

Entwicklung von Direct Power Injection Platinen zur Bestimmung der Beeinträchtigung von Mikrocontrollern aufgrund von IEMI bis 1 GHz in Leiterbahnstrukturen

M. Sc. Felix Burghardt, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik

Johannes Bohse, Hochschule Hannover

Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik

1 Einleitung

Die Bestimmung des Risikos eines Systems vor bewusst hervorgerufenen elektromagnetischen Beeinflussungen (engl.: intentional electromagnetic interferences, kurz: IEMI) ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da das Risiko individuell für jede Untersuchung entsprechend dem gewählten Szenario ermittelt werden muss. Zudem wächst nach Radasky, Baum und Wik [1] die Bedrohung für solche Attacken, weshalb eine intensivere Auseinandersetzung mit dem IEMI Risiko angestrebt werden muss.

Von der Vielzahl an möglichen IEMI-Szenarien ist eines die Bestimmung der Störfestigkeit von Mikrocontrollern gegenüber leitungsgeführter Störsignale. Um eine solche Untersuchung jedoch durchführen zu können, ist eine Prüfplatine notwendig, welche in dieser Arbeit vorgestellt wird.

Die Entscheidung für dieses Szenario ist wie folgt begründet: Durch Untersuchungen von Nitsch et al. [2] ist bekannt, dass elektromagnetische Signale mit einer Frequenz zwischen 100 MHz und 1 GHz Leiterbahnstrukturen anregen. Da Mikrocontroller sehr kleine Strukturgrößen aufweisen (für gewöhnlich nur wenige Zentimeter), sind die im Inneren entstehenden Ströme bzw. Spannungen, welche durch eingekoppelte elektromagnetische Felder unter 1 GHz verursacht werden, vernachlässigbar [3]. Bei der Wahl eines entsprechenden Szenarios kann somit ein Mikrocontroller als eine Einheit angesehen werden, die lediglich durch anliegende Ströme und Spannungsdifferenzen an den Anschlusspins des Mikrocontrollers gestört werden kann.

Diese Arbeit beschreibt den Aufbau solcher Mikrocontroller-Prüfplatinen. Die vorgestellte Platine kommt mit 2 Layern aus und kann mit einfachen Mitteln sowie mit geringem konstruktiven Aufwand nachgebaut werden. Dazu wird zum einem das Augenmerk auf die Einspeisung des Störsignals in den Mikrocontroller gelegt und der Einfluss verschiedener passiver Bauelemente aufgezeigt. Anschließend wird die Herangehensweise erläutert, mit der die verschiedenen Betriebszustände der Pins ermittelt werden und wie die entsprechende Peripherie auszulegen ist. Zusätzlich wird auf den Schaltungsentwurf eingegangen, welcher die Peripherie vor den Störsignalen schützt. Ein weiteres Gebiet der Arbeit ist die Detektierung der Störungen des Mikrocontrollers, welche durch die Störsignale ausgelöst werden sollen. Der Mikrocontroller wird dabei über eine Lichtwellenleiteranordnung mit einem weiteren Mikrocontroller verbunden, welcher den Prüfling permanent überwacht.

2 Normativer Aufbau

In den Normen DIN EN 62132-4 [4] sowie DIN EN 62215-3 [5] ist ein Prüfaufbau sowie verschiedene Prüfprozeduren beschrieben, mit denen leitungsgeführte Störfestigkeitsuntersuchungen mit kontinuierlichen als auch transienten Signalen durchgeführt werden können (Direct Power Injection, kurz: DPI).

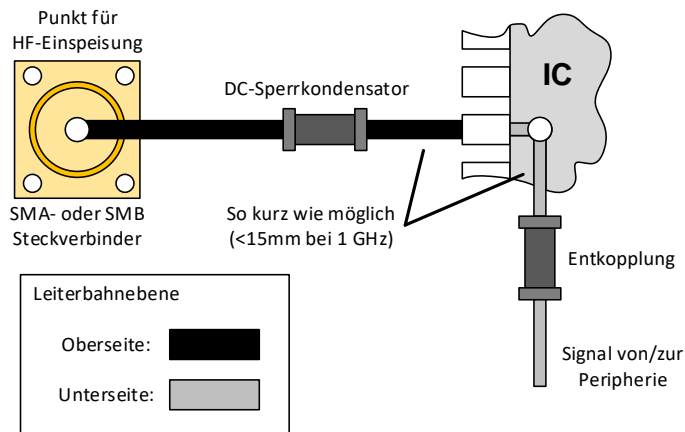


Bild 1: Schematischer Aufbau von DPI (basierend auf DIN EN 62132-4)

Bild 1 zeigt den grundlegenden Aufbau einer DPI-Prüfumgebung. Auf einer Platine wird mittels eines SMA- bzw. SMB-Steckverbinders das Signal der Störquelle eingespeist. Anschließend erfolgt die Übertragung des Signals auf der Platine. Damit keine Impedanzsprünge und den dadurch einhergehenden Reflexionen auf der Leiterbahn auftreten, muss diese einen Wellenwiderstand von 50Ω aufweisen, da dieser Wert dem Wellenwiderstand der Signalquelle und weiterer Komponenten des Prüfaufbaus entspricht. Die Störsignaleinkopplung in den Pin des Mikrocontrollers erfolgt anschließend mittels eines DC-Sperrkondensators. Um die notwendigen Elemente, bspw. die Spannungsversorgung, vor dem Störsignal zu schützen ist nach DIN EN 62132-4 eine Entkopplungsdrossel mit einer Impedanz von $Z_L = 400 \Omega$ vorgesehen.

3 Prüfling

Das in dieser Arbeit vorgestellte Platinendesign orientiert sich an dem Mikrocontroller ATtiny85 der Firma Microchip. Der Prüfling besitzt acht Pins, von denen sechs als Ein- und Ausgänge programmierbar sind. Darüber hinaus kann der Mikrocontroller mittels eines internen ADCs analoge Signale in digitale umwandeln und über verschiedene Kommunikationsschnittstellen mit anderen Mikrocontroller kommunizieren [6].

In Bild 2 ist die Pinbelegung des ATtiny85 abgebildet, welche für diese Arbeit relevant ist. Der rot markierte Pin 8 (V_{CC}) sowie Pin 4 (GND) sind für den Betrieb des Mikrocontrollers essenziell und müssen mit der Spannungsversorgung verbunden sein. Pin 1 (Reset) ist für den Reset des Mikrocontrollers erforderlich und wird auch als solcher in dieser Arbeit ausschließlich verwendet. Die verbleibenden Pins 2, 3, 5, 6 und 7 können als digitale Ein- oder als Ausgänge geschaltet werden. Zudem besteht die Möglichkeit ein

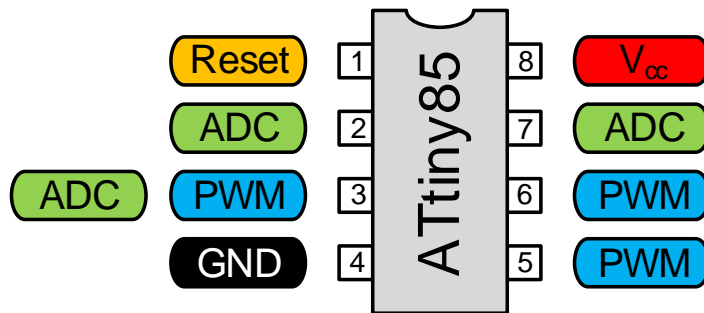


Bild 2: Pinbelegung des ATtiny85 (Auswahl)

pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) zu erzeugen und dieses an den Pins 3, 5 und 6 auszugeben. Darüber hinaus können Pin 2, 3 und 7 analoge Signale aufnehmen.

Durch die Vielseitigkeit dieser Mikrocontroller können verschiedene Aspekte moderner Schaltungen, bspw. Verarbeitung digitaler sowie analoger Eingabesignale, Erzeugung von PWM-Ausgaben, Kommunikation mit anderen Mikrocontrollern per I²C bzw. SPI, realisiert werden. Die Tatsache, dass die Anzahl der Pins sehr gering ist (womit der Untersuchungsaufwand reduziert wird) hat den Entschluss gefestigt diesen Mikrocontroller zu untersuchen.

4 Hochfrequentes Verhalten diskreter Bauelemente

Da Leiterbahnen und diskrete passive Bauelemente ein frequenzabhängiges Verhalten aufweisen, wurden deren parasitären Eigenschaften bei der Auslegung der Testplatten berücksichtigt.

Nach Bild 1 muss die Leiterbahn zwischen dem Einspeisepunkt und dem DC-Sperrkondensator eine Impedanz von 50 Ω aufweisen um einen Impedanzsprung und die dadurch einhergehenden Reflexionen auf der Leiterbahn zu vermeiden. Ob eine Leiterbahn den Anforderungen entspricht, kann mittels eines Netzwerkanalysators überprüft werden. Dazu wird der S₂₁-Frequenzgang einer Streifenleitung ermittelt. Liegt der Frequenzgang bei konstanten 0 dB und treten keine Resonanzen auf, so ist auch die Impedanz der Leitung konstant. Da die Impedanz des Netzwerkanalysators 50 Ω beträgt, erschließt sich daraus, dass eine solche Streifenleitung ebenfalls eine Impedanz von 50 Ω aufweist.

In dieser Arbeit wird eine 50 Ω-Leiterbahn auf Basis einer doppelseitigen mit Kupfer beschichteten Epoxyd-Platine hergestellt. Die Leiterbahn wird dabei aus dem Substrat freigefräst. Ein Überblick des S₂₁-Frequenzgangs von 60 mm langen Streifenleitungen mit unterschiedlichen Leitungsbreiten ist in Bild 3 dargestellt.

Dem Bild ist zu entnehmen, dass bei dem gewählten Platinenmaterial bis 1 GHz eine Leiterbahnbreite von 2,70 mm die geringste Dämpfung aufweist. Da die Norm DIN EN 62132-4

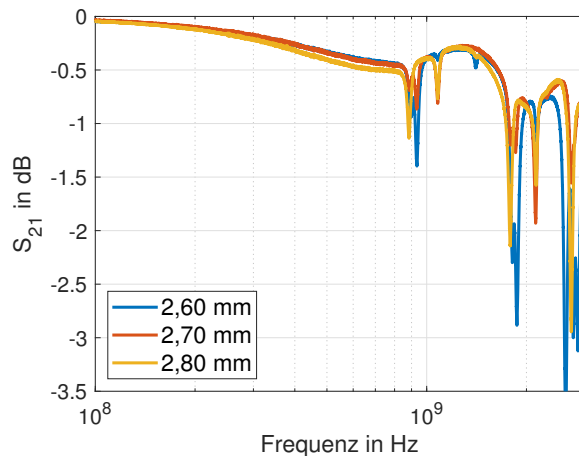


Bild 3: S_{21} -Frequenzgänge von drei unterschiedlich breiten Streifenleitungen

eine maximale Dämpfung von 3 dB gestattet, ist die maximale Abweichung von 0,86 dB vertretbar.

Das Störsignal wird mittels eines DC-Sperrkondensators auf den Anschlusspin des Mikrocontrollers eingekoppelt. Da die Norm DIN EN 62215-3 je nach Pin-Typ verschiedenste Werte von Koppelkondensatoren empfiehlt (von 1 pF bis 1 nF) und die Norm DIN EN 62132-4 einen Wert von 6,8 nF vorschreibt, ist in Bild 4 das Übertragungsverhalten dieser Kondensatoren gegenübergestellt. Die Messungen wurden an SMD-Kondensatoren (Bauform: 1206) durchgeführt.

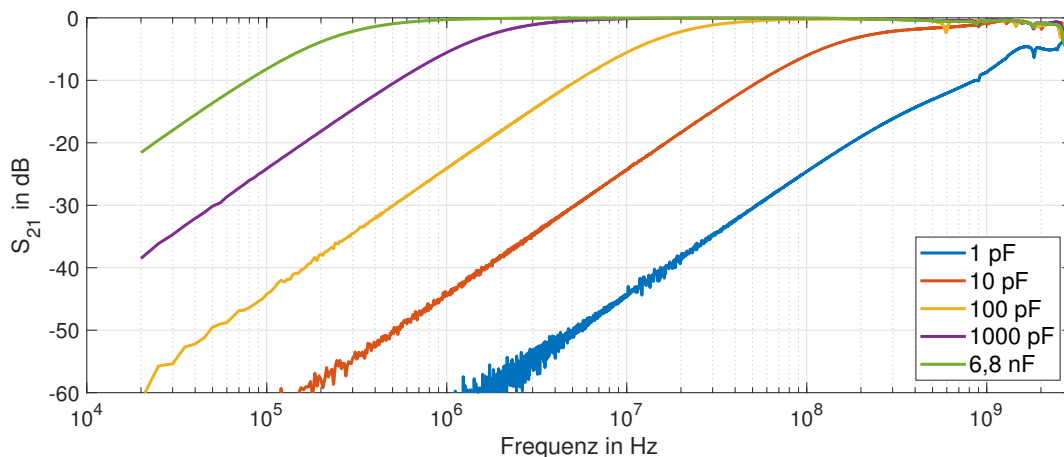


Bild 4: S_{21} -Frequenzgänge verschiedener Kondensatoren

Es ist deutlich zu erkennen, dass Kondensatoren mit einer geringen Kapazität niedrige Frequenzen stärker dämpfen als Kondensatoren mit einer höheren Kapazität. Die 3 dB-Grenzfrequenz des 1 nF-Kondensators liegt bei 1,6 MHz, die des 6,8 nF-Kondensators bei 240 kHz. Die passende Kondensatorwahl für die DPI-Platine hängt somit von dem verwendeten Störsignal ab. Besitzt dieses Störsignal nur hohe Frequenzanteile, dann können DC-Sperrkondensatoren mit einer kleineren Kapazität verwendet werden. In Anbetracht dessen, dass die DPI-Platine für Signale welche ein breites Frequenzspektrum aufweisen (und nur Frequenzanteile bis maximal 1 GHz besitzen) ausgelegt wird, erübrigt

sich die Wahl von zu kleinen Kondensatoren. Daher werden 6,8 nF-Kondensatoren als DC-Sperrkondensatoren verwendet, welche auch die Norm DIN EN 62132-4 empfiehlt.

Damit ein Störsignal nicht die peripheren Schaltungen, welche für die Funktion des Mikrocontrollers essentiell sind, beeinträchtigt, müssen diese von der Zuleitung entkoppelt werden. Die Normen DIN EN 62132-4 und DIN EN 62215-3 verweisen dabei auf ein Bauteil, welches eine Impedanz $>400 \Omega$ besitzen soll. Da die Dämpfung von Widerständen $>400 \Omega$ den Strom bei 5 V Betriebsspannung auf weniger als 12,5 mA begrenzen und die Impedanz einer Induktivität frequenzabhängig ist, sind diese Bauelemente nicht für alle Anwendungsfälle geeignet. Bild 5 zeigt das Übertragungsverhalten realer Induktivitäten.

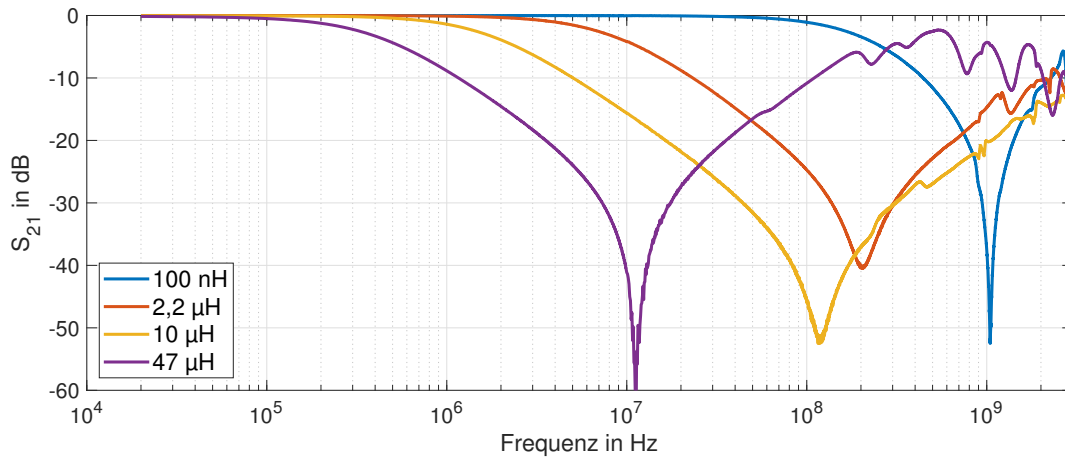


Bild 5: S_{21} -Frequenzgänge verschiedener Induktivitäten

Die Verringerung der Dämpfungen aller Induktivitäten bei höheren Frequenzen, wird durch die parasitären Kapazitäten verursacht. Dieses schmalbandige Bandsperr-Verhalten verhindert den Einsatz von Induktivitäten als reine Tiefpassglieder. Davon ausgehend wird stattdessen, zum Schutz der peripheren Schaltungen auf der DPI-Platine, eine Kombination von Kondensatoren und Induktivitäten verwendet, um eine breitbandige Bandsperrung zu erhalten. Die 20 dB-Frequenzgrenzen der in dieser Arbeit verwendeten Bandsperrung liegt zwischen 3 MHz und 1,8 GHz. Durch diese Wahl wird ein ausreichend breites Frequenzspektrum gedämpft.

5 Peripherie-Schaltungen

Bei den auf der DPI-Platine aufgetragenen peripheren Schaltungen muss die Anzahl an verwendeten Bauelementen so gering wie möglich ausfallen. Jedes zusätzliche Bauteil kann sonst durch das Störsignal beeinträchtigt werden und dadurch die Messung beeinflussen. Aus diesem Grund dürfen nur Schaltungen bzw. Bauelemente welche essentiell notwendig sind auf die DPI-Platine aufgebracht werden. Neben der Spannungsversorgung erfolgt im Folgenden auch die Beschreibung der Schaltungen zur Bereitstellung von Messsignalen und für die Kommunikation.

Die Energieversorgung stellt eine 9 V-Block Batterie zur Verfügung. Da die Betriebsspannung des ATtiny85 5 V beträgt, wird die Versorgungsspannung mit dem Linearregler

L7805CV auf 5 V stabilisiert. Zur Spannungsstabilisierung sind vom Hersteller zwei Kondensatoren vorgesehen. Es ist Praxis, den V_{cc} -Eingang eines Mikrocontrollers vor Spannungsschwankungen ebenfalls mit Kondensatoren zu stabilisieren. Aus diesem Grund werden die beiden $4,7 \mu\text{F}$ und 100 nF Kondensatoren und der V_{cc} -Eingang als eine Einheit angesehen. Bild 6 veranschaulicht die Peripherie, welche die 5 V Betriebsspannung für den Mikrocontroller und alle weiteren Peripherien zur Verfügung stellt. Das Störsignal wird über den $6,8 \text{ nF}$ DC-Sperrkondensator in die Schaltung eingekoppelt.

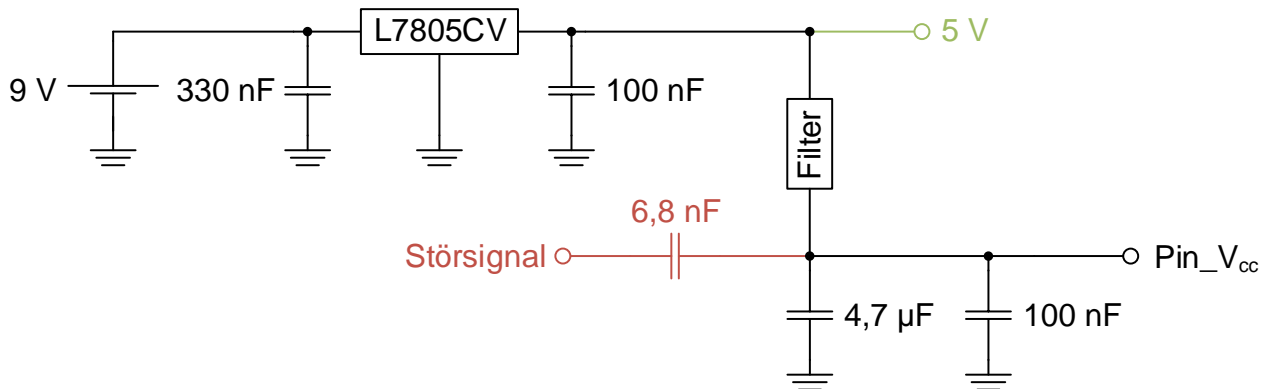


Bild 6: Schaltplan der Peripherie „Spannungsversorgung“

Der Reset-Pin wird laut dem Datenblatt [6] mit einem $10 \text{ k}\Omega$ Pull-Up Widerstand auf 5 V angehoben. Gleichzeitig schützt der Widerstand die Spannungsversorgung vor Störsignalen. Da die Verbindung vom GND-Pin zur Masse niederohmig ausgelegt sein muss, wird dieser über eine Filterschaltung mit Masse verbunden. Als analoges Messsignal empfiehlt es sich einen Spannungsteiler mit zwei hochohmigen Widerständen ($10 \text{ k}\Omega$) zu bilden.

Die Kommunikation des ATtiny85 mit dem Benutzer erfolgt mittels einer optischen Übertragung. Als Sender dient eine LED mit nachgeschaltetem $1 \text{ k}\Omega$ Widerstand. Dieser großzügig ausgelegte Vorwiderstand schützt zugleich die LED vor den Störsignalen. Als optischer Empfänger wird das Bauelement „SFH551V“ verwendet, welches ab einem gewissen Helligkeitswert das Ausgangspotential gegen Masse zieht (invertierender Schmitt-Trigger). Bild 7 zeigt den Aufbau dieser Peripherie.

Damit die Signale automatisiert ausgewertet werden können, erfolgt die Auswertung durch einen Mikrocontroller, welcher an einen Computer angeschlossen ist. Der Mikrocontroller dient dabei als I/O-Schnittstelle und ist durch die optische Kommunikation mit der DPI-Prüfplatine galvanisch getrennt. Da die Schnittstelle nicht mit den Störsignalen der DPI-Prüfplatine in Kontakt tritt, bedarf es keiner besonderen Anforderung an das Platinendesign.

6 Variationen von DPI-Prüfplatinen

Die Pins 2, 3, 5, 6 und 7 des ATtiny85 können unterschiedliche Funktionen wahrnehmen. Da je nach Pin-Modi andere Schaltkreise im Inneren des Mikrocontrollers zur Anwendung

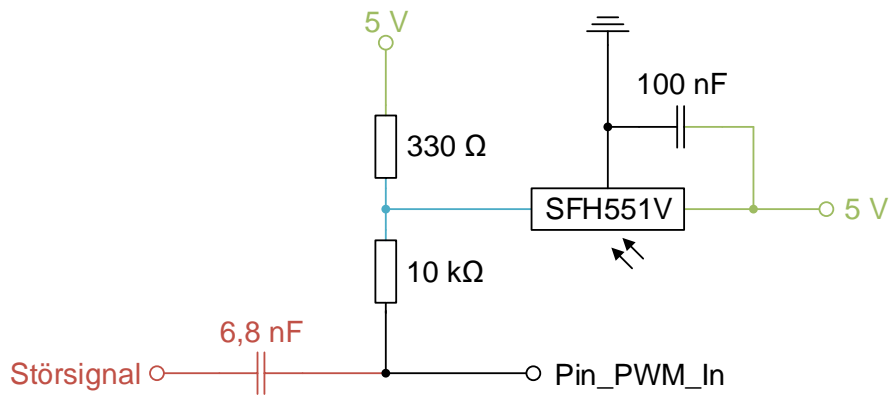


Bild 7: Schaltplan der Peripherie „Empfänger“

kommen, kann das Verhalten dieses Pins bei einem Störsignal unterschiedlich sein. Aus diesem Grund bedarf es verschiedener Konfigurationen der DPI-Prüfplatine. Tabelle 1 zeigt eine Auflistung unterschiedlicher DPI-Prüfplatinen, welche alle Funktionen der Pins abdecken.

Tabelle 1: Auflistung von DPI-Prüfplatinen

Konfiguration	Pin	Arduino Befehl	Verschaltung
A	2	analogRead	Analoger Eingang
	3	analogRead	Analoger Eingang
	5	digitalRead	Empfänger
	6	analogWrite	Sender
	7	analogRead	Analoger Eingang
B	2	digitalRead	Empfänger
	3	analogWrite	Sender
	5	analogWrite	Sender
	6	analogWrite	Sender
	7	digitalRead	Empfänger
C	2	digitalWrite	Sender
	3	digitalRead	Empfänger
	5	digitalRead	Empfänger
	6	digitalRead	Empfänger
	7	digitalWrite	Sender

Zur Überprüfung aller Pins sind somit drei unterschiedliche DPI-Prüfplatinen erforderlich.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Normen noch einige Besonderheiten zu dem Aufbau einer DPI-Prüfplatine vorschreiben. Zu einem gilt eine strikte Trennung der beiden Platinenebenen. So soll sich auf einer Ebene nur der Signalpfad der Störungsübertragung befinden, auf der anderen die peripheren Schaltungen. Zudem muss im Umkreis von 1 cm immer eine Verbindung zwischen den beiden Masseflächen hergestellt sein. Da ein IC-Sockel eine nicht zu vernachlässigende Induktivität besitzt (nach Norm

DIN EN 62132-4 ca. 10 nH), ist darüber hinaus eine Verwendung bei Störsignalen hoher Frequenzen nicht ratsam.

7 Zusammenfassung

Die Anforderungen an einer Mikrocontroller-Prüfplatine für leitungsgeführte Störgrößen sind durch die Normen DIN EN 62132-4 [4] sowie DIN EN 62215-3 [5] definiert. Die Realisierung einer solchen Platine bedarf einer Auslegung, welche in dieser Arbeit anhand des Mikrocontrollers ATtiny85 gezeigt wurde. Zunächst erfolgte eine Analyse des Prüflings und dessen Anforderungen an eine Prüfplatine. In Hinblick auf das hochfrequente Verhalten passiver Bauelemente wurden verschiedene Peripherieschaltungen vorgestellt, welche sowohl mit dem Prüfling in Kontakt stehen, als auch unempfindlich gegenüber den Störsignalen sind. Abschließend erfolgte die Vorstellung unterschiedlicher Prüfplatinen-Konfigurationen um den unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten mancher Pins gerecht zu werden.

Literatur

1. RADASKY, William A; BAUM, Carl E; WIK, Manuem W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004, Jg. 46, Nr. 3, S. 314–321. Abgerufen unter DOI: 10.1109/TEMC.2004.831899.
2. NITSCH, Daniel; FRIEDHOFF, Hans; MAACK, Jörg; SABATH, Frank; CAMP, Michael; GARBE, Heyno. UWB and EMP susceptibility of modern microprocessor boards. In: *EMC Europe 2000 Brügge*. 2000, S. 345–350. ISBN 9076019142.
3. CAMP, Michael. *Empfindlichkeit elektronischer Schaltungen gegen transiente elektromagnetische Feldimpulse*. Shaker, 2004. ISBN 3-8322-3504-3. Dissertation.
4. DIN EN 62132-4:2006. *Integrierte Schaltungen - Messung der elektromagnetischen Störfestigkeit im Frequenzbereich von 150 kHz bis 1 GHz - Teil 4: Verfahren direkter Einspeisung der HF-Leistung (IEC 62132-4:2006)*. 2006-10. Abgerufen unter DOI: 10.31030/9759826.
5. DIN EN 62215-3:2014. *Integrierte Schaltungen - Messung der Störfestigkeit gegen Impulse - Teil 3: Asynchrones Transienteneinspeisungs-Verfahren (IEC 62215-3:2013)*. 2014-04.
6. ATMEL CORPORATION. *Atmel ATtiny25, ATtiny45, ATtiny85 Datasheet* [online]. 2013-08 [aufgerufen am 2019-11-01]. Abgerufen unter: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85_Datasheet.pdf.