

Modellierung und Simulation auf Systemebene

Modellbasiertes Design von Leistungswandlern

Beim Design eines Leistungswandlers können Simulationsmodelle helfen, mehrere Entwurfskriterien gegeneinander abzuwägen. Für eine schnelle Simulation werden einfache schaltbasierte Modelle aktiver Komponenten verwendet, die tiefere technische Einblicke ermöglichen. Einfache Komponentenmodelle bieten jedoch nicht das gleiche Maß an Verlässlichkeit im Design wie ein detailliertes Komponentenmodell des Herstellers.

Radovan Vuletic, Rick Hyde

Wie kann der Entwickler von Leistungswandlern die Modelle auf Systemebene und die detaillierten Modelle der Bauteile zusammen verwenden, um den Entwurfsraums zu erkunden und gleichzeitig ein hohes Maß an Vertrauen in die Ergebnisse zu erreichen? Ein Anwendungsbeispiel, durchgeführt mit den Lösungen von MathWorks für die Modellierung und Simulation auf Systemebene, Simulink und Simscape, in Verbindung mit detaillierten SPICE-Komponentenmodellen von Infineon Automotive MOSFETs soll diese Frage beantworten.

Bei der Entwicklung elektrischer Leistungswandler werden für die Konzept- und Machbarkeitsstudie in der Regel numerische Simulationen eingesetzt. Die Simulationsmodelle müssen sowohl die analoge Schaltung als auch die entsprechenden digitalen Regler umfassen. Beispiele für Fragen, die während der Entwurfsphase mithilfe von Modellen beantwortet werden können, sind:

- Welche Topologie sollte verwendet werden?
- Welche Leistungsfähigkeit kann bei einer bestimmten Topologie erreicht werden?
- Welche Schaltfrequenz sollte für die Pulsweitenmodulation (PWM) verwendet werden?
- Welche Werte und Güte sind für die passiven Komponenten erforderlich?

- Welche Art von Leistungsschalter sollte verwendet werden?
- Typ (z. B. MOSFETs, IGBTs oder BJTs)?
- Technologie und Spannungswerte (z. B. Infineon OptiMOS oder CoolMOS) und Materialien (z. B. Si, SiC oder GaN)?
- Welche Anforderungen werden an die Gate-Treiberschaltungen gestellt,

einschließlich der erforderlichen Mindestzeit?

Basierend auf den vorherigen Bewertungen können die Systemeffizienz und die Bauteilverluste abgeschätzt und anschließend ein geeignetes Kühlsystem entwickelt werden. Schließlich wird der Kompromiss zwischen Systemeffizienz und elektromagnetischer Verträglichkeit

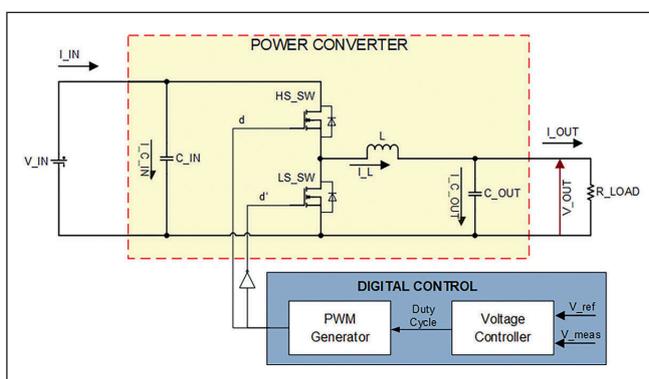


Bild 1: Aufbau eines Abwärts-DC/DC-Wandlers. © Infineon

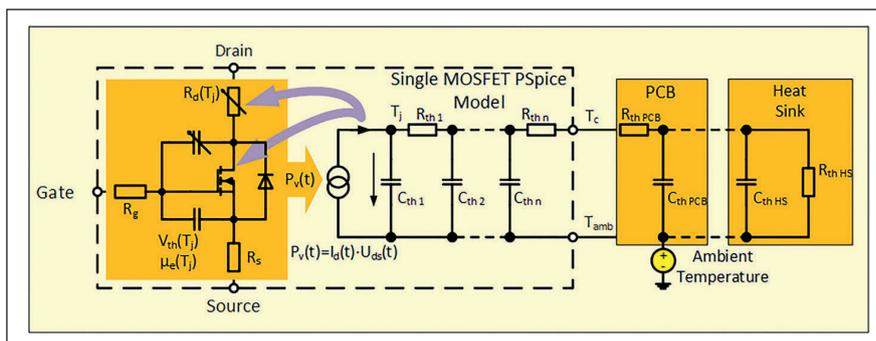


Bild 2: Prinzipschaltbild des SPICE-Modells von Infineon für MOSFETs. © Infineon

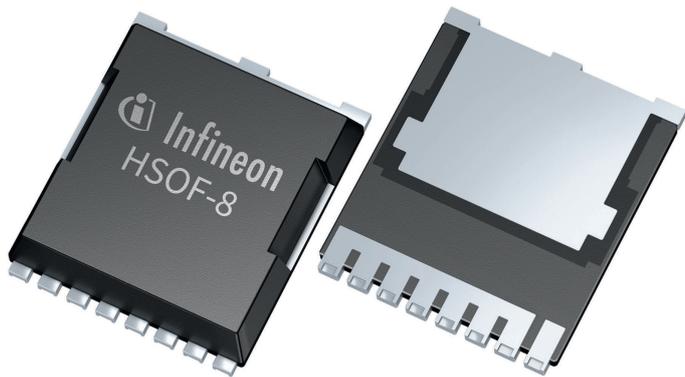


Bild 3: Infineons Automotive-MOSFET IAUT300N0855 N012 im TOLL-Gehäuse (PG-HSOF-8).
© Infineon

(EMV) untersucht. Die Schaltverluste und EMV sind von der Schaltfrequenz und den Schaltflanken der Leistungsschalter abhängig.

SPICE-Simulationswerkzeuge („Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis“) sind die erste Wahl für Schaltungsentwickler. Die beschriebenen Entwicklungsschritte hängen jedoch von der Möglichkeit ab, den Leistungswandler in angemessener Zeit zu simulieren. Werkzeuge zur Schaltungssimulation wie Simscape Electrical verfügen über einfache Bauteilmodelle, bei denen es sich im Wesentlichen um ideale Schalter mit tabellierten Schaltverlusten handelt. Durch diesen vereinfachten Ansatz können angemessene Simulationszeiten erreicht werden. Durch die enge Integration mit Simulink wird die digitale Regelung ebenfalls in die Simulation einbezogen, ohne dass eine Co-Simulation erforderlich ist. Die Annahme eines idealen Schalters führt jedoch zu einer gewissen Ungenauigkeit bei den späteren Entwurfsschritten, die sich auf die Bestimmung der Effizienz und die Feinabstimmung des Designs konzentrieren. Diese Ungewissheit kann durch die Verwendung detaillierter SPICE-Komponentenmodelle behoben werden, die vom Bauteilhersteller entwickelt wurden. Im Folgenden wird ein Prozess definiert, der eine schnelle Erkundung des Entwurfsraums ermöglicht und gleichzeitig die detaillierten SPICE-Komponentenmodelle der Fertigung nutzt. Im Mittelpunkt des Prozesses steht die Verwendung mehrerer Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad, wobei das Modell auf die vorher erwähnten Fragestellungen während der entsprechenden Entwurfsphase abgestimmt wird. Wichtig ist dabei auch die Verwendung von Modellen geringerer Genauigkeit zur Vorinitialisierung detaillierter Simulationsmodelle, wodurch die Initialisierungszeit reduziert wird.

Beispiel für das Design eines Abwärtswandlers

Als Beispiel wird in diesem Beitrag ein 48V/12V DC/DC-Abwärtswandler (Buck-Wandler) verwendet, wie in **Bild 1** dargestellt. Ein Abwärtswandler reduziert die Eingangsspannung (VIN) auf eine niedrigere Ausgangsspannung (VOUT). Sein Verhalten wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$d = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \Rightarrow V_{OUT} = d * V_{IN}$$

Gleichung 1: Tastverhältnis eine DC/DC-Abwärtswandlers (High-Side-Leistungsschalter)

wobei d das Tastverhältnis (0 ≤ d ≤ 1) des „High-Side“ Leistungsschalters (HSSW) darstellt. Das Tastverhältnis des „Low-Side“ Leistungsschalters (LSSW) ist durch d' gegeben, definiert durch:

$$d' = 1 - d$$

Gleichung 2: Tastverhältnis des Low-Side-Leistungsschalters

Auf der Basis der Referenzspannung (Vref) und der gemessenen Ausgangsspannung (Vmeas) berechnet der zeitdiskrete Proportional- und Integralspannungsregler (PI-Regler) das erforderliche Tastverhältnis (d).

Infineon SPICE MOSFET-Modell

SPICE-Simulatoren sind die am weitesten verbreitete Technologie für die Simulation analoger Schaltungen. Als de-facto Industriestandard entwickeln daher viele Halbleiterhersteller SPICE-Modelle ihrer Produkte zur Unterstützung des Schaltungsdesigns.

Infineons Portfolio an automotive-zertifizierten OptiMOS-Leistungs-MOSFETs bietet Benchmark-Qualität in einem Bereich von 20V-300V, verschiedene Gehäuse und einen Rds(on) von bis zu 0,55 mΩ. Die Struktur eines typischen Infineon SPICE-Modells eines MOSFET ist in **Bild 2** dargestellt. Dieses MOSFET-Verhaltensmodell [1] beschreibt sowohl die elektrischen als auch die thermischen Eigenschaften des Leistungsschalters.

Das Modell spiegelt die Temperaturerhöhung aufgrund des Stromflusses im Halbleiter wider. Die Temperaturänderung bewirkt eine Änderung der elektrischen Parameter des MOSFETs (Ladungsträgerbeweglichkeit, Spannungsschwelle, Drain-Widerstand, Gate-Drain-Kapazität und Gate-Source-Kapazität). In **Bild 2** wird das thermische Verhalten folgendermaßen modelliert: Eine Stromquelle (Pv), welche die MOSFET-Verlustleistung repräsentiert, injiziert die Wärme in den PN-Übergang (Tj) und diese Wärme wird dann über das MOSFET-Gehäuse zum Außengehäuse (Tc) weitergeleitet. Die Thermodynamik wird als Cauer-Netzwerk modelliert, das aus zusammengefassten thermischen Widerständen (Rthi) und thermischen Kapazitäten (Cthi) besteht. Durch analoge Simulation des thermischen Modells kann die optimale Kühlung bzw. der optimale Kühlkörper (Rth HS und Cth HS) für gegebene Designparameter wie Laststrom, maximal zulässige Sperrschichttemperatur (Tj), Umgebungstemperatur (Tamb) und Dicke/Anzahl der Leiterplattenlagen (Rth PCB und Cth PCB) bestimmt werden.

Importieren von SPICE Komponentenmodellen in Simscape

Simscape [5] von MathWorks bietet eine Blockdiagramm-Umgebung zur Modellierung und Simulation von Multi-Domänen-Systemen, einschließlich elektrischer, mechanischer, magnetischer und thermischer Aspekte. Die zugehörige Simscape-Sprache drückt die zugrunde liegende Physik mithilfe von Differenzialgleichungen, zugehörigen algebraischen Randbedingungen, Ereignissen und Tabellen aus, welche die unterschiedlichen Betriebsarten des Modells erfassen.

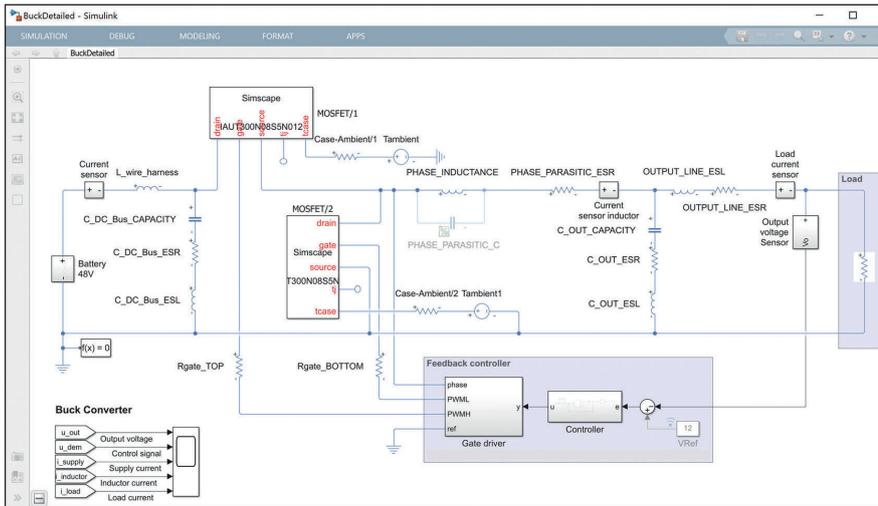


Bild 4: Detailliertes Modell des Abwärtswandlers. © Infineon

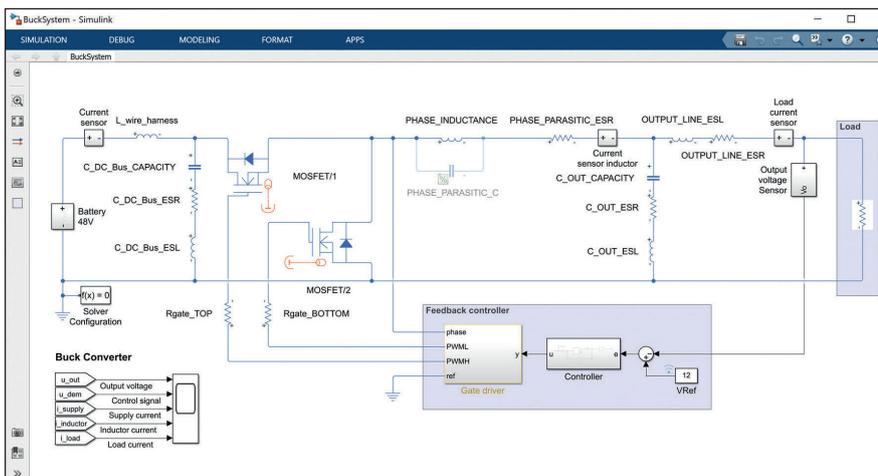


Bild 5: Modell des Abwärtswandlers auf Systemebene. © Infineon

Simscape Electrical [6] kann einen gezielten Satz von SPICE-Komponentenmodellen, z. B. MOSFETs, in eine entsprechende Simscape-Implementierung [7] importieren. Die enge Integration von Simscape mit Simulink ermöglicht dann die Simulation sowohl der digitalen Regelung als auch der analogen Leistungselektronikkomponenten mittels eines einzigen Solvers. Dies führt zu einer effizienteren Simulation als die Kopplung verschiedener Simulationstools (Co-Simulation).

Die Funktion des SPICE-Modellimports wird verwendet, um das Infineon Bauteil IAUT300N08S5N012 [2] [4] (Bild 3) in Simscape zu importieren. Nach dem Import in Simscape wurden kleinere Änderungen am Simscape-Code vorgenommen, um den Zugriff auf die inneren Zustände des Cauer-Modells an der Schnittstelle des erzeugten Blocks zu ermöglichen. Für den Initialisierungsprozess ist ein benutzerdefinierter Zugriff auf die internen Zustände erforderlich.

Ablauf der Simulation

Nachdem das Infineon-Bauteil in Simscape importiert wurde, ist der nächste Schritt die Erstellung eines Simulink-Modells des kompletten Wandlers, einschließlich der importierten Infineon-Bauteile, der übrigen analogen Komponenten und der Regelung, wie in Bild 4 dargestellt.

Die Regelung wird mithilfe von zeitdiskreten Simulink Bibliotheksblöcken implementiert. Das gesamte Modell wird mittels eines Solvers mit variabler Schrittweite simuliert. Dadurch werden die schnelleren Zeitkonstanten parasitärer Effekte und des MOSFET-Ladungsmodells genau erfasst. Die Simulationszeit für einen PWM-Zyklus des Reglers (50 μ s) beträgt 2,3 Sekunden auf einem Intel Core i7-9700 CPU mit 3,00 GHz und MATLAB Version R2021b. Das ist schnell genug, um die Leistung des Schaltkreises im aktuellen Betriebszustand zu analysieren, aber nicht, um die Empfindlichkeit des Schaltkreises ge-



Entwicklung und Produktion von Anlagen zur Verarbeitung von **kleinsten Komponenten und Flüssigkeitsmengen**

Prozessautomation in der Mikroelektronik, Powermodul- oder Sensorfertigung

Höchst präzise Automationslösungen:

Dosieren, Diebonden, Bestücken, Sortieren, Testen, Verpacken

>1000 Maschinenkomponenten für kundenspezifische Automationslösungen

Bildverarbeitung, Rückverfolgbarkeit, MES-Anbindung und Prozesskontrolle

Genauigkeit und Geschwindigkeit

Desktopanlagen / Produktionszellen / vollautomatische Produktionslinien



genüber Änderungen der Designparameter zu bewerten oder die Schaltkreisparameter direkt zu optimieren. Außerdem ist es nicht schnell genug, um einen periodischen stationären Zustand zu simulieren, der bei einer thermischen Zeitkonstante von etwa 10 Sekunden nach 200.000 PWM-Zyklen bei 20 kHz erreicht wird.

Um den Entwurfsraum effizient zu erkunden, wurde ein zusätzliches Modell des Abwärtswandlers auf Systemebene erstellt. Dazu werden die importierten MOSFET-Bauteilmodelle durch ideale Schalter mit festem Einschaltwiderstand ersetzt, der auf den im Datenblatt angegebenen Wert $R_{ds(on)}$ parametrisiert ist (Bild 5). Einige der schnellen parasitären Effekte werden ebenfalls vernachlässigt, wie die MOSFET-Leitungsinduktivitäten. Dieses Modell auf Systemebene ist auf eine konstante

Temperatur festgelegt, wobei der Anwender einen geeigneten $R_{ds(on)}$ -Wert in Abhängigkeit zur angenommenen Sperrschichttemperatur einstellt. Das Modell benötigt etwa 0,05 Sekunden für die Simulation eines PWM-Zyklus und ist damit 46-mal schneller als das detaillierte Modell. Da es keine thermischen Zeitkonstanten gibt, repräsentiert nun die Spannungsregelung die langsamste Dynamik des Leistungswandlers. Diese liegt in der Größenordnung von 5 ms oder 100 PWM-Zyklen. Daher dauert die Simulation bis zum eingeschwungenen Zustand nun etwa 5 s.

Mit dieser Simulationsleistung kann das Modell auf Systemebene verwendet werden, um den Entwurfsraum gründlich zu untersuchen und die Regelung zu optimieren. Nachdem die wichtigsten Entwurfsentscheidungen getroffen wurden, besteht der letzte

Schritt in der Validierung des Designs anhand des detaillierten Simulationsmodells, das die SPICE MOSFET-Modelle von Infineon verwendet. Diese Validierung wird in der Regel für eine Reihe von Betriebspunkten durchgeführt, die durch Lastleistung und Umgebungstemperatur definiert sind. Wie schon vorher erwähnt, benötigt die Simulation des detaillierten Modells bis zum eingeschwungenen Zustand 200.000 PWM-Zyklen. Dies ist jedoch nicht praktikabel, wenn jeder Zyklus 2,3 Sekunden für die Simulation benötigt.

Zur Initialisierung des detaillierten Modells für einen bestimmten Betriebspunkt wird ein iterativer Ansatz unter Nutzung mehrerer Modelle vorgeschlagen. Zusammengefasst besteht die Idee darin, langsamere Zeitkonstanten in separate Modelle aufzuteilen, die schneller laufen. Bevor wir das genauer erläutern, ist ein weiteres Modell erforderlich, das nur den thermischen Zustand des MOSFET und der Umgebung modelliert. Das ist in Bild 6 dargestellt.

Um das rein thermische Modell zu erstellen, werden die importierten Infineon SPICE-Komponentenmodelle der beiden MOSFETs auf die jeweiligen Cauer-Netzwerke reduziert. Die Eingangsgrößen für die beiden Cauer-Netzwerke sind zwei konstante Wärmestromquellen Q1 und Q2, die den durchschnittlichen Sperrschicht-Wärmestrom pro PWM-Zyklus darstellen. Dieses reine Wärmemodell kann entweder bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands simuliert werden. Alternativ kann die Simscape Option „Start from steady state“ verwendet werden. In jedem Fall ist die Zeit für die Bestimmung der Temperaturwerte an den Knoten des Cauer-Netzwerks im Vergleich zu allem anderen vernachlässigbar.

Die drei Modelle werden nun verwendet, um das detaillierte Modell im periodischen stationären Zustand wie folgt zu initialisieren:

- 1 Das Modell auf Systemebene (Bild 5) wird bis zum periodischen stationären Zustand ausgeführt. Die MOSFET-Verluste werden über die letzte volle PWM-Periode gemittelt, um Schätzungen für die Sperrschichtverluste Q1 und Q2 zu erhalten.
- 2 Das rein thermische Modell (Bild 6) wird bis zum thermischen stationären Zustand ausgeführt und die

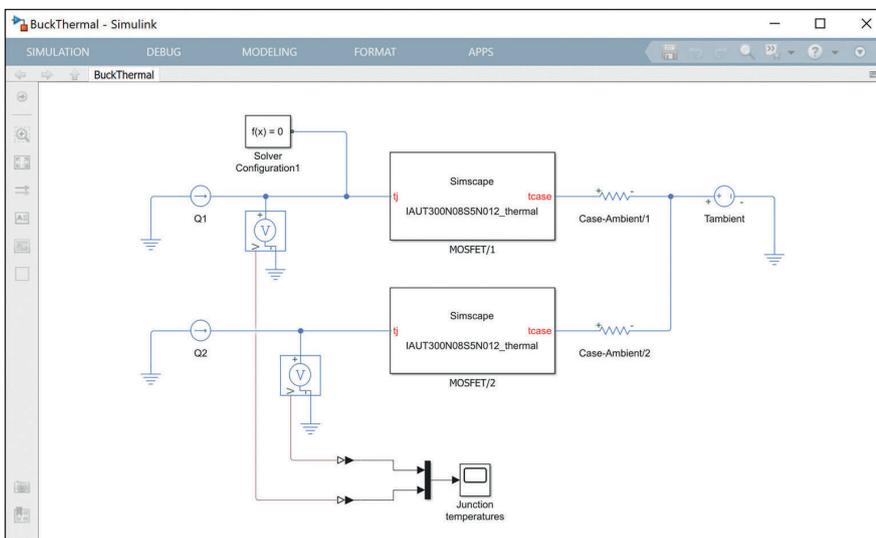


Bild 6: Rein thermisches Modell der beiden MOSFETs. © Infineon

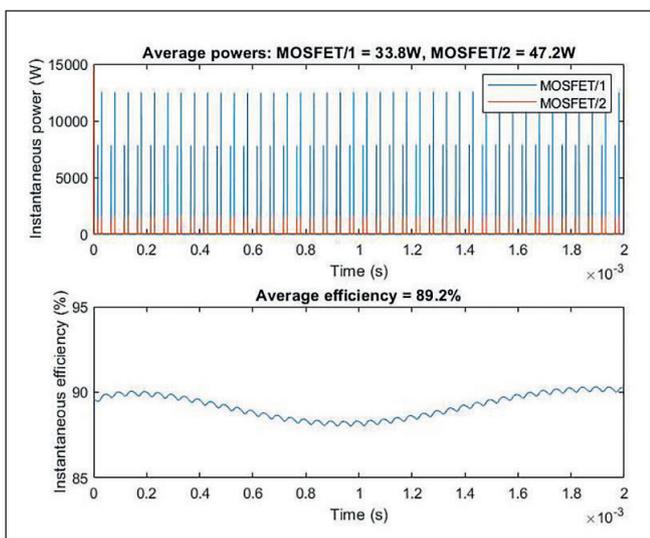


Bild 7: Verluste in Leistungsschaltern und Effizienz des Gesamtsystems. © Infineon

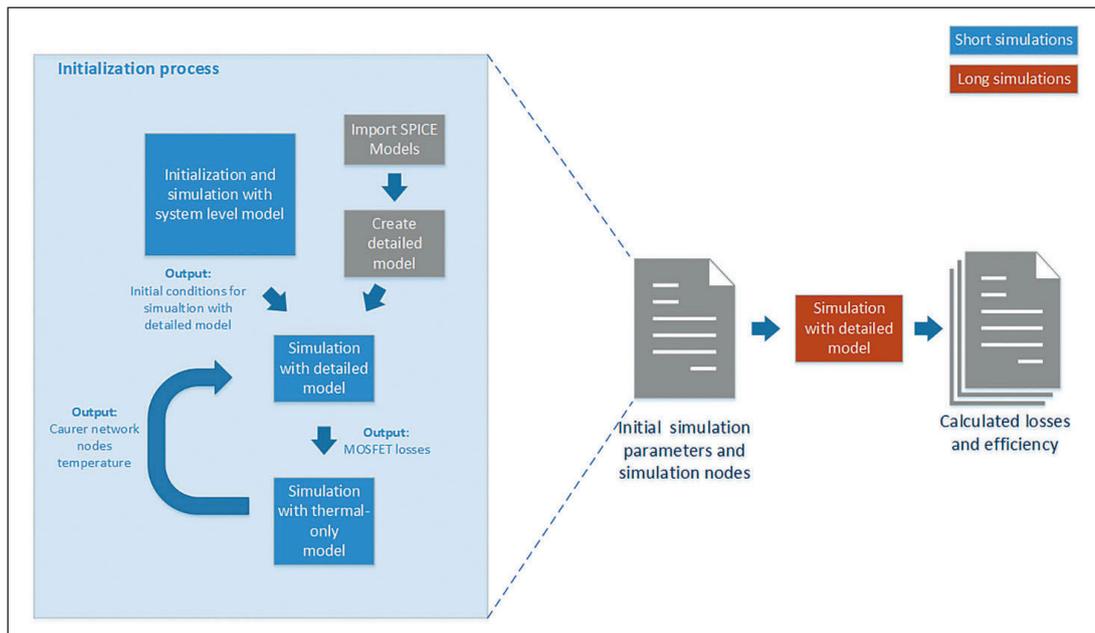


Bild 8: Vorgeschlagener Simulationsablauf für Schaltleistungswandler. © Infineon

- Endtemperaturen für die Knoten der beiden Cauer-Modelle protokolliert.
- 3 Die thermischen Zustände des detaillierten Modells (**Bild 4**) werden auf die Werte aus dem obigen Schritt 2 gesetzt, die übrigen Modellzustände auf die in Schritt 1 ermittelten Werte.
 - 4 Das detaillierte Modell wird für vier vollständige PWM-Zyklen ausgeführt. Die MOSFET-Verluste über die letzte vollständige PWM-Periode werden gemittelt, um überarbeitete Schätzungen für die Sperrschichtverluste, Q1 und Q2, zu erhalten.
 - 5 Schritt 2 wird wiederholt, um die Temperaturen der thermischen Knoten zu überarbeiten.
 - 6 Schritt 4 wird wiederholt, um die eingeschwungenen Zustände und die Schätzung der Sperrschichtverluste zu überarbeiten.

Die Schritte 5 und 6 können bei Bedarf wiederholt werden. Für dieses Beispiel war dies jedoch nicht notwendig. Das Modell ist nun hinreichend nahe an einem periodischen stationären Zustand und die Leistung des Stromkreises kann nun bewertet werden.

Bild 7 zeigt die momentanen Schaltverluste bei der Versorgung einer 2,85-kW-Last sowie den Gesamtwirkungsgrad des Wandlers. Dieser Wirkungsgrad ist eher niedrig. Ein nächster Schritt des Entwicklers könnte darin bestehen, zwei oder drei MOSFETs parallel für die High-Side- und Low-Side-Schalter zu implementieren. Wichtig ist, dass man sich auf dieses Ergebnis verlassen kann, da die validierten SPICE MOSFET-Modelle der Fabrikation zur Erstellung der Simulationsergebnisse verwendet

wurden und diese auch für die tatsächliche Schaltung gelten. Dadurch ergibt sich ein höheres Maß an Vertrauen als bei der manchmal verwendeten Alternative, diese Untersuchungen auf Basis von Datenblatt- und Schaltverluste für eine repräsentative Testschaltung durchzuführen.

Eine Zusammenfassung des Gesamtprozesses ist in **Bild 8** dargestellt. Der Prozess ist in Form eines MATLAB-Skripts implementiert, das von MathWorks File Exchange [3] heruntergeladen werden kann. Die Ausführung des Skripts dauert vier Minuten und führt zu den in **Bild 7** dargestellten Ergebnissen. Im Vergleich dazu benötigt die Ausführung des nichtlinearen Modells ausgehend von einem nicht initialisierten Zustand etwa einen Tag, um zu denselben Ergebnissen zu gelangen.

Folgerungen

Es wurde gezeigt, wie detaillierte, aus der Halbleiterfertigung abgeleitete SPICE Komponentenmodelle in einem Modell der Endanwendung verwendet werden können, um mit hoher Zuverlässigkeit Vorhersagen über die erwartete Schaltungsleistung zu treffen. Die Herausforderung der Initialisierung eines Modells mit stark variierenden Zeitkonstanten und einem periodischen stationären Zustand wurde mit einem zweistufigen Ansatz angegangen. Erstens wird eine langsame Co-Simulation vermieden, indem SPICE-Komponentenmodelle in Simulink importiert werden und das komplette analoge System zusammen mit dem digitalen Regler

mit einem Solver mit variabler Schrittweite gelöst wird. Zweitens wird der stationäre Zustand durch die Verwendung mehrerer Modelle unterschiedlichen Detailgrads mit einem einfachen iterativen Schema gefunden. Das Endergebnis ist eine durchgängige Design- und Simulationsfähigkeit, die schneller ist, als wenn man ausschließlich mit einem SPICE-Simulator arbeitet. ■ (hh)

www.infineon.com

Quellenverzeichnis

[1] März, M., Nance, P., "Thermal Modeling of Power-electronic Systems," Februar 2000. Online verfügbar unter www.infineon.com/dgdl/Thermal+Modeling.pdf?fileId=db3a30431441fb5d011472fd33c70aa3.

[2] Huang, A., "Infineon OptiMOS Power MOSFET Datasheet Explanation," Application Note AN 2012-03 V1.1 März 2012. Online verfügbar unter www.infineon.com/dgdl/Infineon-MOSFET_OptiMOS_datasheet_explanation-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433b47825b013b6b8c6a3424c4.

[3] Vuletic, R., Hyde, R., John, D., "Infineon Buck Simscape Example," MathWorks File Exchange, Februar 2022. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/106925-infineon-buck-simscape-example>.

[4] Online verfügbar unter www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/automotive-mosfet/iaut300n08s5n012/

[5] mathworks.com/help/physmod/simscape

[6] mathworks.com/help/physmod/sps

[7] mathworks.com/help/physmod/simscape/get-started-with-simscape-language.html



Radovan Vuletic ist System Engineer Automotive for (H)EV-Systems bei Infineon Technologies © Infineon



Rick Hyde ist Software Developer bei MathWorks © MathWorks