur 3D-Integration kombiniert. (Quelle: Sintef, Norwegen)



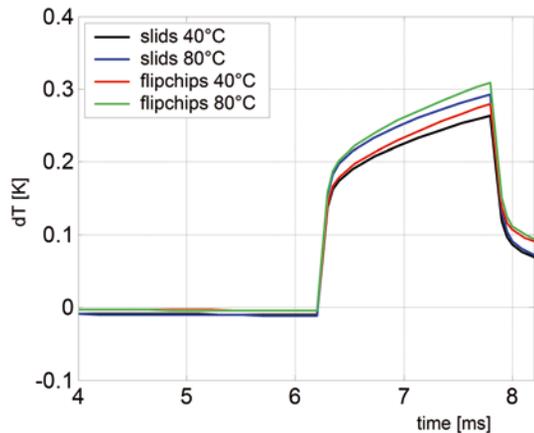
**Abb. 5.15** Links: Geometriemodell des Gehäuses (Schnittdarstellung), rechts: Temperaturverteilung für den statischen Fall bei Felgentemperatur von 0 °C und Reifenlufttemperatur von 125 °C

und Mikro-Flipchips (Abb. 5.7), für MEMS-Drucksensoren usw. Zusätzlich zu diesen Modulen wurden weitere Grundmodule entwickelt, um die Umgebung des TPMS beschreiben zu können: Kondensatoren, ASIC für Energy Harvesting, Gehäuse (Abb. 5.15 links) u. a.

Ein Ergebnis der thermischen Simulation, welches die Designer interessiert, ist die Temperaturverteilung im gesamten System bei der extremen Kombination von Randbedingungen: Felgentemperatur von 0 °C, Luft im Reifen mit 125 °C. Dies bedeutet, dass ein vorher heißer Reifen über Eis rollt. Für derartige stationäre Untersuchungen werden Mittelwerte der sich dynamisch ändernden elektrischen Verlustleistungen des Gesamtsystems verwendet. Die rechte Seite von Abb. 5.15 zeigt die statischen Endtemperaturen in der Schnittdarstellung des 3D-Systems. Unter dem Deckel des Gehäuses sind der Energy Harvester und unterhalb des PCB in der Mitte des Gehäuses das Sensorsystem und die Kondensatoren dargestellt.

Da die Frequenz des BAR stark temperaturabhängig ist, sich auf ihm jedoch keine Temperatursensoren befinden, muss die Temperatur an anderen Stellen des Systems gemessen und anschließend auf die BAR-Temperatur geschlossen werden. Abbildung 5.16 zeigt beispielhaft die Temperaturdifferenz zwischen BAR und einem Messpunkt auf dem TX-ASIC über einen Messzyklus bei verschiedenen Verbindungstechnologien und Umgebungstemperaturen. Zum Zeitpunkt von etwa 4,5 ms wird die Temperatur auf dem TX gemessen

**Abb. 5.16** Temperaturdifferenzen zwischen BAR und dem Messpunkt auf dem TX-ASIC während eines Messzyklusses für die SLID- und die Mikro-Flipchip-Technologien bei Umgebungstemperaturen von 40 und 80 °C



und zwischen 6,2 und 7,8 ms muss der BAR mit der richtigen Frequenz arbeiten. Durch diese entwurfsbegleitende 3D-Simulation konnte eine durchschnittliche Temperaturdifferenz zum Messpunkt von ca. 0,27 K ermittelt werden. Die Designer sind mit diesem Wissen in der Lage, den BAR vor Start der Signalübertragung genau abzustimmen.

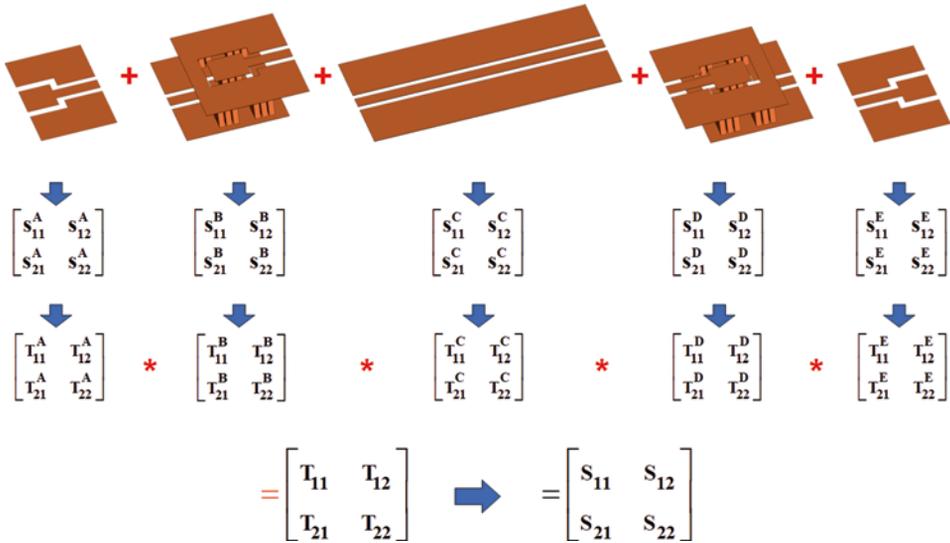
Neben den hier ausschnittsweise vorgestellten Simulationsergebnissen kann das aus Grundmodulen erzeugte komplexe FE-Modell auch verwendet werden, um ein thermisches Verhaltensmodell des 3D-Systems für gekoppelte thermo-elektrische Simulationen auf Systemebene zu generieren. Diese Ableitung kann z. B. mit den weiter vorn vorgestellten Methoden der Modellordnungsreduktion und Modellgenerierung erfolgen. Thermo-elektrische Interaktionen dieses Systems waren bisher jedoch nicht Gegenstand der Untersuchung.

## 5.6 3D-Simulation im HF-Bereich

Die Analyse des elektromagnetischen Verhaltens im Hochfrequenzbereich wird am Beispiel einer Verbindungsstruktur mit Through-Silicon Vias (TSVs) erläutert. Betrachtet werden dabei parasitäre Effekte wie Skin- und Proximity-Effekt und deren Einfluss auf die elektrische Funktionalität des gesamten gestapelten 3D-Systems. Es werden im Folgenden zwei Ansätze zur Berechnung des elektrischen Verhaltens des Gesamtsystems von Verbindungsstrukturen vorgestellt.

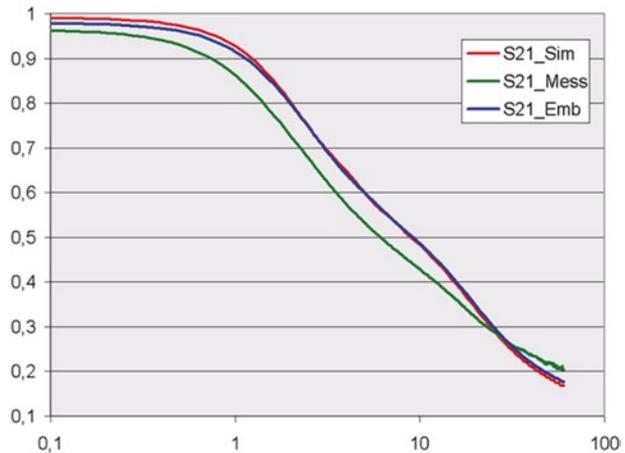
Bei der ersten Möglichkeit werden die Maxwell'schen Gleichungen der kompletten Struktur in einem PDE-Löser, z. B. dem Full-Wave Simulationstool Microwave Studio (MWS) von CST, berechnet. Diese Variante benötigt sowohl sehr hohe Systemressourcen als auch eine lange Simulationsdauer und wird deswegen nicht näher betrachtet.

Beim Ansatz der modularen Modellierung wird eine andere Herangehensweise verfolgt. Unter der Annahme, dass die verschiedenen Lagen eines Stapels durch unterschiedliche Verbindungstechnologien verbunden werden und die Vias eines Typs zwischen zwei Lagen innerhalb eines Stacks weitgehend gleiche Gestalt haben, kann ein modularer Ansatz für die Modellierung der geometrischen Struktur verwendet werden [SRS07].



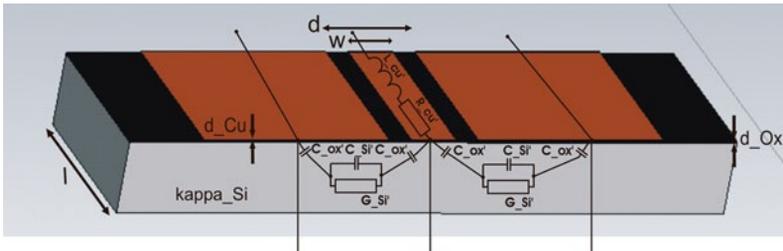
**Abb. 5.17** *Oben:* Verbindungsstruktur bestehend aus Through-Silicon Vias und Signalleitungen, *unten:* Embedding-Technik für diese Verbindungsstruktur

**Abb. 5.18** Vergleich von Mess-, Simulations- und Embeddingergebnissen für die Gesamtstruktur (Übertragungsfaktor als Funktion der Frequenz (in GHz))



Die einzelnen Strukturen (Abb. 5.17 oben) werden aus der gesamten Verbindungsstruktur extrahiert und anschließend separat in MWS simuliert. Dies reduziert die benötigten Systemressourcen und die Simulationszeit auf einen Bruchteil. Wie bereits weiter vorn beschrieben, entstehen so Basismodule der einzelnen Strukturen, die in einer Modellbibliothek abgespeichert werden und über Embedding-Techniken (Abb. 5.17 unten) zu einer bedeutend komplexeren Struktur zusammengefügt werden können.

Für das in dieser Arbeit verwendete Beispiel einer Verbindungsstruktur mit Through-Silicon Vias ist in Abb. 5.18 der Vergleich des berechneten Übertragungsverhaltens zwi-



**Abb. 5.19** „Physikalische“ Ersatzschaltung eines koplanaren Wellenleiters

schen der komplett simulierten, der per „Embedding“ zusammengefügt, und der gemessenen Struktur dargestellt.

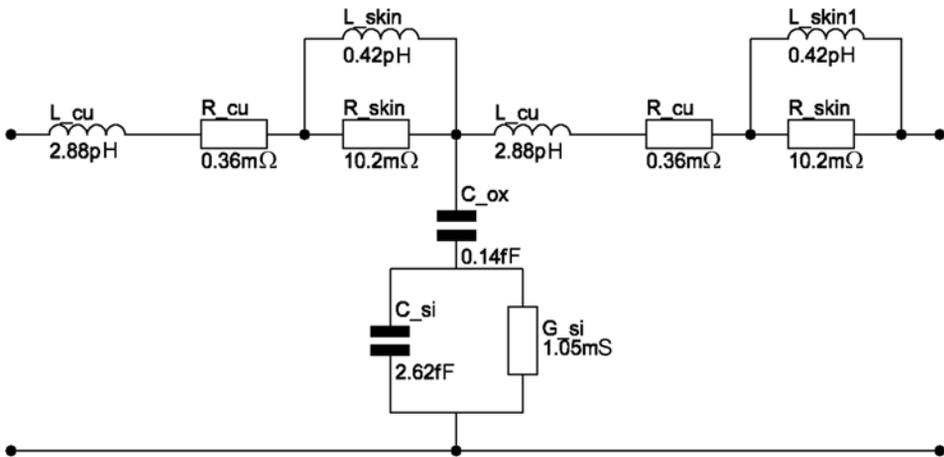
Um die Ergebnisse der Full-Wave-Simulation in Schaltungssimulatoren nutzen zu können, werden Ersatzschaltungen aus passiven Elementen (RLCG) aufgebaut, die das elektrische Verhalten – gegeben durch die S-Parameterverläufe der Originalstrukturen – nachbilden. Zu diesem Zweck werden in einem ersten Schritt geeignete Schaltungen ausgewählt. Abbildung 5.19 zeigt die Ersatzschaltung für ein Teilstück einer Koplanarleitung sowie die Lage der passiven Bauelemente innerhalb der Struktur.

Passive RLCG-Ersatzschaltungen haben gegenüber generisch erzeugten Ersatzschaltungen mit gesteuerten Quellen den Vorteil, besser mit dem physikalischen Verhalten und Aufbau der Struktur zu korrelieren. Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten der Struktur können hierbei direkt von den Bauelementwerten der Ersatzschaltung abgelesen werden. Über den in Abschn. 5.4 beschriebenen Weg der Optimierung mit dem Tool MOSCITO Simon wird im nächsten Schritt das elektrische Verhalten (S-Parameter) der Ersatzschaltung an das tatsächliche Verhalten (S-Parameter der Full-Wave-Simulation) der Struktur durch Variation der Bauelementwerte angepasst. Ergebnis der Optimierung sind parametrische RLCG Ersatzschaltungen mit vorzugsweise gleichem elektrischem Verhalten in Bezug auf die gegebene Verbindungsstruktur (z. B. 15  $\mu\text{m}$  Koplanarleitung, s. Abb. 5.20). Diese Modelle können nun in den Designflow aufgenommen und in Kombination mit dem elektrischen Modell des Gesamtsystems zur genaueren Charakterisierung des elektrischen Verhaltens unter Berücksichtigung parasitärer Effekte verwendet werden.

## 5.7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kap. 5 wurde eine Methodik für die multiphysikalische Modellierung und Simulation sowohl für Einzelstrukturen als auch für komplette 3D-Systeme vorgestellt. Das Hauptziel ist die Unterstützung beim Entwurf von 3D-Systemen.

Der modulare Modellierungsansatz ermöglicht es, effizient und ebenenübergreifend – sowohl hinsichtlich der Modellabstraktionsebenen als auch der physikalischen Domänen – Effekte in 3D-Strukturen zu modellieren. Durch die Parametrisierbarkeit und Aus-



**Abb. 5.20** RLCG-Ersatzschaltung eines  $15\ \mu\text{m}$  langen koplanaren Wellenleiters

tauschbarkeit der Module können vorhandene Modelle mit geringem Aufwand an neue Geometrien, Technologien und Materialien angepasst werden.

Im Bereich der thermischen Analyse mit 3D-Simulationen ist es so z. B. möglich, Hotspots im System, Temperaturgradienten oder die Temperaturen an empfindlichen Bauelementen zu ermitteln. Vom Gesamtmodell sind thermische Ersatznetzwerke (Spice, VHDL-AMS, Verilog-AMS, ...) ableitbar, um bei der Simulation des elektrischen Verhaltens des Gesamtsystems die thermisch-elektrischen Wechselwirkungen zu erfassen (siehe auch Kap. 6 und 11).

Ebenso wird das Hochfrequenzverhalten der Verbindungsstrukturen in die Betrachtungen einbezogen, um die Gesamtfunktionalität des Systems gewährleisten zu können. Full-Wave-Simulatoren bieten die Möglichkeit, bereits in der Entwicklungsphase das elektrische Verhalten von Teilstrukturen des Systems durch Lösung der Maxwell'schen Gleichungen zu betrachten. Die Extraktion einzelner kritischer Verbindungsstrukturen aus dem Gesamtsystem ermöglicht die Ableitung passiver Ersatzschaltungen (RLCG), um parasitäre Effekte und deren Einfluss auf Übersprechen und Signallaufzeiten in der Schaltung im Rahmen einer Systemsimulation berücksichtigen zu können.

## Literatur

- [A04] Agilent Technologies: De-embedding and Embedding S-parameter Networks Using a Vector Network Analyzer. Agilent Application Note 1364-1, May 2004
- [A10] ANSYS Theory Reference and advanced analysis techniques. 13. Aufl. SAS IP (2010)
- [AV73] Anderson, B.D. Vongpanitlerd, su-meth: Network analysis and synthesis: A modern systems theory approach. Prentice Hall Inc., 1973 (Networks Series)
- [B97] Braess, D.: Finite elemente. Springer-Verlag, Berlin (1997)

- [BH03] Bastian, J., Haase, J.: Order reduction for second order systems. MATH-MOD Vienna. **4**, 418–424 (2003)
- [BHS04] Becker, J., Falter, B., Haase, J., Schneider, A., Scholz, S., Schwarz, P.: Werkzeuge für den Entwurf von Modulen für die optische Hochgeschwindigkeitsübertragung, Tagungsband, 10. GMM Workshop Methoden und Werkzeuge für den Entwurf von Mikrosystemen, 20.10.–22.10.2004, Cottbus, S. 125–132
- [CST05] CST Microwave Studio: advanced topics, version 2006. Software documentation, CST-Computer Simulation Technology, September 2005
- [ESR06] Elst, G., Schneider, P., Ramm, P.: Modeling and simulation of parasitic effects in stacked silicon. Proc. 2006 MRS Fall Meeting, November 27–December 1, 2006, Boston, S. 61–65
- [F00] Freund, R.W.: Krylov-subspace methods for reduced-order modeling in circuit simulation. J. Comput. Appl. Math. **123**, 395–421 (2000)
- [FDH08] Flatscher, M., Dielacher, M., Herndl, T., Lentsch, T., Matischek, R., Prainsack, J., Theuss, H., Weber, W.: A bulk acoustic wave(BAW)-based sensor node for automotive wireless sensor networks, e&I Elektrotechnik und Informationstechnik, 125(4), April 2008, Springer. S. 143–146
- [K06] Köhler, A.: Modellreduktion von linearen Deskriptorsystemen erster und zweiter Ordnung mit Hilfe von Block-Krylov-Unterraumverfahren. TU Bergakademie Freiberg, Diplomarbeit, (2006)
- [K95] Kundert, K.S.: The designer's guide to spice and spectre. Kluwer Academic Publishers, Boston (1995)
- [RS76] Reinschke, K., Schwarz, P.: Verfahren zur rechnergestützten Analyse linearer Netzwerke. Akademie-Verlag, Berlin (1976)
- [S99] Sheehan, B.N.: ENOR: Model order reduction of rlc circuits using nodal equations for efficient factorization. In: Proceedings of the 36th ACM/IEEE conference on Design automation, S. 17–21. (1999)
- [SI03] Schneider, A., Ivask, E.: Internet-based Collaborative System Design Using MOSCITO. Proc. Workshop on Challenges in Collaborative Engineering, Poznan (Poland), April 15–16, S. 221–226 (2003)
- [SSB02] Schneider, A., Schneider, P., Bastian, J.: MOSCITO – Ein modulares, Internetbasiertes Programmsystem für die Optimierung von Mikrosystemen. Proc. Abschlussseminar des Vorhabens OMID, Karlsruhe, 25.-26. November 2002, S. 140–151
- [SKB06] Shakouri, A., Kang, S.-M., Bar-Cohen, A., Courtois, B. (Hrsg.): Proc. of IEEE, Special Issue On-Chip Thermal Engineering. **94**(8), August 2006
- [SMR67] Shearer, J.L., Murphy, A.T., Richardson, H.H.: Introduction to system dynamics. Addison-Wesley Publishing Company, Reading (1967)
- [SRS07] Schneider, P., Reitz, S., Stolle, J., Wilde, A.: Ein modularer Modellierungsansatz für die Analyse thermischer und elektromagnetischer Effekte bei der 3D-Systemintegration. 8. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik, Chemnitz, Germany, 14–15 November 2007, S. 79–86
- [SRW07] Schneider, P., Reitz, S., Wilde, A., Elst, G., Schwarz, P.: Towards a methodology for analysis of interconnect structures for 3D-integration of micro systems. Proc. DTIP2007, 25.–27. April 2007, Stresa, S. 162–168
- [TGK85] Törning, W., Gipsner, M., Kaspar, B.: Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen der Technik. Teubner, Stuttgart (1985)
- [TUD] Technische Universität Darmstadt. Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder: Die Finite-Integrations-Theorie und das Programmpaket MAFIA. [http://www.temf.tu-darmstadt.de/forschung\\_5/fitmafia/fit.de.jsp](http://www.temf.tu-darmstadt.de/forschung_5/fitmafia/fit.de.jsp)



<http://www.springer.com/978-3-642-30571-9>

Entwurf integrierter 3D-Systeme der Elektronik

Lienig, J.; Dietrich, M. (Hrsg.)

2012, VIII, 215 S. 110 Abb., 10 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-642-30571-9