

Einfluss eines elektrisch nicht-leitenden Kühlkörpers auf gestrahlte und leitungsgebundene Störungen von Leistungshalbleitern

M. Sc. Stephan Chromy, Helmut-Schmidt-Universität, Grundlagen der Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Stefan Dickmann, Helmut-Schmidt-Universität, Grundlagen der Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Sebastian Fahlbusch, Helmut-Schmidt-Universität, Leistungselektronik
Prof. Dr.-Ing. Klaus F. Hoffmann, Helmut-Schmidt-Universität, Leistungselektronik
M. Sc. Kai Rathjen, Helmut-Schmidt-Universität, Grundlagen der Elektrotechnik

1 Einleitung

Die Entwicklung von Silizium-Leistungshalbleitern und modernen Wide-Bandgap-Materialien wie Galliumnitrid und Siliziumkarbid ermöglicht immer steilere Schaltflanken und höhere Schaltfrequenzen, welche zur Steigerung der Effizienz und zur Kompaktierung leistungselektronischer Systeme genutzt werden. Allerdings führen diese Entwicklungen zu zunehmenden Störaussendungen bei höheren Frequenzen [1,2,3,4]. Weiterhin ist durch die in den Leistungshalbleitern entstehenden Verluste eine Kühlung oftmals unabdingbar. Die Verwendung von Kühlkörpern führt, trotz einer elektrischen Isolierung zwischen Kühlkörper und Leistungshalbleiter, zu einer Wirkung des Kühlkörpers als Antenne. Die unmittelbare Nähe des Kühlkörpers zu den Schaltvorgängen im Leistungshalbleiter bedingt eine kapazitive Kopplung, sodass Spannungsflanken aus den Schaltvorgängen auf den Kühlkörper übertragen werden. Es kommt zu Abstrahlung und bei Verwendung einer Erdung zusätzlich zu Gleichtaktströmen.

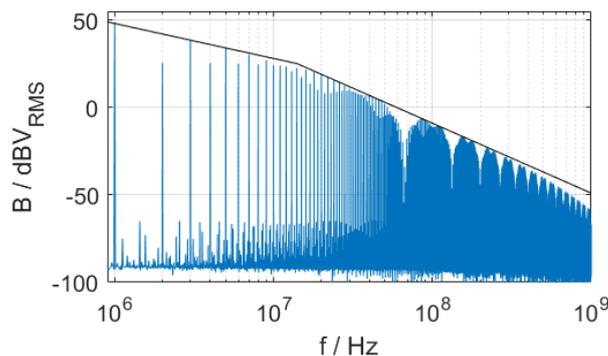


Bild 1: Spektrum der Gate-Source-Spannung u_{DS} eines SiC-MOSFETs in einer Halbbrückenschaltung

In Bild 1 ist beispielhaft das Spektrum der Drain-Source-Spannung u_{DS} eines SiC-MOSFETs der 1,2 kV-Klasse von Wolfspeed, Cree Inc., bei Verwendung in einer hart schaltenden Halbbrückentopologie dargestellt. Weiterhin sind einhüllende Geraden mit Steigungen von -20 dB/dek bzw. -40 dB/dek dargestellt. Es werden 600 V mit einer Anstiegszeit von 15 ns, einer Abschaltzeit von 30 ns bei einer Frequenz von 1 MHz

geschaltet. Das Spektrum wurde unter Verwendung von Messdaten aus [5] berechnet. Es wird deutlich, dass der Frequenzbereich bis 1 GHz für Untersuchungen von Interesse ist.

In der EMV sind Kühlkörper seit langer Zeit Gegenstand verschiedener Untersuchungen. Viele Arbeiten beschäftigen sich mit der Vorhersage und Optimierung des EMV-Verhaltens auf Basis der Kühlkörpergeometrie, wobei häufig Simulationen eingesetzt werden [1,4,6]. Weiterhin wurde in verschiedenen Arbeiten der Einfluss der Erdung auf die EMV untersucht [3,7,8]. Insbesondere für große Kühlkörper und hohe Frequenzen kann die Erdung ein komplexes Problem darstellen und selbst in erheblichem Maße zu Störaussendungen beitragen.

2 Lösungsansatz

Eine potentielle Möglichkeit zur Verringerung der Abstrahlung bei gleichzeitiger Lösung der Erdungsproblematik stellt die Verwendung von Kühlkörpern aus Keramik dar. Insbesondere die Sinterkeramik Aluminiumnitrid (AlN) weist eine hohe Wärmeleitfähigkeit von 180 W/(m K) (Zum Vergleich: Aluminium 236 W/(m K)) auf, sodass eine ausreichende Kühlleistung erreicht werden kann. Gleichzeitig besitzt Aluminiumnitrid einen hohen spezifischen Widerstand von mehr als $5 \cdot 10^{10} \Omega \text{ m}$, sodass die Wirkung eines solchen Kühlkörpers als Antenne reduziert wird.

3 Untersuchungen

In dieser Arbeit wurden die thermische Leistungsfähigkeit und der Einfluss eines Kühlkörpers aus Aluminiumnitrid bei der Verwendung mit Leistungs-MOSFETs hinsichtlich gestrahlter und leitungsgebundener Störungen betrachtet. Für die Durchführung der Untersuchungen wurde beispielhaft ein Leistungshalbleiter im weitverbreiteten TO-247-Gehäuse gewählt, welches mit einem Kühlkörper unter Verwendung einer Wasserkühlung gekühlt wird. Es wurden zwei geometrisch identische Kühlkörper aus Aluminium und Aluminiumnitrid verwendet, welche eine 10 mm Bohrung für die Wärmeabfuhr durch die Wasserkühlung aufweisen. Die Kühlkörper sind 90 mm lang und bieten die Möglichkeit, jeweils bis zu vier TO-247-Gehäuse gleichzeitig zu kühlen. Sie sind zusammen mit einem MOSFET in Bild 2 dargestellt.

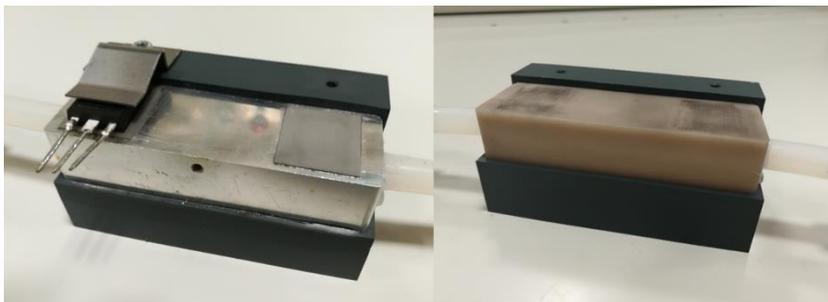


Bild 2: Kühlkörper aus Aluminium mit MOSFET (links); Kühlkörper aus Aluminiumnitrid (rechts)

3.1 Thermische Eigenschaften

Der Wärmewiderstand des Kühlsystems bis zum Kühlwasser wird durch die Wärmewiderstände der einzelnen Komponenten sowie die Übergangswiderstände zwischen diesen Komponenten bestimmt. Für die beiden Kühlkörper sind die einzelnen Komponenten schematisch in Bild 3 dargestellt. Da bei MOSFETs im TO-247-Gehäuse die Kontaktfläche für die Wärmeabfuhr im Allgemeinen auf dem Drain-Potential liegt, ist bei der Verwendung eines elektrisch leitenden Kühlkörpers für mehrere dieser MOSFETs eine elektrische Isolierung der MOSFETs vom Kühlkörper notwendig. In dieser Arbeit wurde die Isolierung für den Aluminium-Kühlkörper mit 0,5 mm dicken AlN-Plättchen realisiert, welche in Bild 2 zu sehen sind. Die Notwendigkeit dieser elektrischen Isolierung bei der Verwendung eines Aluminium-Kühlkörpers führt im Vergleich zum Kühlkörper aus Aluminiumnitrid zu zusätzlichen Übergangswiderständen. Um diese Übergangswiderstände zu minimieren, wurde Wärmeleitwachs verwendet. Beim Vergleich der Kühlsysteme unter Verwendung der Kühlkörper ergeben sich folgende Unterschiede: Der Aluminium-Kühlkörper weist eine höhere Wärmeleitfähigkeit und somit einen niedrigeren Wärmewiderstand auf, wobei die elektrische Isolierung zu zusätzlichen Übergangswiderständen führt.

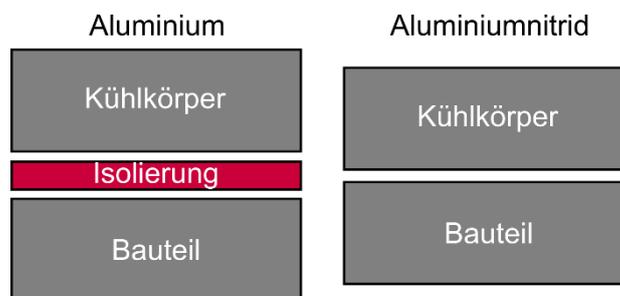


Bild 3: Schema thermisches Gesamtsystem bei Aluminium- und Aluminiumnitrid Kühlkörper

Die thermische Leistungsfähigkeit der Kühlkörper wurde experimentell unter Verwendung von zwei SiC-MOSFETs (C2M0080120D, Wolfspeed, Cree Inc.) in einer Halbbrücke untersucht. Hierbei wurde unter positiver Gate-Source-Spannung U_{GS} ein Dauerstrom von 20 A verwendet, sodass durch den Drain-Source-Widerstand der MOSFETs im eingeschalteten Zustand R_{DSon} eine thermische Verlustleistung erzeugt wird. Das Gehäuse der MOSFETs wurde mittels einer Wärmebildkamera betrachtet. Über die Dauer des Versuchs wurde U_{GS} stufenweise verringert, um R_{DSon} zu erhöhen. Im Mittel konnte für den Aluminiumnitrid-Kühlkörper ($\overline{\Delta T} = 29,8$ K) eine um 12% geringere Temperaturdifferenz des Gehäuses bezogen auf die Kühlwassertemperatur im Vergleich zu der Verwendung des Aluminium-Kühlkörpers ($\overline{\Delta T} = 34,0$ K) beobachtet werden.

3.2 EMV-Eigenschaften

Nach den Untersuchungen der thermischen Leistungsfähigkeit wurden Untersuchungen hinsichtlich der EMV-Eigenschaften anhand der S-Parameter durchgeführt. Die Messungen wurden in einer Halbabsorberkammer durchgeführt. Der Prüfling befand sich

oberhalb einer geerdeten Metallplatte. Es wurde eine Nachbildung eines TO-247-Gehäuses aus Metall verwendet, welche in Bild 4 zusammen mit einem Schema des Messaufbaus abgebildet ist. Mit der TO-247-Nachbildung soll die Kontaktfläche für die Kühlung, welche bei einem MOSFET im TO-247 Gehäuse auf dem Drain-Potential liegt und beim Schalten Potentialsprünge erfährt, möglichst realistisch nachgebildet werden. Über eine SMA-Durchführung in der Metallplatte wurde die TO-247-Nachbildung mit Port 1 eines Netzwerkanalysators (NWA) verbunden. An Port 2 des NWA befand sich eine in 3 m Entfernung positionierte Log-per Antenne.

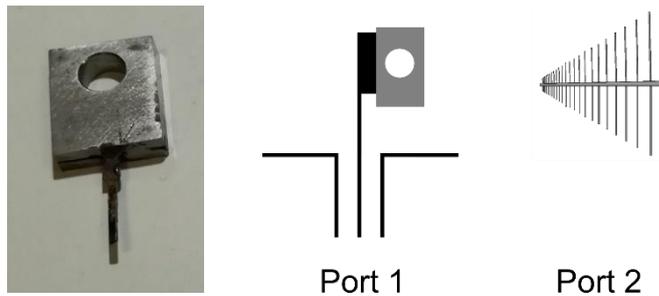


Bild 4: Nachbildung TO-247 Gehäuse (links), Schema Messaufbau S-Parameter (rechts)

3.2.1 S-Parameter

Mit der oben beschriebenen Anordnung wurden Messungen von S_{11} und S_{21} für die folgenden Fälle durchgeführt:

- MOSFET-Nachbildung ohne Kühlkörper - „Ohne Kühlkörper“
- Mit AlN-Kühlkörper – „AlN“
- Mit Al-Kühlkörper ohne Erdung „Al floating“
- Mit Al-Kühlkörper mit Erdung „Al geerdet“

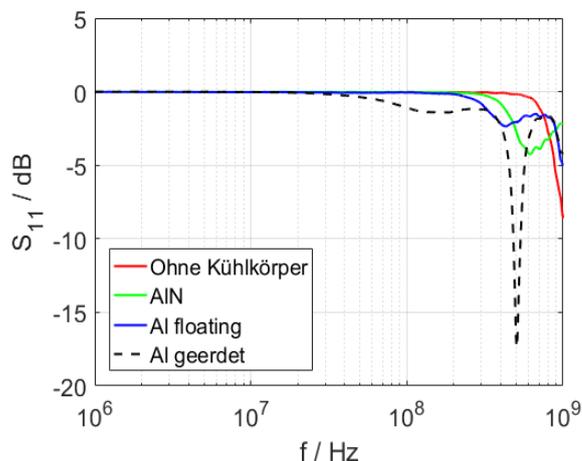


Bild 5: Messung von S_{11} im Frequenzbereich von 1 MHz bis 1 GHz

Die Messwerte des Parameters S_{11} , sind für den Frequenzbereich von 1 MHz bis 1 GHz in Bild 5 betragsweise in dB dargestellt. Somit entsprechenden 0 dB Totalreflexion und negative Werte entsprechen nicht reflektierter Leistung. Außerhalb der Resonanzen oberhalb von 300 MHz, welche auf geometrische Eigenschaften des Versuchsaufbaus zurückgeführt werden konnten, findet nahezu Totalreflexion statt.

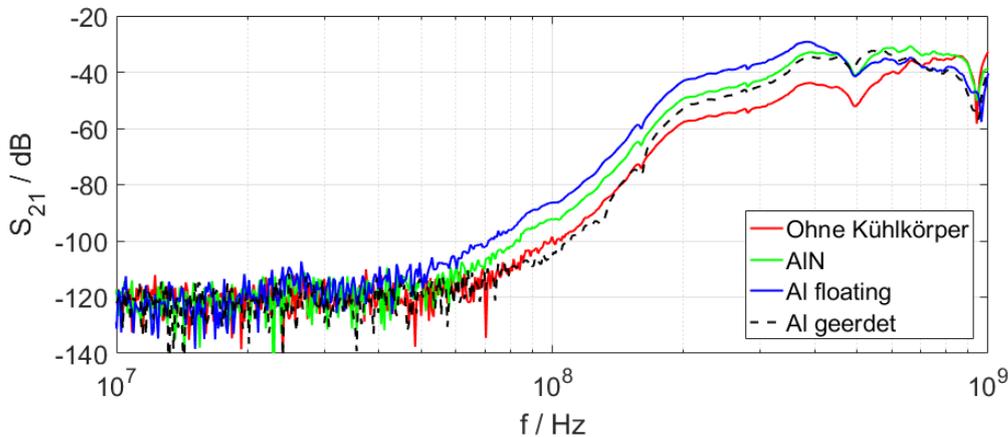


Bild 6: Messung von S_{21} im Frequenzbereich von 10 MHz bis 1 GHz

Neben den Messungen hinsichtlich S_{11} wurden Messungen des Parameters S_{21} durchgeführt. In Bild 6 sind die Messwerte von S_{21} für den Frequenzbereich von 10 MHz bis 1 GHz betragsweise in dB dargestellt. Unterhalb von 30 MHz befindet sich das Messsignal unterhalb der Detektionsgrenze des NWA, während oberhalb von 300 MHz Resonanzen sichtbar sind, welche vermutlich auf den Messaufbau zurückzuführen sind. Auffällig ist der Frequenzbereich von 30 MHz bis 300 MHz, in welchem ein paralleler Anstieg der einzelnen Kurven beobachtet werden kann. Die Messwerte wurden durch eine Simulation mit der Momentenmethode qualitativ bestätigt. Bezüglich der Messungen ohne Kühlkörper und mit dem Al-Kühlkörper erfüllen die Messwerte die Erwartungen: „Ohne Kühlkörper“ und „Al geerdet“ verhalten sich ähnlich, da durch die Erdung der Kühlkörper selbst in diesem Frequenzbereich nicht abstrahlt und lediglich die TO-247-Nachbildung zur Abstrahlung beiträgt. Wird der Al-Kühlkörper nicht geerdet, führt dies zu einer erhöhten Abstrahlung. Die Betrachtung der Messwerte mit dem AlN-Kühlkörper zeigt, dass die Abstrahlung im Vergleich zu dem Fall ohne Kühlkörper und mit geerdetem Al-

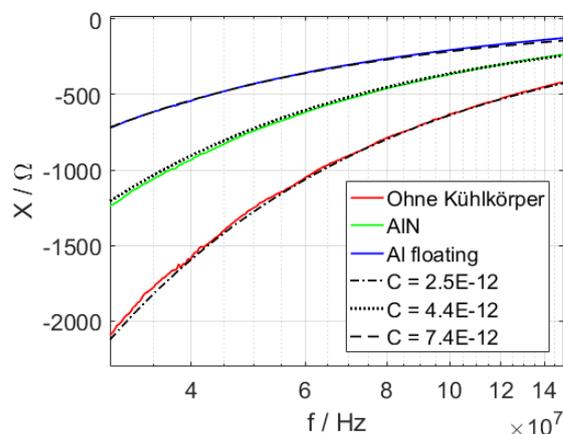


Bild 7: Gemessene und für Kapazitäten berechnete Reaktanz für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 150 MHz

Kühlkörper erhöht, aber geringer als die Abstrahlung mit dem nicht geerdeten Al-Kühlkörper ist.

Um den Einfluss des AlN-Kühlkörpers auf die Abstrahlung zu verstehen, soll die TO-247-Nachbildung mit dem Kühlkörper als Antenne betrachtet werden. Diese habe eine Impedanz $Z_A = R_A + jX_A$ wobei sich der Wirkwiderstand R_A aus den Verlusten sowie dem Strahlungswiderstand R_s zusammensetzt. Nehmen wir die Antenne als einen kurzen Monopol an, kann davon ausgegangen werden, dass R_A klein gegen X_A ist [9]. Dies ist möglich, da die geometrischen Abmessungen bei der Betrachtung von Frequenzen bis 150 MHz klein gegen die Wellenlänge sind. Weiterhin kann ein kurzer Monopol als kapazitiv angenommen werden [9]. Während die Messung des Strahlungswiderstandes schwierig und eine Abgrenzung zu den Verlusten ohne weiteres nicht möglich ist, konnte die Reaktanz der Antenne aus der Messung von S_{11} berechnet werden. Die Reaktanzen für die Fälle ohne Kühlkörper, mit AlN-Kühlkörper und ungeerdetem Al-Kühlkörper sind in Bild 7 dargestellt. Weiterhin wurden in Bild 7 die Reaktanzen für entsprechende Kapazitäten an die Messwerte angepasst. Es wird hier deutlich, dass die Kapazitäten ohne Kühlkörper über den AlN-Kühlkörper hin zu dem ungeerdeten Al-Kühlkörper zunehmen. Dies entspricht der Erwartung aus der Geometrie des Aufbaus unter Berücksichtigung der dielektrischen Eigenschaften von Aluminiumnitrid. Der Zusammenhang zwischen der Reaktanz und dem Verhalten bezüglich der Abstrahlung lässt sich über den Reflexionsfaktor bezogen auf den Anschluss der Antenne herstellen. Für den Reflexionsfaktor gilt [10]

$$r = \frac{R_A - R_0 + jX_A}{R_A + R_0 + jX_A}$$

R_A kann bei einem kurzen Monopol als klein gegenüber der Systemimpedanz R_0 von 50 Ω angenommen werden, sodass die Reaktanz X einen erheblichen Einfluss auf die Reflexion am Eingang der Antenne hat. Signalanteile, die bereits am Eingang der Antenne reflektiert werden, das heißt den MOSFET und somit den Kühlkörper nicht erreichen, können nicht zur Abstrahlung beitragen. Eine betragsmäßige Verringerung der Reaktanz X führt hierbei zu einer Erhöhung der Abstrahlung, da die Antenne besser an die Quelle angepasst ist. Somit führen letztlich die dielektrischen Eigenschaften der Keramik Aluminiumnitrid, welche eine relative Permittivität von ca. 9 aufweist, zu der Erhöhung der Abstrahlung. Es muss hierbei allerdings beachtet werden, dass dieser Effekt direkt von der Systemimpedanz abhängt, welche in leistungselektronischen Schaltungen nur selten 50 Ω beträgt.

3.2.2 Ableitstrom im Zeitbereich

Um die Vorteile eines AlN-Kühlkörpers bezüglich der leitungsgebundenen Störungen zu demonstrieren, sind unter Verwendung eines Oszilloskops und einer Stromzange (CP031, Teledyne LeCroy Inc., 100 MHz) Messungen des Ableitstromes durchgeführt worden. Hierfür wurde die TO-247-Nachbildung mit gaußförmigen Spannungspulsen mit einer Amplitude von 40 V und einer vollen Halbwertsbreite von 1 ns gespeist, sodass der

Frequenzbereich für leitungsgebundene Störungen abgedeckt war. Die Pulse wurden mittels eines Pulsgenerators (HVPG-1000, Sequid GmbH) erzeugt. Die Messungen wurden unter Verwendung des Al-Kühlkörper sowohl geerdet, als auch ungeerdet durchgeführt. Zunächst wurde der Strom durch die Erdung gemessen. Hiernach wurden noch zwei Messungen am Speisepin der TO-247-Nachbildung mit und ohne Erdung durchgeführt. Die drei Messungen wurden hinsichtlich der Zeitachse unkorreliert durchgeführt.

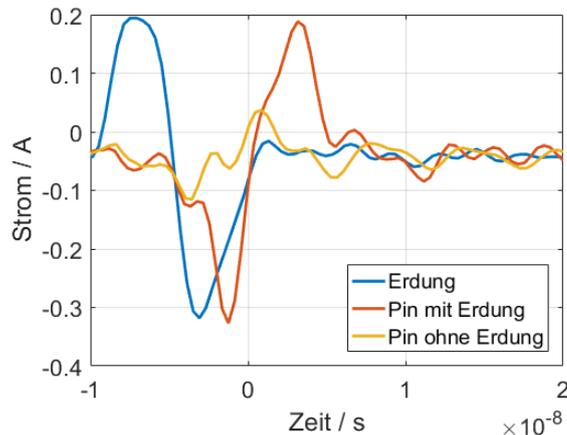


Bild 8: Ableitstrom im Zeitbereich

Die Messung mit Erdung zeigt, dass kurzzeitig bis zu 300 mA über die Erdung abfließen, während ohne Erdung ein maximaler Strom von 100 mA gemessen werden konnte. Es wird deutlich, dass durch die Verwendung eines Kühlkörpers ohne Erdung 2/3 des maximalen Common-Mode-Stromes für diese Pulsform vermieden werden können.

4 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Kühlkörper aus der elektrisch nicht leitenden Keramik Aluminiumnitrid mit einem Kühlkörper aus Aluminium verglichen. Beide Kühlkörper wurden zur Verwendung mit bis zu vier Leistungs-MOSFETs im TO-247-Gehäuse mit einer Wasserkühlung konzipiert. Es konnte gezeigt werden, dass die thermische Leistungsfähigkeit des Aluminiumnitrid-Kühlkörpers mindestens auf dem Niveau des Aluminium-Kühlkörpers liegt. Die Vorteile des Aluminiumnitrid-Kühlkörpers zeigen sich im erheblich geringeren Ableitstrom, da keine Erdung notwendig ist. Dies kann Einsparungen beim Netzfilter ermöglichen, durch welche Bauraum, Masse und Kosten optimiert werden können. Dies kann z. B. für kompakte Wandler auf Galliumnitrid-Basis einen erheblichen Vorteil darstellen, da hier der Netzfilter durch die Common-Mode-Drosseln deutlich mehr Bauraum und Masse beiträgt als die Leistungselektronik selbst. Weiterhin ist es nicht notwendig, eine elektrische Isolierung zwischen MOSFET und Kühlkörper zu verwenden. Auf der anderen Seite wurde festgestellt, dass der Aluminiumnitrid-Kühlkörper die Abstrahlung im Vergleich zu einem geerdeten Kühlkörper in Abhängigkeit von der

Systemimpedanz durch eine Verbesserung der Impedanzanpassung erhöhen kann. Auch sind die Herstellungskosten für einen solchen Keramikkühlkörper deutlich höher und die Geometrie ist stark eingeschränkt. Insgesamt stellt der Kühlkörper aus Aluminiumnitrid einen interessanten Ansatz für Systeme dar, welche stark hinsichtlich des Bauraums und der Masse optimiert werden müssen.

Literatur

- [1] A. Dolente, U. Reggiani, and L. Sandrolini. Comparison of Radiated Emissions from Different Heatsink Configurations. Proceedings of VI International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology: June 21 - 24, 2005, Saint-Petersburg, 2005. OCLC: 254933504.
- [2] K. Kostov, J. Rabkowski, and H.-P. Nee. Conducted EMI from SiC BJT Boost Converter and its Dependence on the Output Voltage, Current, and Heatsink Connection. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, 2013.
- [3] L. Rong and Z. Lin-Chang: Heatsink grounding effect on radiated emission of electronic device. 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2002.
- [4] N.J. Ryan, B. Chambers, and D.A. Stone: FDTD modeling of heatsink RF characteristics for EMC mitigation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44(3):458–465, August 2002.
- [5] S. Fahlbusch, U. Mütter, K. Hoffmann: Analysis of SiC-MOSFETs utilised in Hard Switching Inverter Topologies with Switching Frequencies up to 1 MHz, PCIM Europe 2015, Nürnberg, 19.-21. Mai 2015
- [6] C. E. Brench. Heatsink Radiation as a Function of Geometry. Proceedings of Compatibility in the loop: Chicago 1994 ; IEEE International Symposium on EMC, August 22 - 26 1994, 1994. OCLC: 180504054.
- [7] Y. Arien, P. Dixon, M. Khorrami, A. Degraeve, and D. Pissort. Study on the Reduction of Heatsink Radiation by Combining Grounding Pins and Absorbing Materials. Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2015): [joint conference with EMC Europe]; Dresden, Germany, 16 - 22 August 2015, 2015.
- [8] A. U. Bhoje and P. Sochoux. A Study of Grounded-Heatspreader for EMI Mitigation of ASIC IC Package. Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: [2008 IEEE EMC] ; Detroit, MI, 18 - 22 August 2008, 2008.
- [9] K. Fujimoto, H. Morishita: Modern Small Antennas, Cambridge University Press, New York, 2013
- [10] F. Strauß: Grundkurs Hochfrequenztechnik, Eine Einführung. 2. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016