



**Hochschule Magdeburg-Stendal**  
**Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)**  
**Institut für Elektrotechnik**

# **Bachelorarbeit**

**zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“  
im Studiengang Elektrotechnik mit der Vertiefung Automation  
und Kommunikation**

**Thema: Evaluierung der elektrischen und magnetischen Nahfeldmes-  
sung zur Identifikation nicht authentischer elektrischer Halb-  
leiterkomponenten**

**Eingereicht von: Adrian Juwien**

**Angefertigt für: Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen**

**Matrikel: 2019**

**Ausgabetermin: 31.01.2024**

**Abgabetermin: 17.03.2024**

**Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher**

**Betrieblicher Betreuer: Herr Michael Kögel, M.Sc.**

.....  
1. Prüfer

.....  
2. Prüfer



## Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung .....	III
Danksagung .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	V
Formelzeichenverzeichnis .....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung in die Thematik .....	1
1.2 Motivation und Relevanz.....	2
1.3 Problemstellung und Zielsetzung.....	3
1.4 Fraunhofer-Institut IMWS/CAM.....	4
1.5 Aufbau der Bachelorarbeit .....	5
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	7
2.1 Allgemeine Grundlagen .....	7
2.1.1 Integrierte Schaltkreise.....	7
2.1.2 Fälschungsproblematik in der Elektronik.....	8
2.1.3 Vertrauenswürdige Elektronik und Hardwareschutz .....	10
2.2 Theoretische Grundlagen .....	11
2.2.1 Elektrisches und magnetisches Nahfeld.....	11
2.2.2 Elektrische und magnetische Nahfeldsonden .....	16
2.2.3 Digitale Signalverarbeitung.....	18
2.3 Normung und Stand der Technik .....	21
2.3.1 Normung DIN IEC/TC 61967-3.....	21
2.3.2 Fälschungserkennung durch Röntgenbildgebung .....	22
2.3.3 Fälschungserkennung durch Laser-Entkapselung und Mikroskopie .....	25
3 Material und Methoden.....	27
3.1 Konzeption.....	27
3.2 Komponenten .....	28
3.2.1 Konstruktion der elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden .....	28
3.2.2 Sondenpositionierungssystem.....	35
3.2.3 Datenerfassungssystem .....	38
3.2.4 Benutzerschnittstelle .....	41
3.3 Proben .....	44
3.3.1 Mikrostreifenleitung .....	44
3.3.2 STM32-Mikrokontroller .....	46

3.3.3 FTDI FT232RL.....	49
3.4 Versuchsdurchführung .....	52
3.4.1 Messaufbau .....	52
3.4.2 Messung Mikrostreifenleitung .....	54
3.4.3 Messung STM32-Mikrokontroller .....	56
3.4.4 Messung FTDI FT232RL .....	57
3.5 Frequenzempfindlichkeit und Kalibrierung der Nahfeldsonden .....	59
3.5.1 Frequenzempfindlichkeit.....	59
3.5.2 Kalibrierung .....	61
4 Messergebnisse .....	64
4.1 Mikrostreifenleitung.....	64
4.2 STM32-Mikrokontroller .....	67
4.2.1 STM32F103C6T6 .....	67
4.2.2 STM32F103C8T6 .....	72
4.3 FTDI FT232RL .....	76
5 Diskussion .....	81
5.1 Erkennungsmerkmale einer gefälschten Elektronik .....	81
5.2 Vergleich der Messergebnisse .....	82
5.2.1 Mikrostreifenleitung .....	82
5.2.2 STM32-Mikrokontroller .....	83
5.2.3 FTDI FT232RL.....	84
5.3 Bewertung der messtechnischen Vorgehensweise.....	84
5.3.1 Fehlerbetrachtung .....	84
5.3.2 Limitation der Messmethode und des Messsystems .....	87
6 Zusammenfassung .....	89
6.1 Schlussfolgerungen.....	89
6.2 Ausblick und Verbesserungsvorschläge .....	90
Literaturverzeichnis .....	IX
Anhang .....	XIV
Anhang 1: Weitere Messergebnisse der Oberflächenmessung .....	XIV
Anhang 2: Software der STM32-Proben .....	XVIII
Eidesstattliche Erklärung .....	XIX

## **Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein zerstörungsfreies Messsystem zur Identifizierung von nicht authentischen Halbleiterkomponenten entwickelt und implementiert. Die Messvorrichtung und die konzipierte Methodik verwenden elektrische und magnetische Nahfeldsonden, um die elektromagnetischen Nahfelder von elektronischen Bauteilen zu untersuchen. Mit der Evaluierung der elektrischen und magnetischen Nahfelder können Unterschiede zwischen einer originalen Referenzprobe und einer potenziellen Fälschung mittels spektraler Signalverarbeitung aufgedeckt werden.

Diese Bachelorarbeit nimmt dabei Bezug auf die Herstellung der elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden, die Implementierung des Sondenpositionierungssystems Pegasus sowie des Datenerfassungssystems, welches eine Analog-Digital-Konverter-Messkarte umfasst. Die Bedienung des Messsystems erfolgt über die entwickelte Softwareschnittstelle, die Pegasus Scanner App genannt wird. Zur Identifizierung der elektronischen Fälschungen werden die Nahfeldsonden in einem rasterförmigen Muster mit einem minimalen Abstand über die Oberfläche der Proben bewegt, um ein Messergebnis der kapazitiv eingekoppelten oder induzierten Spannungen der elektrischen oder magnetischen Feldquellen zu erhalten.

Die Analyse der Oberflächenmessergebnisse ermöglicht die Identifizierung von elektronischen Fälschungen, jedoch können recycelte Originalbauteile mit manipulierten Bezeichnungen oder identische Klone von originalen Bauteilen durch die Feldverteilung nicht detektiert werden.

Eine elektronische Fälschung ist anhand der unterschiedlichen Spannungspegel durch Abweichungen in der Feldquellenlokalität sowie durch divergente Frequenzspektren zu unterscheiden.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung der vorliegenden Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst möchte ich insbesondere Herrn Michael Kögel, M.Sc., danken, der mir stets geholfen und mir aktiv im Praktikum sowie in der Schreibphase zur Seite gestanden hat. Seine fachliche Kompetenz und sein konstruktives Feedback waren von unschätzbarem Wert für die Erstellung dieser Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher, der meine Bachelorarbeit hochschuleitig mit seiner fachkundigen und konstruktiven Unterstützung betreut hat. Während meines Studiums haben seine Vorlesungen und Seminare dazu beigetragen, mich fachlich weiterzuentwickeln und meine Interessen zu fördern und zu vertiefen.

Ebenfalls danke ich meinen Studienbetreuern und Ausbildern von der Bundesnetzagentur, die mir während des Studiums und in meiner Ausbildung zum Elektroniker tatkräftig unterstützend zur Seite standen.

Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen bedanken, die mir während der Praxis- und Schreibphase geholfen haben.

Zum Abschluss möchte ich mich bei meiner ganzen Familie bedanken. Hier gilt mein Dank vor allem meinen Eltern Anja und Mario, die mich stets unterstützt und in jeder Hinsicht gefördert haben. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Pia, die mich während dieser intensiven Zeit immer unterstützt und ermutigt hat. Ihr Rückhalt hat mir geholfen, meine Bachelorarbeit und das Studium abzuschließen.

Vielen Dank für alles!

Adrian Juwien

## Abkürzungsverzeichnis

ADC.....	Analog-Digital-Converter
CAM .....	Center für Angewandte Mikrostrukturdiagnostik
DFT .....	Diskrete-Fourier-Transformation
DIN .....	Deutsches Institut für Normung
E-Feld.....	Elektrisches Feld
E-Feldsonde .....	Elektrische Nahfeldsonde
EVA .....	Eingabe Verarbeitung Ausgabe
FFT.....	Fast-Fourier-Transformation
FIFO .....	First-In-First-Out-Prinzip
FPGA .....	Field Programmable Gate Array
FTDI .....	Future Technology Devices International
H-Feld .....	Magnetisches Feld
H-Feldsonde.....	Magnetische Nahfeldsonde
IC.....	Integrated Circuit
ID.....	Identifikationsnummer
IMWS .....	Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen
MarkenG.....	Markenschutzgesetz
SNR.....	Signal-Rausch-Verhältnis
STM.....	STMicroelectronics
UART .....	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB.....	Universal Serial Bus
VDE .....	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

## Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Physikalische Größe	Einheit
$r_{Feld}$	Abstand zur Feldquelle	$m$
$\lambda$	Wellenlänge	$m$
$L_{Quelle}$	Abmessung der aktiven Elemente	$m$
$\mu$	Permeabilität	$\frac{H}{m}$
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante	$\frac{H}{m}$
$\mu_r$	Relative Permeabilität	
$B$	Magnetische Flussdichte	$T$
$H$	Magnetische Feldstärke	$\frac{A}{m}$
$\rho$	Raumladungsdichte	$\frac{C}{m^3}$
$Q$	Elektrische Ladung	$C$
$V$	Volumen	$m^3$
$v$	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$I$	Elektrischer Strom	$A$
$J$	Elektrische Stromdichte	$\frac{A}{m^2}$
$A_{Leiter}$	Leiterquerschnittsfläche	$m^2$
$l$	Länge des Leiters	$m$
$r$	Abstand zum Leiter	$m$
$\varepsilon$	Permittivität	$\frac{F}{m}$



$\varepsilon_0$	Elektrische Feldkonstante	$\frac{C}{V \cdot m}$
$\varepsilon_r$	Relative Permittivität	
$E$	Elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
$T_s$	Abtastintervall	$s$
$f_s$	Abtastfrequenz	$Hz, \frac{Samples}{s}$
$f_{max}$	Maximale Signalfrequenz	$Hz$
$f$	Frequenz	$Hz$
$L$	Induktivität	$H$
$N$	Anzahl der Windungen	
$l_{spule}$	Länge der Spule	$m$
$R$	Spulenradius	$m$
$\Phi$	Magnetischer Fluss	$Wb$
$A_{spule}$	Spulenfläche	$m^2$
$U_{ind}$	Induktionsspannung	$V$
$t$	Zeit	$s$
$C$	Kapazität	$F$
$Z_0$	Wellenwiderstand	$\Omega$
$d_i$	Innendurchmesser	$m$
$S_{11}$	Streuparameter	$dB$
$U_{in}$	Eingangsspannung	$V$

$U_{dBV}$	Spannungspegel	$dBV$
$U_{max}$	Maximale Spannung	$V$
$U_{min}$	Minimale Spannung	$V$
$\bar{x}_n$	Mittelwert der Spannung	$V$
$\sigma$	Standardabweichung	$V$
$n$	Anzahl der Messungen	

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in die Thematik

Seit dem Beginn der Menschheitsgeschichte existieren Täuschungen, Fälschungen und Manipulationen jeglicher Art. Diese wirken sich negativ auf einzelne Personen, Gesellschaften und historische Ereignisse aus. In den letzten Jahrzehnten gehören unter anderem Technologien zu den Fälschungsarten, die am meisten imitiert und verbreitet wurden. Die Fälschungen haben sich im Laufe der menschlichen Zivilisation weiterentwickelt und treten in der heutigen Zeit in jedem Wirtschaftszweig auf. Dabei sind diese meist Kopien bekannter Originalprodukte.<sup>1</sup>

Die Fälschungsindustrie ist ein illegales und geheimes Parallelgeschäft, welches in den letzten Jahrzehnten die Elektronikbranche beeinflusst hat. Die Verbreitung von gefälschten Halbleiterprodukten ist motiviert durch finanzielle Gewinne. Eine Hauptursache für den Wettbewerbsvorteil in der Elektronikbranche ist, dass diese weltweit am Markt etabliert sind. Hierbei ist eine gefälschte Elektronik meist günstiger und weist eine bessere Verfügbarkeit im Vergleich zum originalen Bauteil auf. Die nicht authentischen elektronischen Komponenten werden in illegalen Fabriken zu einer weltweit koordinierten sowie hochentwickelten Industrieware produziert und gelangen durch Umwege in den Wertschöpfungsketten in die globalen Märkte.<sup>2</sup> Obwohl eine nicht autorisierte Kopie eines originalen Produktes kein spezifisches Problem in der heutigen Zeit darstellt, besteht ein technisches Risiko. Diese Imitate sind fehlerhafte Glieder in der Kette von Systemen.<sup>3</sup> Eine elektronische Fälschung kann das Vertrauen zwischen Herstellern und Verbrauchern reduzieren, Missverständnisse hervorrufen oder lebensgefährlich sein.<sup>4</sup>

Der deutsche Zoll verzeichnet mit seiner aktuellen Statistik zur Anzahl der beschlagnahmten Fälschungen außergewöhnliche Unterschiede. Im Jahr 2020 wurden 36.790 Fälschungen auf dem deutschen Markt sichergestellt, während es im Jahr 2021 bereits 188.260 Imitate waren. Dieser enorme Fälschungszuwachs entspricht

---

<sup>1</sup> Vgl. Tehranipoor, Guin & Forte (2015), S. 2.

<sup>2</sup> ebd., S. 1 f.

<sup>3</sup> ebd., S. 2.

<sup>4</sup> Vgl. Plass (2020), S. 29.

einem Anstieg um 411,72 % und lässt darauf schließen, dass die tatsächliche Verbreitung von Fälschungen wesentlich höher ist.<sup>5</sup> Diese explosionsartige Fälschungsaktivität im Elektronikbereich ist durch die hohe Nachfrage an Halbleiterprodukten und der anhaltenden globalen Chipkrise im Frühjahr 2020 verursacht worden.<sup>6</sup> Die Gründe dafür sind die Personaldefizite am Arbeitsmarkt, die COVID-19-Pandemie und die weltweiten geopolitischen Anspannungen.<sup>7</sup> Da die Halbleiterkrise erhebliche Auswirkungen auf viele Branchen hat, verwenden Fälscher die überwiegenden Engpässe vieler Unternehmen für eine vereinfachte Marktintegration gefälschter Produkte. Um diese Mangelscheinung zu lösen, werden Halbleiter-Offensiven seitens der EU und den USA gestartet, indem Unabhängigkeiten von dem asiatischen Raum erzielt werden. Das Ziel ist die Förderung und Subventionierung des globalen Produktionsausbaus, um die Lieferengpässe von authentischen Halbleiterprodukten zu verringern.<sup>8</sup>

Die kontinuierliche Zunahme an Fälschungen zählt zu einer der enormen Nebenwirkungen der heutigen Globalisierung. Daher ist es von besonderer Bedeutung, dass Regelungen und Verfahren zur Evaluierung gegen die elektronische Fälschungsproblematik geschaffen werden. Eine schnelle und präzise Nachweisbarkeit über die Authentizität, Integrität und Sicherheit von Halbleiterbauteilen ist daher unabdingbar.

## **1.2 Motivation und Relevanz**

Mit der Verbesserung von digitalen Innovationen und der fortschreitenden Digitalisierung ist der Bedarf an elektronischen Produkten weltweit gestiegen. Die Gefahr, dass gefälschte Bauelemente in Endprodukten verbaut werden, nimmt dadurch stetig zu. Daher ist es erforderlich, Maßnahmen auf Grundlage des Markenschutzgesetzes zu ergreifen, um die Verbreitung elektronischer Imitationen zu begrenzen.<sup>9</sup> Der Schutz von elektronischen Bauteilen soll ein potenziell gefährliches Produkt identifizieren und die Verbreitung einschränken.

Die Herausforderung, ein elektronisches Imitat aufzudecken, ist aufgrund des kontinuierlichen Fortschritts der Halbleiterindustrie und der rasanten Entwicklung neuer

---

<sup>5</sup> Vgl. Rudnicka (2023).

<sup>6</sup> Vgl. Frieske & Stieler (2021), S. 2.

<sup>7</sup> Vgl. Köllner (2022).

<sup>8</sup> Vgl. Redaktion Digital Chiefs (2022).

<sup>9</sup> Vgl. Bluhm Systeme GmbH (2024).

Fälschungsmethoden enorm gewachsen. Mit innovativen und effizienten Messverfahren im Bereich der Fälschungsanalyse kann es möglich sein, unautorisierte Halbleitermikrochips zu erkennen.

Aus diesem Grund ist es entscheidend, dass Methoden zur Evaluierung und Identifizierung von gefälschten Halbleiterkomponenten und insbesondere von imitierten Mikrochips entwickelt und erforscht werden. Da es keine einheitlichen Prüfverfahren zur Erkennung von gefälschter Mikroelektronik gibt, bietet dieses Thema ein hohes Potenzial für Weiterentwicklungen an. Die Erforschung einer neuen und innovativen Methode zur Erkennung von gefälschten integrierten Schaltkreisen dient als Motivation dieser vorliegenden Bachelorarbeit. Mit dieser Arbeit soll eine Methode zur Fälschungserkennung von elektronischen Bauteilen evaluiert werden. Dabei werden diese näher untersucht, um potenzielle Lösungsansätze zur Bekämpfung von Fälschungen auf dem Elektronikmarkt zu schaffen.

### **1.3 Problemstellung und Zielsetzung**

Die nicht authentischen elektronischen Halbleiterkomponenten stellen ein erhebliches Problem für technische Systeme sowie für die Gesellschaft dar, da diese die Innovationen und die Ertragskraft von neuen Entwicklungen hemmen. Die Nutzung einer elektronischen Fälschung ist problematisch und risikobehaftet, da jederzeit unerwartete kritische Systemausfälle auftreten können und damit das menschliche Leben gefährdet werden kann. Um diesem Risiko entgegenzuwirken, setzen heutige Mikroelektronikhersteller auf sogenannte Antifälschungsprogramme und auf eine vertrauenswürdige Elektronik. Dabei werden herkömmliche zerstörende sowie zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet.<sup>10</sup>

Da aktuelle mikroelektronische Bauteile sehr präzise geklont werden können, sind diese durch optische Verfahren und Funktionsprüfungen kaum von originalen Bauteilen zu unterscheiden.<sup>11</sup> Aus diesem Grund sind die herkömmlichen Untersuchungsverfahren nicht in der Lage, subtile Unterschiede von Mikrochips zu erkennen. Mit einer zerstörungsfreien Oberflächenmessung sollen sowohl elektrische als auch magnetische Nahfelder von integrierten Schaltkreisen analysiert werden. Die potenziellen Abweichungen in den verschiedenen Signaturen werden mit den zu

---

<sup>10</sup> Vgl. Matric Group (2019).

<sup>11</sup> Vgl. Tehranipoor, Guin & Forte (2015), S. 37 f.

erwartenden Verhaltensweisen durch geeignete Algorithmen auf verdächtige Muster untersucht.

Die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit ist, die Wirksamkeit von konstruierten elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden zu untersuchen und festzustellen, ob diese als erfolgversprechendes Werkzeug zur Erkennung von gefälschten Halbleiterbauteilen eingesetzt werden können. Dabei sollen diese das elektrische und magnetische Nahfeld von integrierten Schaltkreisen erfassen und abbilden. Mit dem Aufbau und der Einrichtung eines Scanmessplatzes sollen die konstruierten Nahfeldsonden die elektronischen Proben rasterförmig und automatisiert abtasten. Die empfangenen Signale der Sonden sollen aufgezeichnet und durch spektrale Verfahren ausgewertet werden. Die daraus resultierenden Abbildungen der elektromagnetischen Emissionen werden statistisch und korrelativ untersucht.

Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die gefälschten und originalen Bauteile in den elektrischen und magnetischen Aussendungen voneinander unterscheiden zu können. Aus der genannten Problemstellung und der Zielsetzung kann folgende Forschungsfrage abgeleitet und formuliert werden:

**Kann eine zerstörungsfreie elektromagnetische Oberflächenmessung mit elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden die Signaturunterschiede zwischen authentischen und nicht authentischen Halbleiterkomponenten identifizieren?**

#### **1.4 Fraunhofer-Institut IMWS/CAM**

Das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen gehört zur Fraunhofer-Gesellschaft und ist ein Teil einer renommierten deutschen Forschungsorganisation.<sup>12</sup> Dabei konzentriert sich das IMWS auf die Lösungsfindung für die Materialwissenschaft und Mikrosystemtechnik.<sup>13</sup> Mit einem umfangreichen Fachwissen und modernster Forschungsinfrastruktur bieten das Fraunhofer IMWS und das Center für Angewandte Mikrostrukturdiagnostik die Möglichkeit, den Fokus auf die Qualitätssicherung und die Zuverlässigkeit von elektronischen Halbleiterbautei-

---

<sup>12</sup> Vgl. Fraunhofer Gesellschaft (2023).

<sup>13</sup> Vgl. Fraunhofer IMWS (2024a).

len zu legen. Dabei tragen diese zur innovativen Entwicklung neuer Prozesstechnologien für Materialdiagnostiken und Schadensanalysen im mikroelektronischen Bereich bei.<sup>14</sup>

Das europäische Projekt Velektronik der Fraunhofer-Gesellschaft soll die aktuellen Aspekte einer vertrauenswürdigen Elektronik untersuchen. Dabei werden neue Möglichkeiten zur Fälschungssicherheit im Bereich des Designs, der Fertigung und der Analyse erforscht.<sup>15</sup> Mit der Entwicklung neuartiger Messverfahren sollen die nicht authentischen elektronischen Halbleiterkomponenten identifiziert werden. Durch neue Fragestellungen zur Evaluierung von gefälschter Elektronik trägt das Fraunhofer IMWS zur Entwicklung einer rapiden und effektiven Messumgebung dieser Fälschungsproblematik bei.

### **1.5 Aufbau der Bachelorarbeit**

Um diese Bachelorarbeit und die darin enthaltene Forschungsfrage besser zu verstehen, ist es wichtig, ein grundlegendes Verständnis zum Thema der Fälschungssicherheit und der empirischen Analysemethodik zu erwerben. Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden daher die wesentlichen Begrifflichkeiten, die theoretischen Grundlagen sowie der aktuelle Stand der Technik, welche für eine Erarbeitung der Problematik relevant sind, konkretisiert und erläutert.

Das dritte Kapitel legt die Materialien und Methoden, die für die Erkennung von gefälschten Halbleiterkomponenten erforderlich sind, dar. Hierbei werden die verwendeten Komponenten der Messumgebung, die Proben und der experimentelle Versuchsablauf, welche für eine elektrische und magnetische Nahfeldmessung notwendig sind, beschrieben.

Im vierten Kapitel werden die aufgezeichneten Messergebnisse ausgewertet und erläutert.

Das vorletzte Kapitel umfasst die Diskussion der Messergebnisse aus der experimentellen Untersuchung. Dort werden diese miteinander verglichen, um Rückschlüsse darüber ziehen zu können, ob die zu untersuchenden Halbleiterkomponenten original oder gefälscht sind. Zudem findet eine Fehlerbetrachtung statt, um eine kritische Limitation des Messsystems durchführen zu können.

---

<sup>14</sup> Vgl. Fraunhofer IMWS (2024b).

<sup>15</sup> Vgl. Velektronik (2023).

Das letzte Kapitel umfasst eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse. Dabei wird durch die vorherige theoretische und experimentelle Ausarbeitung die Forschungsfrage beantwortet. Zudem können aufbauend auf dieser Thematik zukünftige Perspektiven gegeben werden.



## **2 Grundlagen und Stand der Technik**

In diesem Kapitel wird auf die allgemeinen Grundlagen eingegangen, um den Hintergrund der notwendigen Problemlösung zu konkretisieren. Mit der Ausarbeitung der theoretischen Grundlagen werden die elektrischen und magnetischen Nahfelder, die Nahfeldsonden sowie die digitale Signalverarbeitung, die für Messungen der elektromagnetischen Nahfeldaussendungen notwendig sind, erklärt. Dazu werden der aktuelle Stand der Technik zur Erkennung von gefälschten Halbleiterkomponenten sowie die Normung zur elektromagnetischen Oberflächenmessung erläutert.

### **2.1 Allgemeine Grundlagen**

Das erforderliche Verständnis dieser Thematik wird durch die allgemeinen Grundlagen vermittelt. Dieses bezieht sich dabei auf die integrierten Schaltkreise, die Fälschungsproblematik sowie auf die vertrauenswürdige Elektronik.

#### **2.1.1 Integrierte Schaltkreise**

Ein integrierter Schaltkreis, auch bekannt als IC oder Mikrochip, ist in dieser Bachelorarbeit essentiell, da dieser als Probe in einem Versuchsaufbau auf die elektromagnetischen Aussendungen untersucht wird. Die fortschreitende Entwicklung von elektronischen Komponenten und insbesondere von Halbleitermikrochips kann mit dem Gesetz von Gordon Moore aus dem Jahr 1965 beschrieben werden.<sup>16</sup> Das Moore'sche Gesetz beschreibt das exponentielle Wachstum der Rechenleistung, der Speicherfähigkeit und der Logikdichte von Halbleitermikrochips. Mit dieser physikalischen Gesetzmäßigkeit wird eine Verdopplung der Anzahl an elektrischen Komponenten pro Fläche innerhalb eines integrierten Schaltkreises alle zwei Jahre beschrieben.<sup>17</sup>

Eine elektronische Komponente fungiert als die kleinste funktionale Einheit einer elektronischen Schaltung, die eine bestimmte Funktion ausführt.<sup>18</sup> Diese „[...] Bauelemente können in die zwei großen Gruppen der passiven und der aktiven Bauelemente eingeteilt werden.“<sup>19</sup> Die passiven Elemente zählen dabei zu den Bauteilen,

---

<sup>16</sup> Vgl. Schaller (1997), S. 53.

<sup>17</sup> ebd., S. 55.

<sup>18</sup> Vgl. Stiny (2019), S. 1.

<sup>19</sup> Stiny (2019), S. 1.

die keine Verstärkungs- und Steuerfunktionen besitzen. Zu diesen gehören sowohl lineare als auch nichtlineare Bauelemente wie zum Beispiel elektrische Widerstände, Spulen und Kondensatoren. Bei aktiven Bauelementen können der Strom und die anliegende Spannung oftmals gerichtet und verändert werden. Auch elektrische Schwingungen lassen sich mit internen Schwingkreisen durch elektronische Komponenten generieren. Zu dieser Bauteilgruppe zählen Halbleiterbauelemente wie beispielsweise Dioden und Transistoren.

Mit der Miniaturisierung und der steigenden Anzahl an elektronischen Elementen pro Fläche besitzen heutige Mikrochips mehrere Milliarden aktive wie auch passive Bauelemente. Diese hohe Bauteildichte befindet sich auf einem Halbleiterträgermaterial, wie beispielsweise dem oft verwendeten Siliziumwafer. In einigen Fällen bestehen heutige Mikrochips aus weit über zehn Milliarden Transistoren, um komplexe Funktionen aus der Analog- und Digitaltechnik ausführen zu können. Die Mikrocontroller, Prozessoren und FPGA's zählen zu den relevantesten Chiparten.<sup>20</sup>

Die steigenden Entwicklungs- und Produktionskosten von komplexer werdenden Mikrochips tragen dazu bei, dass die Verkaufspreise enorm hoch sind. Dadurch wird ein illegaler Markt eröffnet, indem kostengünstige elektronische Replikate erzeugt und verbreitet werden.

### **2.1.2 Fälschungsproblematik in der Elektronik**

Das US-Handelsministerium definiert eine elektronische Fälschung als nicht autorisierte Kopie, welche das ursprüngliche Design eines Originalproduktes aufweist. Ein umgelabeltes Bauteil verfügt über falsche Kennzeichnungen (Abb. 1) oder Dokumentationen. Außerdem können diese unterschiedliche Funktionen im Vergleich zum Originalbauteil beinhalten oder die Zuverlässigkeit durch weitere Eigenschaften beeinträchtigen.<sup>21</sup> Die Verletzung des geistigen Eigentums durch Dritte ist nach dem § 143 des Markenschutzgesetzes strafbar.

---

<sup>20</sup> Vgl. Winzker (2017), S. 24.

<sup>21</sup> Vgl. U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security (2010), S. 221.



Abbildung 1: Potenzielle Fälschung durch unterschiedliche Kennzeichnungen.<sup>22</sup>

Mit der Zunahme der Fälschungsvorfälle in der Elektronikbranche werden Analog-ICs, Mikroprozessor-ICs und programmierbare Logikchips am meisten gefälscht und sind weltweit in den Wertschöpfungsketten implementiert.<sup>23</sup> Die Fälschungen entstehen dabei durch ein Recycling, eine Überproduktion sowie durch Klonungen der Originalbauteile.<sup>24</sup> Eine recycelte elektronische Fälschung ist ein originaler Mikrochip, der aus einem vorhandenen System zurückgewonnen und als neuwertig verkauft wird. Diese Fälschungsart ist risikobehaftet und unzuverlässig, da diese aufgrund der vorherigen Verwendung eine geringe Lebensdauer aufweisen. Zudem können diese durch die Wiederverwendung und Aufbereitung fehleranfällig oder funktionsuntüchtig sein.<sup>25</sup>

Eine weitere Fälschungsmethode ist die Überproduktion originaler Mikrochips. Hierbei werden durch ausgelagerte Produktionsstätten (Outsourcing) mehr Halbleiterkomponenten produziert als offiziell von den Herstellern vereinbart. Die überschüssigen Produkte werden ohne Kontrollmaßnahmen und mit einer falschen Serienkennziffer illegal weiterverkauft.<sup>26</sup>

Eine elektronische Klonung ist eine Fälschung, welche grundlegend ein neuwertiger Mikrochip ist. Hierbei werden Originalprodukte rückwärts entwickelt, um eine Fälschung konstruieren zu können (Reverse Engineering). Die Fälscher versuchen dabei, ein Originalprodukt vollständig in seiner Beschaffenheit und Funktionalität zu kopieren, um die hohen Entwicklungskosten einzusparen.<sup>27</sup>

<sup>22</sup> Tehranipoor, Guin, & Forte (2015), S. 51.

<sup>23</sup> Vgl. Tehranipoor, Guin & Forte (2015), S. 17.

<sup>24</sup> ebd., S. 19.

<sup>25</sup> ebd.

<sup>26</sup> ebd., S. 23.

<sup>27</sup> ebd., S. 25.

Laut den Autoren Tehranipoor, Guin und Forte ist die Volksrepublik China eine Hauptproduktionsquelle von gefälschten Waren und insbesondere von nicht authentischen Mikrochips. Dieses illegale Parallelgeschäft beinhaltet ein geschätztes Billionen-Dollar-Marktvolumen, welches sich unter anderem durch die Herstellung und den Vertrieb von gefälschten Halbleiterbauelementen bildet.<sup>28</sup> Eine elektronische Fälschung schadet der Wirtschaft und stellt ein Risiko im Bereich der Zuverlässigkeit und Sicherheit dar. Durch unvorhersehbare Ausfallerscheinungen können kritische Systeme im Bereich der Medizin, der Luft- und Raumfahrt sowie des Militärs auftreten.

Die heutigen Mikroelektronikhersteller und Händler in den Lieferketten verwenden daher eine Vielzahl an Antifälschungstechnologien, um Systeme besser vor Fälschungen schützen zu können. In diesem Zusammenhang erfahren die vertrauenswürdige Elektronik und der Hardwareschutz zunehmend Beachtung.

### **2.1.3 Vertrauenswürdige Elektronik und Hardwareschutz**

Für eine Eingrenzung der definierten Fälschungsproblematik setzen die heutigen Mikroelektronikproduzenten und Konsumenten immer mehr auf vertrauenswürdige Elektronik oder auf einen Hardwareschutz. Mit dem europäischen Projekt Velektronik wird eine Forschungsplattform geschaffen, um die Sicherheit der Mikroelektronik-Wertschöpfungskette gegenüber Fälschungen und Schwachstellen zu gewährleisten.<sup>29</sup>

Eine vertrauenswürdige Elektronik wird durch ihre hohen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen beschrieben. In diesem Zusammenhang wird eine elektronische Hardware definiert, die in ihrer Produktlebenszeit zuverlässig betrieben werden kann und gegen unerlaubte Fremdeingriffe möglichst gut geschützt ist.<sup>30</sup> „Dies erfordert einerseits Sicherheitsmechanismen in der Spezifikation und andererseits, dass die Hardware keine weiteren relevanten Schwachstellen außerhalb der Spezifikation zeigt [...]“<sup>31</sup> Diese Sicherheitsmechanismen, die in einem Mikrochip enthalten sind, schützen das geistige Eigentum der Hersteller und die Daten von Kon-

---

<sup>28</sup> Vgl. Tehranipoor, Guin & Forte (2015), S. 5.

<sup>29</sup> Vgl. Velektronik (2023).

<sup>30</sup> Vgl. Heyszl, Sigl, Seelos-Zankl & Hiller (2022), S. 3.

<sup>31</sup> Heyszl, Sigl, Seelos-Zankl & Hiller (2022), S. 3.

umenten. Die Mechanismen umfassen beispielsweise die chemische und physikalische Selbstzerstörung, um die Datenstruktur vor einer externen Manipulation zu schützen. Eine Bitstrom-Verschlüsselung und eine regelmäßige Lizenzierungsabfrage können die unerlaubte Nutzung von integrierten Schaltkreisen unterbinden. Mit diesem Hardwareschutz kann ein recycelter Mikrochip nicht anderweitig verwendet werden. Zudem werden Klonungs- und Manipulationsverfahren erheblich durch Schutzmaßnahmen erschwert.<sup>32</sup>

Dennoch besteht die Möglichkeit, dass eine vertrauenswürdige Elektronik durch ihre hohe Komplexität unbeabsichtigte Schwachstellen aufweisen kann. Diese entstehen unweigerlich bei der Schaltungsentwicklung und treten meist nach der Veröffentlichung und der Produktion einer integrierten Schaltung auf. Mit diesen unentdeckten Schwachstellen versuchen die Fälscher durch Hardware-Trojaner an verschlüsselte Informationen zu gelangen, um diese imitieren zu können.<sup>33</sup>

## **2.2 Theoretische Grundlagen**

In dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der elektrischen und magnetischen Nahfelder, die zugehörigen Nahfeldsonden und die digitale Signalverarbeitung, welche für die Auswertung von Bedeutung sind, dargelegt.

### **2.2.1 Elektrisches und magnetisches Nahfeld**

Die grundlegende Theorie der elektrischen und magnetischen Wechselfelder geht aus der klassischen Elektrodynamik hervor. Die Maxwell'schen Gleichungen werden dabei für die mathematische Beschreibung der Feldtheorie verwendet. Diese Gleichungen umfassen den Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld sowie der elektrischen Ladung und dem Strom.<sup>34</sup> Ein elektrisches und magnetisches Feld ist ein Gebiet, in dem elektromagnetische Kräfte durch die räumliche Wechselwirkung der elektrischen Ladung und des Stroms unter bestimmten Randbedingungen auftreten.<sup>35</sup> Die dabei entstehende Verschiebung im Feld bildet eine elektromagnetische Welle aus, welche die Energie an das Umfeld überträgt.

---

<sup>32</sup> Vgl. Tehranipoor, Guin & Forte (2015), S. 206.

<sup>33</sup> Vgl. Heyszl, Sigl, Seelos-Zankl & Hiller (2022), S. 8.

<sup>34</sup> Vgl. Lehner & Kurz (2021), S. 555.

<sup>35</sup> Vgl. Henke (2020), S. 39.

Die integrierten Schaltkreise generieren durch interne Taktgeber in den Prozessanwendungen eine zeitliche Veränderung, welche hochfrequente elektromagnetische Schwingungen erzeugen. Die auftretende Wechselwirkung in den Leitern regt ein elektromagnetisches Feld an, das durch die Verbindungstechniken wie den Leiterbahnen oder durch die Bonddrähte abgestrahlt wird.

Aus den Maxwell'schen Gleichungen lassen sich Sonderfälle aufzeigen, bei denen eine Abhängigkeit zwischen der Verteilung der Felder und dem Abstand zur Feldquelle hervorgeht.<sup>36</sup> Unter dieser Berücksichtigung auf die entfernungsabhängigen Feldkomponenten entsteht ein Bezug, der es ermöglicht, Raumgebiete zu definieren. Für die räumliche Feldmessung werden drei Gebiete festgelegt, die in der Abbildung 2 exemplarisch dargestellt sind. Da die einzelnen Komponenten eine unterschiedliche Wirkung voneinander aufweisen, sind diese unabhängig zu betrachten.

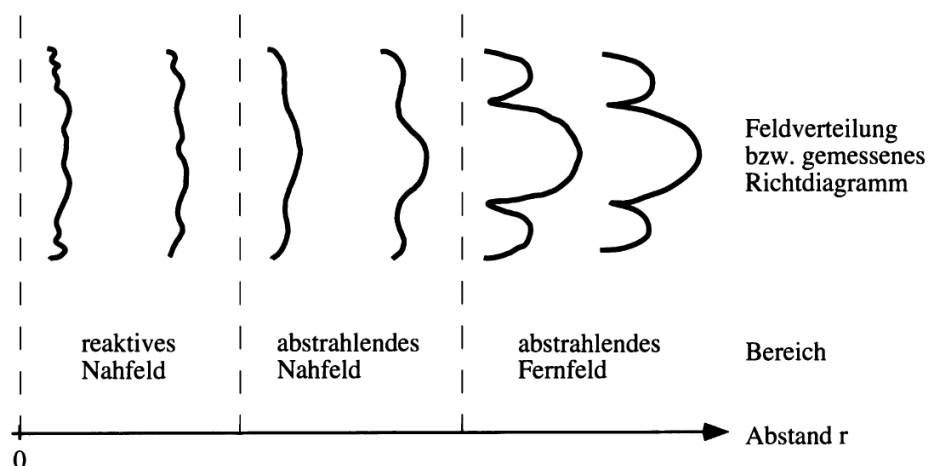


Abbildung 2: Abhängigkeit der Feldverteilung zu den Feldregionen.<sup>37</sup>

Der erste Feldbereich befindet sich in unmittelbarer Umgebung zur Feldquelle und wird als reaktives Nahfeld bezeichnet. In dieser Feldregion findet keine Abstrahlung statt, wodurch kein Energieaustausch zwischen den Feldkomponenten und der Umgebung erfolgt. Der Austausch der Energie findet ausschließlich als Blindleistung zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld statt, da diese zueinander um 90° phasenverschoben sind. Aus diesem Grund erfährt die Feldquelle eine direkte Rückwirkung des reaktiven Nahfeldes.<sup>38</sup> Die elektrische Feldstärke in diesem

<sup>36</sup> Vgl. Balanis (2005), S. 35.

<sup>37</sup> Thumm, Wiesbeck & Kern (1998), S. 237.

<sup>38</sup> Vgl. Balanis (2005), S. 34.

Bereich nimmt mit der dritten Potenz ab, während die magnetische Feldstärke quadratisch mit der Entfernung zur Feldquelle abnimmt.<sup>39</sup>

Das abstrahlende Nahfeld, auch Fresnel-Gebiet bezeichnet, ist die Übergangszone nach dem reaktiven Nahfeld. In diesem erfolgt die Annäherung an das Fernfeld, indem die Felder punktuell gleichphasig sind. Dabei findet eine konstruktive oder destruktive Überlagerung des Feldes statt. An diesen Stellen sind die Feldkomponenten nicht voneinander zu unterscheiden.<sup>40</sup>

Mit den nachfolgenden Formeln werden die Feldgrenzen für eine kurze Antenne (Feldquelle) beschrieben. Hierbei gilt, dass die Abmessungen der aktiven Elemente  $L_{Quelle}$  kleiner sind als die auftretende Wellenlänge  $\lambda$  ( $L_{Quelle} < \lambda$ ). Der Abstand  $r_{Feld}$  stellt dabei die Entfernung zur Feldquelle dar.<sup>41</sup>

$$\text{Reaktives Nahfeld:} \quad r_{Feld} < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

$$\text{Strahlendes Nahfeld:} \quad r_{Feld} > \frac{\lambda}{2\pi} \text{ bis } r < 4\lambda \quad (2)$$

Mit der elektromagnetischen Nahfelduntersuchung finden ausschließlich Messungen zwischen dem reaktiven und dem strahlenden Nahfeld statt. Daher wird der Bezug zum Fernfeld in dieser Bachelorarbeit nicht thematisiert.

Für die Charakterisierung eines magnetischen Feldes von integrierten Schaltkreisen wird das Biot-Savart'sche Gesetz folgend erläutert. Dieses mathematische Gesetz beschreibt, wie ein Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird. Hierbei werden die Zusammenhänge zwischen der magnetischen Feldstärke  $H$ , der magnetischen Flussdichte  $B$  und der elektrischen Stromdichte  $J$  hergestellt. Dabei entspricht  $\mu$  der Permeabilität, die sich aus der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  und aus der relativen Permeabilität  $\mu_r$  zusammensetzt.<sup>42</sup>

$$\text{Permeabilität:} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (3)$$

$$\text{Zusammenhang zwischen B und H:} \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (4)$$

---

<sup>39</sup> Vgl. Willig (2022).

<sup>40</sup> Vgl. Balanis (2005), S. 34 f.

<sup>41</sup> Vgl. Willig (2022).

<sup>42</sup> Vgl. Henke (2020), S. 45.

Die elektrische Stromdichte  $\vec{j}$  ist eine vektorielle Größe, die sich aus der Raumladungsdichte  $\rho$  und dem Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  der Ladungsträger ergibt. Die Raumladungsdichte besteht dabei aus der elektrischen Ladung  $Q$ , die in einem Volumen  $V$  auftritt.

Raumladungsdichte: 
$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad (5)$$

Elektrische Stromdichte: 
$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v} \quad (6)$$

Zusammenhang zwischen  $I$ ,  
 $J$  und Querschnittsfläche  $A$ : 
$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}_{Leiter} \quad (7)$$

Die Stromdichte ist die Summe aller vorkommenden Strompfade, die durch die Querschnittsfläche  $A_{Leiter}$  eines Leiters fließen und somit die Ursache für ein magnetisches Feld bildet.<sup>43</sup> In dieser Ausarbeitung wird davon ausgegangen, dass die Verbindungstechniken in einem Mikrochip einen stromdurchflossenen Leiter darstellen, indem bewegte Ladungen ein Magnetfeld erzeugen. Dabei besagt das Gesetz, dass es direkt proportional zum Strom und zur Länge des Leiters sowie umgekehrt proportional zum Abstand des Leiters ist. Nach Biot-Savart kann der magnetische Feldstärkevektor  $\vec{H}$  an einem Punkt  $P$  im Raum berechnet werden (Abb. 3). In der nachfolgenden integralen Formel ist die Feldstärke von der Länge des stromdurchflossenen Leiters  $\vec{l}$ , von dem Strom  $I$  und vom Abstand zum Leiter  $r$  abhängig.<sup>44</sup>

Magnetischer Feldstärkevektor: 
$$\vec{H} = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (8)$$

---

<sup>43</sup> Vgl. Mietke (2022).

<sup>44</sup> Vgl. Zurek (2023).



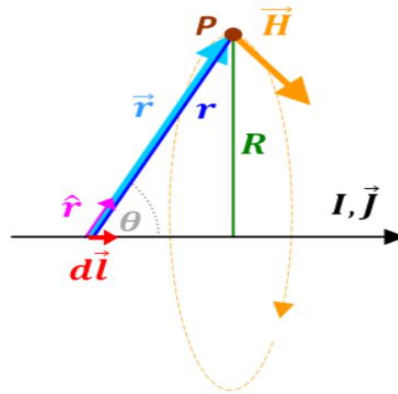


Abbildung 3: Darstellung des Magnetfeldes durch das Biot-Savart-Gesetz.<sup>45</sup>

Die Entstehung eines elektrischen Feldes wird mit dem Coulomb-Gesetz beschrieben. Dabei wirkt die Coulombkraft auf die elektrischen Ladungen, die zwischen unterschiedlich geladenen Körpern vorkommen und umgekehrt proportional zum Quadrat mit dem Abstand zueinander abnehmen. Mit der zeitlichen Veränderung der elektrischen Ladung ändert sich das Feld, welches einen Spannungsabfall am Leitungswiderstand verursacht. Dabei entsteht ein Verschiebungsstrom, der analog dazu das Magnetfeld beeinflusst.<sup>46</sup> Mit diesem Gesetz wird das dazugehörige elektrische Vektorfeld durch die räumliche Verteilung der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  beschrieben. Dabei ist dieser Vektor von der felderzeugenden Ladung  $Q$ , des Ortsvektors  $\vec{r}$ , des Einheitsvektors  $\vec{e}_r$  und der Permittivität  $\epsilon$  abhängig.<sup>47</sup>

Permittivität: 
$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (9)$$

Einheitsvektor 
$$\vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r} \quad (10)$$

Elektrischer Feldstärkevektor: 
$$\vec{E} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{\vec{e}_r}{r^2} \quad (11)$$

Die kapazitive Kopplung ist ein Übertragungseffekt innerhalb eines elektrischen Feldes. Hierbei wird die Energie frequenzabhängig zwischen nicht miteinander verbun-

<sup>45</sup> Zurek (2023).

<sup>46</sup> Vgl. Henke (2020), S. 43.

<sup>47</sup> ebd., S. 44.

denen Leitern transferiert. Da die elektrische Kapazität zwischen Leitern mit steigender Entfernung abnimmt, ist die kapazitive Kopplung vom Abstand der Feldquelle abhängig und ausschließlich bei kleinen Abständen im Nahfeld nutzbar.<sup>48</sup>

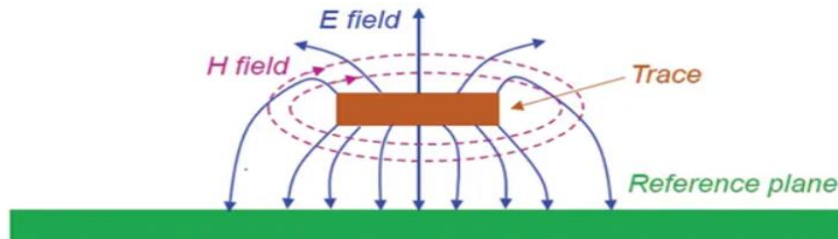


Abbildung 4: Ausbreitung der elektrischen und magnetischen Felder um den Querschnitt einer Mikrostreifenleitung.<sup>49</sup>

Die Ausbreitung der elektrischen und magnetischen Felder von einer Mikrostreifenleitung (Feldquelle) wird in der Abbildung 4 durch die Feldlinien gekennzeichnet. Bei einem magnetischen Feld sind diese kreisförmig und orthogonal zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Beim elektrischen Feld treten diese senkrecht und parallel aus der Feldquelle auf und geben einen Aufschluss über die Richtung zur unterschiedlich geladenen Ladung.

### 2.2.2 Elektrische und magnetische Nahfeldsonden

Die elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden sind essentielle Werkzeuge im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit. Diese werden für die Vermessung der elektromagnetischen Nahfeldfelder von elektronischen Schaltungen eingesetzt. Die theoretischen Grundlagen dieser Sonden basieren dabei auf der Antennentheorie.<sup>50</sup> Hierbei wird zwischen der elektrischen und der magnetischen Nahfeldsonde unterschieden, da die jeweiligen Feldkomponenten unabhängig voneinander zu betrachten sind.

Eine elektrische Nahfeldsonde kann grundlegend als Dipol- oder als Monopolsonde aufgebaut werden. Dabei benutzt diese den Effekt der kapazitiven Nahfeldauskoppung von elektromagnetischen Aussendungen, die auf Signalleitungen in integrierten Schaltkreisen entstehen.<sup>51</sup> Diese Aufnahme der elektrischen Feldkomponenten

<sup>48</sup> Vgl. Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V. (2020).

<sup>49</sup> Peterson (2022).

<sup>50</sup> Vgl. Berger (2003), S. 26.

<sup>51</sup> Vgl. Stolz (2021), S. 52.

ist in der Abbildung 5 schematisch dargestellt. Hierbei wird das elektrische Feld vertikal zur Feldquelle kapazitiv empfangen. Der dabei auftretende Ladungsunterschied erzeugt eine Spannung, die am Ausgang der Sonde gemessen wird.

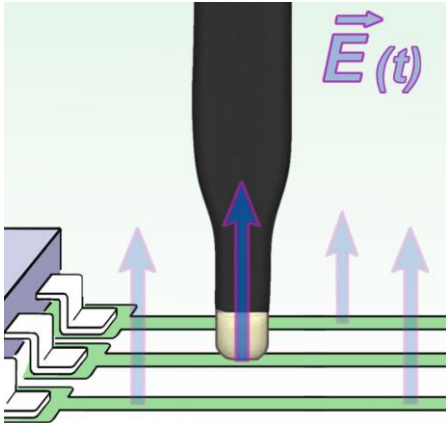


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer elektrischen Feldmessung.<sup>52</sup>

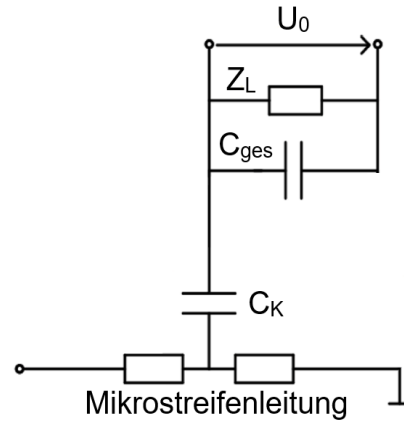


Abbildung 6: Ersatzschaltbild der elektrischen Nahfeldsonde.

Die Abbildung 6 stellt das vereinfachte Ersatzschaltbild anhand einer Oberflächenmessung an einer Feldquelle dar. Dieses umfasst die Koppelkapazität  $C_K$ , die Gesamtkapazität  $C_{ges}$ , welche durch die Schirmung entsteht, sowie die Leitungsimpedanz  $Z_L$ . Die Klemmspannung  $U_0$  ist die Ausgangsspannung, die hochohmig zwischen den leerlaufenden Leiterenden abgegriffen werden kann.

Für die Vermessung der abgestrahlten magnetischen Feldkomponenten wird die magnetische Nahfeldsonde verwendet. Diese ist als kurze Schleifensonde aufgebaut, indem der Durchmesser kleiner als die empfangene Wellenlänge ist. Dabei stellt diese eine helixförmige Zylinderspule dar. Diese empfängt die magnetische Feldstärke nach dem Induktionsgesetz, indem eine Änderung des magnetischen Flusses die Spule durchströmt und eine Spannung induziert. Diese Induktionsspannung kann anschließend am Sondenausgang abgegriffen und ausgewertet werden.

<sup>52</sup> Langer EMV-Technik GmbH (2024a).

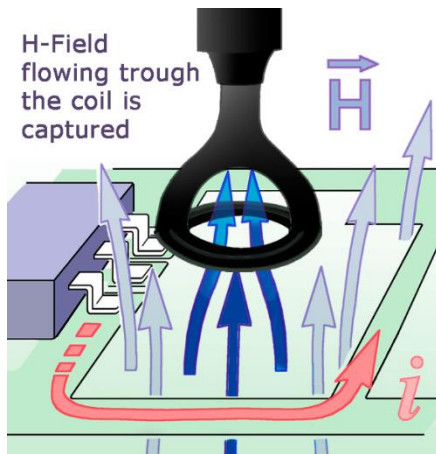


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer magnetischen Feldmessung.<sup>53</sup>

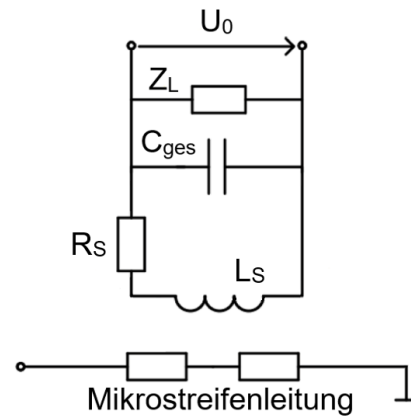


Abbildung 8: Ersatzschaltbild der magnetischen Nahfeldsonde.

Die Abbildung 7 stellt die magnetische Durchströmung einer Spule dar und erfasst die vertikal abgestrahlten Feldkomponenten, die kreisförmig um den stromdurchflossenen Leiter entstehen. Die induzierte Spannung  $U_0$  am Sondenausgang ist von der Induktivität der Spule  $L_S$  und dem dazugehörigen Spulenwiderstand  $R_S$  abhängig (Abb. 8). Je höher die Induktivität ist, desto besser kann eine Sonde die Feldquelle detektieren.<sup>54</sup>

### 2.2.3 Digitale Signalverarbeitung

„Unter der Verarbeitung von Signalen versteht man beispielsweise das Unterdrücken von Störungen, das Herausholen relevanter Informationen, die Signalumwandlung zwecks Übertragung oder Speicherung [...]“<sup>55</sup> Die digitale Signalverarbeitung umfasst in dieser Ausarbeitung die Umwandlung der analogen Signale, die im Nahfeld durch elektrische und magnetische Nahfeldsonden empfangen werden. Zudem findet eine Fast-Fourier-Transformation der digitalisierten Signalamplituden statt, um ein entsprechendes Ergebnis für die Beantwortung der Forschungsfrage erzielen zu können.

Das analoge Zeitsignal  $x(t)$ , welches die elektromagnetischen Aussendungen beinhaltet, weist einen theoretischen Wertebereich von unendlich vielen Werten auf.

<sup>53</sup> Langer EMV-Technik GmbH (2024b).

<sup>54</sup> Vgl. Spang (2012), S. 11.

<sup>55</sup> Ch. von Grünigen (2014), S. 1.

Diese Werte sind jedoch bei einem realen Signal durch die schaltungsbedingte Abtastung begrenzt. In der Signalverarbeitung wird ein analoges Zeitsignal als zeit- und wertekontinuierlich bezeichnet.<sup>56</sup>

Für die Umwandlung in ein digitales auswertbares Signal muss das analoge Signal durch einen Analog-Digital-Wandler mit einem definierten Abtastintervall  $T_s$  abgetastet und anschließend quantisiert werden. Die Abtastung führt zu einer Zeitdiskretisierung, bei der das Signal mit einer definierten Abtastfrequenz aufgenommen wird. Hierbei wird das analoge Signal in ein zeitdiskretes und wertekontinuierliches Signal umgewandelt.<sup>57</sup> Für die fehlerfreie Umsetzung muss das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem eingehalten werden. Dieses besagt, dass die Abtastfrequenz  $f_s$  mindestens doppelt so hoch sein muss, wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz  $f_{max}$ .

Abtastintervall: 
$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (12)$$

Nyquist-Shannon-Abtasttheorem: 
$$\frac{1}{T_s} \geq 2 \cdot f_{max} \quad \text{bzw.} \quad f_s \geq 2 \cdot f_{max} \quad (13)$$

Bei Nichteinhalten des Theorems entsteht eine Unterabtastung, bei der die sogenannten Aliasing-Effekte auftreten. Durch diesen Effekt ist eine korrekte Signalrekonstruktion nicht möglich.<sup>58</sup>

Die Quantisierung stellt den Übergang zwischen einem abgetasteten analogen und einem digitalen Signal  $x[n]$  dar. Hierbei weist ein ADC eine gewisse  $2^N$ -Bit-Wortlänge auf, bei der die wertekontinuierlichen Amplituden den Quantisierungsstufen zugeteilt werden.

Die Umwandlungsschritte von einem analogen Signal in ein digitales Signal sind in der Abbildung 9 schematisch dargestellt. Mit dieser Zeit- und Wertediskretisierung können die digitalisierten Signale durch eine FFT weiterverarbeitet werden.<sup>59</sup>

---

<sup>56</sup> Vgl. Ch. von Grünigen (2014), S. 1.

<sup>57</sup> ebd., S. 2.

<sup>58</sup> Vgl. Werner (2019), S. 308.

<sup>59</sup> Vgl. Ch. von Grünigen (2014), S. 2.

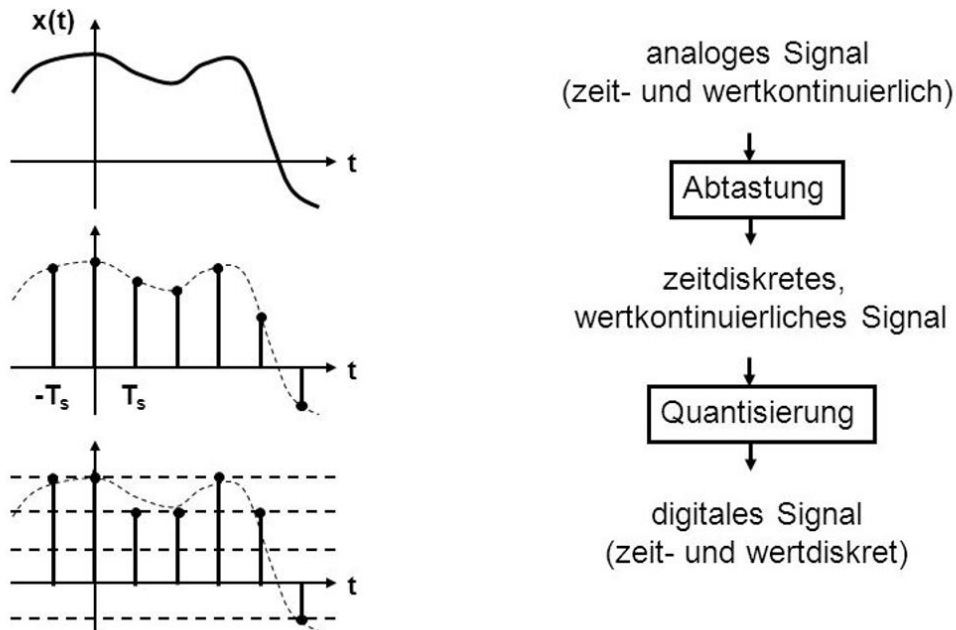


Abbildung 9: Schritte der Digitalisierung eines Analogsignals (modifiziert).<sup>60</sup>

Eine Fast-Fourier-Transformation ist eine optimierte Berechnung der diskreten Fourier-Transformation. Dabei werden die zeit- und wertdiskreten Signale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich umgewandelt. Die FFT-Berechnung gibt einen Aufschluss über die Informationen der spektralen Zusammensetzung des Zeitsignals (Abb. 10).<sup>61</sup>

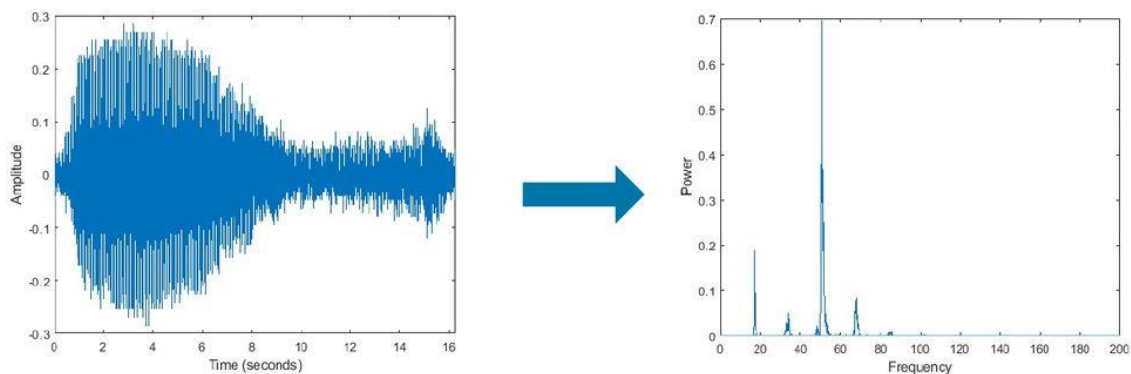


Abbildung 10: Umrechnung des Zeitsignals in das dazugehörige Frequenzspektrum.<sup>62</sup>

<sup>60</sup> Zürcher Hochschule Winterthur (2014).

<sup>61</sup> Vgl. Werner (2019), S. 44.

<sup>62</sup> The MathWorks, Inc (2024).

Mit der Aufteilung der diskreten periodischen Signale in kleine Segmente erfolgt die optimierte DFT/FFT-Berechnung. Hierbei wird durch die Zerteilung weniger Speicherplatz benötigt und die Rechengeschwindigkeit kann durch den FFT-Algorithmus deutlich gesteigert werden. Die DFT führt hierbei eine parallele Berechnung der einzelnen Datensegmente durch, welche die Signale komplex multipliziert und addiert. Mit der iterativen FFT werden die transformierten Segmente kombiniert und in die ursprüngliche Eingangsform rekonstruiert.<sup>63</sup>

Mit der Abtastung des analogen Zeitsignals  $x(t)$  wird die Anzahl der Abtastwerte  $N$  im Zeitbereich festgelegt. Mit dieser Diskretisierung entsteht eine Folge aus Abtastwerten  $x[n]$ , die eine endliche Anzahl an Werten  $n$  beinhaltet. Mit der Berechnung des Amplitudenspektrums entsteht eine Folge komplexer Amplituden, den Spektralwerten  $X[m]$ . Basierend auf der nachfolgenden Formel wird das Spektrum für die jeweiligen Spektrallinien  $m$  berechnet.<sup>64</sup>

Diskretes Signal im Frequenzbereich (DFT):

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \frac{m \cdot n}{N}} \quad (14)$$

$n = 0, 1, \dots, N - 1$  Nummer der Abtastwerte

$m = 0, 1, \dots, N - 1$  Nummer der Spektrallinien

Mit dieser Rechenvorschrift können die einzelnen Komponenten des Spektrums für ein periodisches und diskretes Signal bestimmt und dargestellt werden.

## 2.3 Normung und Stand der Technik

In diesem Abschnitt der Bachelorarbeit werden die Normung DIN IEC/TC 61967-3, die Röntgenbildgebung sowie die Laser-Entkapselung behandelt. Diese Verfahren werden derzeit zur Identifikation von elektronischen Fälschungen eingesetzt.

### 2.3.1 Normung DIN IEC/TC 61967-3

Das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) und der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) veröffentlichten im August 2015 eine Vornormung für die Messung von elektromagnetischen Aussendungen. Die DIN

<sup>63</sup> Vgl. Grünbacher (2010), S. 1 f.

<sup>64</sup> Vgl. Meyer (2017), S. 165.

IEC/TC 61967-3 beinhaltet eine Vorgehensweise zur Oberflächenmessung von elektrischen und magnetischen Nahfeldern, die oberhalb von integrierten Schaltkreisen gemessen werden. Diese Norm beschreibt dabei die Verfahrensweise, die Prüfbedingungen, die Prüfeinrichtung sowie die Verwendung und Kalibrierung von elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden.<sup>65</sup>

„Dieses Diagnoseverfahren dient der Architekturanalyse eines IC, wie beispielsweise der Fertigungsplanung und der Optimierung der Stromverteilung.“<sup>66</sup> Somit können Informationen zur Verbesserung einer integrierten Schaltung hinsichtlich der Funktionsweise und der elektromagnetischen Verträglichkeit gewonnen werden. Dabei ist ein Zusammenhang zwischen der elektrischen oder magnetischen Feldstärke und der Lokalität aufzuweisen. Mit der Zuordnung von ortsabhängigen Messwerten kann ein konzeptionelles Verfahren aufgezeigt werden, indem die Nahfeldsonden die Aussendungen punktuell mit einem Sondenpositionierungssystem (Abb. 11) erfassen.

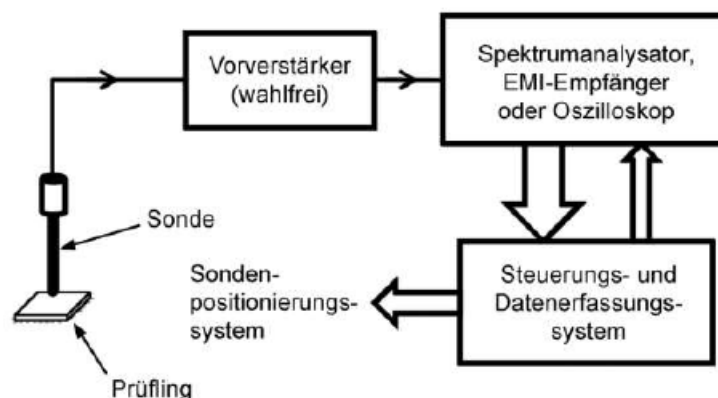


Abbildung 11: Beispielaufbau eines Scansystems.<sup>67</sup>

### 2.3.2 Fälschungserkennung durch Röntgenbildgebung

Die Röntgenbildgebung ist eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur Werkstoffprüfung, um Materialunterschiede in der elektronischen Probe darstellen zu können. Für die optische Unterscheidung einer elektronischen Fälschung kann das digitale Echtzeit-Röntgensystem verwendet werden.<sup>68</sup> Der grundlegende Aufbau

<sup>65</sup> Vgl. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2024).

<sup>66</sup> VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 7.

<sup>67</sup> ebd., S. 12.

<sup>68</sup> Vgl. Forte & Chakraborty (2022), S. 32.



dieses Systems ist in der Abbildung 12 dargestellt. Hierbei emittiert eine Röntgenquelle eine elektromagnetische Welle, die eine Probe transmittiert. Da ein zu untersuchendes Objekt die Strahlung material- und geometrieabhängig absorbiert, kann ein Detektor diese empfangen und ein Bild erzeugen.

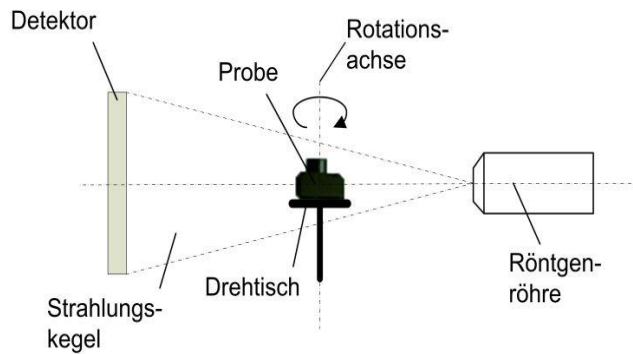


Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines Röntgensystems.<sup>69</sup>



Abbildung 13: Phoenix NanomeX 180 SE.<sup>70</sup>

Um den aktuellen Stand einer zerstörungsfreien Fälschungsuntersuchung darstellen zu können, werden in dieser Bachelorarbeit die Proben, die in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 erläutert werden, geröntgt. Dabei wird ein Phoenix NanomeX 180 SE Echtzeit-Röntgengerät (Abb. 13) mit einer Röhrenspannung von 100 kV verwendet, welches eine elektromagnetische Welle initiiert. Im Folgenden werden die relevanten Röntgenbilder dargestellt, in denen deutliche Unterschiede zwischen einem originalen und einem potenziell gefälschten Bauteil erkennbar sind.

<sup>69</sup> Oppermann & Neubrand (2016).

<sup>70</sup> SMTnet (2018).

Erkennungsmerkmal: Unterschiedlicher Anschlussrahmen (Leadframe).

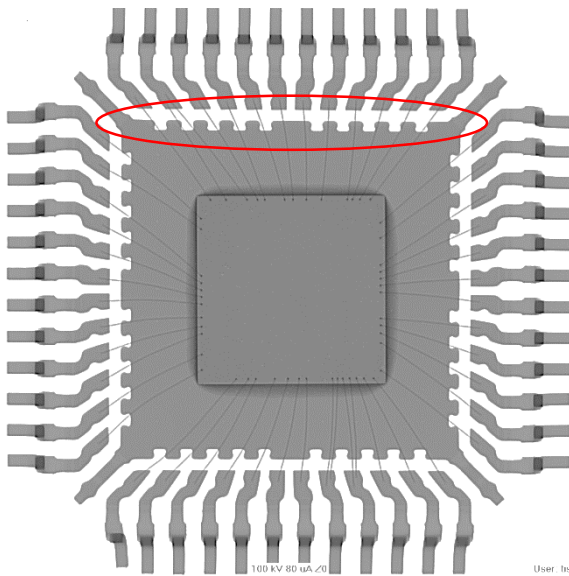


Abbildung 14: Röntgenbild der originalen Probe, STM32F103C6T6A MYS 99 241.

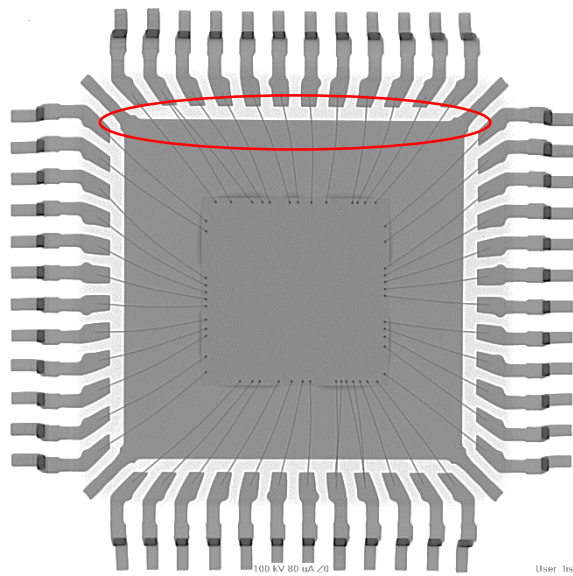


Abbildung 15: Röntgenbild der potenziellen Fälschung, STM32F103C6T6A MYS 99 236.

Erkennungsmerkmal: Unterschiedliche Größe des Chips und des Anschlussrahmens; Abweichungen im Layout der Anschlussleiterbahnen.

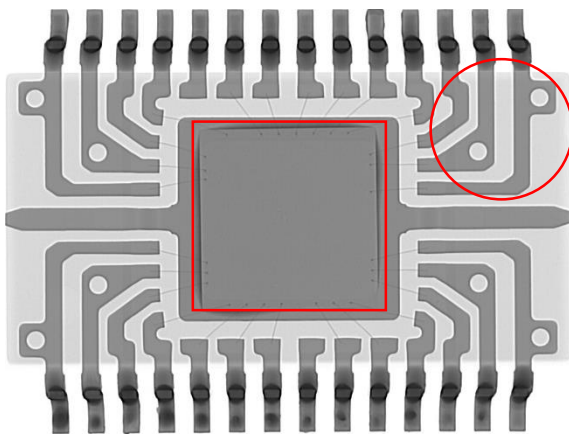


Abbildung 16: Röntgenbild der originalen Probe, FT232RL G52037C1.

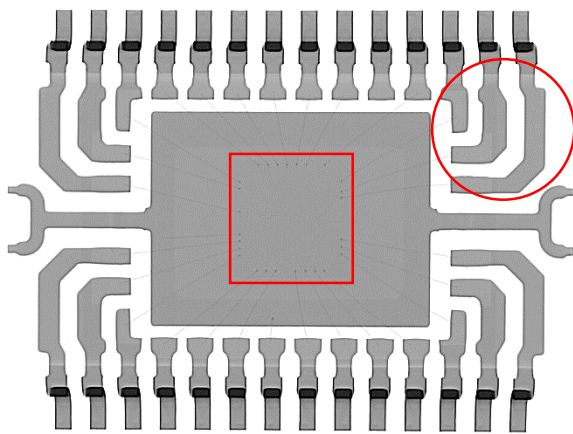


Abbildung 17: Röntgenbild der potenziellen Fälschung, FT232RL B8908572.

Mit diesem Röntgenverfahren können Fälschungen in kürzester Zeit durch strukturelle Abweichungen im Aufbau und in den Verbindungstechniken ermittelt werden. Hierbei werden die Drahtbonden zum Chip, das Leadframe sowie die Pressmasse untersucht. Der Nachteil an diesem Verfahren ist, dass eine präzise Fälschung nicht auf der Chipebene erkennbar ist. Aus diesem Grund werden hochauflösende und

zerstörende Verfahren wie die Laser-Entkapselung oder die Elektronenmikroskopie verwendet, um weitere Abweichungen von einem Originalbauteil feststellen zu können.

### 2.3.3 Fälschungserkennung durch Laser-Entkapselung und Mikroskopie

Ein weiteres Verfahren, welches für die Identifizierung von gefälschten Halbleiterkomponenten verwendet wird, ist die zerstörende Laser-Entkapselung (Die-Shot). Mit diesem kann das obere Layout von integrierten Schaltkreisen untersucht werden, welches beim Röntgen nicht sichtbar ist.

Die Vorgehensweise basiert auf einem photothermischen Verfahren. Dabei wird durch einen Laser eine räumliche Erwärmung erzeugt, die das Material schichtweise abträgt. Die Photoabtragung ist für kleinste Flächen geeignet und besitzt eine sehr hohe Materialabtragsrate.<sup>71</sup> Somit kann die äußere Mikrochipummantelung (Mold compound) sehr präzise entfernt werden, ohne die innere Schaltung zu beschädigen. Nach der Entkapselung des Mikrochips können zum Teil die Funktionsblöcke der Schaltung mithilfe der optischen Mikroskopie oder Elektronenmikroskopie analysiert werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Entkapselung des originalen STM32-Mikrocontrollers (Abb. 18) und des geklonten GD32-Mikrocontrollers (Abb. 19).



Abbildung 18: Originaler Mikrochip  
STM32F103C8T6.<sup>72</sup>

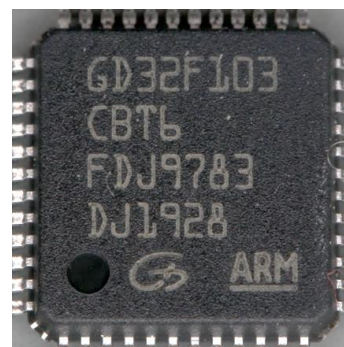


Abbildung 19: Geklonter Mikrochip  
GD32F103C8T6.<sup>73</sup>

<sup>71</sup> Vgl. Coherent Corp. (2024).

<sup>72</sup> Kaußler (2022).

<sup>73</sup> ebd.

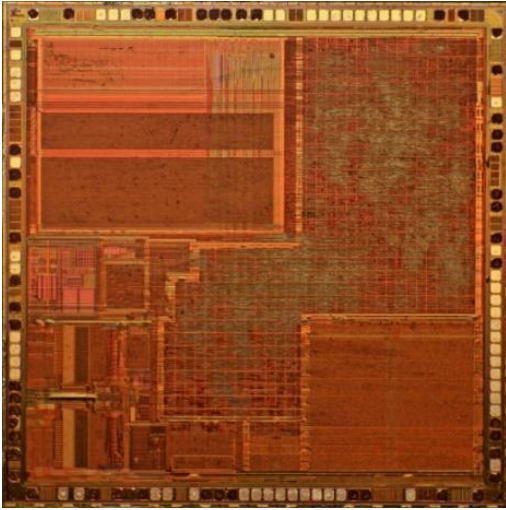


Abbildung 20: Laser-Entkapselung des originalen STM32.<sup>74</sup>

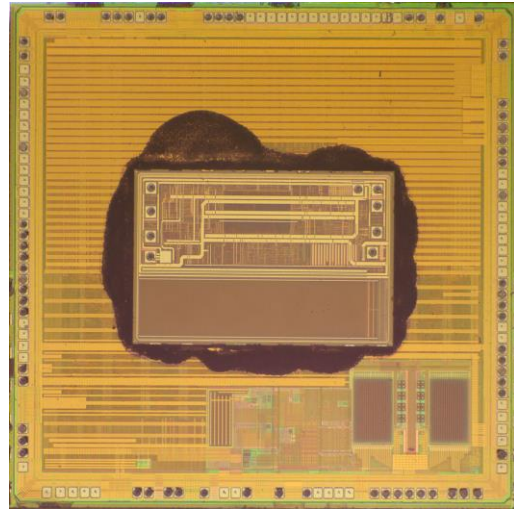


Abbildung 21: Laser-Entkapselung des geklonten GD32.<sup>75</sup>

Die Ergebnisse dieser Verfahrensweise sind in den Abbildungen 20 und 21 dargestellt. Hier ist ein deutlicher Unterschied im Aufbau des Mikrochips zu erkennen, welcher auf eine Fälschung hindeutet. Die Nachteile von diesem Verfahren sind der hohe und langfristige Bearbeitungsaufwand sowie die zerstörende Wirkung auf den Mikrochip. Daher wird diese Vorgehensweise nur stichprobenartig angewendet, um eine potenzielle Fälschung aufdecken zu können.

---

<sup>74</sup> Kaußler (2022).

<sup>75</sup> ebd.

### 3 Material und Methoden

Dieses Kapitel umfasst das grundlegende Konzept, die erforderlichen Komponenten, die Beschreibung des Messaufbaus sowie die zu prüfenden Proben. Dabei werden die Messmethode, der Ablauf der Messungen und ein mögliches Kalibrierverfahren erläutert.

#### 3.1 Konzeption

Mit der theoretischen Ausarbeitung ist die Grundidee für eine zerstörungsfreie elektromagnetische Oberflächenuntersuchung gelegt. Das Konzept dieser Bachelorarbeit beruht auf einer qualitativen Messung, die unter Laborbedingungen die elektromagnetischen Emissionen untersucht, die auftreten, wenn elektronische Halbleiterkomponenten mit einer hohen Prozessauslastung betrieben werden.

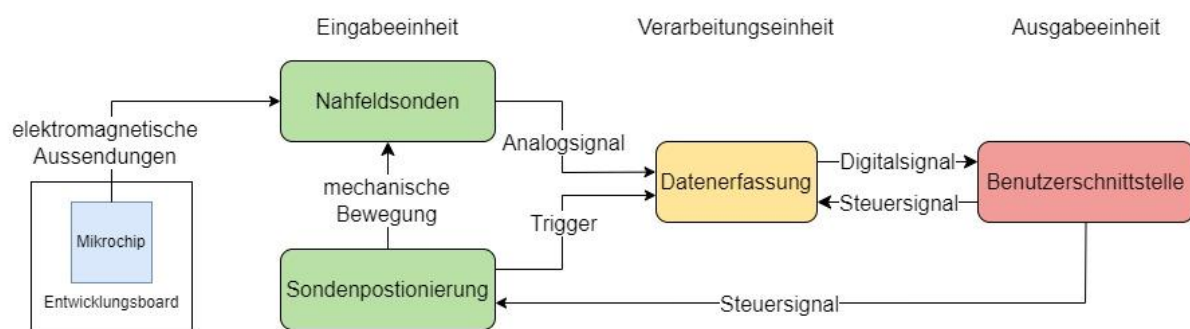


Abbildung 22: Grundkonzept des Messsystems.

In dem Konzeptentwurf (Abb. 22) des grundlegenden Messaufbaus ist ersichtlich, dass der Ausgangspunkt auf einem EVA-Prinzip basiert und aus vier Hauptkomponenten sowie aus den elektronischen Proben besteht.

Die essentielle Eingabeeinheit setzt sich aus elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden sowie einem dazugehörigen Sondenpositionierungssystem zusammen. Die Sonden dienen hierbei als Empfangskomponente und sollen die elektromagnetischen Aussendungen oberhalb der in Betrieb genommenen Proben erfassen. Aufgrund des geringen Abstandes zwischen der Nahfeldsonde und der zu prüfenden Probe ist die Größe des Erfassungsbereichs, auch Footprint genannt, minimal. Die Vergrößerung des abzutastenden Scanbereichs soll daher mit einem Scanaufbau erfolgen. Dabei werden die Nahfeldsonden durch eine Scanvorrichtung rasterförmig

von Abtastpunkt zu Abtastpunkt bewegt, um eine Neuausrichtung des Erfassungsbereichs zu erreichen.

Die Verarbeitungseinheit besteht aus einer Datenerfassung, die mittels Analog-Digital-Konverter-Karte die analogen Signale abtastet und digitalisiert. Dabei erfasst und verarbeitet diese die anliegenden, kapazitiv eingekoppelten und induzierten analogen Spannungsamplituden der Nahfeldsonden.

Die Ausgabeeinheit umfasst eine Benutzerschnittstelle, in der eine digitale Signalverarbeitung der einzelnen Messdaten stattfindet. Hierbei soll das Signal mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation in einzelne Spektralkomponenten zerlegt werden, um frequenzabhängige Amplitudenanalysen durchführen zu können. Mit einer Evaluierung der Messergebnisse kann im Rahmen dieser konzeptionellen Ausarbeitung ein mögliches innovatives Verfahren aufgezeigt werden.

### **3.2 Komponenten**

In diesem Kapitel werden die Komponenten für die elektromagnetische Oberflächenmessung detailliert beschrieben. Dabei werden die elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden, das Sondenpositionierungssystem, das Datenerfassungssystem und die Benutzerschnittstelle näher betrachtet.

#### **3.2.1 Konstruktion der elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden**

Nach den theoretischen und konzeptionellen Vorüberlegungen sind für eine zerstörungsfreie Untersuchung der elektromagnetischen Nahfeldaussendungen verschiedene Nahfeldsonden einsetzbar. Der nutzbare Frequenzbereich, die laterale Sondenauflösung und die Sondenempfindlichkeit sind für die hochfrequente Signalaufnahme von besonderer Bedeutung. Der grundlegende Aufbau ist von der Leiterlänge, der Anzahl der Spulenwindungen und dem verwendeten Sondenmaterial abhängig. In dieser Messumgebung werden die Nahfeldsonden für einen Frequenzbereich von 5 MHz bis 1,5 GHz revidiert. Dieser ist schaltungsbedingt durch die untere Grenzfrequenz des Vorverstärkers und durch die obere Grenzfrequenz des Analog-Digital-Wandlers beschränkt.

Die elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden bestehen grundlegend aus einem halbstarren Semi-Rigid-Koaxialkabel mit einem angelöteten SMA-Stecker. Für

die Konstruktion bietet dieses dämpfungsarme Kabel ideale Übertragungseigenschaften bis zu 10 GHz an und verfügt über einen Wellenwiderstand von  $50 \Omega$ .<sup>76</sup> Dabei besitzt der leitfähige Aluminiumaußenmantel einen Durchmesser von 3,5 mm und der Innenleiter hat einen Durchmesser von 1 mm. Die Isolationsschicht zwischen diesen Leitern, auch Dielektrikum genannt, ist Polytetrafluorethylen (Teflon) und weist eine Schichtbreite von 2,5 mm auf. Für die Konstruktion der Nahfeldsonden werden der leitende Außenmantel, auch Schirmung genannt, der Innenleiter sowie das Dielektrikum abgetrennt, wobei alle drei Kabelkomponenten gleich lang sind.

Die elektrische Nahfeldsonde ist grundlegend als Stab- oder Monopolantenne aufgebaut. Hierfür sind der Außenleiter und das Dielektrikum vom Innenleiter zu separieren. Der optimale Einfluss des leerlaufenden Innenleiters auf das elektrische Wechselfeld ist erreicht, wenn dieser eine annähernde Länge von  $\lambda/4$  aufweist. Dies ist durch die Resonanzwirkung zu begründen, da hierbei der Innenleiter elektrisch angeregt wird und durch das einstrahlende elektrische Feld eine Spannung am Ende des Innenleiters kapazitiv einkoppelt. Bei der Oberflächenmessung von elektrischen Aussendungen sind die hochfrequenten Signale der integrierten Schaltkreise nicht bekannt. Aufgrund dessen sind die Erfassung einer konkreten Resonanzfrequenz und die Bestimmung der Leiterlänge für die elektrische Nahfeldsonde nicht realisierbar. Die Innenleiterlänge wurde durch den Scanaufbau empirisch ermittelt und auf 5 mm festgelegt. Die dabei resultierende Resonanzfrequenz der elektrischen Sonde beträgt 15 GHz. Für eine optimale Messung bei tieferen Frequenzen besitzt die Sonde einen zu kurzen Innenleiter. Die Bandbreite einer Monopolantenne wird von dem Innenleiterdurchmesser bestimmt und je größer dieser ist, desto breitbandiger ist die Sonde. Das Auflösungsvermögen ist ein wichtiger Parameter für die Sondencharakteristik. Dieses gibt an, in welchem Abstand zwei Feldquellen voneinander unterschieden werden können. Die laterale Auflösung einer elektrischen Nahfeldsonde wird durch die Größe der Elektrodenfläche bestimmt und beträgt bei direktem Kontakt zur Feldquelle annähernd die Hälfte des coaxialen Innenleiterdurchmessers. Mit zunehmendem Abstand zwischen der Sonde und dem Mikrochip wird die Auflösung kleiner.

---

<sup>76</sup> Vgl. arnotec GmbH (2024).

Die magnetischen Nahfeldsonden sind als Zylinderspule konstruiert, bei denen die helixförmigen Drahtwicklungen grundlegend den Zylindermantel bilden. Die Wicklungen bestehen dabei aus einem Kupferlackdraht mit einem Drahtdurchmesser von 200  $\mu\text{m}$ . Für die Herstellung der Spulen wird eine geeignete Wickelvorrichtung für die Bestimmung des Spulendurchmessers verwendet. Anschließend wird diese manuell auf das zuvor aufbereitete Koaxialkabel gelötet. Die induzierte Spannung  $U_{ind}$  wird in der Spule durch ein lokales magnetisches Wechselfeld erzeugt. Diese Spannung hängt von der spezifischen Auslegung der Zylinderspule, also der Induktivität  $L$ , sowie von der Stärke der magnetischen Feldkomponenten ab. Die Induktivität einer magnetischen Nahfeldsonde ist ein Maß für die Empfindlichkeit und setzt sich aus der Anzahl der Windungen  $N$ , dem Spulenradius  $R$ , der Spulenlänge  $l_{Spule}$  sowie der magnetischen Permeabilität  $\mu_0$  zusammen. Mit der Näherungsformel für nicht zu kurze Spulen kann die Induktivität unter der Bedingung  $l_{Spule} > R$  berechnet werden.

$$\text{Induktivität:} \quad L \approx \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot R^2 \cdot \pi}{l_{Spule} + 0,9 \cdot R} \quad (15)$$

Der hochfrequente Wechselstrom innerhalb einer integrierten Schaltung bildet durch die Wechselwirkung der bewegten Ladungen ein Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte  $B$  aus. Diese ist von der Anzahl der Windungen  $N$ , dem Strom  $I$  in der Spule sowie von der Spulenlänge  $l_{Spule}$  abhängig. Mit dem Auftreten eines magnetischen Flusses  $\Phi$  durch die Spulenfläche  $A_{Spule}$  wird eine Spannung induziert, die gemessen werden kann.

$$\text{Magnetische Flussdichte:} \quad B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l_{Spule}} \quad (16)$$

$$\text{Magnetischer Fluss:} \quad \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}_{Spule} \quad (17)$$

$$\text{Induktionsspannung:} \quad U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (18)$$



Je größer die Fläche der umspannten Zylinderspule ist, desto höher sind die Ausgangsspannung und die Induktivität der Sonde. Eine große Spulenfläche verfügt über ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis, da im Vergleich zu einer kleinen Spulenfläche mehr elektromagnetische Energie durch den magnetischen Fluss erfasst werden kann. Das SNR gibt darüber Aufschluss, wie hoch die Empfangsempfindlichkeit einer Sonde ist und wie wirksam diese die Signalamplituden aufnehmen kann. Durch eine hohe Empfindlichkeit können schwache Signale besser detektiert werden. Der Nachteil ist, dass eine große Spulenfläche zu einer besseren Aufnahmefähigkeit von Störeinflüssen führt, die durch eine zu hohe Empfindlichkeit empfangen werden können. Dadurch treten elektromagnetische Interferenzen auf, welche die Messgenauigkeit verringern. Die laterale Auflösung beträgt bei direktem Kontakt zur Feldquelle in etwa die Hälfte des inneren Spulendurchmessers. Hierbei ist diese von der verwendeten Schleifensonde abhängig und ist proportional zur umspannten Spulenfläche. Eine kleine Spulenfläche verfügt somit über ein hohes Auflösungsvermögen, welches für eine Erfassung von sehr kleinen Feldquellen vorteilhaft ist. Die Ausrichtung der aufgelöteten Spulen ist horizontal, damit die vertikal emittierten Feldkomponenten gemessen werden können. Somit ist die Ausbreitungsrichtung der magnetischen Felder innerhalb der Proben nicht relevant, da sich die Feldquellen vertikal unter der Sonde befinden.

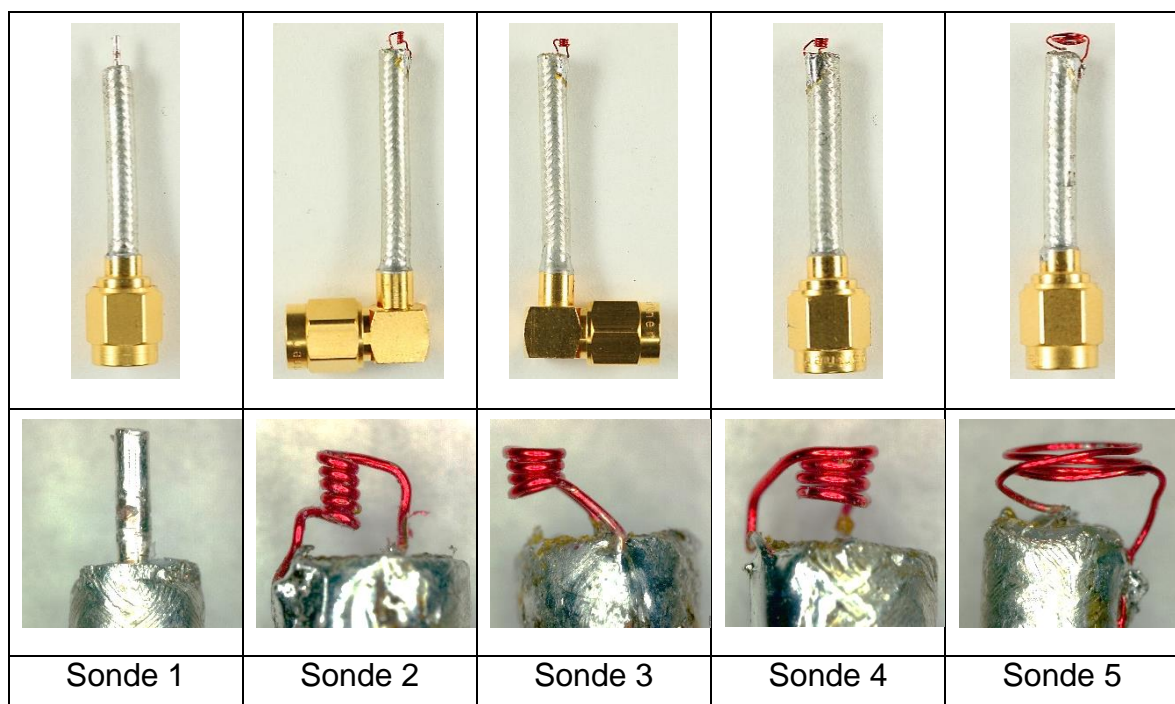


Abbildung 23: Darstellung aller konstruierten Nahfeldsonden.

Die Abbildung 23 beinhaltet die konstruierten Nahfeldsonden, welche bei der elektromagnetischen Oberflächenmessung verwendet werden.

Für die Nahfeldmessung der elektrischen und magnetischen Aussendungen ist eine Abwägung zwischen einer hohen Sondenempfindlichkeit oder einer hohen lateralen Auflösung zu treffen. Aufgrund des geringen Spulendurchmessers einer magnetischen Nahfeldsonde verfügt diese über eine hohe Auflösung, welche jedoch dazu führt, dass amplitudenschwache Aussendungen nicht erfasst werden können. Stattdessen ist die Sonde in der Lage, die Feldquellen mit einem geringen Abstand zueinander und höheren Amplituden zu detektieren. Für die Messung von niedrigen Amplituden ist ein größerer Spulendurchmesser unabdingbar, da diese über eine höhere Aufnahmefähigkeit verfügen. Der Nachteil ist das geringe Auflösungsvermögen, da hierbei unterschiedliche Feldquellen in einem minimalen Abstand nicht detektiert werden können.

Für einen optimalen und reflexionsfreien Signalaustausch zwischen den Sonden und den Übertragungsmedien bedarf es einer elektrischen  $50 \Omega$  Impedanzanpassung an das Messsystem. Da in dieser Versuchsdurchführung in einem breiten Frequenzspektrum gemessen wird, ist die Anpassung der einzelnen Nahfeldsonden mit einem hohen Aufwand verbunden und nicht Teil dieser Bachelorarbeit. In der elektromagnetischen Oberflächenmessung liegt der Schwerpunkt bei der Konstruktion einer Sonde, die eine hohe laterale Auflösung und eine hohe Empfindlichkeit aufweist. Aus diesem Grund werden die Messungen mit einer Fehlanpassung durchgeführt. Zur Bestimmung der Fehlanpassung wird ein PLANAR-304/1-Netzwerkanalysator verwendet. Hierbei wird durch den  $S_{11}$ -Parameter die Leistungsaufnahme der einzelnen Sonden bis zu einer Frequenz von 3,2 GHz bestimmt. Dieser gibt an, wie viel Energie am Eingang der Nahfeldsonde reflektiert wird und in welchem Bereich die Anpassung liegt. Für eine optimale Impedanzanpassung sollte der  $S_{11}$ -Parameter möglichst niedrig sein.

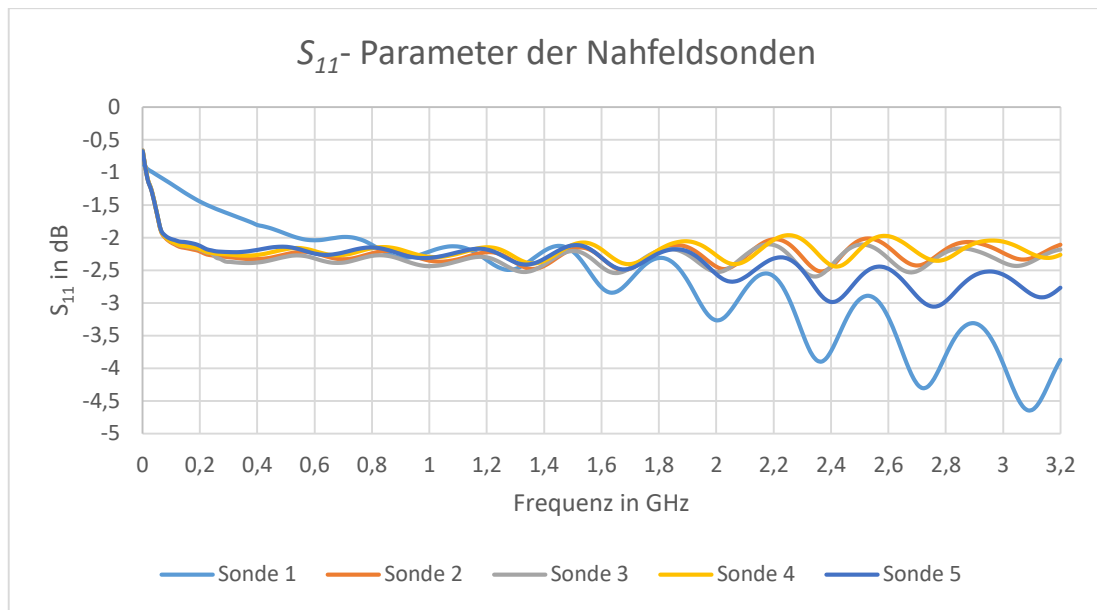


Abbildung 24: Eingangreflexionsfaktor der Nahfeldsonden.

Die Abbildung 24 beinhaltet die  $S_{11}$ -Parameter der fünf Nahfeldsonden. Hierbei ist zu erkennen, dass die Sonden im gesamten messbaren Frequenzbereich fehlerhaft angepasst sind. Der durchschnittliche  $S_{11}$ -Parameter von den Nahfeldsonden beträgt  $-2,3$  dB, was auf eine reflektierte Leistung von rund 58,8 % hindeutet. Die Ursachen für den hohen Eingangreflexionsfaktor sind die unzureichende Länge des Innenleiters der elektrischen Nahfeldsonde sowie die zu geringen Umfänge der magnetischen Sonden. Die Resonanzfrequenzen liegen daher deutlich über dem messbaren Frequenzbereich von 3,2 GHz. Aufgrund der eingeschränkten Messtechnik kann die Resonanzfrequenz nicht ermittelt werden. Diese liegt rechnerisch im höheren GHz-Frequenzbereich. Durch die erhöhte Fehlanpassung kann zudem nur eine geringe Bandbreite der Nahfeldsonden vermutet werden.

Mit einem nachgeschalteten KU-LNA-BB-3000-A Vorverstärker werden schaltungstechnisch die empfangenen Signale der Nahfeldsonden verstärkt. Hierbei erhöht dieser das eingehende Signal um 25 bis 30 dB und ermöglicht eine bessere Signalaufnahme. Mit einer Leerlaufmessung (Tabelle 1) werden die Pegel des verstärkten elektromagnetischen Grundrauschens der Nahfeldsonden sowie das Eigenrauschen des Vorverstärkers aufgezeigt. Mit dieser Messung kann die Empfangsschwelle der einzelnen Sonden ermittelt werden.

Für eine Übersicht der hergestellten Nahfeldsonden beinhaltet die nachfolgende Tabelle 1 den Sondentyp, die strukturellen Abmessungen, die laterale Auflösung, die berechnete und gemessene Induktivität sowie die gemessene Empfangsschwelle.

Sonden- typ	Sondenstruktur	Laterale Auflösung	Induktivität L	Empfangs- schwelle
<b>Sonde 1 E-Feld</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtlänge = 4 cm</li> <li>• Länge Schirmung = 3,5 cm</li> <li>• Länge Innenleiter = 0,5 cm</li> </ul>	≈ 0,5 mm		-71 dBV
<b>Sonde 2 H-Feld</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtlänge = 4 cm</li> <li>• Spulenlänge <math>l_{\text{Spule}} = 1,25 \text{ mm}</math></li> <li>• Windungen <math>N = 5</math></li> <li>• Innendurchmesser <math>d_i = 0,25 \text{ mm}</math></li> <li>• Spulenfläche <math>A_{\text{Spule}} = 0,049 \text{ mm}^2</math></li> </ul>	≈ 0,125 mm	Berechnung 1,132 nH  Messung 2,257 nH	-72 dBV
<b>Sonde 3 H-Feld</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtlänge = 4 cm</li> <li>• Spulenlänge <math>l_{\text{Spule}} = 1 \text{ mm}</math></li> <li>• Windungen <math>N = 3</math></li> <li>• Innendurchmesser <math>d_i = 0,5 \text{ mm}</math></li> <li>• Spulenfläche <math>A_{\text{Spule}} = 0,196 \text{ mm}^2</math></li> </ul>	≈ 0,25 mm	Berechnung 1,812 nH  Messung 2,985 nH	-70 dBV
<b>Sonde 4 H-Feld</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtlänge = 3,7 cm</li> <li>• Spulenlänge <math>l_{\text{Spule}} = 1 \text{ mm}</math></li> <li>• Windungen <math>N = 3</math></li> <li>• Innendurchmesser <math>d_i = 1 \text{ mm}</math></li> <li>• Spulenfläche <math>A_{\text{Spule}} = 0,785 \text{ mm}^2</math></li> </ul>	≈ 0,5 mm	Berechnung 6,126 nH  Messung 8,961 nH	-72 dBV

Sonden- typ	Sondenstruktur	Laterale Auflösung	Induktivität L	Empfangs- schwelle
<b>Sonde 5 H-Feld</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtlänge = 3,7 cm</li> <li>• Spulenlänge <math>l_{\text{Spule}} = 2 \text{ mm}</math></li> <li>• Windungen <math>N = 3</math></li> <li>• Innendurchmesser <math>d_i = 3 \text{ mm}</math></li> <li>• Spulenfläche <math>A_{\text{Spule}} = 12,57 \text{ mm}^2</math></li> </ul>	$\approx 1,5 \text{ mm}$	Berechnung 23,863 nH  Messung 31,649 nH	-72 dBV

Tabelle 1: Parameter der Nahfeldsonden zur Lokalisierung der elektromagnetischen Nahfeldaussendungen.

### 3.2.2 Sondenpositionierungssystem

Das Sondenpositionierungssystem Pegasus ist eine dreiaxige modulare Scaneinheit, bei der die Steuerung auf der Kommandosprache Venus basiert.<sup>77</sup> Für die Kommunikation wird eine MATLAB-Klasse verwendet, mit der die Befehlsätze zwischen der Steuereinheit und der Benutzerschnittstelle implementiert werden. Dieses System ist für eine hochpräzise Positionierung geeignet und besitzt dabei zwei Linearmotoren für die X- und Y-Ausrichtung sowie einen hochpoligen Schrittmotor für die Z-Achse.

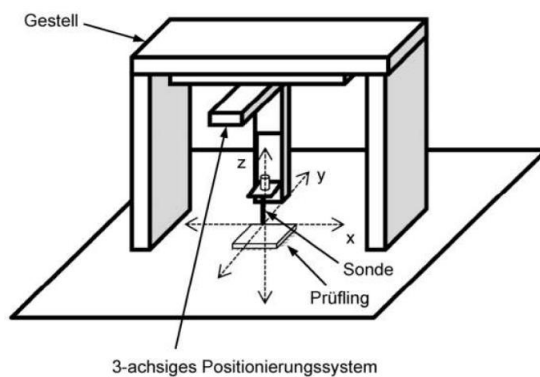


Abbildung 25: Schematischer Aufbau.<sup>78</sup>

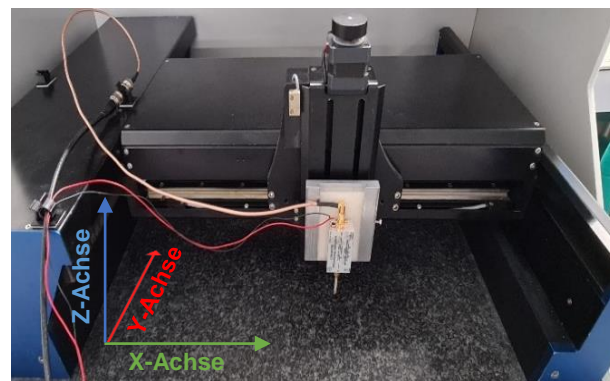


Abbildung 26: Aufbau der Scanvorrichtung.

<sup>77</sup> Vgl. ITK Dr. Kassen GmbH (2003), S. 8.

<sup>78</sup> VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 12.

Der schematische Grundaufbau und der tatsächliche Aufbau der Scaneinheit sind in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt. Letzteres besteht grundlegend aus einem Gestell mit darin integrierten Achsantrieben sowie einer 3D-gedruckten Sondenhalterung, an der ein Vorverstärker mit den Nahfeldsonden befestigt ist. Die Halterung wird durch zwei Linearmotoren auf der X- und Y-Achse bewegt. Dabei erreicht die X-Achse in dieser Messumgebung eine Geschwindigkeit von 1 m/s und verfügt über eine Beschleunigung von  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Dabei fährt diese die einzelnen Messpunkte des Scangebietes nacheinander ab. Die Y-Achse ist für die Linienpositionierung verantwortlich und besitzt daher eine maximale Geschwindigkeit von 0,5 m/s und weist eine Beschleunigung von  $0,1 \text{ m/s}^2$  auf. Das größtmögliche Scangebiet, welches von diesen zwei Achsen aufgestellt werden kann, beträgt  $300 \times 300 \text{ mm}$  und verfügt über eine Positionierungsauflösung von  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Die Z-Achse besitzt einen hochpräzisen Schrittmotor, der für die Höhenpositionierung verantwortlich ist. Dieser hat eine Positionsauflösung von 400 Schritten pro Motorumdrehung und kann die Sondenhalterung auf eine Höhe von 120 mm mit einer maximalen Geschwindigkeit von 20 mm/s über dem definierten Nullpunkt bewegen. Die Beschleunigung beträgt dabei  $10 \text{ mm/s}^2$ .

Die Klassenprogrammierung der Positionierungseinheit heißt PegasusClass und legt die Parametrierung der Achsen und des Triggers fest. Zu Beginn einer Messung findet eine Achsenkalibrierung statt, um die Linear-Encoder auf einen Absolutwert zu justieren. Die Kalibrierung erfolgt durch das Abfahren der minimalen und maximalen X-, Y- und Z-Positionen. Diese sind jeweils durch einen Endschalter begrenzt und geben die aktuellen Positionsparameter an. Nach Beendigung des Kalibriervorgangs wartet die Scaneinheit auf die Eingabe der Scaneinstellungen, die über eine Benutzerschnittstelle eingegeben werden. Diese Parametereingabe wird im Kapitel 3.2.4 präziser erläutert.

Für die Vorbereitung des Scanfeldes werden aus der X- und Y-Eingabe sowie der Auflösung des Scanfeldes die Abtastpunkte berechnet. Hieraus werden in der PegasusClass die nötigen Funktionen für eine rasterförmige Abtastung aufgerufen und an die Pegasus-Steuerung weitergegeben. Die Auflösung stellt hierbei die Anzahl der Messpunkte dar, die pro Messlinie abgetastet werden. Je höher die Auflösung ist, desto mehr Messpunkte werden pro Messlinie erfasst, welche eine höhere Bildauflösung ermöglichen. Für eine positionsgenaue Rasterung der einzelnen Messpunkte werden sogenannte Pixel erzeugt. Diese weisen eine quadratische Form

auf, bei der ein Abtastpunkt den Mittelpunkt des Pixels darstellt. Mit der Anordnung der Pixel wird eine Messlinie erzeugt, die über eine zu prüfende Probe abgefahren wird. In der Abbildung 27 sind die Pixel grafisch dargestellt, in welcher die Pfeile den Scanablauf und die Bewegungsrichtung der Nahfeldsonden markieren. Die Berechnung der Pixel findet mit den Formeln 19, 20 und 21 statt, die anschließend nacheinander und linienweise abgetastet werden.

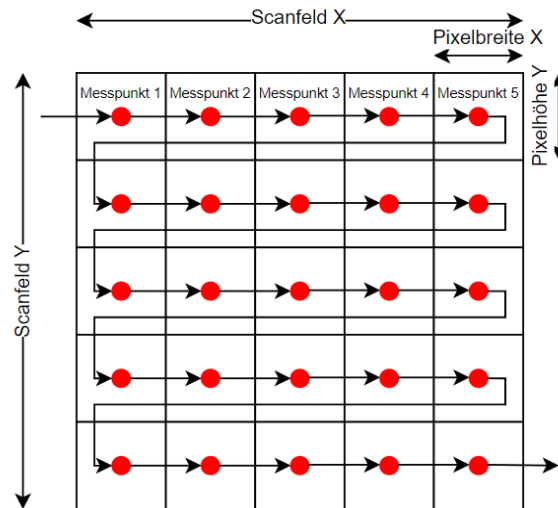


Abbildung 27: Rasterung und Bewegungsablauf.

Pixelgröße in X-Richtung:

$$Pixelbreite = \frac{Scanfeld\ X}{Auflösung} \quad (19)$$

Anzahl der Messlinien:

$$Anz.\ der\ Linien = \frac{Scanfeld\ Y}{Pixelbreite} \quad (20)$$

Pixelgröße in Y-Richtung:

$$Pixelhöhe = \frac{Scanfeld\ Y}{Anz.\ der\ Linien} \quad (21)$$

Für die positionsgenaue Datenaufnahme enthält die Pegasus-Steuereinheit eine kontinuierliche Positionsabfrage, die durch Linear-Encoder an den drei Achsen erfasst wird. Ein Encoder ist ein Messsystem, welches die aktuelle Position durch die Zählung von regelmäßigen Markierungen an dem Linearführungssystem bestimmt. Mit der Aufstellung eines Scanfeldes werden die Zielwerte und Schrittweiten der

Positionierung festgelegt. Mit dem Erreichen einer Messposition wird ein Rechtecksignal als Trigger ausgesendet. Dabei erfasst das Datenerfassungssystem dieses Triggersignal als externen Trigger und löst die Datenaufzeichnung aus. Nach der Fertigstellung des Scanvorgangs bewegt der Scanner die Sonden zum Ausgangspunkt zurück und ist erneut messbereit.

### 3.2.3 Datenerfassungssystem

Der computerintegrierte M4i.2233-x8-Empfänger ist ein speicherfähiger 8-Bit-Analog-Digital-Wandler von der Spectrum Instrumentation GmbH (Abb. 28). Dieser wandelt die analogen Spannungswerte in ein digitales Signal um. Der Empfänger, auch Messkarte genannt, wird durch eine MATLAB-Klassenprogrammierung an die Messumgebung angepasst. Dabei beinhaltet die SpectrumClass Funktionen zur Datenaufnahme und zur Datenverarbeitung.

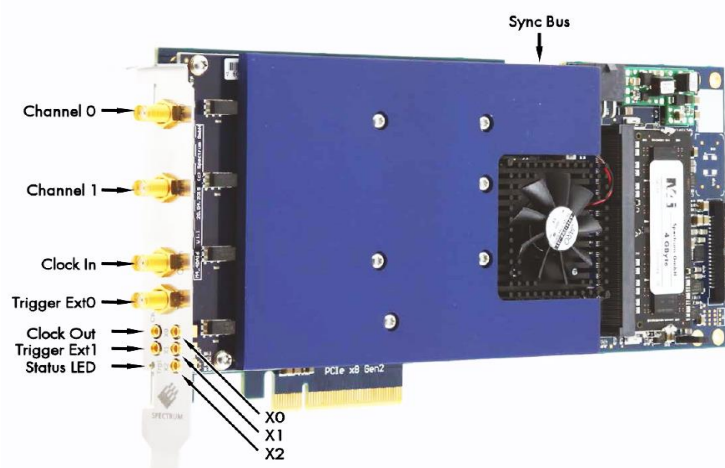


Abbildung 28: M4i.2233-x8 Messkarte.<sup>79</sup>

Die M4i-Messkarte verfügt über zwei analoge 50  $\Omega$ -Eingänge, die jeweils mit bis zu 2,5 GS/s abgetastet werden können. Bei einem aktiven analogen Eingang, wie in dieser messtechnischen Untersuchung, kann eine maximale Abtastrate von 5 GS/s und eine Bandbreite von 1,5 GHz erreicht werden. Die Messkarte wird durch die SpectrumClass programmiert und kann anwendungsspezifisch angepasst werden. Zudem ist der Empfangsbereich mit einer Empfindlichkeit der Eingänge von  $\pm 200$  mV auf bis zu  $\pm 2,5$  V veränderbar. Die interne Datenübertragung findet mit

<sup>79</sup> Spectrum Instrumentation GmbH (2023a), S. 15.



einer PCI-Express-Schnittstelle statt, die bei einer Frequenz von 1,25 GHz mit 3,4 GB/s die Daten per Direct-Memory-Access in den Arbeitsspeicher schreibt. Um die aufgezeichneten Messwerte bis zur Verarbeitung ablegen zu können, besitzt diese Messkarte einen internen Arbeitsspeicher von 4 GB.<sup>80</sup>

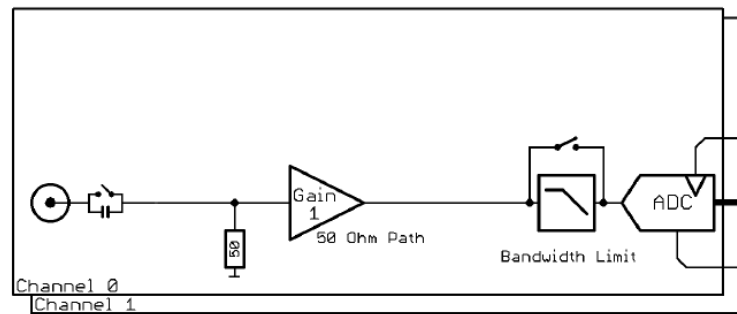


Abbildung 29: Schaltung der analogen Eingänge.<sup>81</sup>

Der Signalpfad vom analogen Eingang bis zur Signalumwandlung innerhalb der Messkarte ist in Abbildung 29 dargestellt. Bevor ein analoges Gleich- und Wechselspannungssignal mit dem Analog-Digital-Wandler umgesetzt wird, können unterschiedliche Schaltungsparameter angepasst werden. Dabei wird das analoge und verstärkte Signal der Nahfeldsonden zunächst an einer SMA-Verbindungsstelle eingespeist. Dort kann dieses Signal über einen parallelgeschalteten Kondensator sowie einen softwaregesteuerten Schalter voneinander entkoppelt werden. Somit lassen sich Gleichanteile vom hochfrequenten Anteil trennen. Mit einem nachgeschalteten Operationsverstärker können die Empfindlichkeitsstufen der einzelnen Eingänge verändert werden, um die Empfindlichkeit zu erhöhen. Somit kann ein mögliches Clipping der Eingangsspannung vermieden werden. Die Frequenzen der analogen Eingangssignale können wahlweise mit einem Anti-Aliasing-Tiefpassfilter begrenzt werden. Zu hohe Frequenzen, die den Aliasing-Effekt verursachen, werden herausgefiltert und verringern die Entstehung von Signalverzerrungen, den so genannten Phantomsignalen.<sup>82</sup>

Mit der elektromagnetischen Untersuchung legen die Nahfeldsonden die induzierte und kapazitiv eingekoppelte Spannung am Analogeingang an. Dabei werden im

<sup>80</sup> Vgl. Spectrum Instrumentation GmbH (2023c).

<sup>81</sup> Spectrum Instrumentation GmbH (2023a), S. 74.

<sup>82</sup> Vgl. Spectrum Instrumentation GmbH (2023b), S. 2.

Zeitraum der Sondenumpositionierung des Scanners keine Messdaten aufgezeichnet. Um diese auswertbaren Ergebnisse erzielen zu können, sind externe positionsgenaue Trigger vom Pegasus-Scanner zu verwenden. Dieses Triggerverfahren wird mit einem Pre- und Posttrigger, auch Vor- und Nachtrigger genannt, durchgeführt und setzt dabei einen Zeitstempel im abgetasteten Signal.

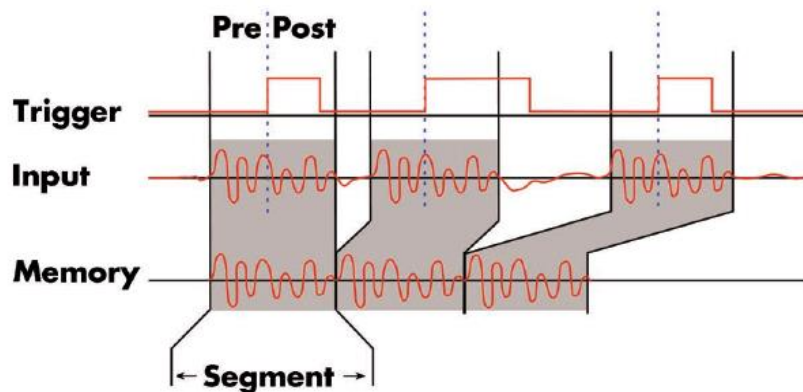


Abbildung 30: Pre- und Posttrigger von einem analogen Signal.<sup>83</sup>

Die Abbildung 30 stellt eine exemplarische Aufzeichnung der Messpunkte dar, indem ein Eingangssignal mithilfe der Vor- und Nachtrigger in die auswertbaren Zeitbereiche zugeschnitten wird. Die Parameter für diese Trigger sind in der SpectrumClass definiert und sorgen dafür, dass die M4i-Messkarte ein positionsgenaues Zeitsignal für jeden einzelnen Messpunkt aufzeichnen und verarbeiten kann.<sup>84</sup>

Der verwendete Messempfänger verfügt über mehrere Trigger-Aufnahmefunktionen, wie beispielsweise die Einzelaufnahme (Single Recording), die Mehrfachaufnahme (Multiple Recording) und der Zeitpunktaufnahme (Timestamp Recording). Für die geringe Fehlerquote einer Messung werden bei der elektromagnetischen Emissionsuntersuchung Mehrfachaufnahmen mit 100.000 Messungen pro Abtastpunkt durchgeführt. Mit der mehrfachen Abtastung erfolgt eine statistische Reduzierung der zufälligen Fehler. Da diese Mehrfachaufnahmefunktion eine sehr kurze Reaktionszeit aufweist, ist diese in der Lage, die Messdaten linienweise als Datenblock zeitgleich zu erfassen und als Segment abzuspeichern. Für jede Messlinie (X-

<sup>83</sup> Spectrum Instrumentation GmbH (2023a), S. 125.

<sup>84</sup> Vgl. Spectrum Instrumentation GmbH (2023a), S. 125.

Achse) wird eine neue Mehrfachaufnahme gestartet, die das Segment mit Signal-  
daten befüllt. Der dabei erzeugte Datenpuffer beinhaltet eine Matrix, die aus der  
Anzahl der Messpunkte pro Linie und der Anzahl der Abtastpunkte pro Messpunkt  
besteht. Dieser Puffer wird bei einer Emissionsuntersuchung mit digitalisierten  
Spannungswerten befüllt und anschließend durch eine digitale Signalverarbeitung  
ausgewertet.

Die Ausgabe der digitalisierten Spannungsamplituden  $U_{in}$ , die am Eingang anliegen,  
wird standardmäßig als 16-Bit-Integer-Ganzzahl ausgegeben. Für eine Auswertung  
dieser Signaldaten findet eine Umrechnung in die tatsächlichen Spannungswerte  
am Eingang statt.<sup>85</sup>

ADC-Abtastwerte in  
Spannungswerte:

$$U_{in} = ADC_{Code} \cdot \frac{Empfindlichkeit}{ADC_{max}} \quad (22)$$

Die abgetasteten und quantisierten Signale werden dabei einem Signalwort zwi-  
schen  $-128$  und  $127$  zugeordnet. Dieses entspricht dem Analog-Digital-Code und  
wird mit dem Verhältnis der voreingestellten Eingangsempfindlichkeit und dem digi-  
talierten 8-Bit-Maximalwert von  $255$  multipliziert.<sup>86</sup>

### 3.2.4 Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle ist ein Teil der Ausgabeeinheit und beinhaltet die Integra-  
tion der Steuereinheit sowie der Verarbeitungseinheit. Diese ist eine MATLAB-An-  
wendung, welche mit dem MATLAB-Appdesigner entwickelt worden ist. Mit der Ap-  
plikation, die Pegasus Scanner App genannt wird, werden sämtliche Funktionen der  
PegasusClass und der SpectrumClass kombiniert und ausgeführt. Die gesamte  
Programmierung der Messumgebung besteht aus zwei MATLAB-Klassen, einer  
FFT-Analyse und diversen grafischen Auswertungsmöglichkeiten.

---

<sup>85</sup> Vgl. Spectrum Instrumentation GmbH (2023a), S. 92.

<sup>86</sup> ebd.

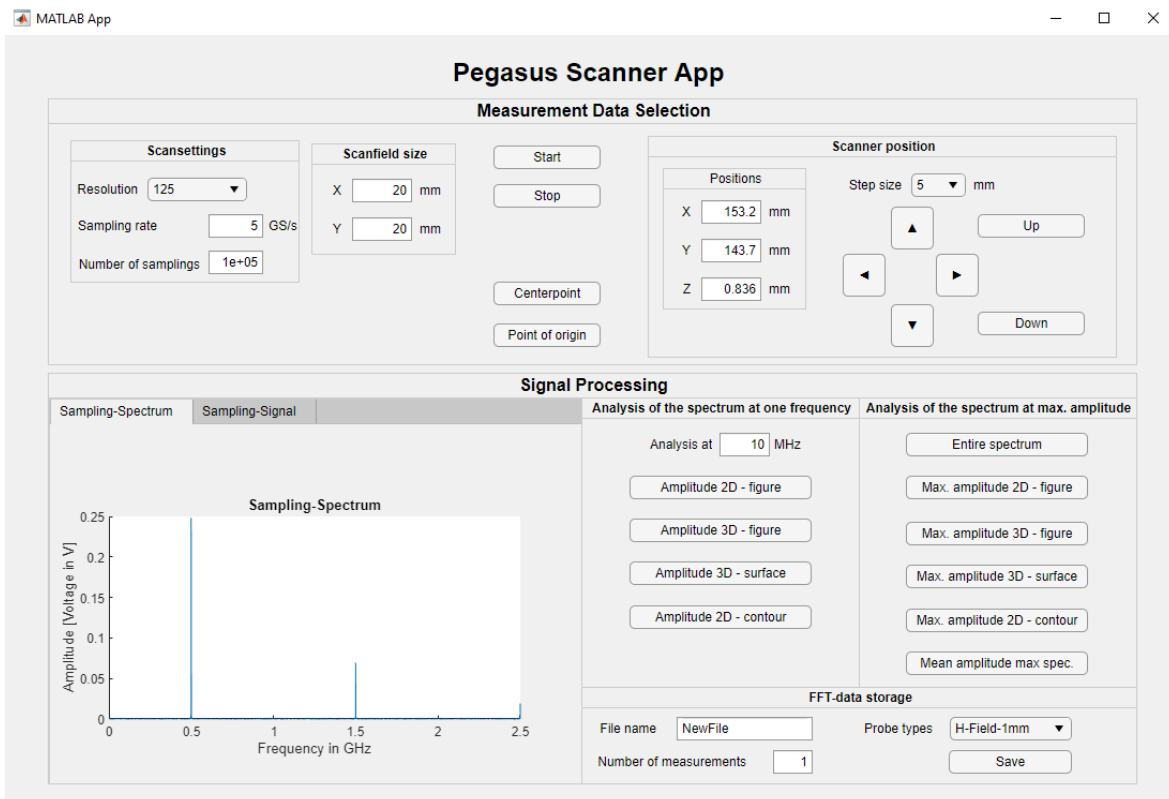


Abbildung 31: Bedienungsfläche der Scan- und Auswertungseinheit.

Das Layout der Pegasus Scanner App ist in Abbildung 31 dargestellt. In dieser Bedienungseinheit findet die Eingabe der Scanparameter statt, die anschließend in der Klassenprogrammierung unterschiedliche Aufnahme- und Positionierungsfunktionen ausführen. Mit den Scaneinstellungen können die Auflösung, die Abtastrate, die Scanfeldgröße und die Anzahl der Messungen pro Messpunkt eingestellt werden. Über ein Auswahlfeld wird die Scanfeldauflösung zwischen 125 und 8000 Messpunkten pro Messlinie gewählt. Zu den genannten Einstellungen besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Messungen pro Messpunkt und die Abtastrate über ein Eingabefeld festzulegen. Dabei werden beide Werte mit den verfügbaren Parametern der Messkarte verglichen. Sofern eine Eingabe nicht von der M4i-Messkarte unterstützt wird, wählt die Anwendung durch einen Fehlerabfang die nächstgelegene Abtastrate und Messanzahl aus.

Der Starttaster übergibt die zuvor festgelegten Parameter an die MATLAB-Klassen und führt die Funktionen der Sondenpositionierung und der Datenaufnahme aus. Dabei bewegt die Scaneinheit die elektrische oder magnetische Nahfeldsonde, wie in Abbildung 27 auf Seite 37 gezeigt, vom Startpunkt zum ersten Messpunkt. Beim Erreichen eines Messpunktes wird der analoge Eingang der M4i-Messkarte aktiviert

und das Triggersignal der Pegasus-Steuerung wird an den externen Triggereingang der Messkarte übertragen. Dabei wird die Mehrfachaufnahme des Zeitsignals gestartet und der Datenpuffer einer Messlinie wird befüllt. Der Stopptaster dient als Abbruchfunktion und beendet die Datenaufzeichnung, -verarbeitung und sämtliche Positionierungen.

Die digitale Signalverarbeitung in der Pegasus Scanner App stellt das abgetastete Signal der Messpunkte sowie das dazugehörige Spektrum dar. Mit einer zerstörungsfreien Oberflächenmessung von den zu prüfenden Proben werden die abgespeicherten Datensegmente in ein Spektrum transformiert. Dabei wird mit einer FFT der zeitlich abgetastete Datenpuffer in einzelne Spektralkomponenten zerlegt (Listing 1). Dieser frequenzabhängige Aufschluss über die Zusammensetzung sorgt dafür, dass einzelne Bereiche auf die Pegel untersucht werden können.

```
app.fftBuffer = [];  
for Lines = 1:nbrOfLines % Linienweise FFT zur Speichereinsparung.  
    line = squeeze(line); % Entfernen von Dimensionen der Länge 1.  
    line_fft = abs(fft(line))/nbrOfSamples; % Berechnung des Spektrums.  
    line_fft = line_fft(1:floor(nbrOfSamples/2),:);  
    line_fft(2:end) = 2*line_fft(2:end); % Folge positiver Frequenzen, beginnend mit der Kleinsten.  
    app.fftBuffer(:, :, Lines) = line_fft; % Befüllung des FFT-Datenpuffers.  
end
```

*Listing 1: MATLAB-Code von der FFT.*

Die Anwendung verfügt über eine Vielzahl an integrierten Auswertungsfunktionen, um die Amplituden des FFT-Datenpuffers auf einzelne Frequenzen analysieren zu können. Mit diesen können das gesamte Spektrum, die Amplitude bei ausgewählten Frequenzen und die maximale Amplitude aller vorkommenden Frequenzen dargestellt werden. Die grafischen MATLAB-Darstellungen sind für die Auswertung relevant und können eine mögliche Abweichung in den Signaturen der originalen und gefälschten Halbleiterkomponenten darstellen (Listing 2).

```

% Button pushed function: Maxamplitude2DfigureButton
function Maxamplitude2DfigureButtonPushed(app, event)
    [max_data_fft max_idx] = max(app.fftBuffer); % Höchste Amplitude im FFT-Datenpuffer.

    figure; % Grafische Darstellung der maximalen Amplitude des gesamten Spektrums.
    imagesc(20*log10(squeeze(abs(max_data_fft))));
    colormap jet;
    cb = colorbar();
    ylabel(cb, 'Amplitude [Voltage in dBV]', 'FontSize', 12, 'Rotation', 90);
    title(['2D-figure; Maximum amplitude of all spectra'], ...
        ['Sampling rate = ' ' num2str(fs) '...'
        ' GS/s, Resolution = ' ' num2str(res) '']);
    xlabel('X-Axis in mm');
    ylabel('Y-Axis in mm');
end

```

*Listing 2: MATLAB-Code von einer exemplarischen Auswertefunktion.*

Der abgebildete Save-Taster in Abbildung 31 dient der Datensicherung und führt eine MATLAB-Save-Funktion aus. Dabei wird der erzeugte FFT-Datenpuffer als MATLAB-File für eine spätere Auswertung abgespeichert.

### 3.3 Proben

Das vorliegende Kapitel behandelt die Proben, die im Rahmen der Untersuchung verwendet werden. Dabei werden die Mikrostreifenleitung sowie die authentischen und nicht authentischen STM32 und die FTDI FT232RL-Proben näher erläutert.

#### 3.3.1 Mikrostreifenleitung

Die in der Abbildung 32 gezeigte Probe ist eine Platine, auf der sich Mikrostreifenleitungen befinden und welche für Testzwecke sowie für ein mögliches Kalibrierverfahren entwickelt wurde. Dabei weisen die Leitungen unterschiedliche Längen sowie Abstände zueinander auf. Auf der Vorderseite befinden sich zehn Kupferbahnen, die jeweils einen angelöteten SMA-Stecker besitzen. Auf der Rückseite dieser zweilagigen Platine befindet sich die Massefläche. Mit dieser Platine wurden die elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden auf die Empfangsempfindlichkeit, die Frequenzempfindlichkeit sowie deren Auflösung gegenüber den elektromagnetischen Feldquellen überprüft.

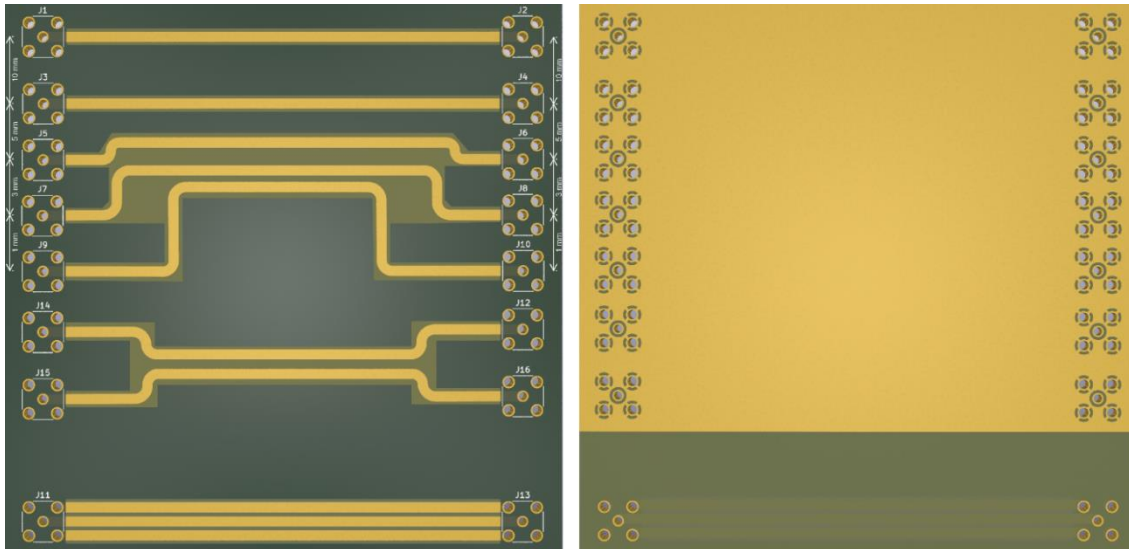


Abbildung 32: KiCad-Layout der Mikrostreifen-Testplatine (links Vorderseite, rechts Rückseite).

Die Platine mit einer Größe von 10 x 10 cm wurde in KiCad erstellt und hat eine Kupferschichtdicke  $T$  von 350  $\mu\text{m}$ . Diese ist aus einem FR-4 Trägerwerkstoff hergestellt und besitzt eine stoffabhängige Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  von 4,5. Die Substrathöhe  $H$ , die sich zwischen den zwei Kupferschichten befindet, ist vom Hersteller JLCPCB vorgegeben und beträgt 1 mm. Die Leitungslänge  $L$  ist unabhängig von der Eingangsimpedanz und kann beliebig variiert werden. Der einzige Parameter, der für eine 50  $\Omega$  Wellenimpedanz  $Z_0$  berechnet werden muss, ist die Leitungsbreite  $W$ . Diese wurde mit dem Berechnungstool von KiCad ermittelt und beträgt rund 1,85 mm. Der Aufbau der Mikrostreifenleitung ist in der Abbildung 33 schematisch dargestellt.

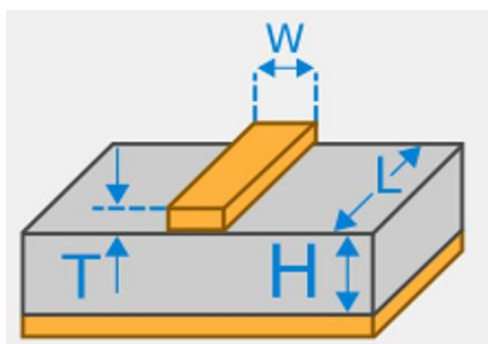


Abbildung 33: Aufbau der Mikrostreifenleitung.<sup>87</sup>

<sup>87</sup> Alberto (2018).

### 3.3.2 STM32-Mikrokontroller

Die erste elektrische Halbleiterkomponente, die in dieser Bachelorarbeit auf die Authentizität überprüft werden soll, ist der STM32-Mikrochip. Dieser ist ein Mikrokontroller von STMicroelectronics und besitzt eine leistungsstarke 32-Bit ARM Cortex-M3-CPU-Kern-Architektur mit einer Rechengeschwindigkeit von 72 MHz. Der STM32 verfügt je nach Art über einen internen Flashspeicher von 32 kB oder 128 kB. Die auszuführenden Prozessanwendungen werden beim Start geladen und durch externe Programme wie *Arduino IDE* in den Flashspeicher abgelegt und implementiert.<sup>88</sup> Die äußeren Abmessungen dieser STM-Probe sind durch die LQFP48-SMD Bauform definiert. Diese besitzt eine Gehäusegröße von 7 x 7 mm und eine Gehäusehöhe von 1,6 mm. In dieser Untersuchung wurden Gehäusetypen und Entwicklungsboards mit 48 Pins verwendet.<sup>89</sup>

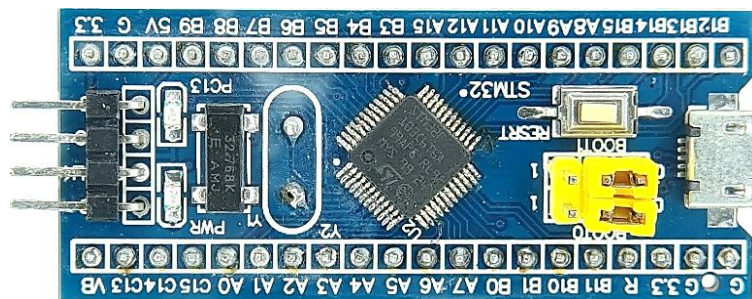


Abbildung 34: BluePill-Entwicklungsboard mit STM32F103C6T6.

Für eine Inbetriebnahme sind die unterschiedlichen STM32-Mikrochips auf einem BluePill-Entwicklungsboard (Abb. 34) aufzulöten.<sup>90</sup> Dabei werden diese Mikrochips mit einer Spannung von 5 V durch eine USB-Schnittstelle in Betrieb genommen. Die Kommunikationsschnittstelle des Mikrochips basiert auf einem USB-Micro-Interface und ermöglicht eine einfache und flexible Softwareimplementierung. Die in den Arbeitsspeicher geladene Software soll die Auslastung anheben, damit im Prozessor höhere Ströme fließen und elektrische Schaltungen innerhalb des Chips aktiviert werden.

Die STM32F103C6T6 und STM32F103C8T6-Proben sind durch eine problemlose Integration und vielfältige Verwendung weltweit in Geräten einsetzbar. Die hohe

<sup>88</sup> Vgl. STMicroelectronics (2015), S. 1.

<sup>89</sup> ebd., S. 10.

<sup>90</sup> Vgl. Stal (2018).



Verbreitung am globalen Markt hat dazu beigetragen, dass unterschiedliche Varianten vom Originalchip entwickelt wurden. Aus diesem Grund sind die heute erhältlichen Imitationen des STM32, typischerweise Klonungen oder weisen ein umgelabeltes Erscheinungsbild von bereits gebrauchten originalen Mikrochips auf. Da die meisten Fälschungen optisch nicht von einem Originalbauteil unterschieden werden können, ist häufig nicht bekannt, ob eine Fälschung oder ein weiterverkauftes Originalbauteil vorliegt.

Am globalen Markt gibt es ein erhebliches Angebot an potenziellen STM32-Fälschungen durch nicht vertrauenswürdige Händler. Die potenziell gefälschten Proben sind in dieser Versuchsdurchführung von dem Onlinehändler AliExpress aus China importiert worden. Dabei besitzen diese eine unterschiedliche Serienkennziffer und Bezeichnung. Zudem weisen diese einen großen Preisunterschied im Vergleich zum Originalbauteil auf.

In den Tabellen 2 und 3 sind die verschiedenen STM32-Proben aufgelistet. Dabei enthalten diese die Bezeichnung des Mikrochips, die Seriennummer auf der Chipoberfläche, den aktuellen Kaufpreis sowie die Nah- und Röntgenaufnahmen. Da eine präzise Imitation von dem Originalbauteil optisch nicht erkennbar ist, sind diese als potenzielle Fälschung gekennzeichnet.

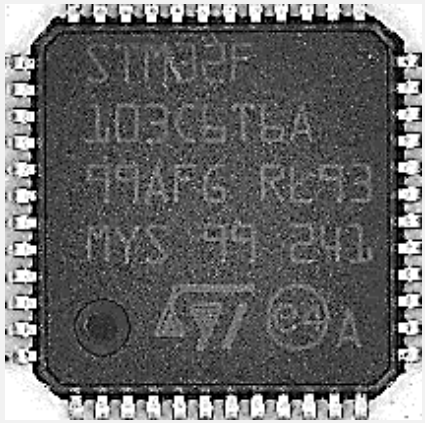

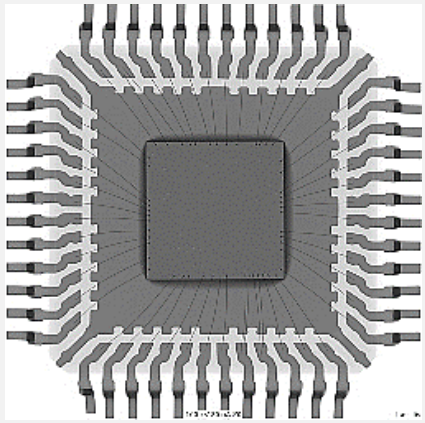
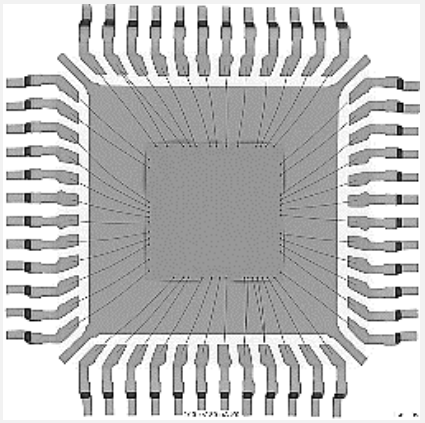
Bezeichnung	STM32 F103C6T6A	STM32 F103C6T6A
Echtheit	Original	potenzielle Fälschung
Seriennummer	MYS 99 241	MYS 99 236
Stückpreis	8,70 €	0,46 €
Händler	STMicroelectronics	AliExpress
Nahaufnahme		
Röntgenaufnahme		

Tabelle 2: Auflistung der authentischen und nicht authentischen STM32F103C6T6-Mikrocontroller.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Mikrokontroller-Arten besteht in der Größe des Speichers. Der STM32F103C8T6 besitzt einen 128 kB Flashspeicher und einen 20 kB SRAM.

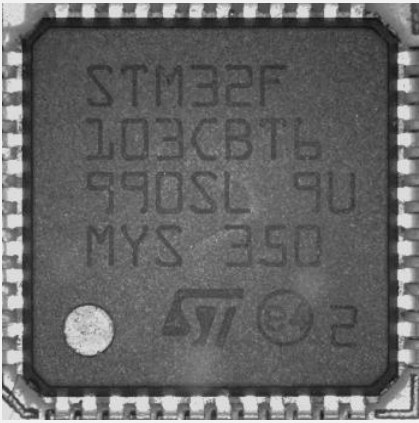
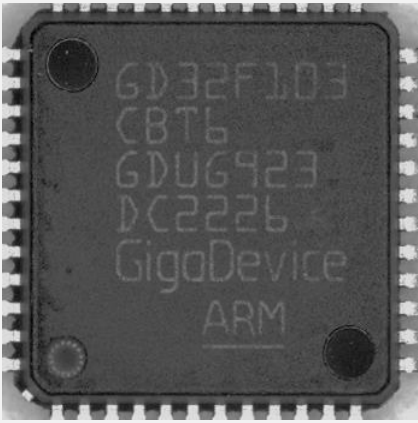
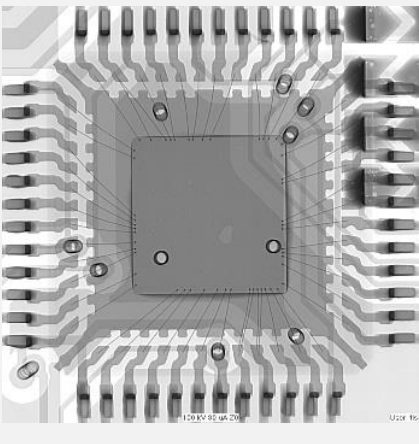
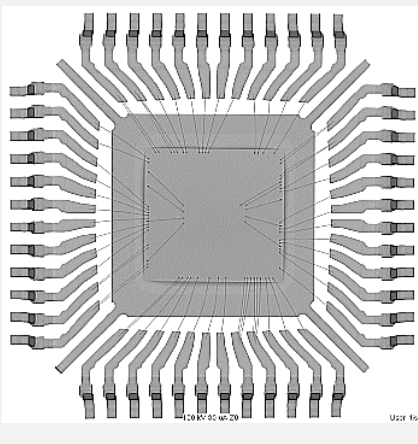
Bezeichnung	STM32 F103C8T6	GD32 F103C8T6
Echtheit	Original	potenzielle Fälschung
Seriennummer	MYS 350	DC2226
Stückpreis	9,60 €	0,87 €
Händler	STMicroelectronics	AliExpress
Nahaufnahme		
Röntgenaufnahme		

Tabelle 3: Auflistung der authentischen und nicht authentischen STM32F103C8T6-Mikrokontroller.

### 3.3.3 FTDI FT232RL

Der FT232RL ist ein Mikrochip von dem Unternehmen Future Technology Devices International und ist ein Signalkonverter. Dieser wird grundlegend in der Kommunikationstechnik als USB-UART-Schnittstelle verwendet. Dabei können die Daten mit

bis zu acht Datenleitungen über die Schnittstelle auf ein serielles Bussystem übertragen werden. Der FTDI-Chip unterstützt das USB 2.0 System und ist auf das USB 1.1 System abwärtskompatibel.<sup>91</sup> Die anliegenden Daten werden mit einer Symbolübertragungsgeschwindigkeit von bis zu 3 Mbaud in beide Richtungen transformiert und übertragen.<sup>92</sup> Dabei basiert der integrierte Datenpuffer auf einem First-In-First-Out-Prinzip und ermöglicht eine effiziente und verlustarme Datenübertragung. Die Taktgenerierung wird dabei mit einem internen Schwingquarz umgesetzt und verfügt über die Taktfrequenzen von 6 MHz, 12 MHz, 24 MHz und 48 MHz. Mit einem integrierten Festspannungsregler, kann der FT232RL mit bis zu 5 V Betriebsspannung versorgt werden. Das Gehäuse des Mikrochips besitzt die SSOP-28 Bauform und verfügt über eine Abmessung von 10,2 x 5,3 mm mit 28 Pins.<sup>93</sup>

Die Inbetriebnahme ist für eine elektromagnetische Oberflächenmessung erforderlich. Daher sind die Proben ebenfalls auf einem Entwicklungsboard zu integrieren. Dieses heißt UM232R und wird von FTDI als typische USB-UART-Schnittstelle verwendet (Abb. 35).<sup>94</sup>

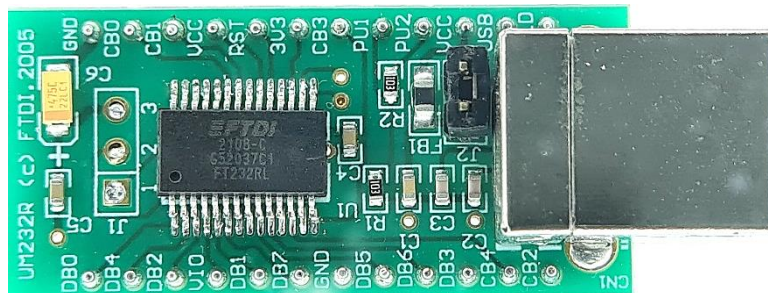


Abbildung 35: UM232R-Entwicklungsboard mit einem FTDI FT232R Konverter.

Für die Fälschungssicherheit des FT232RL wird bei der Herstellung eine eindeutige FTDI-Chip-ID vergeben. Diese ist über die USB-Schnittstelle auslesbar und kann Aufschluss über die Echtheit geben.<sup>95</sup> Mit dieser Echtheitsgarantie sollen die Kundenanwendungen und Softwareprodukte geschützt werden, die mit dem FT232RL-Chip interagieren. Die aktuellen Fälschungstechnologien sind aller-

<sup>91</sup> Vgl. Future Technology Devices International Ltd (2020), S. 1.

<sup>92</sup> ebd.

<sup>93</sup> ebd., S. 31.

<sup>94</sup> Vgl. FTDI Chip (2018), S. 2.

<sup>95</sup> Vgl. Future Technology Devices International Ltd (2020), S. 12.

dings in der Lage, diese ID zu klonen oder diese ohne Gültigkeit betreiben zu können. Da der Konverterchip für eine Vielzahl an Anwendungen weltweit verwendet wird, nutzen Fälscher die Möglichkeit, die Varianten ohne gültige FTDIChip-ID zu verkaufen.

Die in dieser Messreihe verwendeten FT232RL-Mikrochips wurden bei dem Hersteller FTDI und dem Onlinehändler AliExpress bestellt. Hierbei liegt erneut der Verdacht vor, dass die Produkte von dem Onlinehändler potenzielle Fälschungen sind. Die nachfolgende Tabelle beinhaltet die Bezeichnung des Chips, die Seriennummer, den aktuellen Kaufpreis sowie die Nah- und Röntgenaufnahmen.

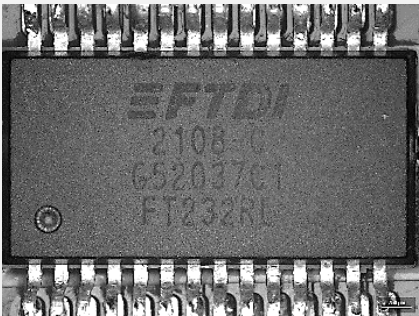
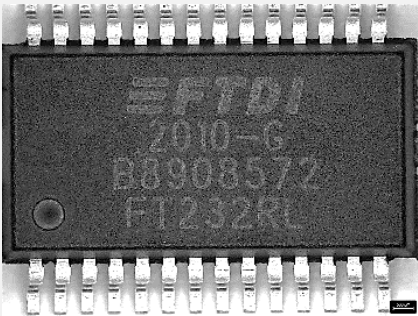
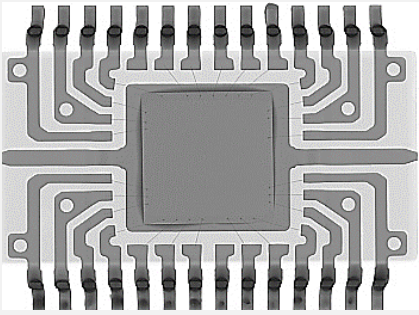
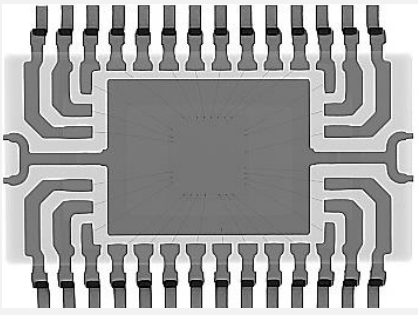
Bezeichnung	FT232RL	FT232RL
Echtheit	Original	potenzielle Fälschung
Seriennummer	G52037C1	B8908572
Stückpreis	5,26 €	2,30 €
Händler	FTDI	AliExpress
Nahaufnahme		
Röntgenaufnahme		

Tabelle 4: Auflistung der authentischen und nicht authentischen FTDI FT232RL-Konverter.

### 3.4 Versuchsdurchführung

Dieses Kapitel umfasst die experimentelle Methodik, die den Aufbau des Messsystems sowie die Durchführung von Messungen an den zuvor beschriebenen Proben darlegt.

#### 3.4.1 Messaufbau

Der Messaufbau basiert auf dem Konzeptentwurf mit den zuvor erläuterten Komponenten. In der Abbildung 36 ist der grundlegende Schaltplan der Versuchsdurchführung abgebildet und soll den Signalfluss von der Nahfeldsonde bis zur Auswertung in der Pegasus Scanner App darstellen. Für die elektromagnetische Oberflächenmessung wird zudem ein Mess-PC für die Softwareimplementierung, Steuerung und Auswertung verwendet. Außerdem wird ein Labornetzgerät für die Inbetriebnahme des Vorverstärkers benötigt (Abb. 37). Für die Untersuchung der Mikrostreifenleitungen ist zudem ein Frequenzgenerator erforderlich. Die Datenübertragung zwischen den Nahfeldsonden, dem Vorverstärker und der M4i-Messkarte erfolgt durch halbstarre Semi-Rigid- und RG-58/U-Koaxialkabel.

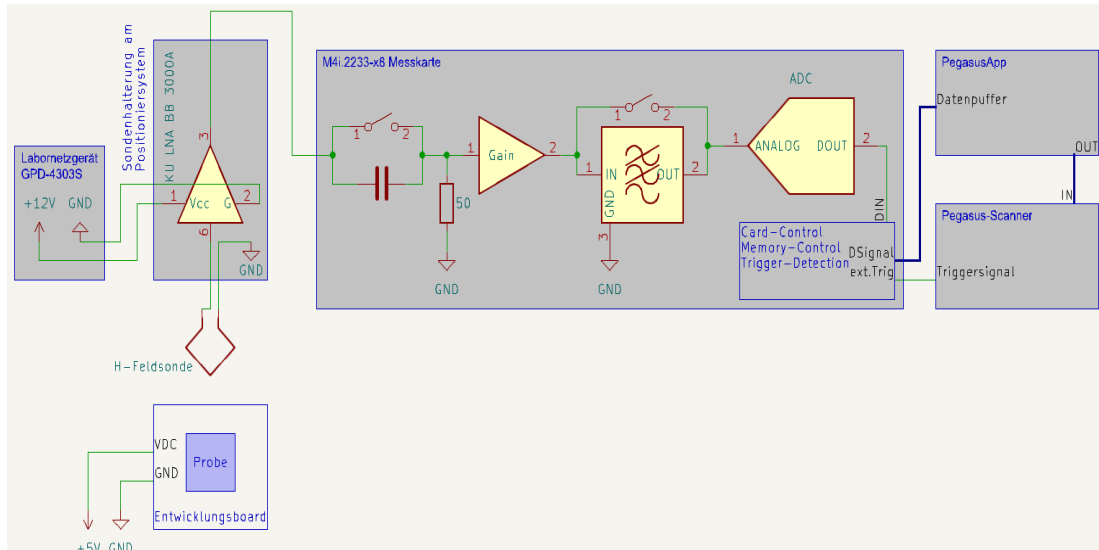


Abbildung 36: Schaltplan der Messumgebung.

Die Versuchsdurchführung einer zerstörungsfreien elektromagnetischen Oberflächenmessung beginnt damit, dass die verschiedenen Proben schaltungsgemäß auf einem Entwicklungsboard zu integrieren sind (Abb. 34 und 35). Die Entwicklungsboards werden hierbei mit einer USB-Schnittstelle an den Mess-PC angeschlossen und mit einer Spannung versorgt. Dieser implementiert das notwendige Programm

mit dem Entwicklungstool *Arduino IDE* und dem Terminal-Programm *hterm*, damit die Prozessauslastung der Mikrochips erhöht werden kann.

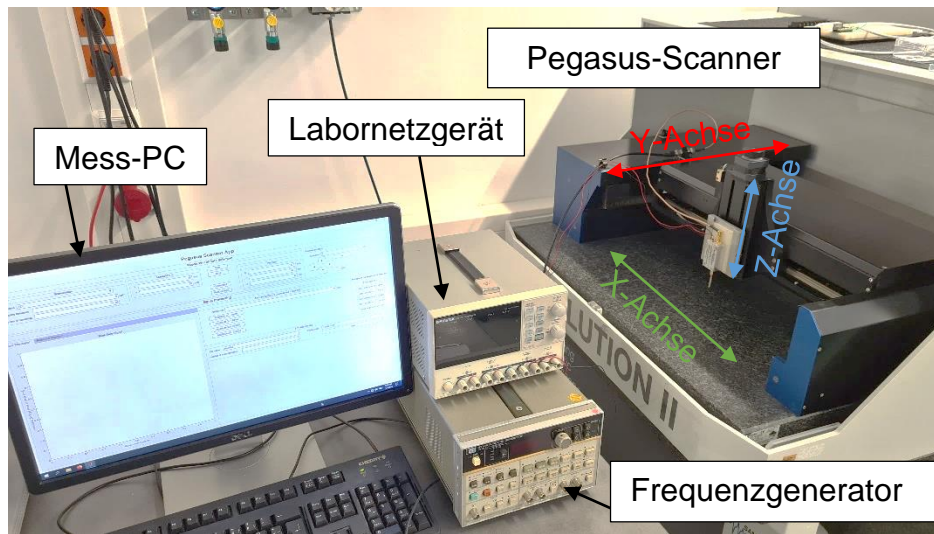


Abbildung 37: Scanmessplatz und dazugehörige Geräte.

Nach der Inbetriebnahme wird die Pegasus-Scaneinheit kalibriert, damit der dreiachsige Scanner positionsgenau die Messpunkte und Messlinien anfahren kann. Die zu untersuchenden Proben werden im Scanbereich des Pegasus-Scanners orthogonal zur Messlinie (X-Achse) positioniert. Die Nahfeldsonden sind für ein positionsgenaueres Messergebnis mittig und oberhalb der Probe zu platzieren. Die Feinpositionierung wird mit der Pegasus Scanner App und den integrierten Steuerknöpfen umgesetzt. Der Starttaster führt die Scanprozedur aus und die M4i-Messkarte erfasst und wandelt die analogen Zeitsignale in ein Digitalsignal um. Nach einem Scan werden die Messwerte aus dem Datenpuffer ausgelesen und durch eine Fast-Fourier-Transformation in die spektralen Anteile zerlegt. Der dabei erzeugte FFT-Datenpuffer dient der Auswertung und wird mit unterschiedlichen Analysefunktionen aufgerufen und anschließend abgespeichert.

Die Spannungsamplituden der FFT-Analyse werden logarithmiert und positionsgenau abgebildet. Dabei werden die Ergebnisse auf ein optisches Bild des Mikrochips projiziert und überlagert. Mit dieser soll eine vereinfachte Darstellung der internen Pegelverteilung oberhalb der Probe ermöglicht werden.

Spannungspegel: 
$$U[dBV] = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_{FFT}}{1V} \right) \quad (23)$$

### 3.4.2 Messung Mikrostreifenleitung

Mit der elektromagnetischen Untersuchung der Aussendungen von den Mikrostreifenleitungen sollen das theoretische Biot-Savart-Gesetz sowie das Abstands-Quadrat-Gesetz der Feldquellen nachgewiesen werden. Für die Einspeisung der 50  $\Omega$ -Mikrostreifenleitung wird ein 3314A-Hewlett-Packard Funktionsgenerator verwendet. Dieser legt ein Sinussignal mit einer Amplitude von 7 V und mit einer Frequenz von 20 MHz an, das anschließend über die Kupferleitungen abgestrahlt wird. Das Leitungsende wird hierbei mit einem SMA ANNE-50L+ 50  $\Omega$ -Abschlusswiderstand abgeschlossen. Für die Bestätigung des elektromagnetischen Abstands-Quadrat-Gesetzes werden die Mikrostreifenleitungen orthogonal zur Messlinie (X-Achse) des Pegasus-Scanners positioniert (Abb. 38). Dabei wird das Scanfeld mit einer Auflösung von 125 Abtastpunkten pro Messlinie, einer Scanfeldgröße von 30 x 30 mm und 100.000 Messungen pro Abtastpunkt abgetastet.

Diese Untersuchung stellt die Höheninformation der Nahfeldsonden und der dabei induzierten sowie kapazitiv eingekoppelten Spannung in einem Verhältnis dar. Diese Messung soll einen Aufschluss darüber geben, in welcher Höhe sich die Sonde für eine optimale Pegelmessung befinden muss. Dabei wird diese auf dem Kupferbelag der Mikrostreifenleitung aufgesetzt und durch die Z-Achse des Scanners von 0,5 mm bis 20 mm angehoben. Die daraus resultierenden Pegel sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt und beweisen die physikalische Gesetzmäßigkeit. Die Nahfeldsonden sind dabei einzeln zu betrachten, da diese unterschiedliche Sondenstrukturen aufweisen.

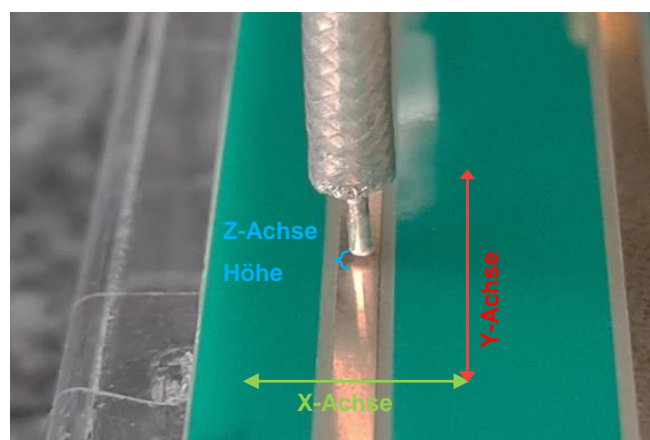


Abbildung 38: Messung der Aussendungen oberhalb der Mikrostreifenleitung in einer Höhe von 0,5 mm.



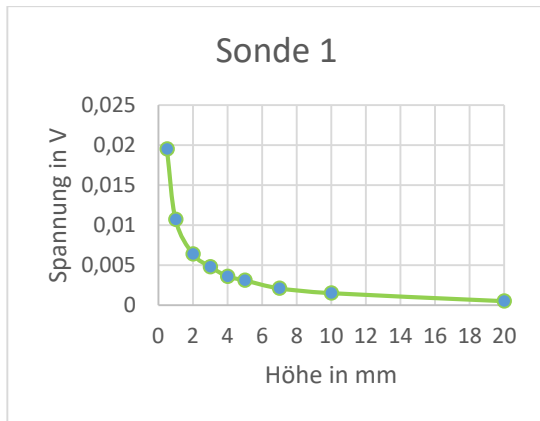


Abbildung 39: Amplituden der E-Feldsonde 1.

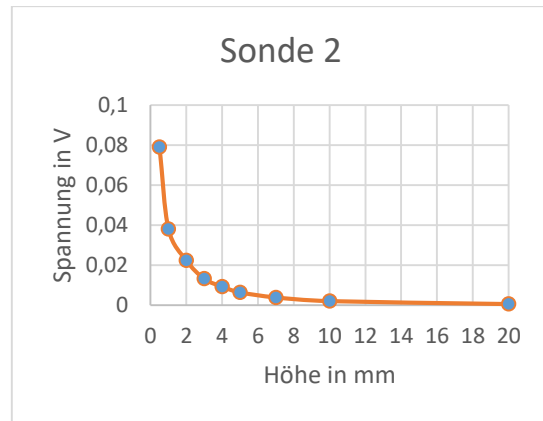


Abbildung 40: Amplituden der H-Feldsonde 2.

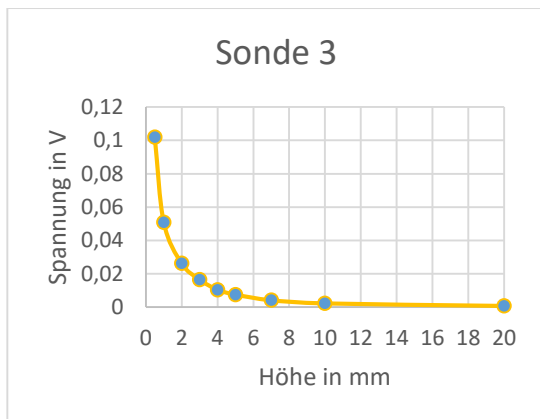


Abbildung 41: Amplituden der H-Feldsonde 3.

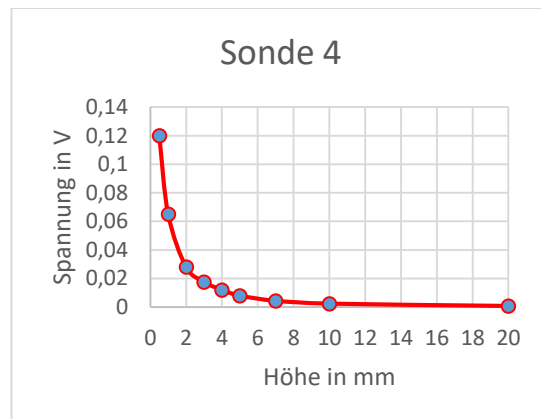


Abbildung 42: Amplituden der H-Feldsonde 4.

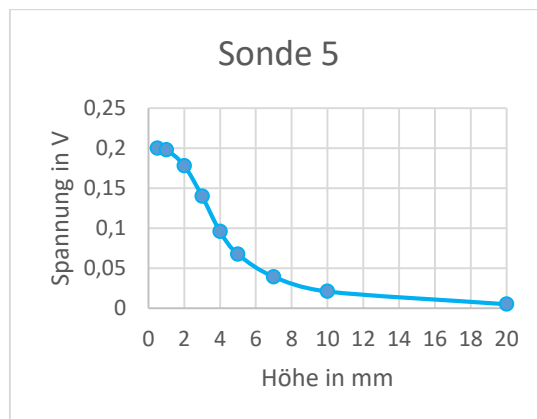


Abbildung 43: Amplituden der H-Feldsonde 5.

Diese vorliegenden Diagramme beinhalten Messdaten über die Höheninformation im Verhältnis zur kapazitiv eingekoppelten (Abb. 39) und induzierten (Abb. 40 bis 43) Spannung. Darin ist ersichtlich, dass je geringer der Abstand zur Feldquelle ist, desto höher sind die empfangenen Spannungsamplituden. Die gewonnene Erkenntnis aus dem Abstands-Quadrat-Gesetz der elektromagnetischen Felder wird bei den zu prüfenden originalen und gefälschten Halbleiterproben verwendet.

Um die Funktionsfähigkeit der horizontal ausgerichteten magnetischen Nahfeldsonden (Spulen) nachzuweisen, werden weitere Messungen zur Erfassung des magnetischen Nahfeldes durchgeführt. Hierbei soll das Biot-Savart-Gesetz sowie die Unabhängigkeit der Nahfeldsonden von der Ausbreitungsrichtung der Nahfelder in einer Höhe von 0,5 mm nachgewiesen werden.

### **3.4.3 Messung STM32-Mikrokontroller**

Bei der Messung der elektromagnetischen Emissionen des STM32 wird ein Scanfeld von 7 x 7 mm aufgestellt. Dieses ergibt sich aus den LQFP48-SMD Gehäusemaßen und soll ausschließlich die elektromagnetischen Strahlungscharakteristiken oberhalb des Mikrochips erfassen. Hierbei werden die Spannungspegel der abgestrahlten Nahfelder vertikal (Z-Richtung) erfasst und ausgewertet. Aufgrund der gewonnenen Höheninformation beträgt der Abstand zwischen der Sonde und der Probe 0,5 mm.

Die Software für die Erhöhung der prozessbedingten Auslastung wurde für den STM32 mit *Arduino IDE* implementiert. Hierbei führt dieses Programm eine rechenintensive for-Schleife aus und sorgt damit dafür, dass der Prozessor stark ausgelastet ist. Diese hohe Auslastung des Mikrochips soll dazu beitragen, dass prozessbedingte Feldquellen oberhalb des Gehäuses detektierbar sind. Da der Prozessor mit einer Rechengeschwindigkeit von 72 MHz getaktet ist, wird die Abtastrate der M4i-Messkarte von 5 GS/s auf 0,625 GS/s gesenkt. Somit werden mögliche Störquellen oberhalb des Frequenzbereichs abgeschnitten und es können mehr Messwerte bei niedriger Abtastrate aufgenommen werden. Diese Verringerung führt zu einer feineren spektralen Auflösung und das SNR wird durch Mittelung verbessert. Die Pegelerfassung ist durch das Abtasttheorem bis zu einer auswertbaren Signalfrequenz von 312,5 MHz möglich.

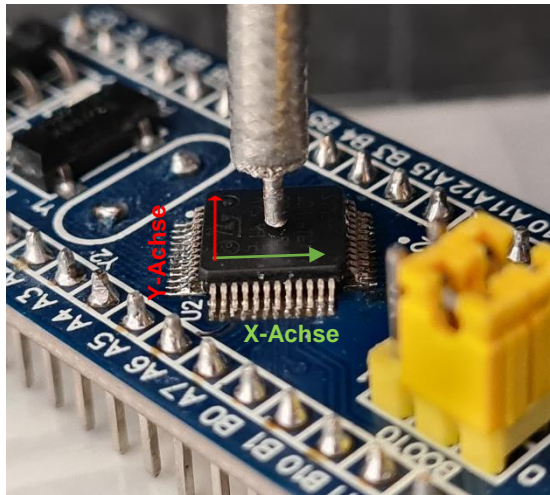


Abbildung 44: Messung der Aussendungen oberhalb des STM32 in einer Höhe von 0,5 mm.

Die Abbildung 44 stellt die exakte Sondenpositionierung oberhalb des STM32-Gehäuses dar. Dabei werden die Nahfeldsonden mittig vom Gehäuse platziert und der Scanner fährt die berechneten Messpunkte nacheinander ab. Für eine konkrete Reproduzierbarkeit der Messergebnisse werden alle relevanten Scanparameter nachfolgend aufgelistet.

Scanfeld Auflösung	125 Messpunkte je Messlinie
Abtastrate	0,625 GS/s
Anzahl der Abtastungen pro Messpunkt	100.000
Scanfeld in X-Richtung	7 mm
Scanfeld in Y-Richtung	7 mm
Scanhöhe in Z-Richtung	0,5 mm
Empfangsbereich M4i-Messkarte	$\pm 200$ mV

Tabelle 5: Auflistung der Messparameter STM32.

#### 3.4.4 Messung FTDI FT232RL

Die elektromagnetische Nahfeldmessung des FT232RL basiert grundlegend auf demselben Messaufbau (Abb. 45) und beinhaltet die gleichen Messparameter wie bei dem STM32. Durch verschiedene Gehäusetyper besitzt das Scanfeld hierbei die Größe von 11 x 6 mm. Da der FT232RL kein Mikroprozessor ist, sondern als Konverter fungiert, bedarf es hierbei keiner internen Softwareimplementierung. Dennoch muss für die Felderfassung ein Datenaustausch im Mikrochip stattfinden. Dabei wird das Terminal-Programm *hterm* verwendet. Es generiert ein Bitsignal,

welches mit 12 Mbit/s von der USB-Schnittstelle an den Chip übertragen wird. Dieses Signal wird vom TXD-Ausgang ausgesendet und über eine geschirmte Kupferleitung mit der Länge von 2 m zum RXD-Eingang transferiert. Diese Transferierung sorgt dafür, dass im Mikrochip Wechselströme erzeugt werden, die ein elektromagnetisches Feld generieren. Die Abtastrate der M4i-Messkarte beträgt ebenfalls 0,625 GS/s, da der Konverterchip mit internen Taktfrequenzen bis 48 MHz arbeitet.

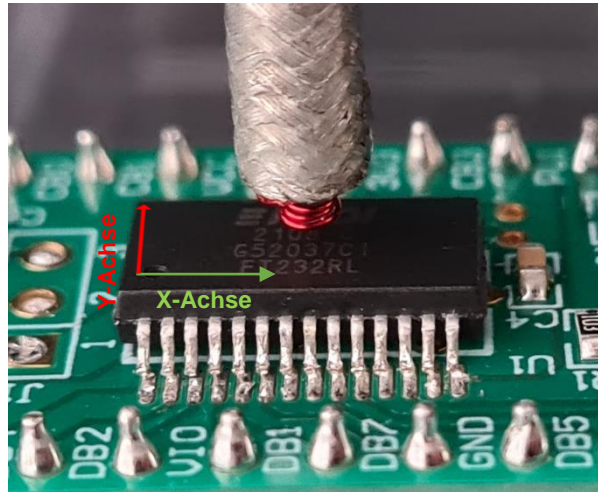


Abbildung 45: Messung der Aussendungen oberhalb des FT232RL in einer Höhe von 0,5 mm.

Die nachfolgende Tabelle beinhaltet die notwendigen Informationen, um eine Reproduktion der Messung an dem FT232RL Konverterchip vornehmen zu können. Hierbei werden die Auflösung, die Abtastrate, die Scanfeldparameter sowie die Übertragungsrate aus dem *hterm*-Programm aufgelistet.

Scanfeld Auflösung	125 Messpunkte je Messlinie
Abtastrate	0,625 GS/s
Anzahl der Abtastungen pro Messpunkt	100.000
Scanfeld in X-Richtung	11 mm
Scanfeld in Y-Richtung	6 mm
Scanhöhe in Z-Richtung	0,5 mm
Empfangsbereich M4i-Messkarte	$\pm 200$ mV
Übertragungsrate TXD $\rightarrow$ RXD	12 Mbit/s

Tabelle 6: Auflistung der Messparameter FT232RL.

### 3.5 Frequenzempfindlichkeit und Kalibrierung der Nahfeldsonden

Dieser Abschnitt der Bachelorarbeit umfasst eine Analyse der Empfangsempfindlichkeit von den Nahfeldsonden im Frequenzbereich von 5 MHz bis 1,5 GHz. Des Weiteren wird ein potenzielles Kalibrierungsverfahren für die elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden vorgestellt.

#### 3.5.1 Frequenzempfindlichkeit

Die Frequenzempfindlichkeit einer Sonde beschreibt die Empfindlichkeit gegenüber dem elektrischen und magnetischen Nahfeld in Abhängigkeit der Frequenz. Für Nahfeldsonden kann diese mithilfe des Kalibrierungsaufbaus, wie in der Abbildung 46 dargestellt, gemessen werden. Hierbei werden die Sonden in einer Höhe von 1 mm über eine orthogonal zur Messlinie ausgerichtete 50  $\Omega$ -Mikrostreifenleitung positioniert. Die Sonde ist dabei so auszurichten, dass damit die maximale magnetische Feldstärke in Z-Richtung erfasst werden kann.<sup>96</sup>

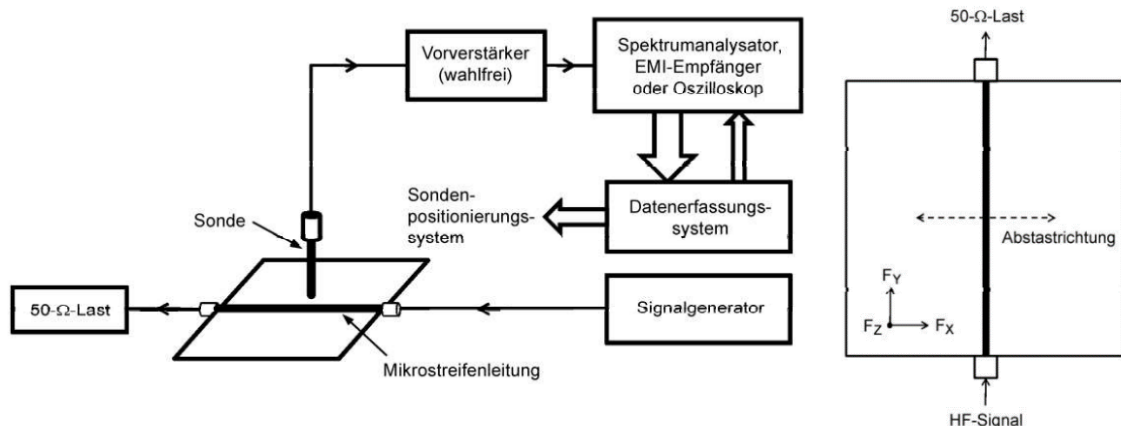


Abbildung 46: Struktureller Aufbau der Kalibrierung und der Abstrahlung über der Mikrostreifenleitung.<sup>97</sup>

Die Mikrostreifenleitung wird am Ende mit einem 50  $\Omega$ -Abschlusswiderstand abgeschlossen. Bei der Messung der Frequenzempfindlichkeit werden die frequenzabhängigen Pegel von 5 MHz bis 1,5 GHz gemessen und in einem Diagramm dargestellt. Bei dieser Messung wird die Empfindlichkeitsstufe der M4i-Messkarte von

<sup>96</sup> Vgl. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 17.

<sup>97</sup> VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 21.

$\pm 200$  mV auf  $\pm 2,5$  V erhöht, um ein Signalclipping zu vermeiden. Der Signalgenerator speist unterschiedliche Signalfrequenzen mit einer Leistung von 10 dBm in die Mikrostreifenleitung ein.

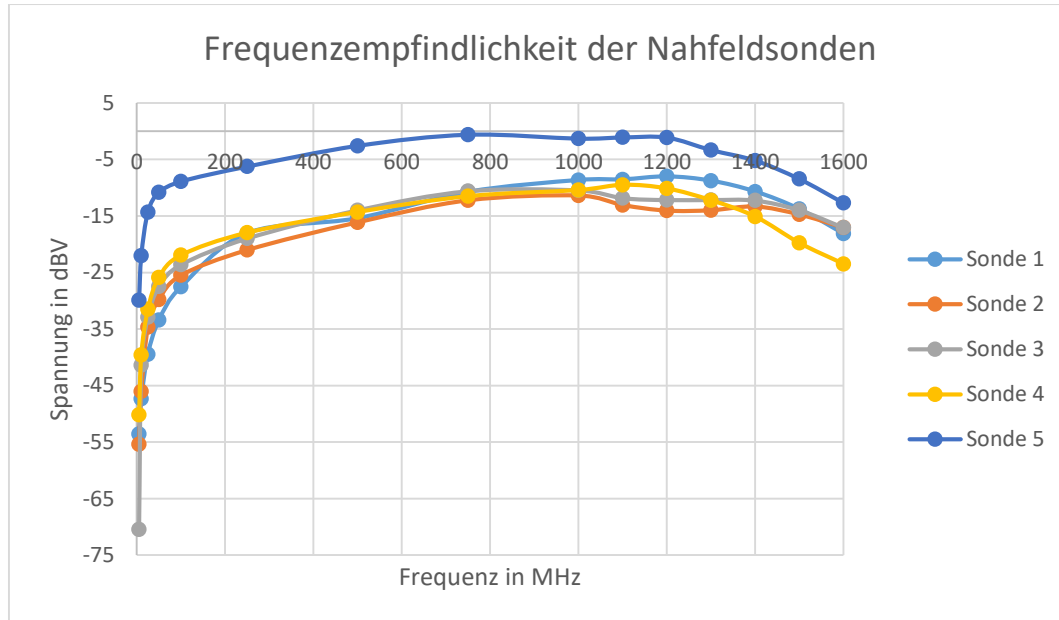


Abbildung 47: Messdaten der Frequenzempfindlichkeit der Nahfeldsonden.

In dem soeben gezeigten Diagramm (Abb. 47) ist ersichtlich, dass die Sonden im niedrigen Frequenzbereich die Amplituden nicht konstant erfassen. Die Ursachen liegen in den unterschiedlichen strukturellen Parametern der Nahfeldsonden sowie unvermeidbaren Effekten wie induktive Kopplungen, Streukapazitäten und Dämpfungen durch parasitäre Widerstände. Für eine optimale Erfassung der elektromagnetischen Emissionen bedarf es einer Kalibrierung der Nahfeldsonden innerhalb des zu untersuchenden Frequenzbereichs.

In dieser Bachelorarbeit werden die Messungen ohne Kalibrierung durchgeführt. Die Gründe liegen hierbei in der ausreichenden Stabilität der Sonden sowie einer hohen Vergleichbarkeit der Messergebnisse von den einzelnen Proben. Da die Messergebnisse von Sonde zu Sonde unabhängig auszuwerten sind, bedarf es hierbei keiner Korrektur der Spannungspegel. Diese weisen durch den strukturellen Aufbau eine unterschiedliche Empfindlichkeit und laterale Auflösung auf. Daher sind die Messergebnisse einzeln zu betrachten. Auf einen Vergleich der Messergebnisse zwischen den Sonden wurde daher verzichtet.

### 3.5.2 Kalibrierung

Da der Aufwand für eine vollständige Sondenkalibrierung sehr hoch ist, wird im Folgenden eine exemplarische Kalibrierung für eine Frequenz durchgeführt. „Mit der Kalibrierung einer Sonde werden Schwankungen der Ansprechempfindlichkeit mit der Frequenz kompensiert und die Umrechnung des Signalpegels an ihrem Ausgang in eine magnetische oder elektrische Feldstärke ermöglicht.“<sup>98</sup> Die Normung DIN IEC/TC 61967-3 beschreibt dabei den Kalibrierungsaufbau sowie das dazugehörige Verfahren (Abb. 46). Für die Kalibrierung der Sonden wird ein sogenannter Kalibrierfaktor benötigt. Dieser stellt eine physikalische Beziehung zwischen dem gemessenen Signalpegel und der Feldstärke her.<sup>99</sup>

Für die Korrektur der Messwerte ist der Pegel in Abhängigkeit zum Abstand von einer Mikrostreifenleitung zu messen. Dabei wird ein Scanfeld von 20 x 20 mm in einer Höhe von 1 mm aufgestellt, welches für die Berechnung und die Messung benötigt wird. Für den Nachweis einer exemplarischen Kalibrierung wird ein Sinus-signal mit 50 MHz und mit einer Leistung von 10 dBm in die Mikrostreifenleitung eingespeist.

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke basiert auf dem Biot-Savart-Gesetz und wird in MATLAB analytisch berechnet. Das Gesetz bildet dabei die Beziehung zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  und der elektrischen Stromverteilung. Mit der Berechnung der Stromverteilung der 10 cm langen Mikrostreifenleitung wird aus dem Vektorprodukt das resultierende Magnetfeld simuliert. Die folgende Formel in Differentialform beschreibt das Magnetfeld durch die magnetische Flussdichte eines stromdurchflossenen Leiters. Dabei ist  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante und  $d\vec{l}$  ist die Länge des Leiters, durch den der Strom  $I$  fließt. Der Einheitsvektor  $\hat{r}$  gibt die Richtung des Vektorabstandes  $r$  vom Strom zum Feldpunkt an.

Magnetischer Flussdichtevektor:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (24)$$

Mit der nachfolgenden MATLAB-Berechnung wird der Verlauf der Feldstärke in Abhängigkeit zum Abstand der Mikrostreifenleitung dargestellt. Die Parameter  $N_x$  und

---

<sup>98</sup> VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 17.

<sup>99</sup> Vgl. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 21.

$N_y$  beinhalten die Anzahl der Abtastpunkte des Simulationsfeldes. Die Auflösung wird durch die Werte  $dx$  und  $dy$  berechnet. Hierbei ergeben sich diese aus der Länge und Breite der Mikrostreifenleitung sowie der Abtastpunkte. Die Simulationshöhe wird durch den Parameter  $h$  festgelegt.

```

% Stromverteilungsmap.
CurrentDensityMapX = zeros([Nx Ny]);
CurrentDensityMapY = zeros([Nx Ny]);
CurrentDensityMapZ = zeros([Nx Ny]);

fieldVector = zeros([Nx Ny 3]);
xv = 1:Nx;
yv = 1:Ny;

for xs = xv
    for ys = yv
        % Definierung des Stromvektors J und Vektorposition r.
        currentVector = [CurrentDensityMapX(xs,ys) CurrentDensityMapY(xs,ys) 0];
        currentVectorPosition = [xs*dx ys*dy 0] ;

        for xi = xv
            for yi = yv
                positionVector = [xi*dx yi*dy h]; % Positionsvektor.
                diffVector = positionVector-currentVectorPosition;

                % Berechnung des magnetischen Flussdichtevektors.
                B = u / (4*pi) * cross(currentVector .* [dx dy 0],...
                    diffVector./norm(diffVector));
                B = B / (norm(diffVector)^2);

            end
        end
    end
end
end

```

Listing 3: MATLAB-Code zur Simulation des magnetischen Feldes.

Die berechnete Feldstärke und die gemessenen Spannungspegel werden in einem Diagramm abgebildet. Die dabei entstehende Kalibrierungskurve wird für die Bestimmung des Kalibrierfaktors mit der berechneten elektromagnetischen Feldstärke verglichen.<sup>100</sup> Die Differenz zwischen der berechneten Feldstärke und dem gemessenen Spannungspegel stellt den Kalibrierfaktor der jeweiligen Frequenz dar.

<sup>100</sup> Vgl. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015), S. 21.



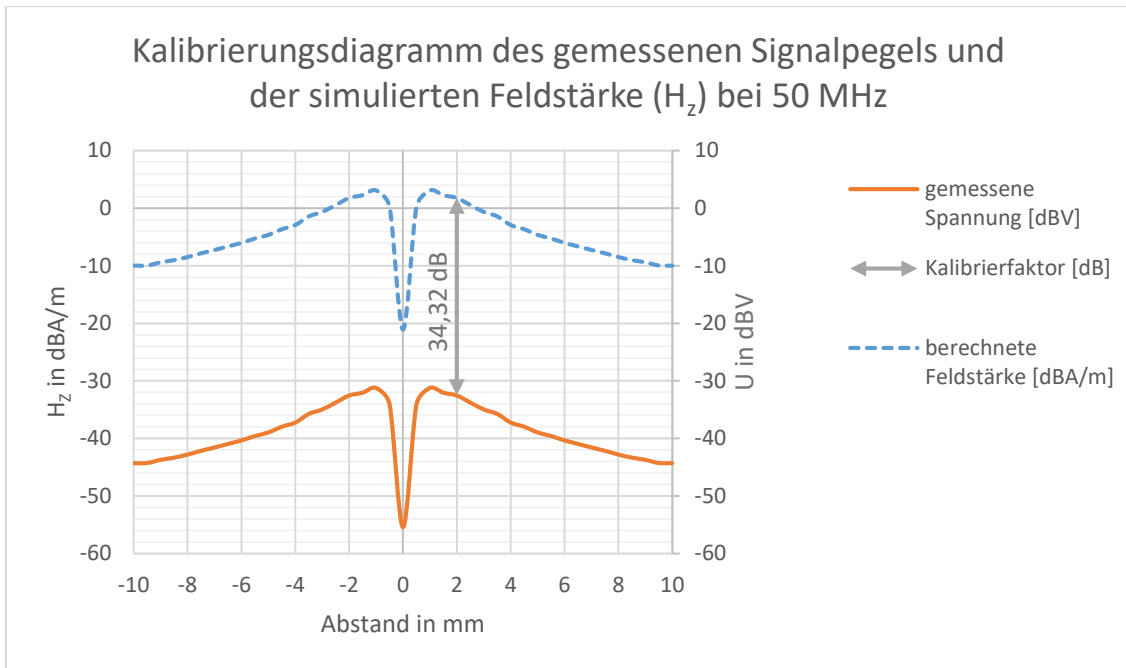


Abbildung 48: Bestimmung des Kalibrierfaktors.

Nach Festlegung des logarithmischen Kalibrierfaktors kann dieser anschließend mit dem Spannungspegel addiert werden.

Kalibrierung: 
$$U_{Kalibr.}[dBV] = U_{Sonde}[dBV] + Kalibrierfaktor[dB] \quad (25)$$

Mit dem Kalibrierfaktor von 34,32 dB kann die magnetische Feldstärke aus der gemessenen Spannung bei einer Frequenz von 50 MHz berechnet werden. Zusammen mit der Empfindlichkeitsmessung aus dem Kapitel 3.5.1 können die Kalibrierfaktoren für den gesamten Frequenzbereich der Sonde bestimmt werden.

## 4 Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die positionsgenauen Ergebnisse der Oberflächenmessungen dargestellt und erläutert. Hierbei ist zu erwähnen, dass nicht alle Nahfeldsonden auswertbare Ergebnisse erzielt haben, um die Echtheit der Proben nachweisen zu können. Daher werden ausschließlich die relevanten Ergebnisse mit deren Überlagerung aufgezeigt. Durch eine farbige Codierung wird die Verteilung der elektrischen und magnetischen Komponenten vereinfacht dargestellt. Die Messergebnisse der Mikrochip-Proben beinhalten Markierungen, die auf markante lokale Spannungspegel hindeuten. Damit soll eine Vergleichbarkeit zwischen dem originalen und gefälschten Bauteil aufgezeigt werden. Die Unterscheidung der Authentizität wird im Kapitel 5.1 diskutiert und konkretisiert.

### 4.1 Mikrostreifenleitung

In dieser Messreihe werden die Sonden 1, 2 und 5 verwendet. Dabei bildet die Sonde 1 die kapazitiv eingekoppelten Spannungen ab. Die Sonden 2 und 5 geben einen Aufschluss über die induzierten Spannungen des Nahfeldes. Die Messergebnisse beinhalten die maximalen Amplituden des gesamten Spektrums.

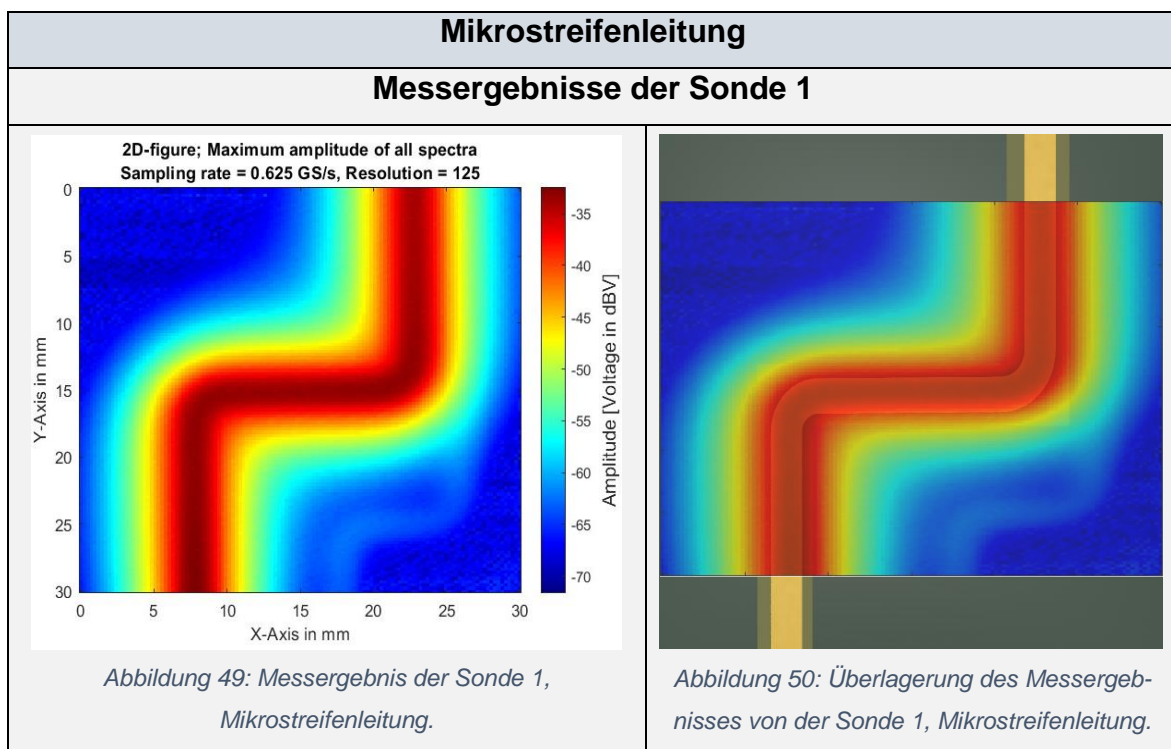


Tabelle 7: Messergebnis der Sonde 1, Mikrostreifenleitung.

In dem Messergebnis der elektrischen Nahfeldsonde (Tabelle 7) ist ersichtlich, dass die höchsten Pegel entlang der Mikrostreifenleitung auftreten. Die lokalen Maxima der Spannungspegel betragen in der Mitte der Mikrostreifenleitung  $-32,6$  dBV. Im Abstand von rund 5 mm zur Mitte der Mikrostreifenleitung beträgt der gemessene Spannungspegel  $-70,9$  dBV. Dieser geringe Pegel ist auf das empfangene und verstärkte Grundrauschen der elektrischen Nahfeldsonde sowie der Vorverstärker zurückzuführen. Je größer der Abstand zur Feldquelle ist, desto niedriger sind die gemessenen Pegel. Dieses Verhalten ist durch das Abstands-Quadrat-Gesetz zu begründen.

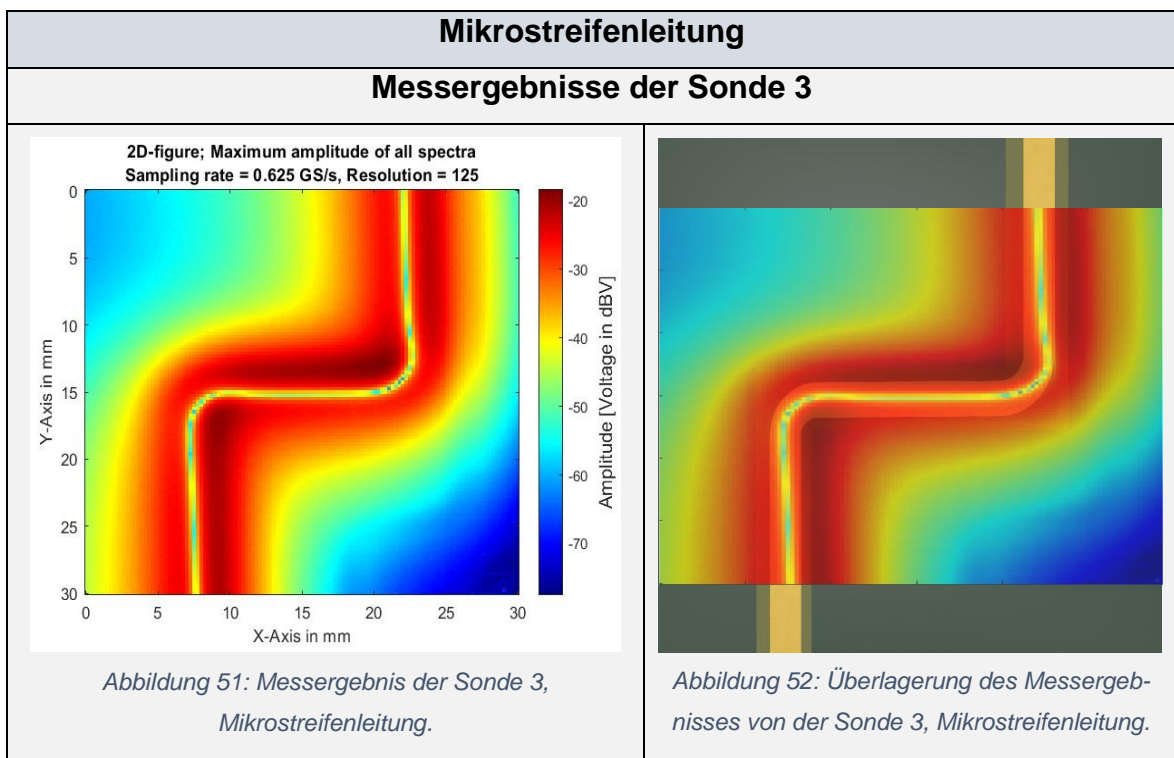


Tabelle 8: Messergebnis der Sonde 3, Mikrostreifenleitung.

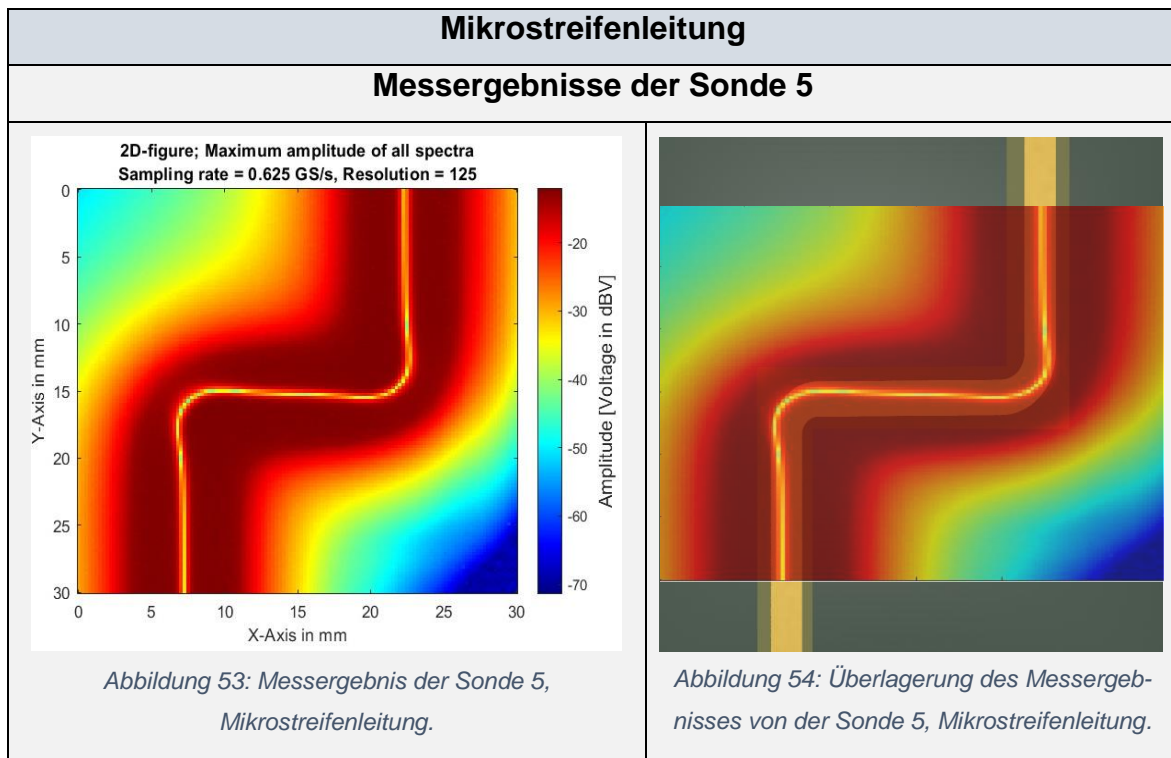


Tabelle 9: Messergebnis der Sonde 5, Mikrostreifenleitung.

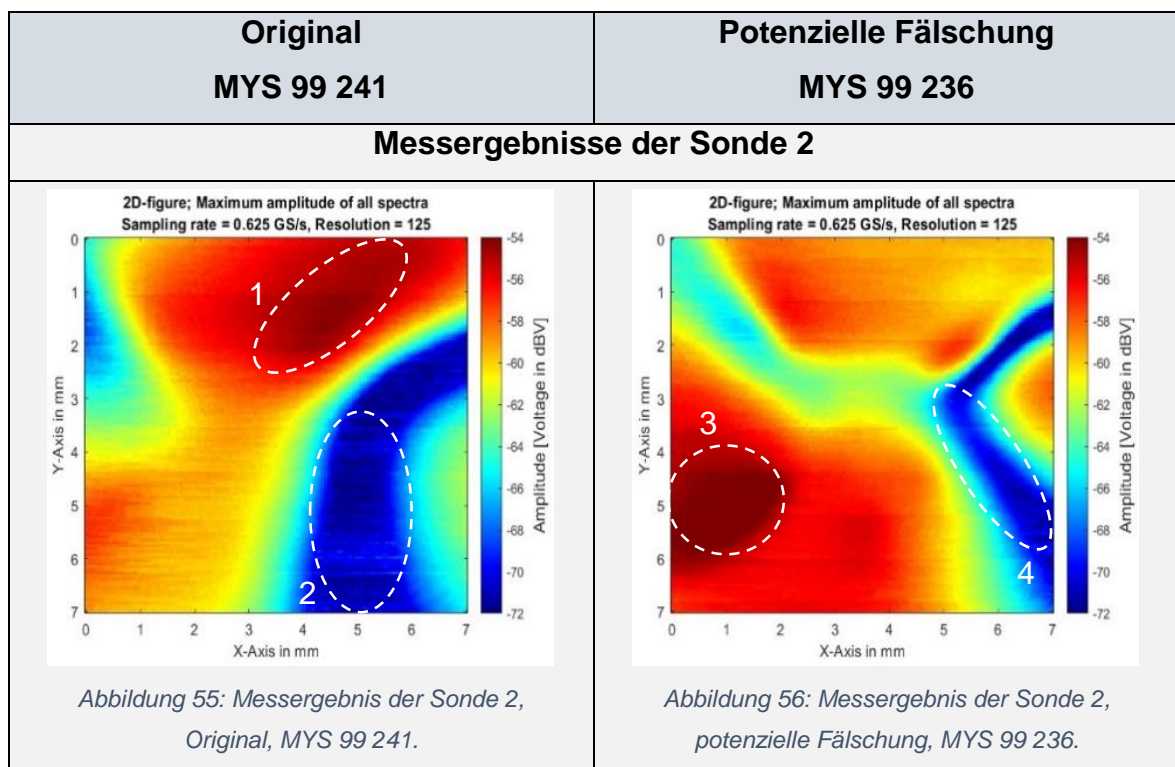
In den Ergebnissen der magnetischen Nahfeldsonden 3 (Tabelle 8) und 5 (Tabelle 9) sind die induzierten Spannungspegel durch die magnetischen Feldkomponenten in Z-Richtung dargestellt. Diese weisen in der Mitte der Mikrostreifenleitung ein lokales Minimum durch die Ausbreitungsrichtung des Magnetfeldes auf. Die Feldlinien sind dabei kreisförmig und orthogonal zur Bewegung der Ladungsträger verteilt und bilden eine Schleife um den Querschnitt der Mikrostreifenleitung. Aufgrund des kleineren Durchmessers verfügt die Sonde 3 über einen maximalen Pegel von  $-19,7$  dBV und einen minimalen Spannungspegel von  $-69,9$  dBV. Im Abstand von rund 10 mm zur Mitte der Mikrostreifenleitung ist die induzierte Spannung der magnetischen Komponenten noch messbar. Je größer der Spulendurchmesser ist, desto höher sind die Spannungen, die durch den magnetischen Fluss induziert werden. Durch die Beschreibung der elektrischen Stromdichte ist davon auszugehen, dass die Sonde 5 eine höhere Empfindlichkeit als die Sonde 3 aufweist. Das Messergebnis der Sonde 5 ist dadurch stärker ausgeprägt, da mehr vom Magnetfeld erfasst und dargestellt werden kann. Das lokale Maximum liegt bei einem Pegel von  $-12,1$  dBV und einem Minimum von  $-69,8$  dBV. Die induzierte Spannung kann in einem Abstand von 16,5 mm zur Mitte der Mikrostreifenleitung gemessen werden.

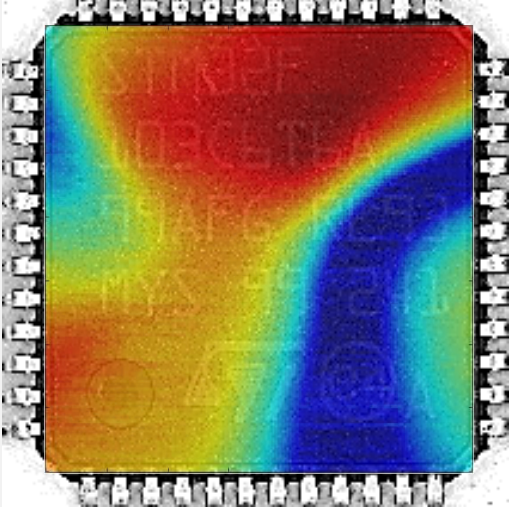
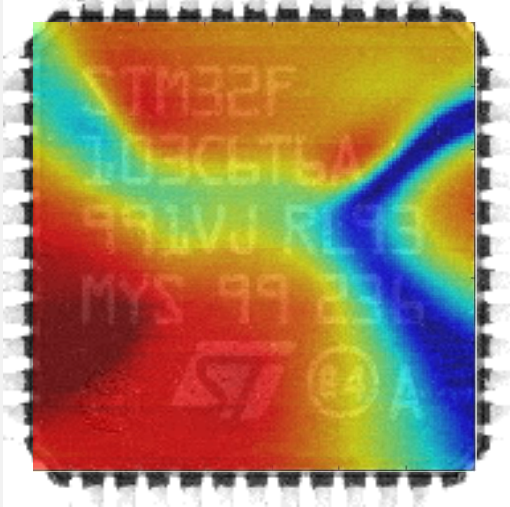
## 4.2 STM32-Mikrokontroller

Bei der Untersuchung der STM32-Proben haben die Messergebnisse der elektrischen Nahfeldsonde keine eindeutigen Unterschiede, die auf eine potenzielle Fälschung hinweisen, aufweisen können. Daher wird diese nicht bei der STM32-Probenuntersuchung verwendet. Für die bessere Unterscheidung werden die Seriennummern der einzelnen STM32-Proben angegeben.

Das gemessene Spektrum der STM32-Untersuchung besteht aus einer Vielzahl an Signalen, die bei den Frequenzen um 72 MHz abstrahlen. Aus diesem Grund werden alle Pegel des gesamten Spektrums für die bessere Auswertbarkeit grafisch dargestellt. Mit der Auswertung der induzierten Spannung ist zu erkennen, dass die rot markierten Bereiche auf einen hohen Stromfluss innerhalb des STM32 hinweisen, da hierbei die höchsten Spannungspegel induziert werden. In dem blau codierten Bereich sind die Pegel niedriger und diese können die Empfangsschwelle des Messsystems erreichen. Diese Bereiche deuten auf einen inaktiven Schaltungsbe- reich bzw. auf einen Bereich, in dem ein geringer Stromfluss vorhanden ist.

### 4.2.1 STM32F103C6T6



Original MYS 99 241	Potenzielle Fälschung MYS 99 236
 <p data-bbox="212 831 759 902"><i>Abbildung 57: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, MYS 99 241.</i></p>	 <p data-bbox="799 831 1347 902"><i>Abbildung 58: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, MYS 99 236.</i></p>

*Tabelle 10: Messergebnisse der Sonde 2, STM32F103C6T6.*

In der Tabelle 10 werden die Ergebnisse der magnetischen Sonde 2 dargestellt. Das lokale Maximum der originalen Probe ist in der Abbildung 55 mit der Nummer 1 markiert. Dabei weist dieses einen Pegel von  $-54,4$  dBV auf. Der niedrigste Pegel aus diesem Messergebnis ist mit der Nummer 2 markiert und beträgt bei der originalen Probe  $-72,1$  dBV. Die potenzielle Fälschung MYS 99 236 besitzt ein Pegelmaximum von  $-52,1$  dBV und ist mit der Nummer 3 in der Abbildung 56 dargestellt. Das Minimum mit  $-71,6$  dBV ist dem Bereich der Nummer 4 zuzuordnen. Hierbei ist zu erkennen, dass die geringen Pegel in der Größenordnung des verstärkten Grundrauschens des Vorverstärkers liegen.

In den Abbildungen 55 und 56 weisen die höchsten Spannungspegel einen Pegelunterschied von rund  $-2,3$  dBV auf. Die lokalen Minima beinhalten eine Abweichung von  $-0,5$  dBV zueinander. Somit liegen die vorhandenen Spannungen in einer ähnlichen Größenordnung zueinander. Da die beiden Proben identisch in Betrieb genommen wurden, liegt der Unterschied in der magnetischen Nahfeldverteilung. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Pegelmaxima und -minima an unterschiedlichen Stellen im Scanfeld auftreten. Zudem liegt ein deutlicher Flächenunterschied in den induzierten Pegelwerten vor. Die originale Probe verfügt im Vergleich zur potenziellen Fälschung über einen größeren Bereich, indem die niedrigen und hohen Pegel vorkommen.

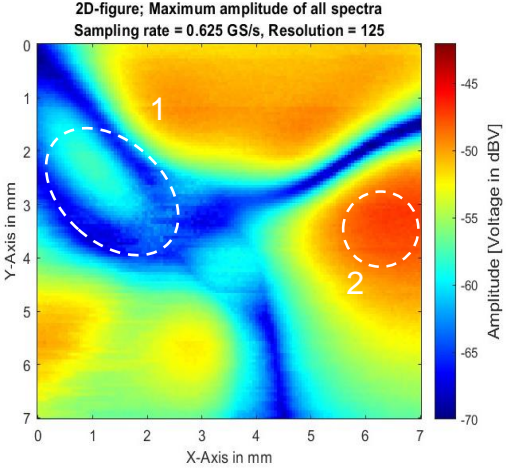
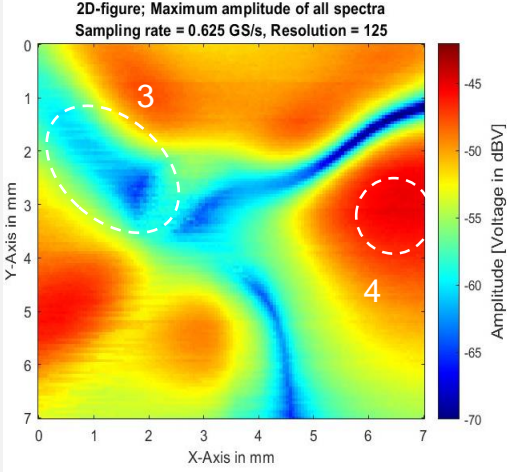
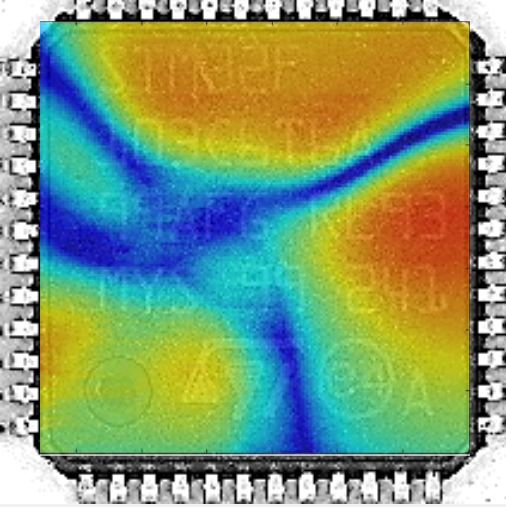
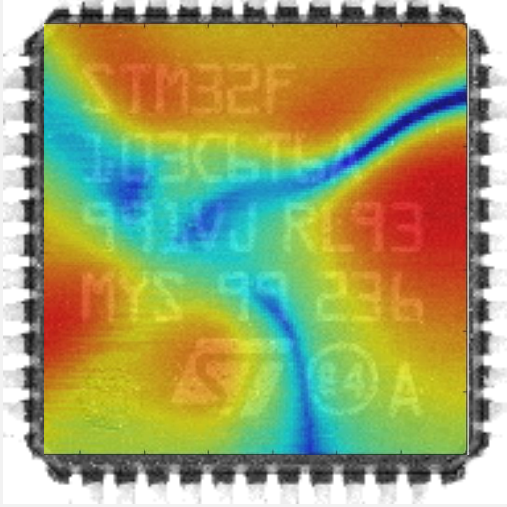
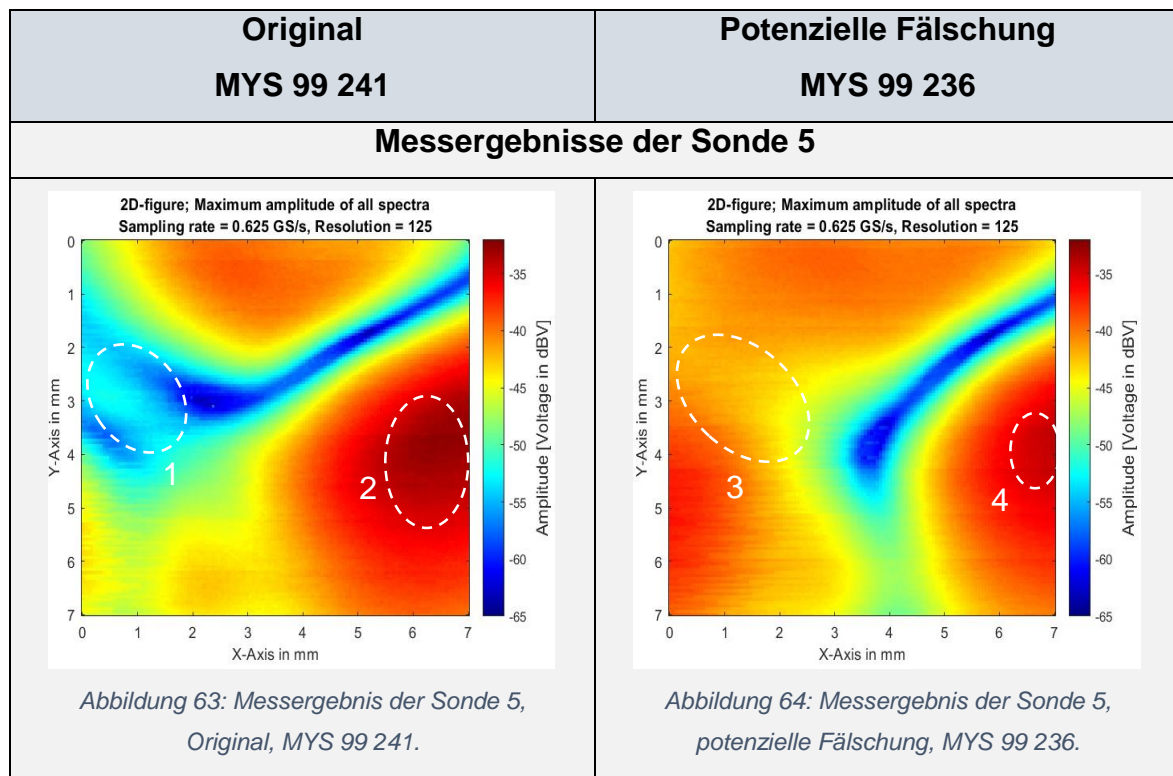
Original MYS 99 241	Potenzielle Fälschung MYS 99 236
<b>Messergebnisse der Sonde 4</b>	
 <p data-bbox="300 376 743 421">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="300 869 743 936">Abbildung 59: Messergebnis der Sonde 4, Original, MYS 99 241.</p>	 <p data-bbox="885 376 1329 421">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="885 869 1329 936">Abbildung 60: Messergebnis der Sonde 4, potenzielle Fälschung, MYS 99 236.</p>
 <p data-bbox="300 1507 743 1574">Abbildung 61: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 4, MYS 99 241.</p>	 <p data-bbox="885 1507 1329 1574">Abbildung 62: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 4, MYS 99 236.</p>

Tabelle 11: Messergebnisse der Sonde 4, STM32F103C6T6.

Die Tabelle 11 beinhaltet die Messergebnisse der magnetischen Nahfeldsonde 4. Hierbei ist erkennbar, dass durch den größeren Spulendurchmesser von 1 mm im Vergleich zur Sonde 2 mit 0,25 mm mehr vom Magnetfeld erfasst werden kann. Die originale Probe emittiert einen maximalen Pegel von  $-47,1$  dBV, welcher in der Abbildung 59 bei der Markierung 2 dargestellt ist. Die potenzielle Fälschung verfügt

über einen maximalen Pegel von  $-45,2$  dBV im Bereich der Markierung 4. Bei beiden Messergebnissen betragen die lokalen Minima  $-68,1$  dBV. Somit weisen die maximalen Pegel einen Unterschied von  $-1,9$  dBV zueinander auf.

Bei den Positionen 1 und 3 ist zu erkennen, dass bei der originalen Probe der flächenbezogene Anteil der geringen Pegel höher ausfällt als bei der potenziellen Fälschung. Die geringe laterale Sondenauflösung der Sonde 3 führt dazu, dass die geringeren Feldquellen nicht oberhalb der Probe detektiert werden können. Somit weisen beide Abbildungen eine Ähnlichkeit zueinander auf.





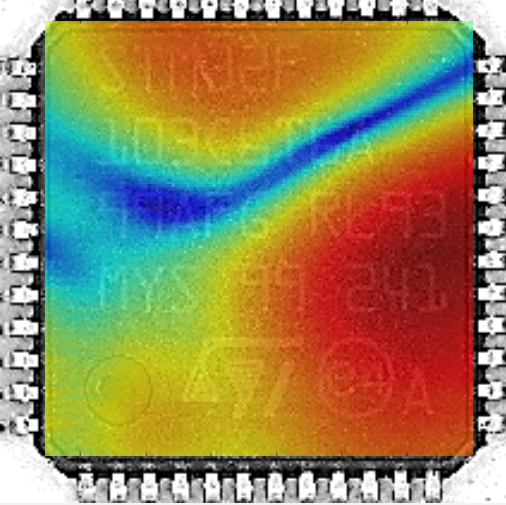
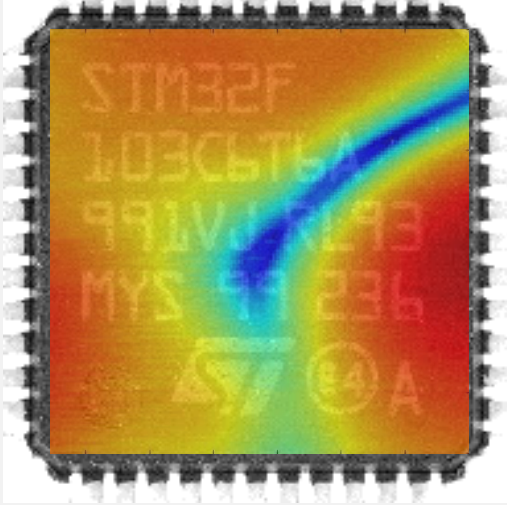
Original MYS 99 241	Potenzielle Fälschung MYS 99 236
 <p data-bbox="252 846 794 913"><i>Abbildung 65: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 5, MYS 99 241.</i></p>	 <p data-bbox="837 846 1380 913"><i>Abbildung 66: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 5, MYS 99 236.</i></p>

Tabelle 12: Messergebnisse der Sonde 5, STM32F103C6T6.

Die Sonde 5 verfügt über den größten Spulendurchmesser und somit über das geringste Auflösungsvermögen. Damit ist diese für die Erfassung der geringen Spannungspegel am besten einsetzbar. Dennoch ist diese aufgrund des geringen Auflösungsvermögens nicht optimal für die Erfassung der minimalen Feldquellen geeignet. Somit werden diese durch stärkere Aussendungen überlagert und nicht gemessen. Der höchste Spannungspegel der originalen Probe im Bereich der Markierung 2 beträgt  $-32,8$  dBV und von der potenziellen Fälschung  $-34,1$  dBV im Bereich der Markierung 4. Die Pegelminima der MYS 99 241 Probe liegen bei  $-64,3$  dBV und die Minima der MYS 99 236 Probe liegen bei  $-62,3$  dBV.

Die Pegelmaxima weisen in dieser Messung einen Unterschied von  $-1,3$  dBV auf, während die Minima einen Pegelunterschied von  $-2$  dBV aufzeigen. Somit besitzen die auftretenden Pegel eine hohe Übereinstimmung zueinander. Der Unterschied liegt in der lokalen Verteilung. Hierbei ist erneut zu erkennen, dass die originale Probe einen größeren Bereich mit geringen und höheren Pegeln enthält. Darüber hinaus weist die potenzielle Fälschung kein lokales Minimum im markierten Bereich 3 im Vergleich zum Originalbauteil (Markierung 1) auf.

## 4.2.2 STM32F103C8T6

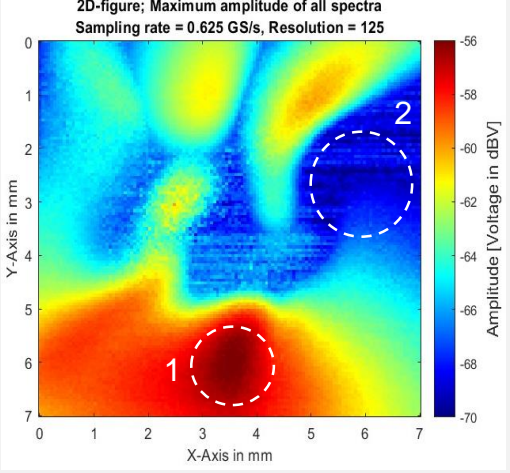
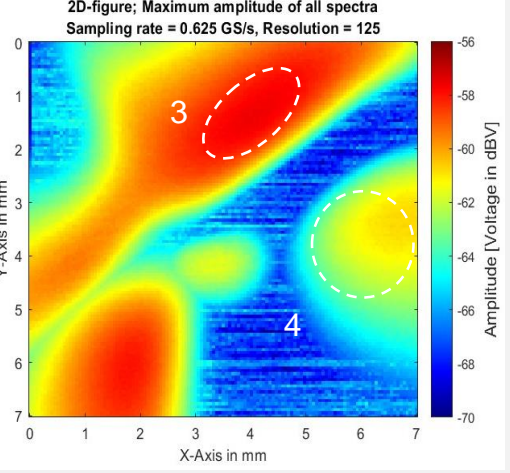
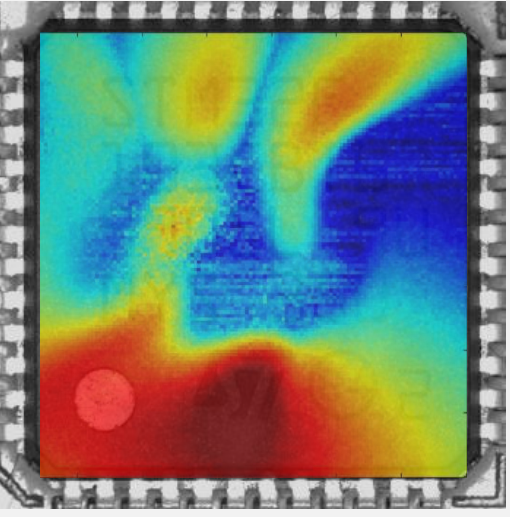
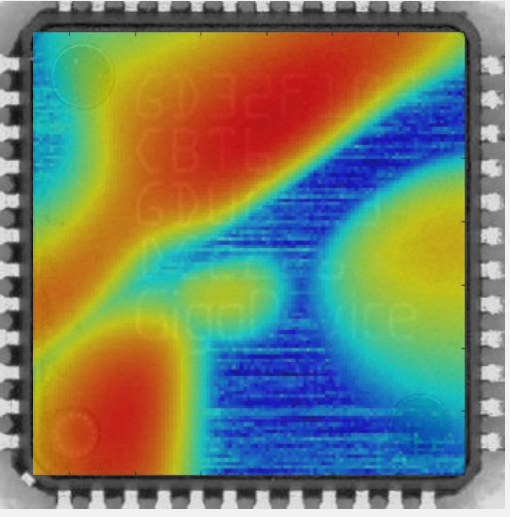
Original MYS 350	Potenzielle Fälschung DC2226
<b>Messergebnisse der Sonde 2</b>	
 <p data-bbox="255 481 718 526">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="255 963 718 1041"><i>Abbildung 67: Messergebnis der Sonde 2, Original, MYS 350.</i></p>	 <p data-bbox="861 481 1324 526">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="861 963 1324 1041"><i>Abbildung 68: Messergebnis der Sonde 2, potenzielle Fälschung, DC2226.</i></p>
 <p data-bbox="255 1579 718 1657"><i>Abbildung 69: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, MYS 350.</i></p>	 <p data-bbox="861 1579 1324 1657"><i>Abbildung 70: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, DC2226.</i></p>

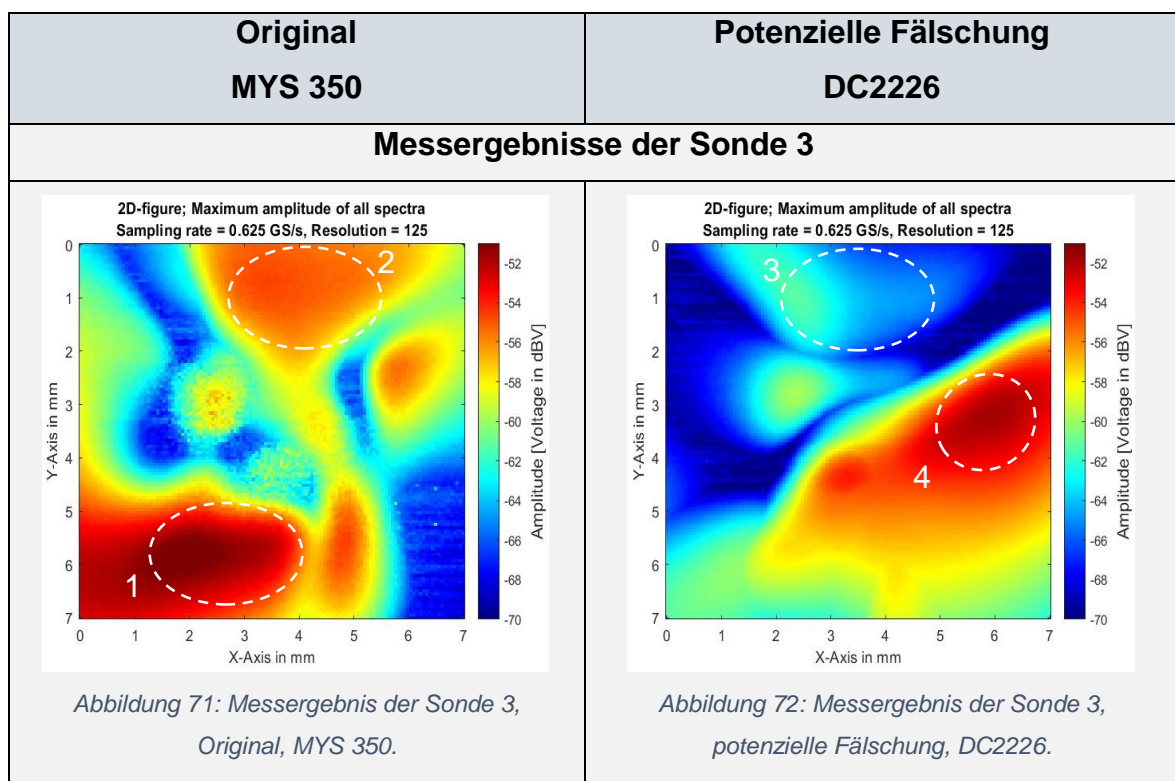
Tabelle 13: Messergebnisse der Sonde 2, STM32F103C8T6.

Die Messreihe der magnetischen Nahfeldsonde 2 hat grundlegend unterschiedliche Messergebnisse zwischen der MYS 350 und der DC2226 Probe erzielen können. Die originale Probe MYS 350 besitzt im unteren Teil der Abbildung 62 ein lokales Maximum von  $-56,1$  dBV (Markierung 1). Das gemessene Minimum beträgt hierbei  $-69,9$  dBV und befindet sich im blau codierten Bereich. Die potenzielle Fälschung

DC2226 verfügt über einen maximalen Spannungspegel von  $-59,7$  dBV im Bereich 3 und einen minimalen Pegel von  $-67,4$  dBV.

Es besteht ein Unterschied von  $-3,6$  dBV zwischen den maximalen Pegeln und  $-2,5$  dBV zwischen den kleinsten Pegeln. Aufgrund der großen Unterschiede in der Lokalität sind die Maxima und Minima der Proben nicht vergleichbar. An den markierten Positionen zeigt die potenzielle Fälschung einen enormen Pegelunterschied zum Originalbauteil auf. Hierbei liegt an der Markierung 4 in der Abbildung 68 ein Pegel von  $-61,3$  dBV an, während bei der originalen Probe ein lokales Minimum vorliegt. Des Weiteren verfügt die MYS 350 Probe über ein markiertes Maximum, während die DC2226 Probe ein Minimum aufweist.

Diese signifikanten Unterschiede in der Pegelverteilung weisen auf mögliche strukturelle Unterschiede oder Manipulationen im Mikrochip hin.



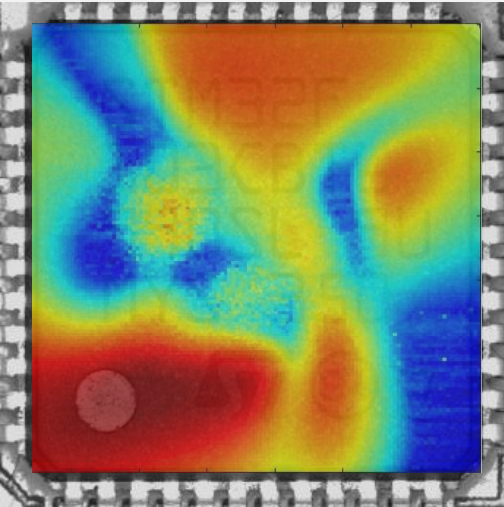
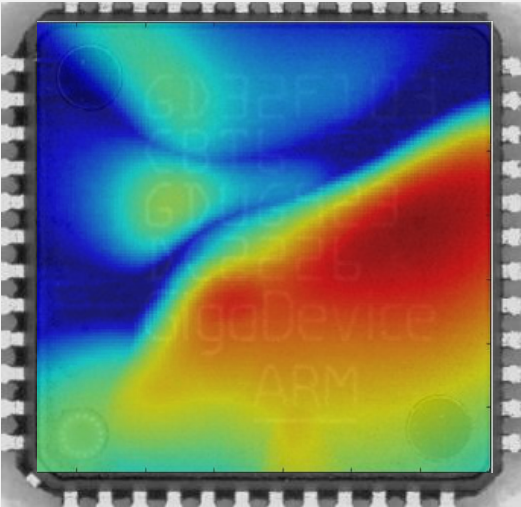
Original MYS 99 241	Potenzielle Fälschung MYS 99 236
 <p data-bbox="209 842 751 909">Abbildung 73: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 3, MYS 350.</p>	 <p data-bbox="799 842 1342 909">Abbildung 74: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 3, DC2226.</p>

Tabelle 14: Messergebnisse der Sonde 3, STM32F103C8T6.

Die Messergebnisse der magnetischen Sonde 3 befinden sich in der Tabelle 14. Hierbei ist erneut zu erkennen, dass enorme Unterschiede zwischen der potenziellen Fälschung und der originalen Probe vorliegen.

Die MYS 350 Probe verfügt über einen maximalen Spannungspegel im markierten Bereich 1 in der Abbildung 71 von  $-51,1$  dBV und ein lokales Minimum von  $-67,6$  dBV. Die DC2226 Probe besitzt ein Maximum von  $-51,9$  dBV (Markierung 4) und ein Minimum von  $-70$  dBV.

Die Messergebnisse der Sonde 3 bestätigen weiterhin, dass die DC2226 Probe große Unterschiede in der Pegelverteilung bei den Markierungen 2 und 3 aufweist. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil der niedrigen Spannungspegel bei der potenziellen Fälschung flächenmäßig vermehrt auftritt. Die Unterschiede zwischen den maximalen Pegeln betragen  $-0,8$  dBV und bei den minimalen Pegeln liegen sie bei  $-2,4$  dBV.

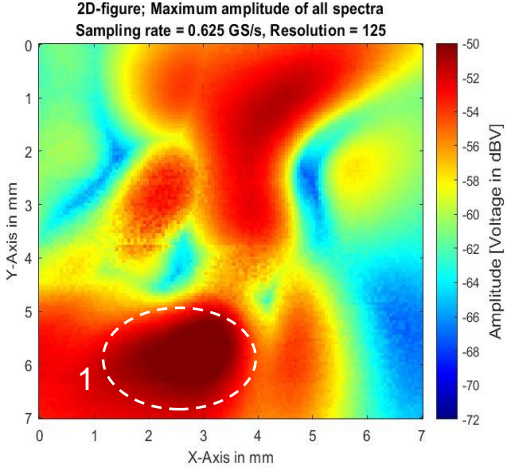
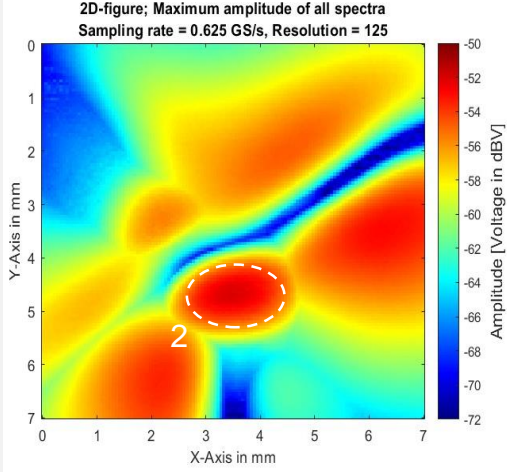
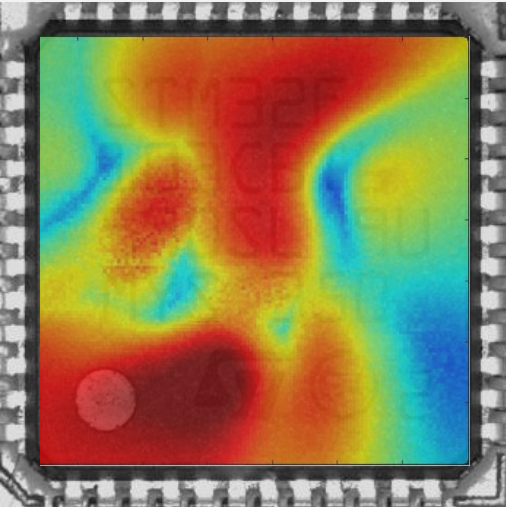
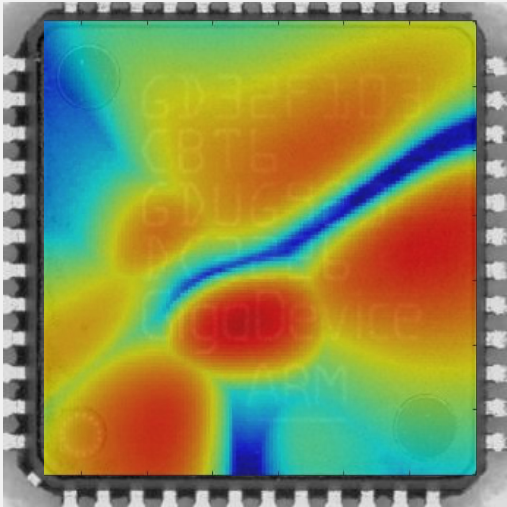
Original MYS 350	Potenzielle Fälschung DC2226
<b>Messergebnisse der Sonde 4</b>	
 <p data-bbox="296 376 746 421">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="296 869 746 936">Abbildung 75: Messergebnis der Sonde 4, Original, MYS 350.</p>	 <p data-bbox="882 376 1332 421">2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p> <p data-bbox="882 869 1332 936">Abbildung 76: Messergebnis der Sonde 4, potenzielle Fälschung, DC2226.</p>
 <p data-bbox="252 1503 791 1570">Abbildung 77: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 4, MYS 350.</p>	 <p data-bbox="837 1503 1377 1570">Abbildung 78: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 4, DC2226.</p>

Tabelle 15: Messergebnisse der Sonde 4, STM32F103C8T6.

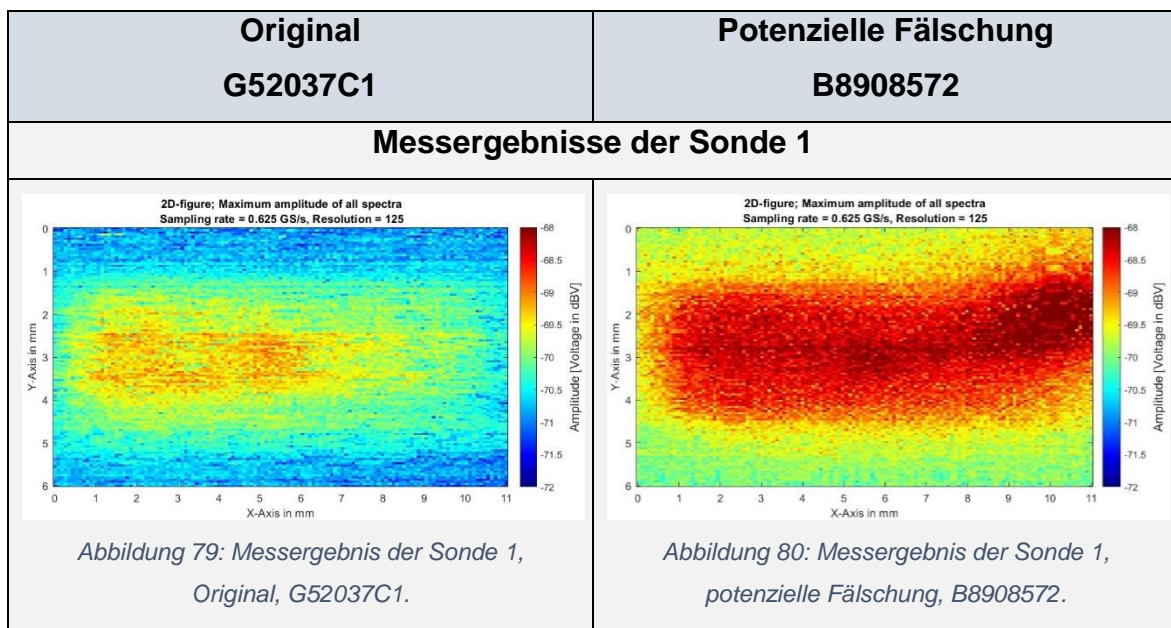
In den Messergebnissen der magnetischen Nahfeldsonde 4 ist zu erkennen, dass die induzierten Spannungen der Nahfelder durch das magnetische Feld stärker ausgeprägt sind. Dies ist auf die geringe laterale Auflösung zurückzuführen, bei der die große Spulenfläche mehr vom magnetischen Fluss aus den Feldquellen erfassen kann.

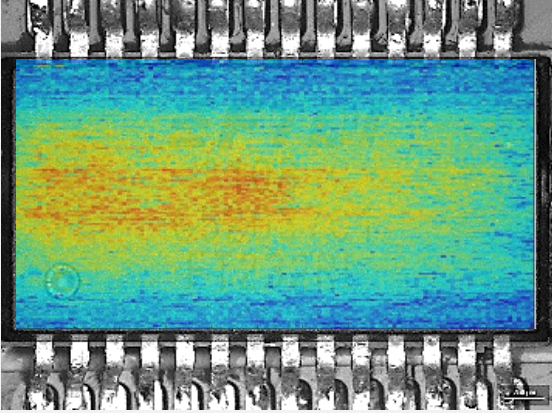
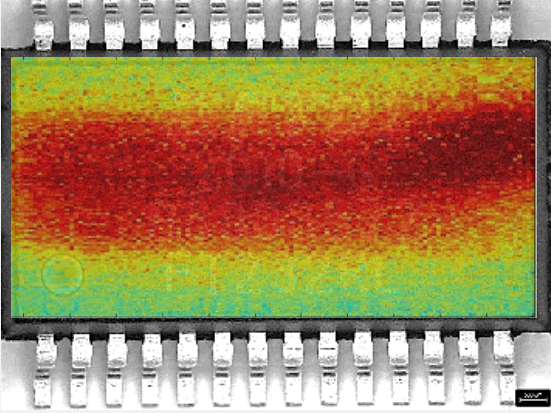
Die Proben verfügen daher in den Messergebnissen in der Tabelle 15 über mehr rot codierte Flächen. Das Bauteil MYS 350 zeigt im markierten Bereich 1 ein Pegelmaximum von  $-49,9$  dBV. Die geringsten Spannungspegel der originalen Probe liegen bei  $-66,3$  dBV. Die potenziell gefälschte Probe weist dabei Spannungspegel zwischen  $-52,1$  dBV (Markierung 2) und  $-70,6$  dBV auf.

Die Abweichungen in den maximalen Pegeln betragen  $-2,2$  dBV und bei den minimalen Pegeln liegen sie bei  $-4,3$  dBV. Hierbei ist durch die unterschiedlichen Lokalitäten ersichtlich, dass die potenzielle Fälschung eine Abweichung in der Feldverteilung im Vergleich zum Original aufweist.

### 4.3 FTDI FT232RL

Bei der elektromagnetischen Oberflächenuntersuchung der FTDI FT232RL-Proben wurden die Nahfeldsonden 1, 2 und 5 verwendet. Für die Identifikation einer Fälschung werden weiterhin die Spannungspegel des gesamten Spektrums grafisch im Scanfeld dargestellt.

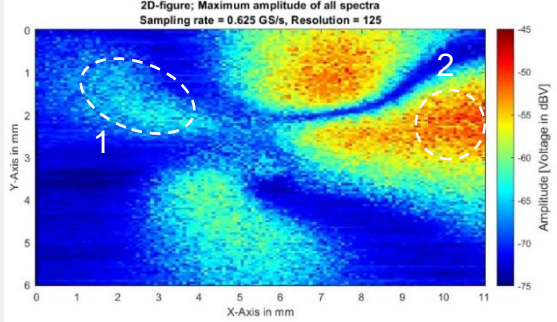
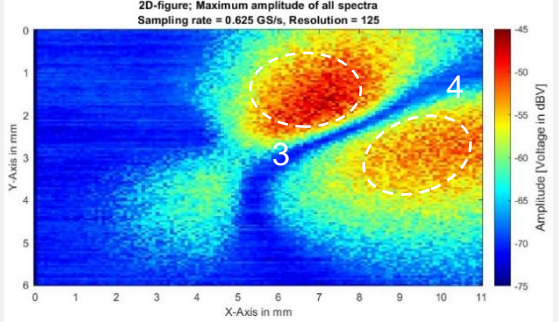
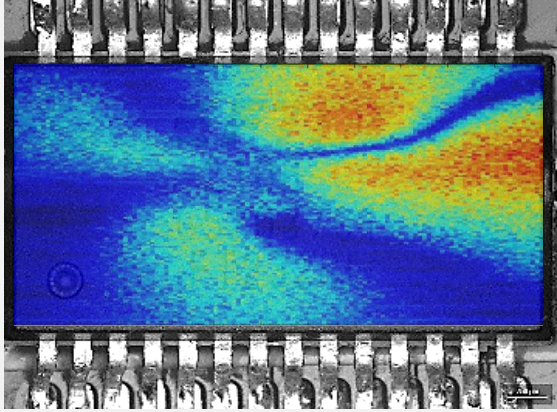
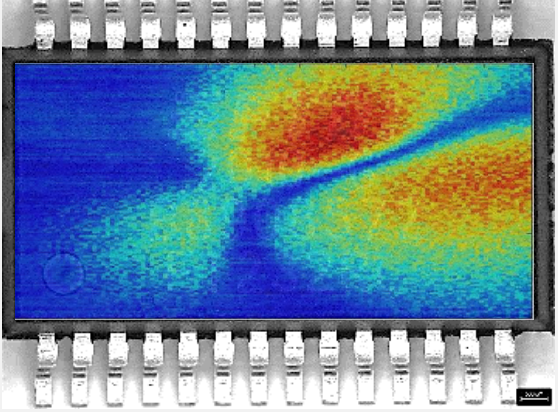


Original G52037C1	Potenzielle Fälschung B8908572
 <p data-bbox="245 741 794 808"><i>Abbildung 81: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 1, G52037C1.</i></p>	 <p data-bbox="833 741 1382 808"><i>Abbildung 82: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 1, B8908572.</i></p>

*Tabelle 16: Messergebnisse der Sonde 1, FTDI FT232RL.*

In der Messung der elektrischen Aussendungen oberhalb der FT232RL-Proben ist ersichtlich, dass die elektrische Nahfeldsonde keine minimalen Feldquellen im Inneren des Gehäuses detailliert darstellen kann. Hierbei sind ausschließlich die maximalen und minimalen Pegel zu betrachten. Die Größe des gemessenen elektrischen Feldes ist in beiden Proben nahezu gleich.

Die originale G52037C1-Probe verfügt über ein Maximum von  $-69,3$  dBV und ein Minimum von  $-70,5$  dBV. Im Vergleich dazu koppelt die B8908572-Probe einen maximalen Pegel von  $-68,1$  dBV und einen minimalen Pegel von  $-69,1$  dBV ein. Hierbei ist anzumerken, dass die gemessenen Pegel unabhängig von dem Maximum oder dem Minimum sehr nah an der Empfangsschwelle von  $-71$  dBV liegen. Die Unterschiede betragen beim Maximum  $-1,2$  dBV und beim Minimum  $-1,9$  dBV. Zudem sind die geringsten Pegel der potenziellen Fälschung höher als die höchsten Pegel der originalen Probe.

Original G52037C1	Potenzielle Fälschung B8908572
<b>Messergebnisse der Sonde 2</b>	
 <p data-bbox="256 712 710 786"><i>Abbildung 83: Messergebnis der Sonde 2, Original, G52037C1.</i></p>	 <p data-bbox="847 712 1300 786"><i>Abbildung 84: Messergebnis der Sonde 2, potenzielle Fälschung, B8908572.</i></p>
 <p data-bbox="212 1249 754 1317"><i>Abbildung 85: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, G52037C1.</i></p>	 <p data-bbox="802 1249 1345 1317"><i>Abbildung 86: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 2, B8908572.</i></p>

*Tabelle 17: Messergebnisse der Sonde 2, FTDI FT232RL.*

In den Untersuchungsergebnissen der magnetischen Nahfeldkomponenten von dem FT232RL ist bei der Nahfeldsonde 2 zu erkennen, dass die originale Probe und die potenzielle Fälschung eine hohe Ähnlichkeit zueinander aufweisen.

Das lokale Pegelmaximum bei der Markierung 2 beträgt bei der originalen G52037C1-Probe  $-47,4$  dBV und das Minimum weist  $-71,3$  dBV auf (Abb. 83). Die potenzielle Fälschung weist bei der Markierung 3 ein lokales Maximum von  $-45,2$  dBV auf. Dabei betragen die kleinsten Pegel dieser Probe  $-70,1$  dBV (Abb. 84).

Obwohl die Konverter-Mikrochips ein ähnliches Erscheinungsbild in der Feldverteilung aufweisen, liegen die höchsten Pegel an unterschiedlichen Lokalisationen. Zudem weist die originale Probe im Bereich der Markierung 1 einen Pegelunterschied von



-12,6 dBV im Vergleich zur B8908572-Probe auf. Die Markierung 4 bildet einen Bereich ab, in dem die induzierte Spannung der potenziellen Fälschung sich auf ähnlichem Niveau befindet wie das Maximum des Originalbauteils. Die Differenz zwischen den Pegelmaxima beträgt in der Messung -2,2 dBV und zwischen den Pegelminima -1,2 dBV.

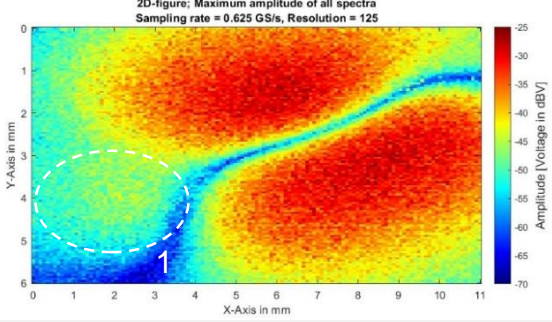
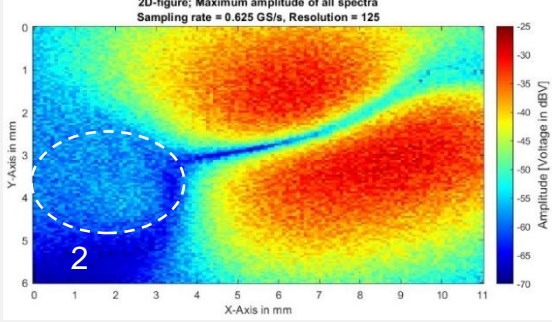
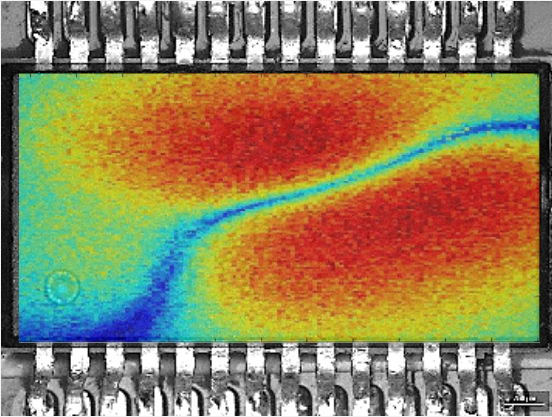
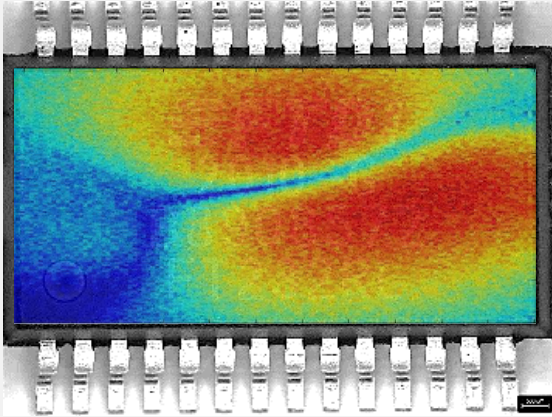
Original G52037C1	Potenzielle Fälschung B8908572
<b>Messergebnisse der Sonde 5</b>	
 <p data-bbox="296 1064 746 1133"><i>Abbildung 87: Messergebnis der Sonde 5, Original, G52037C1.</i></p>	 <p data-bbox="882 1064 1332 1133"><i>Abbildung 88: Messergebnis der Sonde 5, potenzielle Fälschung, B8908572.</i></p>
 <p data-bbox="252 1608 793 1677"><i>Abbildung 89: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 5, G52037C1.</i></p>	 <p data-bbox="837 1608 1378 1677"><i>Abbildung 90: Überlagerung des Messergebnisses von der Sonde 5, B8908572.</i></p>

Tabelle 18: Messergebnisse der Sonde 5, FTDI FT232RL.

In den Ergebnissen der Nahfeldsonde 5 ist zu erkennen, dass die induzierten Spannungen des Nahfeldes durch das magnetische Feld deutlich stärker ausgeprägt sind als die der Sonde 2.

Die originale Probe verfügt im Messergebnis, welches in der Abbildung 87 dargestellt ist, über ein Pegelmaximum von  $-29,9$  dBV und ein Pegelminimum von  $-65,4$  dBV. Das Ergebnis des potenziell gefälschten Bauteils besitzt in der Abbildung 88 einen maximalen Pegel von  $-33,3$  dBV und einen minimalen Pegel von  $-66,9$  dBV.

Die Abweichungen in den maximalen Pegeln betragen  $-3,4$  dBV und bei den minimalen Pegeln liegen diese bei  $-1,5$  dBV. Hierbei ist durch die unterschiedlichen Lokalitäten ersichtlich, dass die potenzielle Fälschung eine Abweichung in der Feldverteilung im Vergleich zum Original aufweist. Die Markierungen 1 und 2 deuten auf eine unterschiedliche Ausprägung des Feldes hin. Hierbei beträgt der Pegelunterschied rund  $-6$  dBV.

## **5 Diskussion**

Dieses Kapitel umfasst die Erkennungsmerkmale einer gefälschten Mikroelektronik sowie den Vergleich der Messergebnisse, indem Rückschlüsse auf die Authentizität der elektronischen Halbleiterproben gewonnen werden können. Des Weiteren wird das entwickelte Messsystem in Bezug auf die Fälschungsanalyse evaluiert und durch eine Fehlerbetrachtung auf die Stabilität und Reproduzierbarkeit untersucht.

### **5.1 Erkennungsmerkmale einer gefälschten Elektronik**

Eine Elektronik, die von den Originalherstellern produziert wird, dient in dieser Bachelorarbeit als verlässliche Referenzprobe, um eine Fälschung identifizieren zu können.

Aus der theoretischen Ausarbeitung geht hervor, dass eine nicht authentische Elektronik durch die Diversifikation in der Produktionsqualität von einem Originalbauteil unterschieden werden kann. In einigen Fällen sind diese anhand von optischen Abweichungen im Oberflächendesign, in der Oberflächenprägung oder durch das Markenlabel zu identifizieren. Auch verschiedene Markenbezeichnungen, interne Schaltungsvarianten und unterschiedliche Funktionen können Hinweise auf eine elektronische Fälschung geben. Dabei ist anzumerken, dass die gefälschten Mikrochips meist in höherer Stückzahl und zu einem niedrigeren Preis am globalen Markt gehandelt werden. Obwohl die Halbleiterkrise die Lieferketten im Elektronikbereich schwächt, sind die gefälschten Produkte durch fragwürdige Produzenten und Händler erhältlich.

Die Erkennungsmerkmale einer gefälschten Elektronik sind in der elektromagnetischen Oberflächenuntersuchung durch ungewöhnlich hohe oder niedrige Spannungspegel erkennbar. Aber auch Variationen in der lokalen Pegelverteilung deuten auf unterschiedlich verwendete Materialien, auf Abweichungen im Schaltungslayout oder auf andere Funktionalitäten im Vergleich zum Originalbauteil hin. Des Weiteren können die Fälschungen durch die Frequenzanalyse ein unterschiedliches Spektrum aufweisen und damit nicht den erwarteten Mustern der originalen Probe entsprechen.

Die Identifikation einer elektronischen Fälschung findet somit durch die Analyse der Pegelintensitäten und des Frequenzspektrums sowie durch die Form und Lokalität der elektrischen und magnetischen Nahfelder statt.

## **5.2 Vergleich der Messergebnisse**

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der analysierten Messergebnisse, um eine fundierte Aussage über die Authentizität der elektronischen Halbleiterproben zu treffen. Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, dass die Verwendung der elektrischen Nahfeldsonde für die Fälschungsanalyse nur begrenzt geeignet ist, da diese die eingekoppelten Spannungspegel nicht detailliert erfassen kann. Der Grund dafür ist, dass die elektrische Nahfeldsonde ausschließlich die niedrigen Pegel erfasst hat, welche im Bereich des Grundrauschens liegen. Daher ist der Einsatz einer magnetischen Nahfeldsonde zur elektronischen Fälschungserkennung erfolgsversprechender.

### **5.2.1 Mikrostreifenleitung**

In dem Messergebnis der elektrischen Nahfeldsonde der Mikrostreifenleitung ist der Ursprung der Feldquelle erkennbar. Wie in den theoretischen Grundlagen belegt, treten die Feldlinien vertikal aus der Feldquelle aus und koppeln eine Spannung kapazitiv in die elektrische Nahfeldsonde ein. Das empfangene Maximum befindet sich mittig an der Mikrostreifenleitung.

Im Gegensatz dazu zeigen die magnetischen Nahfeldsonden in der Mitte der Mikrostreifenleitung ein lokales Minimum und in der unmittelbaren Nähe dazu ein lokales Maximum an. Dieses Minimum breitet sich entlang der Leitung aus, da die Abstrahlungscharakteristik des magnetischen Feldes kreisförmig um die Leitung herum auftritt. Die Bildung der beiden Maxima an der horizontalen Spulenausrichtung erfolgt durch die Induzierung mit dem Eintreten der Feldlinien in die positive sowie in die negative Richtung. Somit verfügt das Magnetfeld über zwei Maxima, wie in der Simulation auf der Seite 63 in der Abbildung 48 gezeigt.

Die Ergebnisse unterstützen die theoretische Annahme des Abstands-Quadrat-Gesetzes, da die induzierte und kapazitiv eingekoppelte Spannung mit zunehmendem Abstand zur Feldquelle quadratisch abnimmt. In Bezug auf die magnetischen Nahfeldsonden wird festgehalten, dass ein größerer Spulendurchmesser zu einer höheren Empfindlichkeit gegenüber geringen Spannungspegeln führt. Allerdings wird beobachtet, dass die magnetischen Felder stärker empfangen werden, was die Erkennung von minimalen Feldquellen beeinträchtigen kann.

### 5.2.2 STM32-Mikrokontroller

In diesem Vergleich werden zunächst die Ergebnisse der Messungen von den STM32F103C6T6-Proben analysiert. Es wurden deutliche lokale Abweichungen in der Pegelverteilung in den Messergebnissen der magnetischen Sonden 2 und 5 festgestellt. Diese Unterschiede weisen auf eine strukturelle Veränderung im Schaltungslayout oder auf eine unterschiedliche Funktionsweise hin. Zudem zeigen die gemessenen Spannungspegel geringe Unterschiede zueinander auf. Demgegenüber weisen die Messergebnisse der Sonde 4 auf eine hohe lokale Ähnlichkeit hin. Die minimalen und maximalen induzierten Spannungspegel liegen an der gleichen Position. Dennoch verfügen diese über unterschiedlich hohe Pegel. Besonders bei den minimalen Spannungen ist zu erkennen, dass hierbei eine unterschiedlich starke Feldausbreitung vorliegt.

Im Rahmen der elektromagnetischen Oberflächenmessung der STM32F103C6T6-Probe mit der Seriennummer MYS 99 236 zeigt sich, dass die zuvor definierten Fälschungsmerkmale bei der Verwendung von verschiedenen Nahfeldsonden zu erkennen sind. Dabei weist diese Probe weitere Abweichungen in den Röntgenbildaufnahmen (Tabelle 2) auf und verfügt über enorme Preisunterschiede bei diversen Händlern. Aufgrund dieser genannten Punkte ist davon auszugehen, dass es sich bei der MYS 99 236 Probe um ein nicht authentisches Elektronikbauteil handelt.

Mit dem folgenden Vergleich werden die Ergebnisse der elektromagnetischen Oberflächenuntersuchung der STM32F103C8T6- und der GD32F103C8T6-Proben im Hinblick auf die Nahfeldverteilung bewertet. Hierbei ist vorab anzumerken, dass alle Nahfeldsonden unterschiedliche Ergebnisse im Vergleich zur originalen Probe erzielt haben. Insbesondere die magnetischen Nahfeldsonden 2, 3 und 5 zeigen signifikante Unterschiede in den Lokalisationen der Pegel sowie in den Pegelminima und -maxima auf. Aufgrund dieser Abweichungen vom Originalbauteil erfüllt die DC2226-Probe alle charakteristischen Merkmale für die Erkennung einer elektronischen Fälschung mittels dieser Messmethode.

Hierbei ist anzumerken, dass die GD32F103C8T6-Probe mit der Seriennummer DC2226 nicht von STMicroelectronics, sondern von dem chinesischen Unternehmen GigaDevice hergestellt wird. Dies deutet darauf hin, dass es sich um eine Klone handelt. Die Röntgenbilder in der Tabelle 3 zeigen zudem Abweichungen in der Struktur und in den Bonddrähten auf. Des Weiteren ist ein zweiter Chip in der DC2226-Probe zu erkennen. Aufgrund dieser Erkenntnisse und der signifikanten

Preisunterschiede zwischen den verschiedenen Händlern kann davon ausgegangen werden, dass es sich um eine elektronische Fälschung handelt.

### **5.2.3 FTDI FT232RL**

Die Identifikation einer potenziellen Fälschung, basierend auf den Messergebnissen der elektrischen Nahfeldsonde, gestaltet sich schwierig, da die Unterschiede ausschließlich in den minimalen und maximalen Pegeln liegen. Die vorhandenen Abweichungen in den Pegeln zwischen den Proben können auf minimale Variationen im Abstand zur Probe zurückzuführen sein. Aufgrund der geringen, empfangenen kapazitiv eingekoppelten Spannungen, die sich nahe am Grundrauschen befinden, sind keine signifikanten Pegelunterschiede festzustellen.

In den Messergebnissen der magnetischen Nahfeldsonden 2 und 5 zeigen sich lediglich geringfügige Abweichungen in den Pegeln und in den Lokalisationen. Die dargestellten magnetischen Feldverteilungen liegen innerhalb der messtechnischen Positionierungstoleranz. Die minimalen Unterschiede zwischen der G52037C1 und der B8908572-Probe deuten auf kein Fälschungsmerkmal in der Messmethode hin. Demgegenüber weisen die Röntgenbilder aus der Tabelle 4 Unterschiede zueinander auf. Diese strukturellen Abweichungen haben in der elektromagnetischen Oberflächenmessung keine signifikanten Unterschiede in den Aussendungen hervorgerufen. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit der Messergebnisse kann kein Fälschungsmerkmal dieser Messmethode erfüllt werden. Daher wird mit diesem Messaufbau und der Messmethode die B8908572-Probe des FT232RL nicht als gefälschte Elektronik eingestuft.

## **5.3 Bewertung der messtechnischen Vorgehensweise**

In diesem Kapitel wird eine Fehlerbetrachtung von dem Pegasus-Messsystem durchgeführt, um darauf basierend eine kritische Limitation aufzustellen.

### **5.3.1 Fehlerbetrachtung**

Die Fehlerbetrachtung beinhaltet in dieser Bachelorarbeit die Ermittlung der systematischen und zufälligen Fehler. Dabei werden die Reproduzierbarkeit des Messsystems sowie das Auftreten der externen Störquellen betrachtet.

Ein systematischer Fehler beeinflusst das Messergebnis bei der Wiederholung der Messung unter den gleichen Bedingungen. Somit sind diese Fehler konstant und

erscheinen in der gleichen Größenordnung. Bei der elektromagnetischen Nahfeldmessung treten die systematischen Fehler durch Abweichungen in der Positionsgenauigkeit des Pegasus Scanners sowie durch Linearitäts- oder Quantisierungsfehler der M4i-Messkarte auf. Dabei beziehen sich die konstanten Fehler im Messsystem auf fehlerhafte Systemkalibrierungen oder auf bauteilbedingte Abweichungen. Da die Fehlerquellen bekannt sind, können diese durch Korrekturen vermindert oder vermieden werden.

Die zufälligen Fehler in den Messungen sind unregelmäßige und unvorhersehbare Erscheinungen. Hierbei sind diese von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel von den Umgebungsbedingungen des Messplatzes sowie von äußeren Störquellen. Hierbei tritt die Fehlerart durch menschliche Ungenauigkeiten bei der Sondenpositionierung auf. Des Weiteren können die Ergebnisse durch unbekannte Störer verzerrt und dadurch fehlerhaft erfasst werden. Für die Ermittlung des zufälligen Fehlers im Messsystem werden die Zuverlässigkeit und die Reproduzierbarkeit durch die Standardabweichung bestimmt. Die nachfolgende Tabelle 19 beinhaltet zehn Einzelmessungen von einer elektronischen Probe. Dabei werden die Spannungspegel an den identischen Positionen gemessen und dargestellt (Abb. 91). Bei jeder einzelnen Messung wurde das Messsystem neu kalibriert und die Sonden neu ausgerichtet.

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\max}$ [dBV]	-41,66	-40,98	-41,63	-41,23	-42,34	-41,55	-40,3	-41,48	-42,58	-42,98
$U_{\min}$ [dBV]	-70,34	-71,01	-70,95	-68,83	-69,77	-72,74	-71,05	-71,18	-68,76	-69,86

Tabelle 19: Darstellung der Einzelmessungen an der gleichen Position.

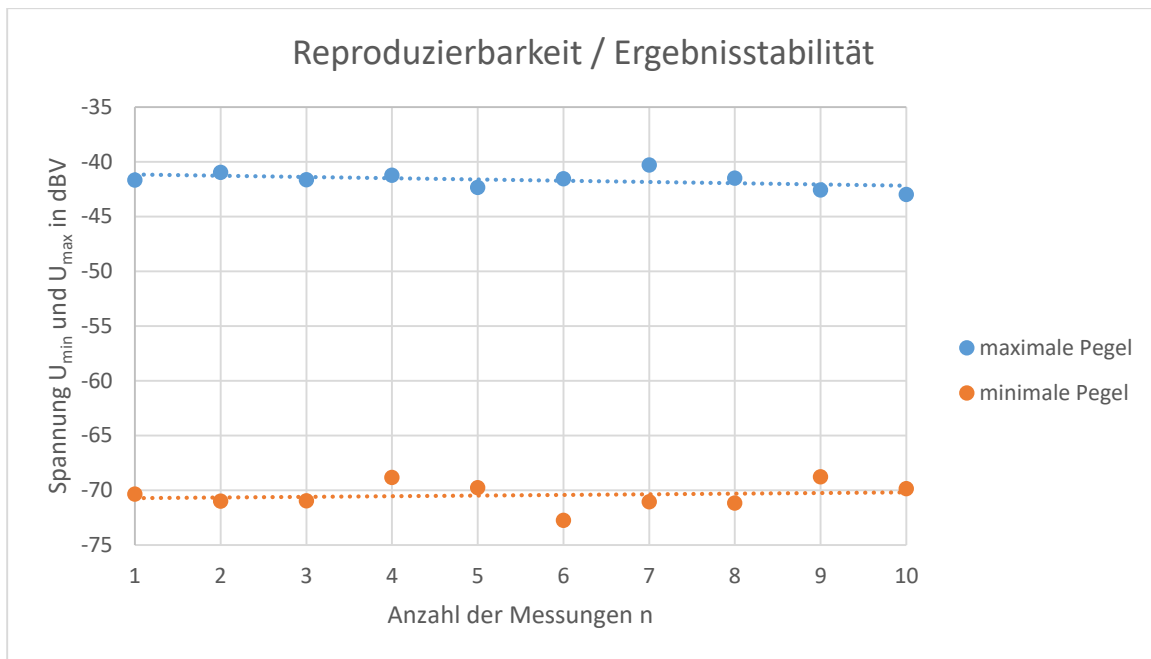


Abbildung 91: Darstellung der Ergebnisstabilität.

Im Nachfolgenden wird die Standardabweichung  $\sigma$  der dargestellten Einzelmessungen  $n$  berechnet. Diese gibt an, wie weit die aufgenommenen Messwerte  $x_i$  vom Mittelwert  $\bar{x}_n$  entfernt sind und legt damit die Streubreite des Messsystems dar. Für die Berechnung der Standardabweichung werden die logarithmierten Messwerte in die lineare Form umgerechnet.

$$U[\text{dBV}] \text{ in } U[\text{V}]: \quad U[\text{V}] = 10^{\frac{U[\text{dBV}]}{20}} \quad (26)$$

$$\text{Mittelwert:} \quad \bar{x}_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (27)$$

$$\text{Standardabweichung:} \quad \sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \quad (28)$$

Die Standardabweichung der maximalen Spannungsamplituden beträgt 0,71 mV um den Mittelwert von 8,28 mV. Bei den minimalen Amplituden beträgt die Standardabweichung 39  $\mu\text{V}$  um den Mittelwert von 303  $\mu\text{V}$ . Da die Ergebnisse der Einzelmessungen sehr nah beieinanderliegen, ist die Standardabweichung minimal.



Die geringe Streuung gibt an, dass dieses Messsystem eine hohe Reproduzierbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse aufweist. Die minimalen Abweichungen in den Ergebnissen sind auf die erneute Positionierung zurückzuführen.

Eine externe Störungsquelle ist ein zufälliger Fehler, der bei einer elektromagnetischen Oberflächenmessung auftreten kann. Hierbei wird in der Abbildung 92 der elektromagnetische Störer punktuell bei der Messung des STM32 gemessen und dargestellt.

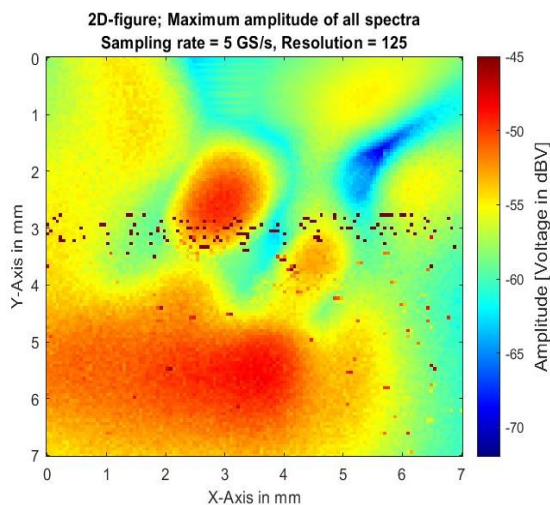


Abbildung 92: Aufnahme eines externen Störers.

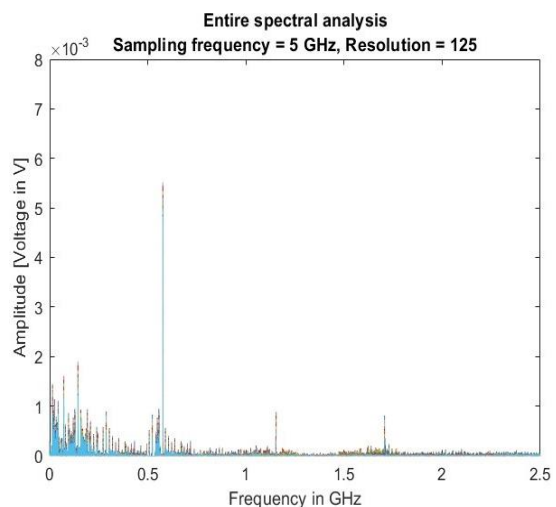


Abbildung 93: Frequenzspektrum der Messung.

In der Abbildung 93 ist das Frequenzspektrum der Oberflächenmessung dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass der empfangene Störer bei einer Frequenz von 576,3 MHz die Messergebnisse mit einer Amplitude von 5,6 mV deutlich überlagert. Das dargestellte Messergebnis des Scanfeldes ist somit nicht eindeutig auswertbar, da die höchsten Pegel durch den Störer verursacht werden. Da das Pegasus-Messsystem über keine Schirmung verfügt, können die elektrischen Geräte in der unmittelbaren Umgebung als potenzielle Störer auftreten.

### 5.3.2 Limitation der Messmethode und des Messsystems

Das Pegasus-Messsystem und die Messmethode unterliegen aufgrund des experimentellen Versuchsaufbaus verschiedenen technischen Einschränkungen.

Hierbei ist zu erwähnen, dass die manuell konstruierten Nahfeldsonden nicht an den breiten Frequenzbereich angepasst sind. Aus diesem Grund können die Sonden die elektromagnetischen Aussendungen nur bedingt erfassen. Zudem verfügen

diese über eine begrenzte laterale Auflösung, welche dazu führt, dass die kleinsten Feldquellen einer elektronischen Probe nicht zu detektieren sind. Die Empfangsempfindlichkeit ist ein weiterer Faktor, der das Messsystem unter bestimmten Bedingungen einschränkt. Durch die Abwägung einer hohen lateralen Auflösung oder einer hohen Empfindlichkeit kann das Messsystem nicht optimiert werden. Mit der Verstärkung der anliegenden Spannung am Sondenausgang werden die Messsignale auswertbar. Allerdings führt die Signalverstärkung zur Anhebung des Rauschpegels und zur Erhöhung der Störanfälligkeit gegenüber externen Störquellen.

Das Messsystem ist nicht in der Lage, eine identische Klonung von einem Originalbauteil oder einem gebrauchten, originalen Mikrochip, welcher als neuwertig unter einer neuen Bezeichnung verkauft wird, zu identifizieren. Sobald die innere Schaltung und die Funktionalität im Mikrochip gleich sind, werden die generierten Ausstrahlungen nicht voneinander im Frequenzspektrum oder in der Pegelanalyse unterschieden.

Eine weitere Einschränkung, die den Messprozess verzögert und damit einschränkt, ist die manuelle Inbetriebnahme der Entwicklungsboards mit den darauf gelöteten Mikrochips. Für die Messung der elektromagnetischen Emissionen einer elektronischen Probe muss diese in Betrieb genommen und durch eine Softwareimplementierung angesteuert werden. Diese Software trägt dazu bei, dass softwareabhängige Schaltungs- und Funktionsblöcke ein Nahfeld erzeugen, welches messbar ist. Somit kann mit diesem Messsystem keine Fälschung ohne eine vorherige Inbetriebnahme und Softwareimplementierung ermittelt werden.

## **6 Zusammenfassung**

In dem letzten Kapitel dieser Bachelorarbeit werden die relevantesten Erkenntnisse und Ergebnisse in der Schlussfolgerung zusammengefasst. Zudem wird hierbei die zuvor aufgestellte Forschungsfrage beantwortet. In dem Ausblick wird eine weitere Perspektive auf die Thematik eröffnet, um die entwickelte Messmethodik im Hinblick auf die vereinfachte Anwendbarkeit der elektromagnetischen Fälschungsanalyse zu verbessern.

### **6.1 Schlussfolgerungen**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein zerstörungsfreies Messsystem entwickelt und in Betrieb genommen, um nicht authentische elektronische Halbleiterkomponenten zu identifizieren. Mit der Entwicklung des Scansystems wurden in dieser Arbeit der Herstellungsprozess und die Funktionsweise der elektrischen und magnetischen Nahfeldsonden erläutert. Die manuelle Herstellung der elektrischen und magnetischen Sonden wies eine schnelle und kostengünstige Variante für das Messverfahren auf. Zudem wurden mit der Inbetriebnahme des Messaufbaus das Sondenpositionierungssystem Pegasus, das Datenerfassungssystem M4i.2233-x8 sowie die MATLAB-Benutzerschnittstelle programmiert und erfolgreich implementiert.

Die konzipierte Methodik verwendet elektrische und magnetische Nahfeldsonden zur Untersuchung der elektromagnetischen Nahfelder von elektronischen Bauteilen. Zusammenfassend ist hierbei zu erwähnen, dass bei der Herstellung der Nahfeldsonden die Priorisierung bei der Konstruktion einer Sonde liegt, die eine hohe Empfangsempfindlichkeit sowie eine hohe laterale Auflösung aufweist. Zur Identifizierung der elektronischen Fälschungen wurden die Nahfeldsonden in einem rasterförmigen Muster mit einem Abstand von 0,5 mm über der Oberfläche der Proben bewegt, um die Messergebnisse der kapazitiv eingekoppelten oder induzierten Spannungen der elektrischen oder magnetischen Feldquellen zu erhalten. Die Unterschiede in den elektromagnetischen Nahfeldaussendungen zwischen den originalen Referenzproben und den potenziellen Fälschungen wurden durch eine spektrale Signalanalyse evaluiert.

Aus den Messergebnissen geht grundsätzlich hervor, dass eine potenzielle Fälschung durch unterschiedliche Spannungspegel oder durch laterale Abweichungen in der Feldverteilung zu unterscheiden ist. Hierbei ist zu erwähnen, dass ein elek-

tronisches Imitat, welches eine identische Abstrahlungscharakteristik durch ein Recycling oder durch eine Klonung aufweist, nicht von einem Originalbauteil zu unterscheiden ist.

Mit diesem Messaufbau und der dazugehörigen Messmethode konnte bewiesen werden, dass die potenziellen Fälschungen der STM32-Proben charakteristische Fälschungsmerkmale aufweisen und somit als gefälscht identifiziert werden können. Im Gegensatz dazu ist die potenzielle Fälschung des FT232RL mit diesem Scanaufbau nicht eindeutig von der Referenzprobe zu unterscheiden.

Im Hinblick auf das vorliegende Analyseverfahren und die Vergleichbarkeit der Messergebnisse lässt sich konkret schlussfolgern, dass die zu Beginn gestellte Forschungsfrage der Bachelorarbeit positiv bestätigt werden kann. Das implementierte Messsystem mit den konstruierten Nahfeldsonden und der konzipierten Messmethodik kann eine nicht authentische elektronische Halbleiterkomponente durch die elektromagnetische Nahfeldmessung identifizieren. Bei einer nicht eindeutigen Erkennung können weitere optische sowie elektrische Antifälschungsmethoden wie das Röntgenverfahren oder die Laser-Entkapselung verwendet werden.

## **6.2 Ausblick und Verbesserungsvorschläge**

In dem folgenden Ausblick wird festgestellt, dass mit dieser Bachelorarbeit ein wichtiger Beitrag zum aktuellen Forschungsstand zur Bekämpfung der elektronischen Fälschungsproblematik geleistet wurde. Für zukünftige Forschungen und Entwicklungen, aufbauend auf dieser innovativen Messmethode, werden folgende weitere thematische Perspektiven eröffnet, um die Anwendbarkeit der Fälschungsanalyse zu verbessern.

Mit der Integration eines umfassenden Anpassungsnetzwerks zwischen den Nahfeldsonden und dem Vorverstärker besteht die Möglichkeit, dass die Effizienz der Signalübertragung zum  $50 \Omega$  Messsystem verbessert werden kann (Abb. 94). Für die Sondenoptimierung muss der Frequenzbereich der elektromagnetischen Ausstrahlungen durch weitere Messungen bekannt sein, um die Bandbreite der Nahfeldsonden eingrenzen zu können.

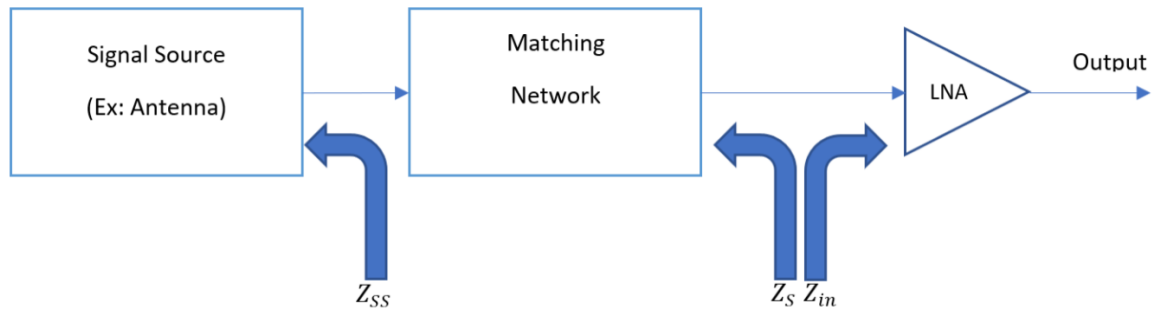


Abbildung 94: Anpassnetzwerk zwischen Nahfeldsonde und Vorverstärker.<sup>101</sup>

Eine weitere Möglichkeit, das Messsystem signifikant zu verbessern, besteht darin, eine automatisierte Abstandsmessung zur Probe einzusetzen. Da die Messergebnisse der Nahfeldsonden vom Abstand zur Probenoberfläche abhängig sind, ist es entscheidend, das System zu optimieren. Es stellt sich die Frage, ob durch regelmäßige und automatisierte Abstandsmessungen an den Messpunkten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse durch eine präzise Höhenpositionierung pro Messpunkt verbessert werden kann. Eine potenzielle Möglichkeit zur Messung der Höhe besteht in der Verwendung eines berührungslosen Laser-Wegmesssystems, welches Informationen an die Steuerung des Pegasus-Scanners sendet, um die Z-Achse zwischen jedem Messpunkt zu korrigieren. Dabei kann ein Soll-Ist-Vergleich der Höhe zielführend sein.

Eine Verbesserungsmöglichkeit zur Zeiteinsparung kann durch Parallelisierungstechniken umgesetzt werden. Hierbei hat die Entwicklung eines Nahfeldsondenarrays das Potenzial, die Messmethode durch ein zeitgleiches Messen der elektromagnetischen Aussendungen oberhalb einer Probe zu ermöglichen. Hierbei bedarf es grundlegend keiner Sondenpositionierung, da diese die Probenoberfläche vollständig abdecken und die Aussendungen empfangen. Mit der nachträglichen Überlagerung der Messergebnisse der einzelnen Sonden könnten diese effizient und schnell ausgewertet werden.

Der letzte Punkt, um das vorhandene Messsystem weiter zu optimieren, besteht darin, eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht, die Mikrochips ohne Implementierung auf einem Entwicklungsboard in Betrieb zu nehmen. Dies könnte durch die Verwendung einer geeigneten IC-Fassung erreicht werden, die auf einer angefertigten Prüfplatine installiert ist. Durch das einfache Einsetzen der entsprechenden

<sup>101</sup> Academy Berkeley Nucleonics (2024).

elektronischen Proben ohne Lötarbeiten durchzuführen, könnte das Verfahren deutlich vereinfacht und beschleunigt werden. Mit der Kombination des Messsystems und der schnellen und einfachen Inbetriebnahme könnte dieses Prüfverfahren eine Anwendung im Wareneingang von Lieferketten finden. Auf diese Weise könnten die zeitaufwändigen Vorbereitungen, die Inbetriebnahme sowie die Softwareimplementierung beschleunigt werden.

## Literaturverzeichnis

- Academy Berkeley Nucleonics. (2024). *Front End Receiver Noise Figures*.  
Abgerufen am 10. März 2024 von  
<https://academy.berkeleyelectronics.com/courses/657334/lectures/12222667>
- Alberto, N. (März 2018). *KiCad Info Forum*. Abgerufen am 16. Januar 2024 von  
<https://forum.kicad.info/t/microstrip-formulas-in-pcb-calculator/9861>
- arnotec GmbH. (2024). *koax24*. Abgerufen am 18. Januar 2024 von  
<https://www.koax24.de/produktinfos/koaxialkabel/aufbau/semi-rigid.html>
- Balanis, C. A. (2005). *Antenne Theory Analysis and Design*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Berger, N. H. (2003). *Innovative Verfahren zur Erweiterung der Mess- und Prüftechnik von MMICs*. Stuttgart.
- Bluhm Systeme GmbH. (2024). *Fälschungssicherheit*. Abgerufen am 31. Januar 2024 von <https://www.bluhmsysteme.com/faelschungssicherheit.html>
- Ch. von Grünigen, D. (2014). *Digitale Signalverarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Coherent Corp. (2024). *coherent*. Abgerufen am 15. Februar 2024 von  
<https://www.coherent.com/de/news/glossary/laser-ablation>
- Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V. (2020). *D EMV T*. Abgerufen am 18. Februar 2024 von  
[https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=857c163a\\_95e3\\_4c42\\_80c6da07c58ada5a](https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=857c163a_95e3_4c42_80c6da07c58ada5a)
- Forte, D., & Chakraborty, R. S. (2022). *Counterfeit Integrated Circuits: Thearts, Detection, and Avoidance*. University of Florida, IIT Kharagpur.
- Fraunhofer Gesellschaft. (2024). *Fraunhofer Gesellschaft*. Abgerufen am 23. Januar 2024 von <https://www.fraunhofer.de/de/institute/institute-einrichtungen-deutschland.html>
- Fraunhofer IMWS. (2024a). *Forschungsthemen*. Abgerufen am 30. Januar 2024 von  
<https://www.imws.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/mikroelektronik/forschungsthemen/materialdiagnostik-leistungselektronik.html>

- Fraunhofer IMWS. (2024b). *Fraunhofer IMWS*. Abgerufen am 30. Januar 2024 von <https://www.imws.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/mikroelektronik/leistungsangebote.html#242112216>
- Frieske, B., & Stieler, S. (2021). *Wissen Kompakt. Die "Halbleiter-Krise" als Folge der Covid-19-Pandemie*. Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg. Abgerufen am 29. Dezember 2023
- FTDI Chip. (2018). *UM232R USB - Serial UART Development Module Datasheet*.
- Future Technology Devices International Ltd. (2020). *FT232 USB UART IC Datasheet*.
- Grünbacher, H. (2010). *Digital Signal Processing*. Institute of Computer Engineering.
- Henke, H. (2020). *Elektromagnetische Felder* (Bd. 5. Auflage). Berlin: Springer Vieweg.
- Heyszl, D., Sigl, P., Seelos-Zankl, A., & Hiller, D. (10. März 2022). Referenzpapier Vertrauenswürdige Elektronik. *Teil I: Definition, Bedrohungen und Bewertung von Lösungsansätzen*.
- ITK Dr. Kassen GmbH. (2003). *Betriebsanleitung Pegasus*. Lahnau.
- Kaußler, R. (2022). *Richi's Lab*. Abgerufen am 18. Dezember 2023 von <https://www.richis-lab.de/STM32.htm>
- Köllner, C. (07. Januar 2022). Das müssen Sie zur Halbleiter-Krise wissen. *Springer Professional*. Abgerufen am 30. Dezember 2023 von <https://www.springerprofessional.de/halbleiter/halbleitertechnik/das-muessen-sie-zur-halbleiter-krise-wissen/19356172>
- Langer EMV-Technik GmbH. (2024a). *Langer EMV Technik; E-Feldsonde*. Abgerufen am 12. Februar 2024 von <https://www.langer-emv.de/de/product/rf-passiv-30-mhz-bis-3-ghz/35/rf-e-10-e-feldsonde-30-mhz-bis-3-ghz/10#Lightbox-mainimage>
- Langer EMV-Technik GmbH. (2024b). *Langer EMV Technik; H-Feldsonde*. Abgerufen am 20. Februar 2024 von <https://www.langer-emv.de/de/product/rf-passiv-30-mhz-bis-3-ghz/35/rf-b-50-1-h-feldsonde-30-mhz-bis-3-ghz/602#Lightbox-mainimage>
- Lehner, G., & Kurz, S. (2021). *Elektromagnetische Feldtheorie* (Bd. 9). Berlin: Springer Vieweg.



- Matric Group. (24. September 2019). *6 WAYS TO IDENTIFY & AVOID COUNTERFEIT ELECTRONIC COMPONENTS*. Abgerufen am 29. Dezember 2023 von <https://blog.matric.com/counterfeit-electronic-components-avoid>
- Meyer, M. (2017). *Signalverarbeitung; Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter* (Bd. 8). Windisch: Springer Vieweg.
- Mietke, D. (2022). *Elektroniktutor*. Abgerufen am 22. Februar 2024 von <https://www.elektroniktutor.de/elektrophysik/mfeldgr.html#:~:text=Die%20Stromdichte%20ist%20die%20Summe,die%20Ursache%20f%C3%BCr%20den%20Strom.>
- Oppermann, M., & Neubrand, T. (10. März 2016). *all-electronics*. Abgerufen am 10. Februar 2024 von <https://www.all-electronics.de/elektronik-entwicklung/die-aufbau-und-verbindingstechnik-wird-durchleuchtet.html>
- Peterson, Z. (5. August 2022). *altium*. Abgerufen am 29. Februar 2024 von <https://resources.altium.com/de/p/skin-effect-current-density-and-electromagnetic-field>
- Plass, C. (2020). *Prävention gegen Produktpiraterie*. Paderborn, Deutschland: Springer Vieweg. Abgerufen am 29. Dezember 2023
- Redaktion Digital Chiefs. (06. Januar 2022). *Chipkrise und kein Ende – Gründe und mögliche Auswege*. Abgerufen am 30. Dezember 2023 von <https://www.digital-chiefs.de/chipkrise-gruende-auswege/>
- Rudnicka, J. (Mai 2023). *Statista*. Abgerufen am 29. Dezember 2023 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/436393/umfrage/anzahl-der-vom-zoll-in-deutschland-beschlagnahmten-gefaelschten-waren/#:~:text=Die%20Statistik%20zeigt%20die%20Anzahl,57%20Millionen%20St%C3%BCck%20unterschiedlicher%20Waren.>
- Schaller, R. (1997). *Moore's law: past, present and future*. IEEE.
- SMTnet. (6. November 2018). *SMTnet*. Abgerufen am 12. Februar 2024 von [https://smtnet.com/mart/index.cfm?fuseaction=view\\_item&company\\_id=55615&item\\_id=176992](https://smtnet.com/mart/index.cfm?fuseaction=view_item&company_id=55615&item_id=176992)
- Spang, M. (2012). *Einsatz von Feldsonden mit mehreren Ausgängen in EMV-Nahfeldmessungen von Leiterplatten*. Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg.

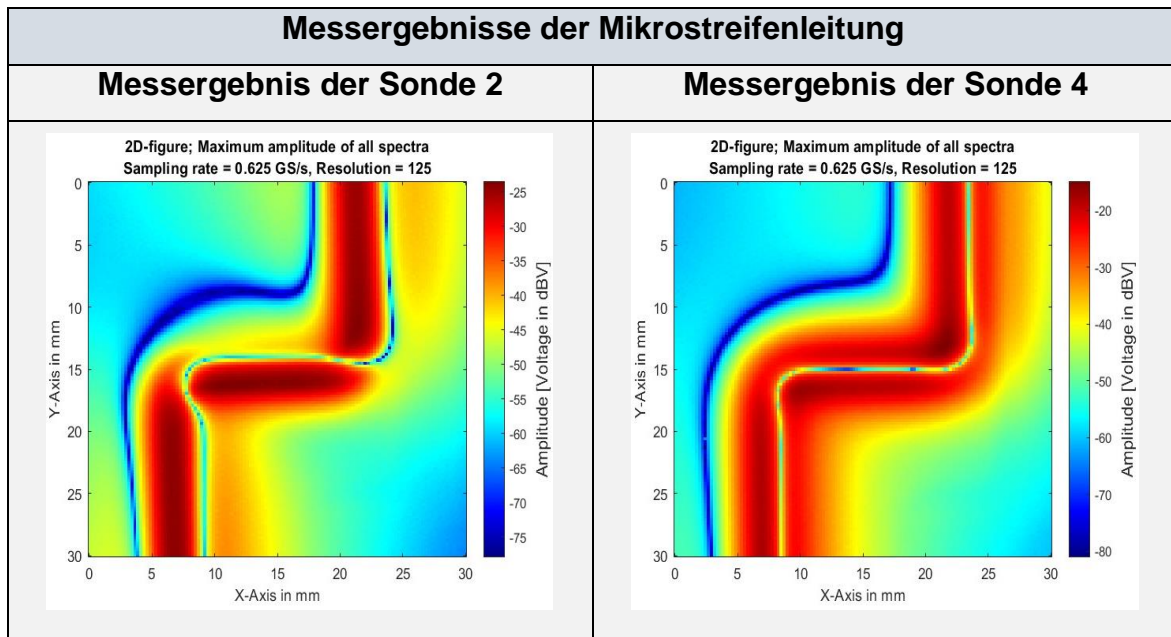
- Spectrum Instrumentation GmbH. (2023a). *Hardware Manual Software Driver Manual*. Grosshansdorf.
- Spectrum Instrumentation GmbH. (2023b). *M4i22-Datasheet*. Grosshansdorf.
- Spectrum Instrumentation GmbH. (2023c). *spectrum-instrumentation*. Abgerufen am 15. Januar 2024 von <https://spectrum-instrumentation.com/products/details/M4i2233-x8.php?data-ab=tab-2>
- Stal, D. M. (03. April 2018). *heise online*. Abgerufen am 19. Januar 2024 von <https://www.heise.de/blog/Blue-Pill-STM32-ARM-Cortex-M3-Boards-4009580.html>
- Stiny, L. (2019). *Aktive elektronische Bauelemente*. Haar a. d. Amper: Springer Vieweg.
- STMicoelectronics. (2015). *Datasheet STM32F103x6*. st.com.
- Stolz, D. (2021). *Elektromagnetische Verträglichkeit in der Praxis*. Babenhausen: Springer Vieweg.
- Tehranipoor, M. M., Guin, U., & Forte, D. (2015). *Counterfeit Integrated Circuits*. Schweiz: Springer. Abgerufen am 28. Dezember 2023
- The MathWorks, Inc. (2024). *MathWorks; Schnelle Fourier-Transformation*. Abgerufen am 25. Februar 2024 von [https://de.mathworks.com/discovery/fft.html#:~:text=Eine%20schnelle%20Fourier%2DTransformation%20\(FFT,und%20andere%20Eigenschaften%20eines%20Signals](https://de.mathworks.com/discovery/fft.html#:~:text=Eine%20schnelle%20Fourier%2DTransformation%20(FFT,und%20andere%20Eigenschaften%20eines%20Signals).
- Thumm, M., Wiesbeck, W., & Kern, S. (1998). *Hochfrequenzmesstechnik*. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH.
- U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security. (2010). *Defense Industrial Base Assessment. Counterfeit Electronics*. Arlington.
- VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015). *Integrierte Schaltungen - Teil 3 Messung der abgestrahlten Aussendungen - Verfahren der Oberflächenabtastung (IEC/TS 61967-3:2014)*. Frankfurt am Main: Beuth Verlag GmbH.
- VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2024). *DKE Normen. Machen. Zukunft*. Abgerufen am 10. Februar 2024 von <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7058611&type=dke%7Cdokument>

- Velektronik. (2023). *Vertrauenswürdige Elektronik*. Abgerufen am 30. Januar 2024 von <https://www.velektronik.de/>
- Werner, M. (2019). *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB*. Fulda: Springer Vieweg.
- Willig, H.-P. (2022). *cosmos-indirekt*. Abgerufen am 02. Februar 2024 von [https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Nahfeld\\_und\\_Fernfeld\\_\(Antennen\)](https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Nahfeld_und_Fernfeld_(Antennen))
- Winzker, M. (2017). *Elektronik für Entscheider*. Sankt Augustin: Springer Vieweg.
- Zürcher Hochschule Winterthur. (2014). *SlidePlayer*. Abgerufen am 10. Januar 2024 von <https://slideplayer.org/slide/884388/>
- Zurek, S. (04. September 2023). *Encyclopedia Magnetica*. Abgerufen am 12. Februar 2024 von [https://www.e-magnetica.pl/doku.php/biot-savart\\_law](https://www.e-magnetica.pl/doku.php/biot-savart_law)

## Anhang

In diesem Anhang sind alle weiteren Messergebnisse der Nahfeldsonden aufgelistet, die nicht in dieser Bachelorarbeit betrachtet und verglichen wurden.

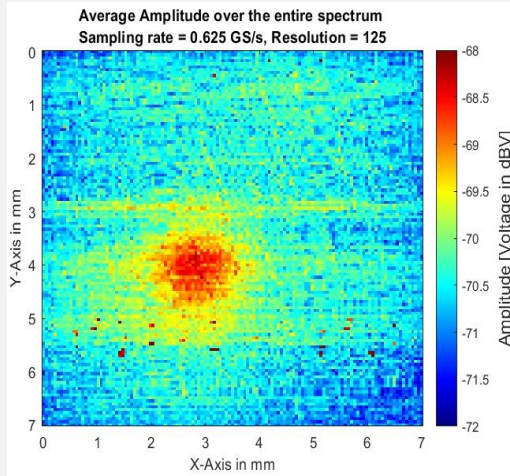
### Anhang 1: Weitere Messergebnisse der Oberflächenmessung



## Messergebnisse des STM32F103C6T6

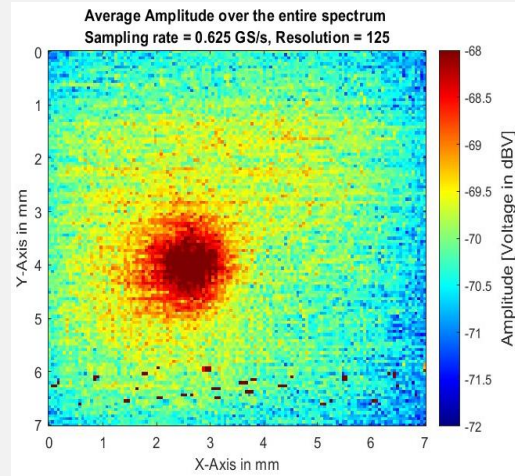
### Messergebnis der Sonde 1

**MYS 99 241**



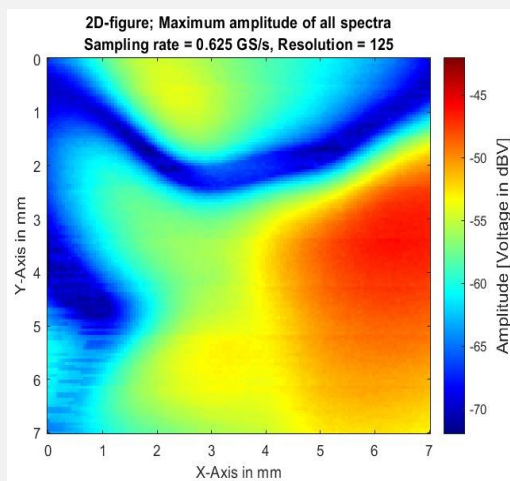
### Messergebnis der Sonde 1

**MYS 99 236**



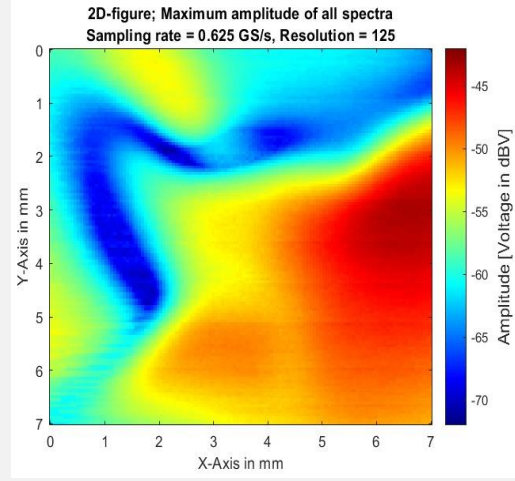
### Messergebnis der Sonde 3

**MYS 99 241**



### Messergebnis der Sonde 3

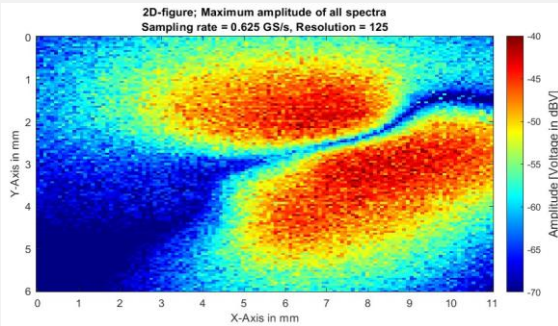
**MYS 99 236**



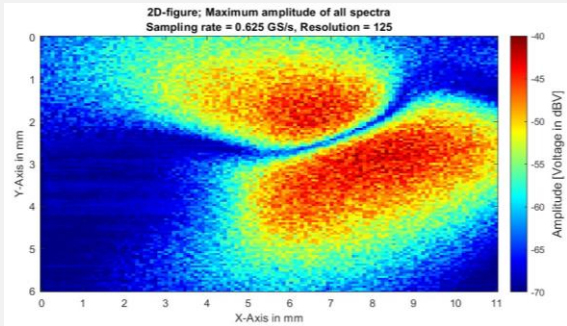
Messergebnisse des STM32F103C8T6	
<p><b>Messergebnis der Sonde 1</b></p> <p><b>MYS 350</b></p>	<p><b>Messergebnis der Sonde 1</b></p> <p><b>DC2226</b></p>
<p>Average Amplitude over the entire spectrum Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p>	<p>Average Amplitude over the entire spectrum Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p>
<p><b>Messergebnis der Sonde 5</b></p> <p><b>MYS 350</b></p>	<p><b>Messergebnis der Sonde 5</b></p> <p><b>DC2226</b></p>
<p>2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p>	<p>2D-figure; Maximum amplitude of all spectra Sampling rate = 0.625 GS/s, Resolution = 125</p>

# Messergebnisse des FTDI FT232RL

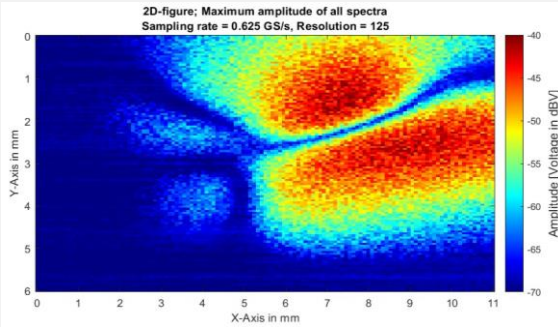
**Messergebnis der Sonde 3  
G52037C1**



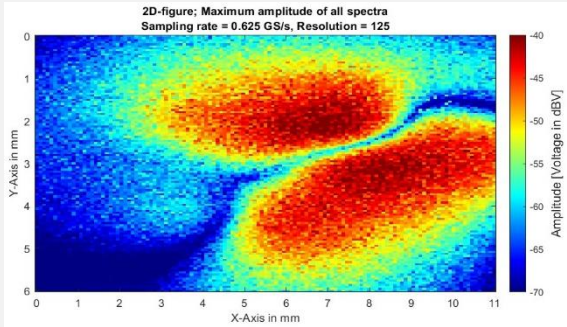
**Messergebnis der Sonde 3  
B8908572**



**Messergebnis der Sonde 4  
G52037C1**



**Messergebnis der Sonde 4  
B8908572**



## Anhang 2: Software der STM32-Proben

Mit dieser implementieren Software wurde der STM32-Prozessor rechenintensiv ausgelastet.

```
volatile float buffer = 0;

void setup()
{
    pinMode(PC13, OUTPUT); //Pinfestlegung der Kontroll-LED.
}

void loop()
{
    //digitalWrite(PC13, LOW); //LED aus.
    buffer = 0; //Leerer Datenpuffer.

    for(int i = 0; i < 100000; i++) //Rechenintensive for-Schleife.
    {
        buffer++;
        buffer = 1/(i+1) * buffer + buffer;
    }
    //digitalWrite(PC13, HIGH); //LED an.

    for(int i = 0; i < 100000; i++) //Rechenintensive for-Schleife.
    {
        buffer++;
        buffer = 1/(i+1) * buffer + buffer;
    }
}
```



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Adrian Juwien, dass die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

### **Evaluierung der elektrischen und magnetischen Nahfeldmessung zur Identifikation nicht authentischer elektrischer Halbleiterkomponenten**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Die Bachelorarbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Die digitale Fassung der Arbeit stimmt mit der in Schriftform vorgelegten Fassung wörtlich überein.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift