

Gekoppelte elektro-thermische Simulation: Methodik zur Entwicklung eines bidirektionalen Onboard Chargers mit hoher Leistungsdichte

Thomas Langbauer¹ (*), Christian Mentin¹, Alexander Connaughton¹, Franz Vollmaier¹, Michael Rindler¹, Rudolf Krall¹, Klaus Krischan²

¹Silicon Austria Labs GmbH, Inffeldgasse 25F, 8010 Graz, +43 664 8157869, thomas.langbauer@silicon-austria.com, www.silicon-austria-labs.com

²Technische Universität Graz - Institut für elektrische Antriebstechnik und Maschinen, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, +43 316 8737745, klaus.krischan@tugraz.at, www.tugraz.at/institute/eam

Kurzfassung:

Im Energienetz der Zukunft werden erneuerbare Energien im hohen Maße Verteil- und Übertragungsnetze an ihre Belastungsgrenzen bringen. Elektromobilität kann daher ein wichtiger Bestandteil einer erfolgreichen Energiewende werden, da durch neue Batterie- und Ladetechnologien wichtige Netzstabilisierungsfunktionen realisiert werden können. An diese neuen Technologien werden jedoch auch hohe Ansprüche gestellt. Neue Onboard Ladeeinrichtungen sollen auf geringstem Bauraum minimalste Verluste realisieren und gleichzeitig hohe Ladeleistungen sowie bidirektionalen Energietransfer bereitstellen [7], um die gewünschte Stabilisierungsfunktion für Stromnetze zu bieten.

Um die zukünftigen Anforderungen realisieren zu können, werden vermehrt neue Wide-Bandgap Halbleiter eingesetzt. Zusätzlich interagieren passive- sowie aktive Bauteile auf kleinstem Bauraum immer stärker. Um diese elektrisch thermischen Interaktionen bereits in der Simulation berücksichtigen zu können, muss die Simulation elektrisch thermisch gekoppelt werden.

Anhand eines einfachen Boost Converters gibt dieser Beitrag einen Überblick über die Methodik einer Simulationsumgebung aus mehreren kombinierten Tools. Diese transient elektrisch und 3D thermisch gekoppelte Simulation wird in weiterer Folge für den Entwurf eines zu entwickelnden Onboard Chargers verwendet. In [1] sind bereits wesentliche Methoden der vorgeschlagenen Co-Simulationsumgebung erklärt. Dieser Beitrag soll anhand dieses einfachen Beispiels die Wichtigkeit der folgenden Punkte in der Entwurfsmethodik hervorheben:

- Update elektrischer Schaltungsparameter in Abhängigkeit der Bauteiltemperaturen, um genaue Werte für deren Verlustleistungen zu erhalten.
- Elektro thermische Interaktionen zwischen benachbarten Komponenten

Die Wichtigkeit, vor allem des ersten Punktes, wird anhand eines Boost Converters veranschaulicht. In der 3D Simulation werden durch Entwärmung aktiver Komponenten in der Platine, elektrische Eigenschaften benachbarter Bauteile stark beeinflusst. Nur die Berücksichtigung dieser starken Abhängigkeiten führt zu genauen Simulationsergebnissen.

Die vorgeschlagene Simulationsumgebung besteht aus dem Schaltungssimulator SALamanderCircuits, dem Tool für die Simulation der Regelung implementiert in Matlab/Simulink™, dem Programm für die Kopplung der verschiedenen Tools Model.CONNECT™ und die thermische Simulation mit AVL FIRE™ M. Die Kopplung dieser Programme bildet die entwickelte SAL Co-Simulationsumgebung. Wird die Schrittweite für die 3D transiente thermische Simulation adaptiv verändert, so kann die Simulation, wie in [1] beschrieben, beschleunigt werden. Um eine schnelle Schaltungssimulation zu ermöglichen, werden die Schaltverluste in Bauteilen über Look-up Tabellen abgebildet, welche schon vorab mithilfe von SPICE Simulationen aufgebaut werden.

Die Ergebnisse dieser Simulationsumgebung werden in dieser Arbeit in den folgenden Kapiteln einer Labormessung mit Thermokamera gegenübergestellt. In Abbildung 1 sind repräsentativ zwei Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Im Falle einer elektrisch-thermisch gekoppelten Simulation ergeben sich deutliche Unterschiede in der simulierten Systemtemperatur nach 60s. Für diese Co-Simulationszeit von 60 s wurden 45 min Rechenzeit an einem handelsüblichen Notebook benötigt. Mithilfe dieser elektrisch-thermisch gekoppelten Simulation kann man bereits im Designprozess realitätsnahe Ergebnisse für die Temperaturverteilung im gesamten 3D Aufbau erzielen und so einen eventuellen teuren und aufwendigen Re-Design Prozess vermeiden.

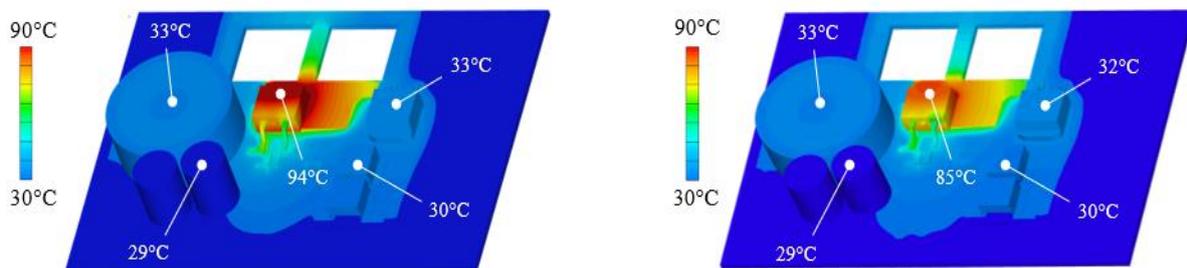


Abbildung 1: (links) Simulierte Temperaturverteilung nach 60s **ohne** Update der elektrischen Parameter; (rechts) Co-simulierte Temperaturverteilung nach 60s **mit** Update der elektrischen Parameter

Keywords: elektro-thermische Co-Simulation, elektro-thermische Interaktion;

1 Einleitung

In einem aktuellen Forschungsprojekt soll ein bidirektionaler Laderegler realisiert werden, um den vorhandenen elektrischen Energiespeicher für verschiedenste Anwendungen nutzen zu können. Da besonders im Bereich Elektromobilität, Bauraum und Effizienz des Ladereglers eine hohe Bedeutung zukommen, ist ein integrales Ziel des Projekts höhere Leistungsdichte und gleichzeitig höhere Effizienz als aktuelle state-of-the-art Lösungen zu erreichen [7]. Um ebendiese Anforderungen realisieren zu können, werden neue Wide-Bandgap Halbleiter eingesetzt, welche im Gegensatz auf reines Silizium basierenden Halbleitern typischerweise bei gleichen Leistungen eine geringere Baugröße aufweisen. Zusätzlich zu der Steigerung der Leistungsdichte auf den Halbleiter Bauelementen selbst, interagieren passive- sowie aktive Bauteile auf kleinstem Bauraum immer stärker. Damit schon im Designprozess des Onboard Ladereglers kritische Bauelemente und elektrisch thermischen Interaktionen zwischen solchen zuverlässig abgeschätzt werden können, ist es notwendig die elektrische sowie thermische Simulationsdomäne miteinander zu koppeln. In [8] und [9] wurde diese Methodik auf Modulebene durchgeführt. In dieser Arbeit wird diese nun auf Systemebene angewandt, welche die Grundlage zur Simulation eines Onboard Ladereglers darstellt.

1.1 Onboard Charger

In zukünftig am Markt befindlichen E-Autos werden Onboard Charger als Standardausrüstung verfügbar sein. Auch im Industriebereich werden sich Onboard Charger für gewisse Bereiche, wie z.B. E-Gabelstapler durchsetzen. Die Leistungen für Onboard Charger werden von 3,6 kW bis 22 kW für E-Autos und Industrieapplikationen reichen [7]. In diesem Leistungsbereich lässt sich ein gutes Verhältnis von Ladeleistung zu Gewicht, welches ständig mittransportiert werden muss erzielen. Weiters sind diese Leistungsbereiche in Haushalten bzw. Industrie verfügbar. Um möglichst geringen Bauraum in Anspruch zu nehmen, werden zukünftige Onboard Charger mit hoher Leistungsdichte ausgeführt. Dadurch entstehen starke elektro-thermische Interaktionen, denn aktive sowie passive Bauelemente werden durch Verluste und daraus resultierender Temperaturentwicklung stark beeinflusst. Ein Ansatz, um bei der Entwicklung von neuen Onboard Chargern solche Sachverhalte zu berücksichtigen ist eine gekoppelte elektro-thermische Simulation.

2 Simulation

Anhand eines einfachen Boost Konverters, dargestellt in Abbildung 2, gibt dieser Beitrag einen Überblick über die Methodik einer Simulationsumgebung aus mehreren kombinierten Tools. Diese transient elektrisch und 3D thermisch gekoppelte Simulation wird für den Entwurf eines zu entwickelnden Onboard Chargers verwendet. In [1] sind bereits wesentliche Methoden der vorgeschlagenen Co-Simulationsumgebung erklärt. Dieser Beitrag soll anhand dieses einfachen Beispiels die Wichtigkeit der folgenden Punkte in der Entwurfsmethodik hervorheben:

- Update der elektrischen Schaltungsparameter in Abhängigkeit der aktuellen Bauteiltemperaturen, um so genaue Werte für deren Verlustleistungen zu erhalten
- Elektro thermische Interaktionen zwischen benachbarten Komponenten

2.1 Modell

In Abbildung 2 ist das Printed Circuit Board (PCB) des verwendeten Boost Konverters mit den entsprechenden Bauelementen beschriftet und deren Funktion dargestellt. In Abbildung 3 sind die verwendeten 3D Modelle der Bauelemente dargestellt. In braun sind die Kupferbahnen des PCBs und in rot jene Volumen in welchen die gleichverteilten Verluste auftreten dargestellt. Weiters ist erkennbar, dass Bauteile, deren Beitrag zu den elektrischen Verlusten gering ist, im 3D Modell vernachlässigt wurden.

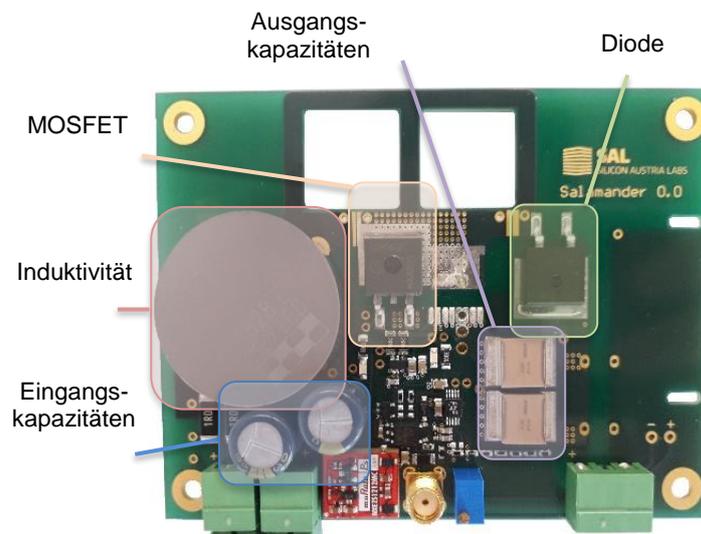


Abbildung 2: Printed Circuit Board (PCB) der Boost Konverter Anwendung

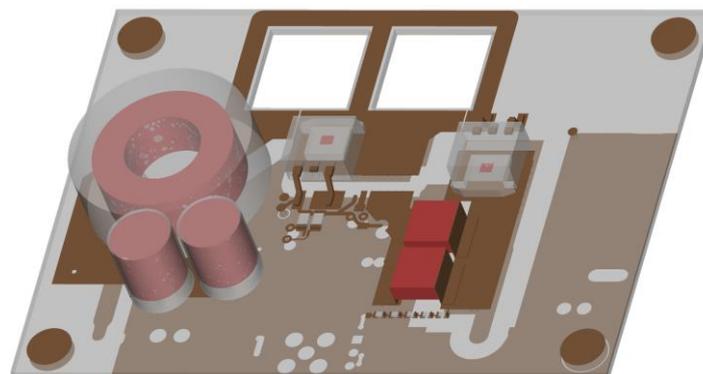


Abbildung 3: Finite Volumen Methode (FVM) Modell des Boost Konverter Prototypen

Abbildung 4 zeigt das Prinzipschaltbild eines Boost Konverters. Die Funktion des Boost Konverters lässt sich wie folgt erklären. Zu Beginn wird der Transistor S_1 eingeschaltet. Es baut sich ein Strom über die Induktivität auf. Danach wird S_1 wieder ausgeschaltet und der Strom über die Induktivität baut sich am Ausgang über D_1 ab. Somit wird eine niedrige Spannung am Eingang zu einer hohen am Ausgang transformiert.

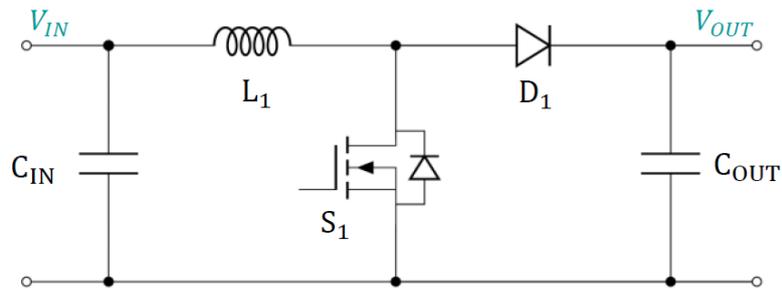


Abbildung 4: Prinzipschaltbild des Boost Konverters

In Abbildung 5 ist die Temperaturabhängigkeit der Verluste von MOSFET und Diode sowie die Kapazität eines Ceralink™ Kondensators dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass über den Arbeitstemperaturbereich (25-150°C) die Verluste des MOSFETs um 16% variieren können. Die Verluste sind somit stark temperaturabhängig. Jene Verluste der Diode variieren im Arbeitstemperaturbereich um 6%. Weiters ändert sich die Kapazität des Ceralink™ [2] Kondensators vom Spitzenwert zum niedrigsten Wert im Arbeitstemperaturbereich um 43%.

In einem kompakten Design mit hoher Leistungsdichte, wo aktive und passive Komponenten sehr knapp nebeneinander platziert werden, kann die Temperaturverteilung im System somit einen signifikanten Einfluss auch auf die elektrische Simulation haben.

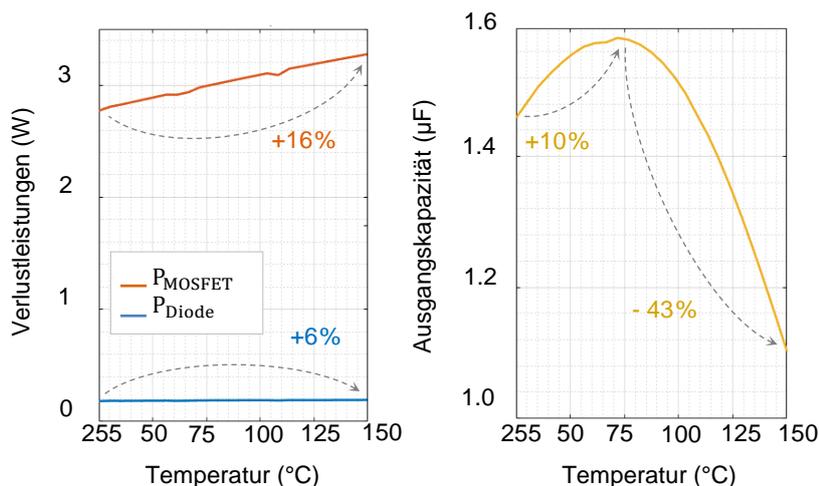


Abbildung 5: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Verlustleistungen von MOSFET [3] und der Diode [4] sowie die Temperaturabhängigkeit der Kapazität eines Ceralink™ Kondensators [2]

2.2 Etablierte Simulationsmethode

In Abbildung 6 ist eine etablierte bzw. konventionelle Simulationsmethodik einer gekoppelten Simulation gegenübergestellt. Zu Beginn wird die Arbeitstemperatur der einzelnen Bauelemente festgelegt. Mit dieser werden im nächsten Schritt die elektrischen Parameter, wie z.B. der $R_{ds,on}$ eines MOSFETs bestimmt. Aufgrund dieser Werte ergeben sich im weiteren Schritt die Verlustleistungen. Diese werden in die Simulation für die Temperatur, welche aus einem 3D Modell generiert wird, übernommen. Mit den Verlustleistungen in den Volumen aus Abbildung 3 entsteht eine Temperaturverteilung im 3-dimensionalen Aufbau. Wie bereits mit den Pfeilen in Abbildung 6 angedeutet, kann für mehrere Arbeitstemperaturen der

Simulationsablauf wiederholt und angenommene Bauteiltemperaturen manuell mit den thermischen Simulationsergebnissen upgedated werden. Durch die starke Temperaturabhängigkeit einiger elektrischer Bauteilparameter ist es daher vorstellbar, dass bei Abweichungen der gewählten Arbeitstemperatur zur aktuell simulierten Temperatur, bei dementsprechend längeren transienten Simulationen auch deutliche Abweichungen im Endergebnis entstehen können (siehe Abbildung 1). Sofern eine exakte Temperaturanalyse des Systems nicht notwendig ist, eignet sich diese Methode mit manuellem Feedback, um Temperatur Hotspots vorherzusehen und entsprechend Gegenmaßnahmen im Design zu ergreifen. Eine akkurate Simulation von Verlusten und daraus resultierender Systemeffizienz erfordert eine genauere Betrachtung elektrisch thermischer Interaktionen zwischen Bauteilen. Um dies zu erreichen wird im nächsten Abschnitt die Kopplung beider Simulationsdomänen vorgestellt.



Abbildung 6: Gegenüberstellung der etablierten Simulationsmethodik (links) und der vorgeschlagenen Co-Simulationsmethode mit automatischem Temperaturfeedback (rechts)

2.3 Co-Simulation

Nach festlegen einer Systemstarttemperatur (Abbildung 6) werden mit dieser die elektrischen Parameter der Bauelemente (Abbildung 3) festgelegt. Aus diesen werden wiederum die Verlustleistungen berechnet. Diese Verlustleistungen werden in die 3D Simulation übergeben und mit den aktuellen Verlusten die Temperatur nach einem thermischen Simulationsschritt (Schrittweite siehe Abschnitt 0) der elektrischen Simulation automatisch zurück übergeben. Die elektrischen Bauteilparameter werden mit den neuen Bauteiltemperaturwerten entsprechend angepasst, die Verluste ändern sich daher nach jedem thermischen Simulationsschritt. Dieser Vorgang wird bis zum Ende der transienten Simulation wiederholt.

In Abbildung 7 ist die für die Co-Simulation verwendete Toolchain dargestellt. Die vorgeschlagene Simulationsumgebung besteht aus dem Schaltungssimulator

SALamanderCircuits [6], dem Tool für die Simulation der Regelung implementiert in Matlab/Simulink™, dem Programm für die Kopplung der verschiedenen Tools AVL Model.CONNECT™ [5] und der thermischen Simulation mit AVL FIRE™ M [5]. Die Verknüpfung dieser Programme bildet die entwickelte SAL Co-Simulationsumgebung. Um eine schnelle Schaltungssimulation zu garantieren, werden die Bauteilverluste über Look-up Tabellen bestimmt.



Abbildung 7: Zusammensetzung der Programme, welche zur SAL Co-Simulationsmethode benötigt werden

2.4 Schrittweiten

In Abbildung 8 sind die verschiedenen Zeitschritte zwischen den Simulationstools dargestellt. Zu Beginn werden die Verlustleistungen und die Systemstarttemperatur ausgetauscht. Danach starten die thermische und elektrische Simulationssoftware parallel. Da die elektrischen Zeitkonstanten in elektronischen Systemen wesentlich kleiner sind als die thermischen, erreichen die Verlustleistungen im System im Zeitpunkt P_1 den stationären Zustand. Da sich ab diesem Zeitpunkt diese Leistungen nicht mehr verändern wechselt SALamanderCircuits nach Erreichen dieses stationären Zustandes in einen Zero-order-hold Modus (ZOH), die elektrische Simulation wird sozusagen angehalten. Zum Zeitpunkt t_1 werden die neuen Verlustleistungen und Temperaturwerte zwischen der elektrischen und thermischen Simulation ausgetauscht. Die elektrischen Parameter werden entsprechend der Temperatur angepasst und die elektrische Simulation startet erneut, bis sich entweder wieder der stationäre Zustand der Verlustleistungen einstellt oder erneut neue Temperaturwerte übergeben werden. Die Zeitpunkte $t_0, t_1 \dots t_{end}$ werden durch die thermischen Systemparameter bestimmt und können konstant gehalten oder auch adaptiv angepasst werden [1].

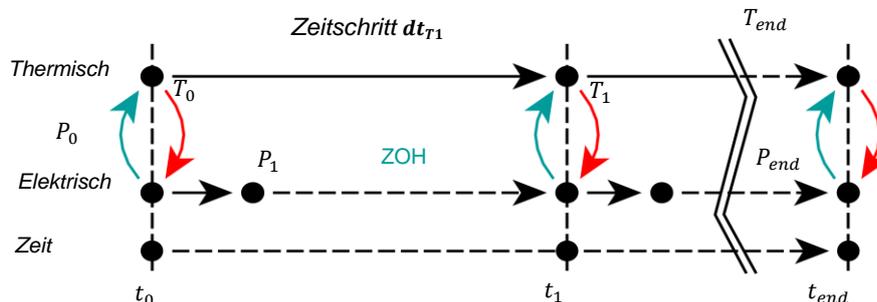


Abbildung 8: Darstellung der Zeitschritte zwischen thermischer und elektrischer Simulation

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation, konventionell sowie gekoppelt elektrisch-thermisch, werden hier einer Labormessung mit Thermokamera gegenübergestellt. Die Labormessung und die Simulation wurden bei einer Umgebungstemperatur von 28,3°C durchgeführt. Die

Schaltfrequenz, Eingangs und Ausgangsspannung wurden während der Messung und der Simulation des transienten Erwärmungsvorgangs konstant gehalten.

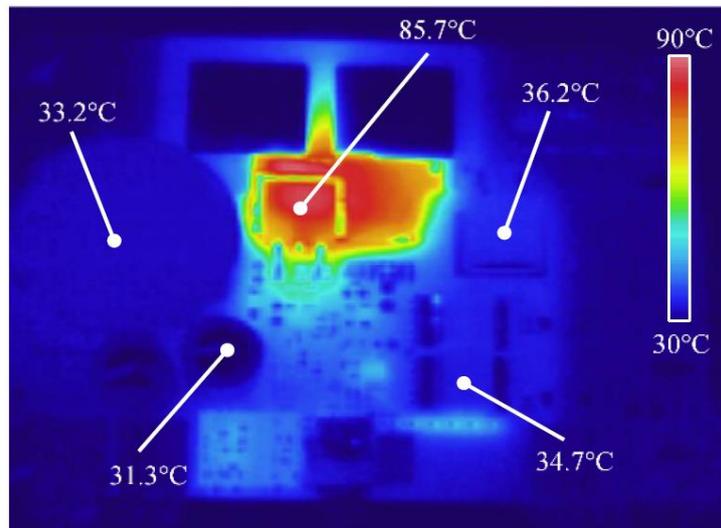


Abbildung 9: Verifikation des Boost Konverters anhand einer Labormessung mittels Thermokamera

3.1 Labormessung

Die Labormessung des Boost Konverters Prototypen wurde mithilfe einer Infrarotkamera durchgeführt. In Abbildung 9 sind die ermittelten Oberflächentemperaturen nach 60s transienter Erwärmung dargestellt. Dabei ist klar ersichtlich, dass in der gewählten Anordnung die Verlustleistung im Schaltelement die höchste Erwärmung verursacht und über die Kupferleiterbahnen Wärme in die umliegenden Strukturen und Bauelemente transportiert wird. Dies kann zu einer starken elektro-thermischen Interaktion zwischen verschiedensten Bauelementen führen.

3.2 Simulationsergebnisse

In Abbildung 10 sind die Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Dabei wurde einmal die elektrisch-thermische Co-Simulation ohne Temperaturupdate in der elektrischen Simulation (etablierter konventioneller Ansatz) sowie einmal der vorgeschlagene Simulationsansatz mit Temperaturupdate (Co-Simulation) der Bauteilparameter in der elektrischen Domäne gewählt. Im etablierten Ansatz wurde für den MOSFET zur Bestimmung seiner elektrischen Parameter eine Arbeitstemperatur von 140°C gewählt, welche der gemessenen stationären MOSFET Oberflächentemperatur bei denselben Betriebsparametern nach mehreren Minuten Aufwärmzeit entspricht. Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass beide Varianten nach einer Simulationsdauer von 60s einen Temperaturunterschied (z.B. Differenz der MOSFET Oberflächentemperaturen: 9°C) aufweisen. Vergleicht man beide Simulationsergebnisse in Abbildung 10 mit dem Ergebnis der Thermokameramessung in Abbildung 9 wird deutlich, dass die Co-simulierte Temperaturverteilung mit automatischem Temperaturupdate der elektrischen Schaltungsparameter, wesentlich bessere Übereinstimmung liefert. Für diese Co-Simulation von 60 s inklusive Update der elektrischen Parameter nach jedem thermischen Simulationsschritt, wurden 45 min Rechenzeit an einem handelsüblichen Notebook benötigt.

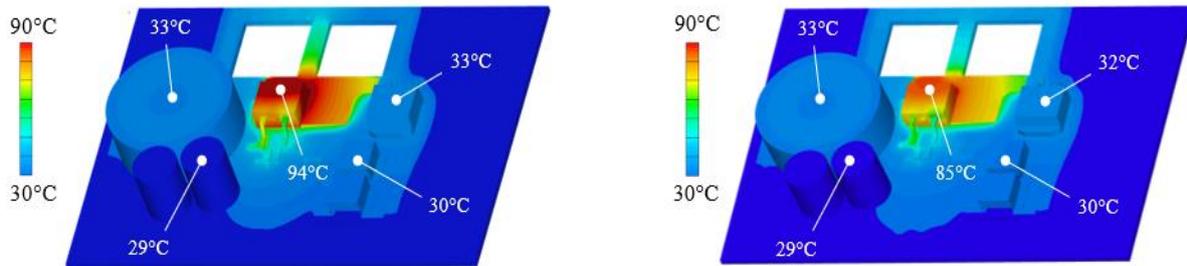


Abbildung 10: (links) Simulierte Temperaturverteilung nach 60s **ohne** Update der elektrischen Parameter; (rechts) Co-simulierte Temperaturverteilung nach 60s **mit** Update der elektrischen Parameter

Nachfolgend soll noch kurz der Einfluss von elektro-thermischer Interaktion erläutert werden. In Abbildung 11 ist ein Schnitt durch den MOSFET und Diode abgebildet. Im linken Teil ist erkennbar, dass sich die Wärme im MOSFET von innen nach außen verteilt, da die Verluste am Halbleiter selbst, im Zentrum des Bauelementes auftreten. Im rechten Teil des Bilds, in der Diode, wird durch den benachbarten MOSFET Wärme über die Anschlüsse in das Innere der Diode transportiert. Somit kommt es zu einer zusätzlichen Erwärmung in der Diode und folglich ändern sich elektrische Parameter der Diode. Werden Bauelemente auf immer engerem Bauraum, wie z.B. in einem Onboard Laderegler platziert, so wird diese thermische Interaktion zwischen aktiven und auch passiven Bauelementen immer stärker. Die elektrischen Systemeigenschaften sind daher nicht nur von Verlusten und resultierenden elektrischen Bauteileigenschaften in einzelnen Bauelementen abhängig, viel mehr müssen der 3-dimensionale Aufbau und die daraus folgende elektrisch-thermische Interaktion zwischen solchen berücksichtigt werden. Um zuverlässige Simulationsergebnisse zu erhalten wird bei hohen Leistungsdichten der vorgestellte Simulationsansatz daher eine bedeutende Rolle spielen.

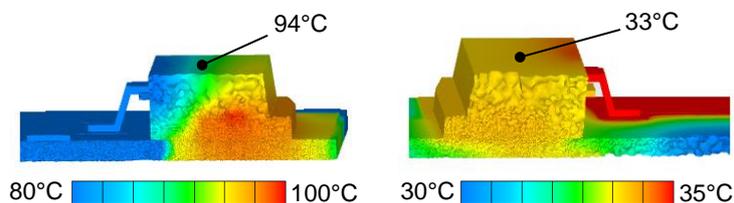


Abbildung 11: Querschnitt durch den MOSFET (links) und die Diode (rechts). Die Schnitte stammen aus der etablierten Simulationsmethode aus Abbildung 10.

4 Zusammenfassung

Der vorgestellte Simulationsansatz erhöht die Genauigkeit für elektrisch-thermische Co-Simulationen im Vergleich mit der getrennten elektrischen und thermischen Simulation, ohne die benötigte Zeit zur Berechnung exzessiv zu vergrößern. Eine besonders gute Übereinstimmung der Co-Simulationsergebnisse mit den Labormessungen verdeutlicht die Anwendbarkeit der vorgestellten Methodik. Mithilfe dieser elektrisch-thermisch gekoppelten Simulation können bereits im Designprozess von Konvertern realitätsnähere Ergebnisse erzielt, die Beeinflussung durch thermosensitive elektrische Parameter berücksichtigt und so ein eventueller teurer und aufwendiger Re-Design Prozess vermieden werden. Der Einfluss von verlustreichen Komponenten auf temperaturabhängige Parameter von benachbarten Komponenten kann mit dieser Co-Simulationsmethode abgebildet werden.

Wie bereits in Abbildung 5 festgestellt wurde, kann eine solche Kombination aus verlustreichen Bauelementen und Systemen mit hoher Bauteil- und Leistungsdichte und stark temperaturabhängigen Bauteilparametern einen großen Einfluss auf das elektrische Systemverhalten haben. Der betrachtete Boost Konverter Prototyp konnte anschaulich zur Darstellung der Co-Simulationsergebnisse verwendet werden. Eine starke elektrisch-thermische Interaktion bleibt in diesem Design zwar aus, jedoch ist anzunehmen das im nächsten Designschritt bei Realisierung des Onboard Ladereglers, Komponenten wesentlich kompakter platziert sein werden. Weiterführende Untersuchungen werden dann bei dem Design eines solchen durchgeführt werden.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt von der AVL List GmbH, Fronius International GmbH, Infineon Technologies Austria AG, AT&S Austria Technologie & Systemtechnik Aktiengesellschaft, TDK Electronics GmbH & Co OG und Silicon Austria Labs (SAL), in Besitz der Republik Österreich, der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft (SFG), dem Land Kärnten, der Upper Austrian Research GmbH (UAR) und dem Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie (FEEI).

6 Referenzen

- [1] Langbauer, T., Mentin, C., Rindler, M., Vollmaier, F., Connaughton, A., & Krischan, K. (2019, September). Closing the Loop between Circuit and Thermal Simulation: A System Level Co-Simulation for Loss Related Electro-Thermal Interactions. In *2019 25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [2] TDK, "CeraLink Model Library for LTspice," 2016. [Online]. Available: <https://www.tdk-electronics.tdk.com>. [Accessed: 06-Apr-2019].
- [3] Infineon Technologies, "CoolMOSTM C7 IPB60R060C7," 2019. [Online]. Available: <https://www.infineon.com>. [Accessed: 01-Jul-2019].
- [4] CREE, "C3D06060A SiC Schottky Diode," 2015. [Online]. Available: <https://www.wolfspeed.com>. [Accessed: 03-Jan-2019].
- [5] "AVL Advanced Simulation Technologies." [Online]. Available: <https://www.avl.com/de/simulation>. [Accessed: 19-Aug-2019].
- [6] "Gecko Simulations." [Online]. Available: gecko-simulations.com. [Accessed: 19-Aug-2019].
- [7] Khaligh, A., & D'Antonio, M. (2019). Global trends in high-power on-board chargers for electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3306-3324.
- [8] L. Ceccarelli, A. S. Bahman, F. Iannuzzo, and F. Blaabjerg, "A fast electro-thermal co-simulation modeling approach for SiC power MOSFETs," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 966–973, 2017.
- [9] Q. Mei, W. Schoenmaker, S. H. Weng, H. Zhuang, C. K. Cheng, and Q. Chen, "An Efficient Transient Electro-Thermal Simulation Framework for Power Integrated Circuits," *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 35, no. 5, pp. 832–843, 2016.