

# Auswirkungen von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von ICs

M. Sc. Maik Rogowski<sup>1</sup>, [rogowski@geml.uni-hannover.de](mailto:rogowski@geml.uni-hannover.de)  
Dipl.-Ing. Tim Peikert<sup>1</sup>, [peikert@geml.uni-hannover.de](mailto:peikert@geml.uni-hannover.de)  
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe<sup>1</sup>, [garbe@geml.uni-hannover.de](mailto:garbe@geml.uni-hannover.de)  
Dr. Stefan Potthast<sup>2</sup>, [stephanpotthast@bundeswehr.org](mailto:stephanpotthast@bundeswehr.org)

<sup>1</sup> Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik,  
Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Deutschland  
<sup>2</sup> Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien ABC-Schutz,  
Humboldtstraße 100, 29633 Munster, Deutschland,

## 1 Einleitung

Mikrocontroller werden in modernen IT Netzwerken, der Industrie, Infrastrukturen und vielen weiteren Bereichen eingesetzt und sind heutzutage so leistungsstark, dass an diesen Mikrocontrollern zusätzliche Kühlkörper angebracht werden müssen zur Ableitung der entstehenden Verlustwärme. Die Hersteller dieser Kühlkörper haben viele unterschiedliche Designs entwickelt, um dies möglichst effizient zu gestalten. Jedoch werden die elektromagnetischen Eigenschaften dieser Kühlkörper meist nicht berücksichtigt. So wirken diese als mögliche Antennen und können Störungen in der Funktion des Mikrocontrollers verursachen.

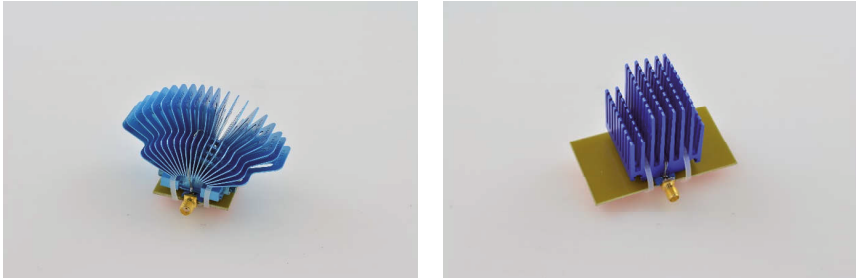
In dieser Arbeit soll der Einfluss von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von ICs untersucht werden. Dazu werden die Kühlkörper, wie von Genender in [3] beschrieben, als unbeabsichtigte Empfänger definiert. Zunächst soll die Richtcharakteristik unterschiedlicher Kühlkörper bestimmt werden. Hierfür sollen diese in der GTEM-Zelle mit einem Netzwerkanalysator untersucht werden. Anschließend soll eine Testschaltung entwickelt werden, die mit und ohne Kühlkörper in der GTEM-Zelle mit elektromagnetischen Feldimpulsen beaufschlagt werden, um den Einfluss von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von Mikrocontrollern zu untersuchen.

In dem folgenden Paper wird auf den Messaufbau und die, aus den Messungen bestimmten, Richtcharakteristiken der Kühlkörper eingegangen. Anschließend wird der Messaufbau der Testschaltung zu Untersuchung des Einflusses der Kühlkörper auf die Ausfallwahrscheinlichkeit von ICs beschrieben und die Ergebnisse präsentiert.

## 2 Messung der Richtcharakteristik von Kühlkörpern

Kühlkörper vermeiden die Überhitzung und somit eine Beschädigung von Bauteilen, wie zum Beispiel ICs, da sie die Oberfläche dieser wärmeabgebenden Bauteile vergrößern. Um eine effiziente Wärmeleitfähigkeit zu gewährleisten bestehen diese Kühlkörper aus metallischem Material. Diese Eigenschaft erfüllt jedoch die Voraussetzung für das Einkoppeln von elektromagnetischen Felder in die Kühlkörper und verursacht somit Störungen von Bauteilen. Bisherige Untersuchungen betrachteten den Kühler als Sendeantenne und die daraus resultierende Störeinwirkung auf elektronische Komponenten in der Umgebung. Beispiele hierzu sind bei Williams [1] und Dawson [2] zu finden. In dieser Arbeit

wird der gegenteilige Aspekt betrachtet. Um den Einfluss, eines Kühlkörpers unter Beaufschlagung einer elektromagnetischen Störung auf die Funktionalität eines ICs zu untersuchen, wird dieser Kühlkörper als unerwünschter Empfänger definiert. Hierfür wird zunächst die Richtcharakteristik der Kühlkörper gemessen, welche in Abbildung 1 abgebildet sind. Diese Kühlkörper sind ähnlich zu herkömmlichen Antennenstrukturen. So weist der Fächerkühlkörper eine ähnliche Struktur zu einer Hornantenne und der Stufenstiftkühlkörper zu einer Dipolantenne auf, jeweils auf einer Kontaktfläche geerdet.



**Abbildung 1:** Fächerkühlkörper (links) und Stufenstiftkühlkörper (rechts)

## 2.1 Messaufbau zur Bestimmung der Richtcharakteristik

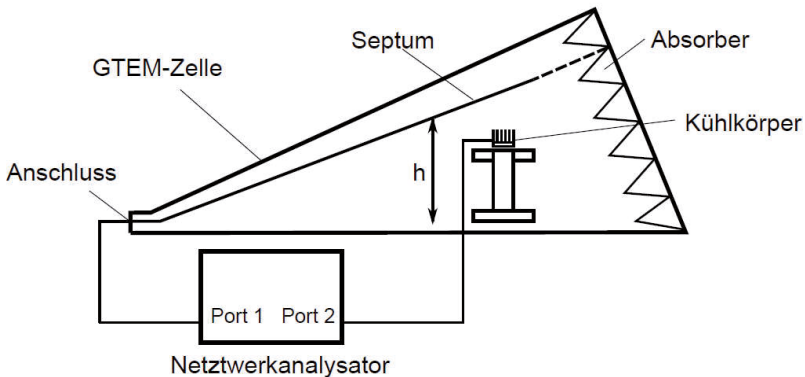
Der Messaufbau besteht aus einer GTEM-Zelle 1500, einem Vektor-Netzwerkanalysator ZVC der Firma Rohde und Schwarz und einem Signalverstärker der Firma Amplifier Research, Modell 10S1G4A. Dieser Verstärker verstärkt das Signal in einem Frequenzbereich von 800 MHz bis 4,2 GHz. An den Kühlkörper wurde ein SMA-Stecker angebracht, sodass zwischen dem Innenleiter des SMA-Steckers und dem Kühlkörper eine leitende Verbindung besteht. Dieser wurde anschließend an einer Styroporplatte befestigt und in eine Halterung aus Holz und Kunststoff eingeklemmt. Diese Halterung ermöglicht es, einen frei wählbaren Neigungswinkel von 0 - 360 Grad einzustellen (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Halterung aus Holz und Kunststoff mit frei wählbaren Neigungswinkel

An den Tx-Port 1 des Netzwerkanalysators wird der Input-Port des Verstärkers und an dessen Output-Port die GTEM-Zelle angeschlossen. Rx-Port 2 des Netzwerkanalysators wird mit dem Kühlkörper im Inneren der GTEM-Zelle verbunden. Als Leitungen wurden HF-Koaxkabel mit N-Stecker verwendet. Um die Richtcharakteristik zu messen ist es notwendig, dass der zu messende Kühlkörper um 360 Grad gedreht werden kann. Um dies zu verwirklichen wurde die Ansteuerung eines Drehtellers in der GTEM-Zelle realisiert. Die Ansteuerung erfolgt über eine am Institut entwickelte Matlab-GUI (Graphical User Interface) auf einem PC. Dieser ist über USB an eine Steuereinheit, einem LabJack

U6, angeschlossen. Sobald ein High-Signal vom PC gesendet wird steuert der LabJack U6 den Frequenzrichter an. Somit ist es möglich den Drehteller in jede beliebige Winkelposition zu drehen, wobei der Winkel von 0 Grad zum Port der GTEM-Zelle zeigt. Für eine ausführlichere Beschreibung wird auf die Arbeit von Menßen et. al. [4] verwiesen. Die Halterung mit dem Kühlkörper wird im Inneren der GTEM-Zelle auf den Drehteller gestellt. Der Netzwerkanalysator speist über den Tx-Port 1 ein gewobbeltes Signal mit einem vorgegebenen Frequenzbereich in die GTEM-Zelle ein, empfängt die Daten des Kühlkörpers und bestimmt durch Transmission und Reflexion die Empfangscharakteristik. In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau dargestellt.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau der Messung der Richtcharakteristik von Kühlkörpern

## 2.2 Richtcharakteristik verschiedener Kühlkörper

Die Richtcharakteristik wurde von folgenden Kühlkörpern unterschiedlicher Bauart aufgenommen, einen Stufenstift- und einen Fächerkühlkörper. Um die Messergebnisse besser vergleichen zu können, wurden bis auf den Frequenzbereich bei allen Messungen die gleichen Einstellungen in der Matlab-GUI verwendet. Es wurden in der Matlab-GUI folgende Einstellungen vorgenommen:

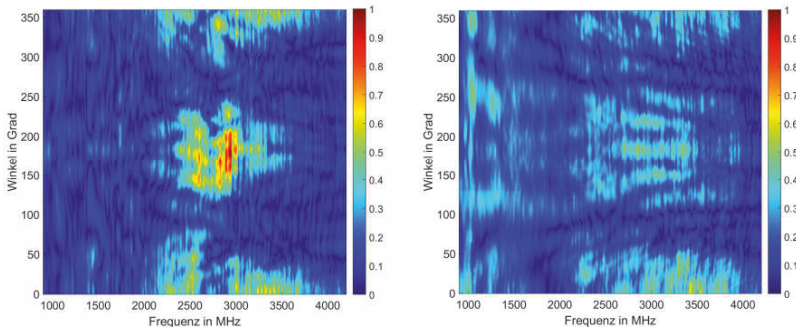
- Resolution Bandwidth = 100 kHz
- Sweeppoints = 1601 Punkte
- Range = 80 dBm
- Messpause = 2 s
- Schrittweite = 1 Grad

Die Schrittweite wurde auf 1 Grad festgelegt, sodass die Auflösung der Empfangscharakteristik sehr genau ist. Die Messungen der Richtcharakteristik wurden mit einem Verstärker im Frequenzbereich von 900 MHz bis 4,2 GHz durchgeführt.

Zunächst wurde der Fächerkühlkörper untersucht. Die Rippen dieses Kühlers sind fächerförmig angebracht und sind vergleichbar mit mehreren Hornantennen mit einem gemeinsamen Kontaktpunkt. Bei dieser Messung wurde der Fächerkühler so ausgerichtet, dass die Lamellen in Richtung des Ports zeigten. Im Frequenzbereich von 900 MHz bis 4,2 GHz

hat der Fächerkühler bei einer Frequenz von etwa 3,2 GHz und einem Winkelbereich von 330 - 50 Grad und von 150 – 230 Grad den höchsten Leistungsempfang.

Abschließend wurde der Stufenstiftkühlkörper untersucht. An diesem Kühlkörper wurden auf der gesamten Grundfläche stiftähnliche Strukturen angebracht. Bei diesem Kühlkörper sind die mittleren Stifte länger als die Äußeren. Dies ist vergleichbar mit vielen Dipolantennen auf einer Kontaktfläche. Die Stifte des Kühlkörpers zeigen bei dieser Messung in Richtung des Septums. Im Frequenzbereich von 900 MHz bis 4,2 GHz empfängt der Kühlkörper die meiste Leistung in einem Winkelbereich von 310 - 50 Grad und im Bereich von 120 - 220 Grad in einem Frequenzbereich von 2,5 GHz bis 3 GHz. Die Empfangscharakteristiken beider Kühlkörper sind in Abbildung 4 dargestellt.



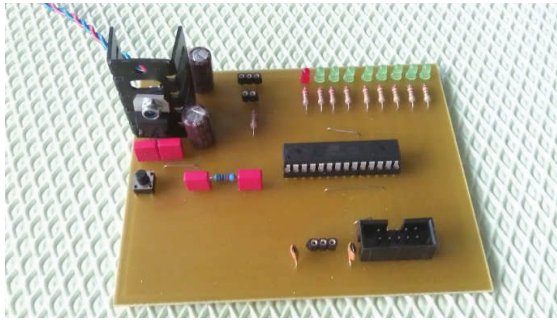
**Abbildung 4:** Empfangscharakteristik im Frequenzbereich von 900 MHz bis 4,2 GHz des Stufenstiftkühlkörper (links) und Fächerkühlkörper(rechts)

### 3 Untersuchung des Einflusses von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von ICs

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Einfluss der Empfangscharakteristik von Kühlkörpern auf einen IC. Dazu werden der Stufenstiftkühler und der Fächerkühler verwendet, da diese in ihrer Struktur herkömmlichen Antennen sehr nah kommen (siehe Abschnitt 2). Anhand einer Testschaltung soll das Ausfallverhalten eines Mikrocontrollers, unter Beaufschlagung von elektromagnetischen Feldimpulsen, mit und ohne Kühlkörper untersucht werden. Im Folgenden wird der Aufbau der Messung erläutert.

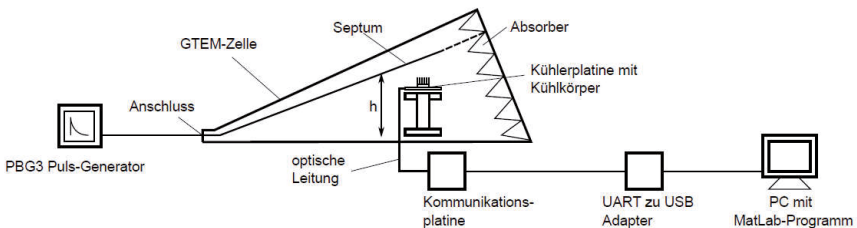
#### 3.1 Aufbau der Messung

Bei diesen Messungen wurde eine Testschaltung (Abbildung 5) auf einer Styroporplatte befestigt und in die Halterung, welche ebenfalls zur Messung der Richtcharakteristik verwendet wurde, eingespannt. Anschließend wurde die Halterung im Inneren der GTEM-Zelle, bei einer Höhe des Septums von ca. 1 m platziert. Am Anschluss der GTEM-Zelle wird eine Impulsquelle angeschlossen die einen doppeltexponentiellen Puls in die Zelle einspeist. Als Impulsquelle dient ein PBG3 oder PBG7 der Firma Kentech welche an einem Signalgenerator 33120A der Firma Hewlett Packard angeschlossen ist. Dieser triggert die Impulsquelle und gibt somit die Frequenz vor in der die Pulse in die GTEM-Zelle gespeist werden. Der PBG7 arbeitet mit einer maximalen Amplitude von 48 kV und der PBG3 mit 14 kV ohne Dämpfungsglieder.



**Abbildung 5:** Testschaltung zu Untersuchung des Einflusses von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von ICs

Auf dem Programm des Mikrocontrollers der Testschaltung sollen drei Werte durch Divisionsberechnungen bestimmt werden. Die Berechnung der Werte bewirkt, dass der Mikrocontroller im aktiven Zustand betrieben wird. Anschließend werden diese Werte sequentiell über den TXD Pin der UART-Schnittstelle zu einem Lichtwellenleiter, dem SFH756 der Firma Avago, gesendet. Am Anschluss des Lichtwellenleiters wird ein optisches Kabel angeschlossen, welches durch eine Öffnung am Boden der GTEM-Zelle nach außen geführt wird und mit dem Anschluss des Empfängers von optischen Signalen, dem SFH551V der Firma Avago, auf der Kommunikationsplatine verbunden ist. Der optischen Empfänger sendet die Werte, über den RXD Pin der UART-Schnittstelle an den Mikrocontroller der Kommunikationsplatine. Diese werden anschließend über die UART-Schnittstelle, an einen UART zu USB Adapter weiter geleitet, der mit einem PC verbunden ist (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Schematischer Aufbau der Messung des Ausfallverhaltens von Mikrocontrollern mit Kühlkörpern

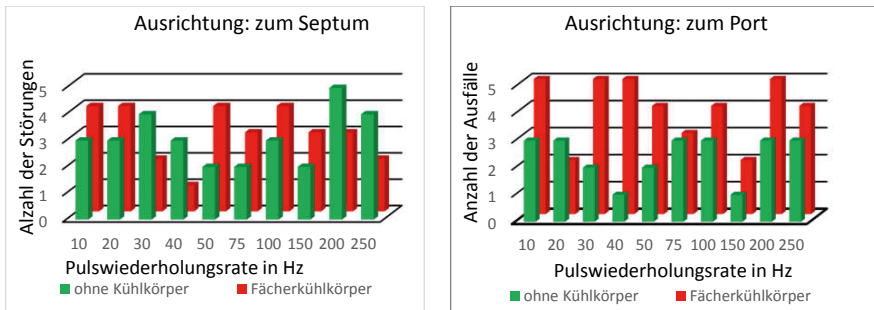
Die Auswertung der gesendeten Daten, die von der USB-Schnittstelle des PCs empfangen werden, erfolgt durch ein Matlabprogramm. Dieses Programm vergleicht die drei gesendeten mit den drei vorgegebenen Werten. Wird die Kühlerplatte, durch den elektromagnetischen Feldimpuls gestört, wird am PC eine Fehlermeldung ausgegeben. Hierbei werden drei Fehler unterschieden:

- Werte werden in einer falschen Reihenfolge gesendet,
- Falsche Werte werden gesendet,
- Keine Werte werden gesendet, Totalausfall.

Nach jeder Messung wird der Mikrocontroller resettet um mögliche Folgeschäden, die nach einer Störung auftreten können, zu vermeiden und die Funktionsfähigkeit des Mikrocontrollers zu gewährleisten.

### 3.2 Einfluss von Kühlkörpern auf das Ausfallverhalten von ICs

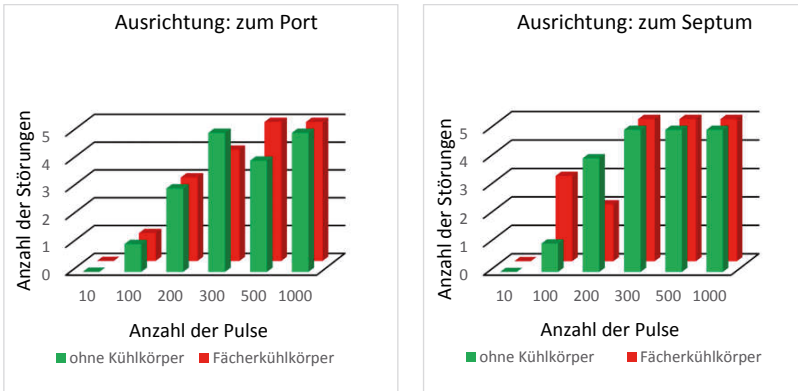
In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Kühlkörpers auf das Ausfallverhalten von Mikrocontrollern erläutert. Die Messreihen wurden im Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien in Munster durchgeführt. Der Anschluss der GTEM-Zelle wurde an einen PBG7 angeschlossen. Ein Signalgenerator triggert des PBG7 und dieser erzeugt einen doppelteponentialen Puls, der in die Zelle eingespeist wird. Am Signalgenerator kann die Anzahl der Pulse und die Frequenz eingestellt werden. In der ersten Messreihe wird die Anzahl der Pulse auf 100 festgelegt und verschiedene Frequenzen eingestellt, damit die Beaufschlagungsdauer variiert. Die Testplatine wird bei einer Septumhöhe von 1 m platziert, bei der eine Feldstärke von 32 kV/m gemessen wurde. Das Ausfallverhalten der Testplatine wurde ohne Kühlkörper und mit einem Fächerkühlkörper untersucht, bei der für jede eingestellte Frequenz, jeweils fünf Messungen durchgeführt wurden. Weiterhin wurde die Ausrichtung der Testplatine berücksichtigt, sodass die Oberseite der Platine zum Septum oder zum Port der GTEM-Zelle zeigte.



**Abbildung 7:** Diagramme der Ausfallwahrscheinlichkeiten der ersten Messreihe in Abhängigkeit der Pulswiederholungsrate

In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die Ausrichtung der Testplatine Auswirkungen auf das Ausfallverhalten hat. Beim Vergleich der Testplatine ohne Kühlkörper ist ersichtlich, dass Störungen häufiger auftreten, wenn die Oberfläche der Platine auf das Septum gerichtet ist. Dies kann an einem höheren Einfluss des elektronischen Feldes liegen, da zwischen Septum und Platine ein Spannungspotential entsteht. Dies sorgt für eine kapazitive Einkopplung und bildet eine hohe Störspannung. Weiterhin ist beim Vergleich der Testplatine mit Fächerkühlkörper und ohne Kühlkörper zu erkennen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit mit einem Kühlkörper bei der Ausrichtung zum Septum in etwa der Ausfallwahrscheinlichkeit ohne Kühlkörper entspricht und bei der Ausrichtung zum Port sogar höher ist. Die Schwere der Störungen bei der Platine ohne Kühlkörper ist jedoch höher, da es bei den Messungen ohne Kühlkörper öfter zu Totalausfällen des Mikrocontrollers kam. Dies könnte daran liegen, dass die Kühlkörper ohne Berücksichtigung der Richtcharakteristik auf dem Mikrocontroller befestigt wurden und somit eine Abschirmung vor elektromagnetischen Feldimpulsen erfolgte.

Die zweite Messreihe wurde ebenfalls im Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien in Munster durchgeführt. Der Anschluss der GTEM-Zelle wurde in dieser Messung an einen PBG3 angeschlossen. Der Signalgenerator wurde so eingestellt, dass eine feste Frequenz von 100 Hz vorgegeben und die Anzahl der Impulse erhöht wird. Die Kühlerplatte wird bei einer Septumshöhe von 0.5 m platziert. Daraus resultiert ein elektromagnetisches Feld mit einer Amplitude von 20 kV/m. In dieser Messung gelten die gleichen Definitionen für Fehlerzustände, wie in der ersten Messung. Die Ergebnisse der Messung wurden in die Tabelle 4.3 eingetragen. Untersucht wurde das Ausfallverhalten der Kühlerplatte mit Fächerkühlkörper und ohne Kühlkörper. Hierbei wurde jedoch die Richtcharakteristik des Fächerkühlkörpers berücksichtigt. Jede Messung wurde, wie in der ersten Messreihe, fünf Mal durchgeführt.



**Abbildung 8:** Diagramme der Ausfallwahrscheinlichkeiten der zweiten Messreihe in Abhängigkeit der Anzahl der Pulse

Aus den Ergebnissen der zweiten Messreihe in Abbildung 8 können einige Aussagen zur Ausfallwahrscheinlichkeit, die in der Ersten getroffen wurde, bestätigt werden. Beim Vergleich der Ausrichtung der Kühlerplatte ist die Ausfallwahrscheinlichkeit höher wenn die Oberfläche der Platine zum Septum zeigt. Des Weiteren wird ersichtlich, dass beim Vergleich der Fehlerzustände die Kühlerplatte mit Fächerkühlkörper öfter gestört wird als ohne Kühlkörper. Ebenfalls ist die Schwere der Störungen höher mit dem Kühlkörper, da es nur zu Totalausfällen der Kühlerplatte mit dem Fächerkühler kam. Des Weiteren ist ersichtlich, dass mit steigender Anzahl der Impulse, die Ausfallwahrscheinlichkeit ebenfalls steigt.

In einer dritten Messung sollten die notwendigen Feldstärken, die zur Störung des Mikrocontrollers auf der Kühlerplatte führen, untersucht werden. Die Messergebnisse wurden in die Tabelle 1 eingetragen. Dabei sind nicht die Feldstärken im Inneren der GTEM-Zelle gemeint, sondern die resultierenden Feldstärken bei der Einstellung der Amplituden am PBG3. Dazu wurde am Anschluss der GTEM-Zelle an einen PBG3 mit einstellbarer Amplitude angeschlossen, der wiederum mit einem Signalgenerator verbunden ist. Der PBG3 erzeugt einen doppel-exponentiellen Puls, der in die GTEM-Zelle eingespeist wird. Am Signalgenerator wird eine feste Frequenz von 10 Hz eingestellt. Im Gegensatz zu dem Signalgenerator, der in den ersten beiden Messungen verwendet wurde, triggert der PBG3 ohne Zeitintervall, sodass ein doppel-exponentieller Puls mit 10 Hz in die Zelle eingespeist wird. Die Testplatte wird zunächst bei einer Septumshöhe von 1 m platziert.

Bei dieser Messung wurden der Fächerkühlkörper und der Stufenstiftkühlkörper verwendet, die mit ihren Lamellen, beziehungsweise Stiften zum Septum gerichtet sind. Die Richtcharakteristik der Kühlkörper wurde bei dieser Messung ebenfalls beachtet. Nach der Messung bei einer Septumshöhe von 1 m, wird die Kühlerplatine zu einer Septumshöhe von 0,3 m verschoben und die Messung wiederholt.

**Tabelle 1:**

Kühlkörper	notwendige Feldstärke in kV/m bei einer Septumshöhe von 1 m	notwendige Feldstärke in kV/m bei einer Septumshöhe von 0,3 m
Ohne	Kein Ausfall	14 ; 12,8 ; 14
Fächerkühlkörper	11 ; 11 ; 11	10,4 ; 8 ; 6
Stufenstiftkühlkörper	12,2 ; 11 ; 11	10,4 ; 11 ; 10,4

Aus der Tabelle 1 ist deutlich erkennbar, dass die notwendige Feldstärke, die an einer Störquelle eingestellt werden müssen, bei Mikrocontrollern mit Kühlkörper viel geringer sein kann als bei Mikrocontrollern ohne Kühlkörper. Weiterhin fällt beim Vergleich der Kühlkörper auf, dass die Bauart der Kühlkörper ebenfalls einen Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit hat, da einige Bauarten eine höhere Antennenwirkung aufweisen.

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Kühlkörpern auf die Störfestigkeit von Mikrocontrollern untersucht. Zunächst wurden die Kühlkörper als unbeabsichtigte Empfänger definiert und die Richtcharakteristik verschiedener Kühlkörper in der GTEM-Zelle mit einem Netzwerkanalysator bestimmt. Anschließend wurden die Kühlkörper ausgewählt, welche die erfolgversprechendste Empfangscharakteristik aufweisen. Weiterhin wurde eine Testschaltung entwickelt, um in der GTEM-Zelle unter Beaufschlagung elektromagnetischer Feldimpulse mit und ohne Kühlkörper zu messen. Die Ergebnisse dieser Messungen haben gezeigt, dass Kühlkörper Einfluss auf das Ausfallverhalten von Mikrocontrollerschaltungen haben. Wird die Richtcharakteristik so ausgerichtet, dass die Kühlkörper die höchste Leistung empfangen, ist die Ausfallwahrscheinlichkeit höher als ohne. Im gegenteiligen Fall können die Kühlkörper den Mikrocontroller vor Störeinstrahlungen abschirmen, dass diese eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit ausweisen. Der Einfallswinkel ist dabei ein entscheidender Faktor, da dieser die Empfangscharakteristik beeinflusst. Ebenfalls ist die Bauform der Kühlkörper entscheidend, da diese die Antennenstruktur und -eigenschaften bestimmen.

## 5 Literaturangaben

- [1] T. Williams, *Characterisation of emissions due to power electronics heatsinks*, Technical report, 2-6. Sept.2013
- [2] S.J. Porter, A. Nothofer, J.E. Will, S. Hopkins, J.F. Dawson, A.C. Marvin, *The effect of grounding on radiated emissions from heatsinks*, Technical report, 2001
- [3] E. Genender, *Risikoanalyse von Systemen bei elektromagnetischer Störbeaufschlagung*, Shaker Verlag, Aachen 2012
- [4] B. Menßen, T. Peikert, H. Garbe, *Automatisiertes Messverfahren zur Bestimmung von Antennendiagrammen in einem TEM Wellenleiter*, EMV 2016, Veröffentlichung angenommen