

# **Interner Bericht**

**DLR-IB-FT-BS-2025-158**

## **Untersuchung der Störeinkopplung auf Platinen mittels elektromagnetischer Strahlung**

### **Bachelorarbeit**

Marie Johanna Brunner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht  
**DLR-IB-FT-BS-2025-158**

**Untersuchung der Störeinkopplung auf Platinen mittels  
elektromagnetischer Strahlung**

Marie Johanna Brunner

Institut für Flugsystemtechnik  
Braunschweig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Flugsystemtechnik  
Abteilung Flugversuchstechnik & IT

**Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird  
elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt.**

Braunschweig, den 04.11.2025

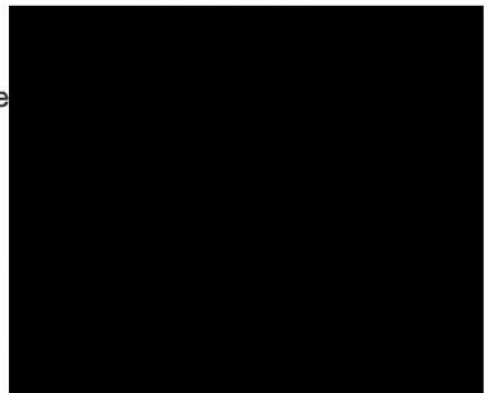
Unterschriften:

Institutsleitung: Prof. Dr. C. Keßler, Dr.-Ing. A. Bie

Abteilungsleitung: Dr.-Ing. C.-H. Oertel

Betreuer:in: M. Sc. M. Schubert-Zhang

Verfasser:in: M. J. Brunner



# **Untersuchung der Störeinkopplung auf Platinen mittels elektromagnetischer Strahlung**

## **Bachelorarbeit**

des Studienganges Luft- und Raumfahrttechnik  
mit Schwerpunkt Luft- und Raumfahrtelektronik  
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg  
Campus Friedrichshafen

von  
Marie Johanna Brunner

22.09.2025

**Bearbeitungszeitraum**  
**Matrikelnummer, Kurs**  
**Ausbildungsfirma**  
**Betreuer der Ausbildungsfirma**  
**Gutachter der Dualen Hochschule**

12 Wochen  
[REDACTED]  
DLR e. V., Braunschweig  
M. Sc. Maximilian Schubert-Zhang  
Dr.-Ing. Philipp Krämer

## Erklärung

gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017.

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema:

**„Untersuchung der Störeinkopplung auf Platinen mittels elektromagnetischer Strahlung“**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Braunschweig, 22. September 2025



Marie Johanna Brunner



## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the idea of being able to defend against drone attacks by using electromagnetic radiation. For this purpose fundamental investigations will be carried out in this thesis. The aim is to determine whether physical damage can be caused to circuit boards when they are exposed to high-frequency electromagnetic radiation. Firstly, various printed circuit boards are selected as test objects. These include both passive antennas with a simple design and more complex commercial parts that are suitable for use in a drone: an inertial measurement unit and an antenna for signals from the global navigation satellite system. Test setups are developed and measurements are carried out to test the interference coupling of these test objects. The aim is to determine whether mechanisms for the physical destruction of the circuit boards can occur. However, since no physical destruction was determined during the tests, the coupled power is assessed and it is also monitored whether and how the specified function of the electronics can be temporarily or even permanently disrupted.

## Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Gedanken, Drohnenangriffe mithilfe von elektromagnetischer Bestrahlung abwehren zu können. Dafür sollen in dieser Arbeit grundlegende Untersuchungen angestellt werden. Es gilt zu ermitteln, ob an Platinen physischer Schaden angerichtet werden kann, wenn diese hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt werden.

Dafür werden zunächst verschiedene Platinen als Testobjekte ausgewählt. Dabei handelt es sich sowohl um passive Antennen mit einem einfachen Aufbau, aber auch um komplexere Kaufteile, die zum Einsatz in einer Drohne passen: eine inertielle Messeinheit und eine Antenne für Siganle des globalen Navigationssatellitensystems.

Für die Prüfung der Störeinkopplung dieser Testobjekte werden Testaufbauten entwickelt und Messungen durchgeführt. Ziel dabei ist es, festzustellen, ob Mechanismen zur physischen Zerstörung der Platinen auftreten können. Allerdings sind bei den Tests keine physischen Zerstörungen aufgetreten. Stattdessen wird die eingekoppelte Leistung beurteilt und außerdem überwacht, ob und wie die vorgegebene Funktion der Elektronik temporär oder sogar nachhaltig gestört werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                                    | <b>VI</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                                    | <b>VII</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                                      | <b>VII</b> |
| <b>Formelzeichenverzeichnis</b>                                                 | <b>VII</b> |
| <b>1. Einleitung</b>                                                            | <b>1</b>   |
| <b>2. Theoretische Grundlagen</b>                                               | <b>3</b>   |
| 2.1. Maxwellgleichungen . . . . .                                               | 3          |
| 2.2. Elektromagnetische Wellen . . . . .                                        | 5          |
| 2.3. Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .                               | 7          |
| 2.3.1. Kopplungswege . . . . .                                                  | 8          |
| 2.3.2. EMV-Messverfahren . . . . .                                              | 9          |
| 2.4. Antennen . . . . .                                                         | 10         |
| 2.4.1. Vom Hertz'schen Dipol zur $\lambda/2$ -Antenne . . . . .                 | 11         |
| 2.4.2. Eigenschaften und Kenngrößen von Antennen . . . . .                      | 13         |
| 2.4.3. Antennenbauformen . . . . .                                              | 18         |
| 2.4.4. Übertragung von Leistung . . . . .                                       | 21         |
| 2.5. Drohnenabwehr . . . . .                                                    | 22         |
| 2.5.1. Zivile und militärische Drohnen . . . . .                                | 23         |
| 2.5.2. Kinetische Maßnahmen zur Drohnenabwehr . . . . .                         | 25         |
| 2.5.3. Elektronische Methoden zur Drohnenabwehr . . . . .                       | 26         |
| 2.5.4. Schutz von Drohnen vor Drohnenabwehrmaßnahmen . . . . .                  | 29         |
| <b>3. Auswahl der Testobjekte</b>                                               | <b>33</b>  |
| 3.1. Testplatine mit passiven Antennen . . . . .                                | 33         |
| 3.2. Sensoren . . . . .                                                         | 39         |
| <b>4. Testaufbau</b>                                                            | <b>44</b>  |
| 4.1. Normen zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung und Impulsen . . . . . | 44         |
| 4.2. Erarbeiteter Testaufbau und Vorgehen . . . . .                             | 49         |
| 4.2.1. Bestrahlung der Testplatine . . . . .                                    | 49         |
| 4.2.2. Bestrahlung der inertialen Messeinheit . . . . .                         | 54         |
| 4.2.3. Bestrahlung der GNSS-Empfangeinheit . . . . .                            | 58         |
| <b>5. Auswertung der Messungen</b>                                              | <b>60</b>  |
| 5.1. Einkoppelte Leistungen auf der Testplatine . . . . .                       | 60         |
| 5.1.1. Einfluss der Kabeldämpfung . . . . .                                     | 60         |
| 5.1.2. Einfluss des Abstands zwischen Sendeantenne und Platine . . . . .        | 63         |
| 5.1.3. Einfluss der Polarisierung der Sendeantenne . . . . .                    | 65         |
| 5.1.4. Vergleich zwischen den Testantennen . . . . .                            | 66         |
| 5.1.5. Vergleich zwischen den genutzten Frequenzen . . . . .                    | 68         |
| 5.1.6. Beurteilung der physischen Einflüsse auf die Platine . . . . .           | 70         |
| 5.1.7. Untersuchung der Unsicherheit der Feldsonde . . . . .                    | 71         |
| 5.2. Bestrahlung der Sensoren . . . . .                                         | 74         |
| 5.2.1. Inertiale Messeinheit . . . . .                                          | 74         |

---

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 5.2.2. GNSS-Antenne . . . . . | 80        |
| <b>6. Fazit</b>               | <b>84</b> |
| <b>7. Ausblick</b>            | <b>85</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>88</b> |
| <b>A. Anhang</b>              | <b>92</b> |
| A.1. Tabellen . . . . .       | 92        |
| A.2. Abbildungen . . . . .    | 92        |

## Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>C4I</b>     | Führungsinformationssystem, engl. Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence |
| <b>C-UAS</b>   | Counter Unmanned Aircraft System                                                                |
| <b>CUT</b>     | Cable Under Test                                                                                |
| <b>DLR</b>     | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.                                                 |
| <b>HDOP</b>    | Horizontal Dilution Of Precision                                                                |
| <b>EASA</b>    | European Union Aviation Safety Agency                                                           |
| <b>ECAD</b>    | Electronic Computer-Aided Design                                                                |
| <b>EMP</b>     | Elektromagnetischer Impuls, engl. Electromagnetic Pulse                                         |
| <b>EMV</b>     | Elektromagnetische Verträglichkeit                                                              |
| <b>EU</b>      | Europäische Union                                                                               |
| <b>EUROCAE</b> | European Organization for Civil Aviation Equipment                                              |
| <b>EUT</b>     | Equipment Under Test                                                                            |
| <b>ESD</b>     | Elektrostatische Entladung, engl. Electrostatic Discharge                                       |
| <b>EW</b>      | Elektronische Kampfführung, engl. Electronic Warfare                                            |
| <b>GNSS</b>    | Globales Navigationssatellitensystem                                                            |
| <b>GPS</b>     | Global Positioning System                                                                       |
| <b>HALE</b>    | High-Altitude Long-Endurance                                                                    |
| <b>HEMP</b>    | High-Altitude Electromagnetic Pulse                                                             |
| <b>HF</b>      | Hochfrequenz                                                                                    |
| <b>HPM</b>     | High-Power Microwave                                                                            |
| <b>IMU</b>     | Inertiale Messeinheit, engl. Inertial Measurement Unit                                          |
| <b>KI</b>      | Künstliche Intelligenz                                                                          |
| <b>LISN</b>    | Netznachbildung, engl. Line Impedance Stabilization Network                                     |
| <b>MALE</b>    | Medium-Altitude Long-Endurance                                                                  |
| <b>MEMS</b>    | Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme                                                               |
| <b>NATO</b>    | North Atlantic Treaty Organization                                                              |
| <b>NMEA</b>    | National Marine Electronics Association                                                         |
| <b>RTCA</b>    | Radio Technical Commission for Aeronautics                                                      |
| <b>SMA</b>     | Sub-Miniature-A                                                                                 |
| <b>TEM</b>     | Transverse Electromagnetic Cell                                                                 |
| <b>UA</b>      | Unmanned Aircraft                                                                               |
| <b>UAS</b>     | Unmanned Aircraft System                                                                        |
| <b>VNA</b>     | Vektorieller Netzwerkanalysator                                                                 |
| <b>VSWR</b>    | Stehwellenverhältnis, engl. Voltage Standing Wave Ratio                                         |

## Abbildungsverzeichnis

|     |                                                                           |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Schema der Störübertragung . . . . .                                      | 7  |
| 2.  | Übersicht EMV-Messungen . . . . .                                         | 9  |
| 3.  | Hertz'scher Dipol als Ersatzschaltbild . . . . .                          | 12 |
| 4.  | Richtdiagramm . . . . .                                                   | 15 |
| 5.  | Smith-Diagramm . . . . .                                                  | 18 |
| 6.  | Patch-Antenne . . . . .                                                   | 19 |
| 7.  | Breitbandantennen . . . . .                                               | 20 |
| 8.  | Testplatine in KiCad . . . . .                                            | 34 |
| 9.  | Gefertigte Testplatine . . . . .                                          | 35 |
| 10. | Betrag des $S_{11}$ -Parameters von Antenne 3 . . . . .                   | 37 |
| 11. | Verwendete IMU . . . . .                                                  | 40 |
| 12. | GNSS-Modul und Antenne . . . . .                                          | 43 |
| 13. | Testaufbau einer gestrahlten Störfestigkeitsmessung . . . . .             | 46 |
| 14. | Aufbau zur Signalerzeugung außerhalb der EMV-Kammer . . . . .             | 50 |
| 15. | Aufbau innerhalb der EMV-Kammer . . . . .                                 | 52 |
| 16. | Skizze des gesamten Aufbaus . . . . .                                     | 53 |
| 17. | Aufbau zur Bestrahlung der IMU . . . . .                                  | 55 |
| 18. | Nahaufnahme der IMU . . . . .                                             | 55 |
| 19. | Kupferschütte . . . . .                                                   | 56 |
| 20. | Aufbau zur Bestrahlung des GNSS-Moduls . . . . .                          | 59 |
| 21. | Kabeldämpfung in Abhängigkeit der Frequenz . . . . .                      | 61 |
| 22. | Einfluss der Kabeldämpfung auf die Messdaten . . . . .                    | 62 |
| 23. | Exemplarischer Vergleich 1 m und 0,5 m Abstand der Sendeantenne . . . . . | 64 |
| 24. | Vergleich aller Frequenzen bei Antenne 4 . . . . .                        | 69 |
| 25. | Untersuchung der Feldsonde, Ausgangsposition . . . . .                    | 72 |
| 26. | Aufzeichnung gestörter Messdaten der IMU . . . . .                        | 75 |
| 27. | Störung der IMU bei 375 MHz, horizontal . . . . .                         | 76 |
| 28. | Störung der IMU bei 375 MHz, horizontal - Detailaufnahme . . . . .        | 77 |
| 29. | Abstrahlung der IMU bei 250 MHz–1,5 GHz, horizontal . . . . .             | 78 |
| 30. | Abstrahlung der IMU bei 250 MHz–1,5 GHz, vertikal . . . . .               | 79 |
| 31. | Empfangene Daten der GNSS-Einheit . . . . .                               | 82 |
| 32. | Betrag des $S_{11}$ -Parameters von Antenne 1 . . . . .                   | 92 |
| 33. | Betrag des $S_{11}$ -Parameters von Antenne 2 . . . . .                   | 93 |
| 34. | Betrag des $S_{11}$ -Parameters von Antenne 4 . . . . .                   | 93 |
| 35. | Betrag des $S_{11}$ -Parameters von Antenne 5 . . . . .                   | 94 |
| 36. | Leermessung bei 250 MHz–1,5 GHz, horizontal . . . . .                     | 94 |
| 37. | Leermessung bei 250 MHz–1,5 GHz, vertikal . . . . .                       | 95 |

## Tabellenverzeichnis

|    |                                                                        |    |
|----|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. | Übersicht der Ergebnisse der $S_{11}$ -Messung . . . . .               | 38 |
| 3. | Genutzte Frequenzen und zugehörige Wellenlängen . . . . .              | 39 |
| 4. | Übersicht "Broadband Amplifier" von Rhode&Schwarz . . . . .            | 50 |
| 5. | Frequenzen mit der höchsten Leistungseinkopplung . . . . .             | 69 |
| 6. | Störung der inertialen Messeinheit . . . . .                           | 75 |
| 7. | Nutzung von Werkzeugen basierend auf künstlicher Intelligenz . . . . . | 92 |
| 8. | Ergebnisse der Untersuchung der Unsicherheit der Feldsonde . . . . .   | 92 |

## Formelzeichenverzeichnis

| Symbol       | Einheit         | Bedeutung                         |
|--------------|-----------------|-----------------------------------|
| $\vec{B}$    | $T$             | Magnetische Flussdichte           |
| $c$          | $\frac{m}{s}$   | Lichtgeschwindigkeit              |
| $C$          | $F$             | Kapazität                         |
| $d$          | $m$             | Abstand                           |
| $D$          | —               | Richtfaktor                       |
| $\vec{E}$    | $\frac{V}{m}$   | Elektrische Feldstärke            |
| $f$          | $Hz$            | Frequenz                          |
| $G$          | $dB_i$          | Gewinn                            |
| $G_E$        | $dB_i$          | Gewinn der Empfangsantenne        |
| $G_S$        | $dB_i$          | Gewinn der Sendeantenne           |
| $\vec{H}$    | $\frac{A}{m}$   | Magnetische Feldstärke            |
| $\vec{j}$    | $\frac{A}{m^2}$ | Stromdichte                       |
| $l$          | $m$             | Geometrische Länge                |
| $L$          | $H$             | Induktivität                      |
| $P$          | $W$             | Leistung                          |
| $P_E$        | $W$             | Empfangsleistung                  |
| $P_S$        | $W$             | Sendeleistung                     |
| $r$          | $m$             | Abstand                           |
| $R$          | $\Omega$        | Ohm'scher Widerstand              |
| $Z$          | $\Omega$        | Impedanz                          |
| $Z_0$        | $\Omega$        | Wellenwiderstand im Vakuum        |
| $Z_A$        | $\Omega$        | Eingangsimpedanz                  |
| $Z_O$        | $\Omega$        | Ausgangsimpedanz                  |
| $\Gamma$     | —               | Reflexionskoeffizient             |
| $\epsilon$   | $\frac{As}{Vm}$ | Dielektrizität oder Permittivität |
| $\epsilon_0$ | $\frac{As}{Vm}$ | Elektrische Feldkonstante         |
| $\eta$       | —               | Antennenwirkungsgrad              |
| $\lambda$    | $m$             | Wellenlänge                       |
| $\mu$        | $\frac{Vs}{Am}$ | Magnetische Permeabilität         |
| $\mu_0$      | $\frac{Vs}{Am}$ | Magnetische Feldkonstante         |

| Symbol     | Einheit          | Bedeutung            |
|------------|------------------|----------------------|
| $\rho$     | $\frac{As}{m^3}$ | (Raum-)Ladungsdichte |
| $\omega$   | $\frac{1}{s}$    | Kreisfrequenz        |
| $\omega_0$ | $\frac{1}{s}$    | Eigenfrequenz        |



## 1. Einleitung

In aktuellen Zeiten können immer wieder Schlagzeilen zu Drohnen und deren Einsatz in kriegesischen Auseinandersetzungen gelesen werden.

Im derzeitigen Krieg in der Ukraine aufgrund der russischen Invasion im Februar 2022 spielen Drohnen eine wesentliche Rolle. Dabei kommen nicht nur große militärische Drohnen zum Einsatz. Vielmehr werden kleinere, kommerziell erwerbbare und modifizierte oder selbst gebaute Propeller-Drohnen für verschiedene Zwecke eingesetzt – und zwar auf beiden Seiten des Konflikts. Dadurch können mehrere Vorteile erreicht werden: Die einfacheren Drohnen können von Personal ohne aufwendige Ausbildung gesteuert werden, die Kosten werden trotz hoher Stückzahlen deutlich reduziert und die Drohnen können vielseitig für verschiedene militärische Zwecke eingesetzt werden. [1]

Die Verteidigungsmechanismen müssen daher auf die Situation reagieren und Bestrebungen zur Drohnenabwehr nehmen ebenfalls großen Raum in der technischen Entwicklung und der elektronischen Kampfführung ein (siehe 2.5.3).

Militärische Drohnen werden i. d. R. vor physischen und elektronischen Gegenmaßnahmen geschützt. Werden kommerzielle oder andere kleine und leichte Drohnen für militärische Zwecke eingesetzt, so weisen diese oftmals kein umfangreiches System zum Schutz vor Gegenmaßnahmen auf. So sind diese unter anderem anfälliger für elektromagnetische Störungen der elektronischen Komponenten für Navigation, Kommunikation, Überwachung oder sonstige Aufgaben. [1]

In dieser Arbeit soll grundlegend untersucht werden, welche Effekte bei Elektronik durch elektromagnetische Strahlung ausgelöst werden können. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung, ob Platinen durch den Einfluss von elektromagnetischen Feldern langfristige Störungen möglicherweise davontragen.

Zunächst werden in Kapitel 2 einige Grundlagen zu den relevanten Themen dieser Arbeit vorgestellt. Dazu gehören elektromagnetische Strahlung und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), theoretische Hintergründe zu Antennentechnik, Drohnen und elektronische Kampfführung. In den folgenden Kapiteln geht es um die angestrebten Untersuchungen zur Störeinkopplung auf Platinen mithilfe elektromagnetischer Strahlung. Dafür wird ermittelt, wie viel Leistung in verschiedenartig aufgebaute Platinen eingekoppelt werden kann und ob weitere Effekte festge-

stellt werden können. Die dafür verwendeten Testobjekte werden in Kapitel 3 genauer erläutert. Anschließend wird der Testaufbau in Kapitel 4 thematisiert. Dabei werden zunächst mögliche Aufbauten und Vorgehen in Normen analysiert und schließlich ein Messaufbau und Vorgehen entwickelt. Eine ausführliche Auswertung der Messergebnisse erfolgt in Kapitel 5. Schließlich folgen ein Gesamtfazit zur Arbeit (Kapitel 6) und ein Ausblick (Kapitel 7).

## 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Themen erläutert, welche für das Verständnis und den Kontext der Arbeit vonnöten sind.

Zunächst werden die theoretischen Hintergründe und Grundlagen der elektromagnetischen Felder und Strahlung erläutert. Anschließend erfolgt die Definition von elektromagnetischer Verträglichkeit und die Einordnung des Themas der Arbeit in diesen Bereich. Anschließend werden einige Aspekte aus dem Bereich der Antennentechnik eingeführt.

Wie in der Einleitung erläutert, steht diese Arbeit im Kontext der Drohnenabwehr. Daher wird diesbezüglich der Stand der Technik in Abschnitt 2.5 erläutert.

### 2.1. Maxwellgleichungen

Die Maxwellgleichungen bilden die physikalische Grundlage für die Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge. Sie wurden im 19. Jahrhundert vom Physiker James Clerk Maxwell formuliert. Zu den wichtigen Aspekten gehört dabei die Verknüpfung von elektrischem und magnetischem Feld und die Abhängigkeit zwischen elektrischen und magnetischen Phänomenen. Die Maxwellgleichungen bilden die Grundlage für die Betrachtung elektromagnetischer Wellen und Felder, daher werden sie zunächst allgemein vorgestellt. Dabei ist anzumerken, dass es verschiedene Darstellungs- und Vereinfachungsformen gibt. Hier werden die zeitabhängigen Gleichungen in Differentialform dargestellt. [2]

#### Feldbetrachtung im Vakuum

Die Maxwellgleichungen werden zunächst im Vakuum betrachtet. Sie können allerdings auch um weitere Terme ergänzt werden für eine Betrachtung in Materie. Weiter werden die Gleichungen in Abhängigkeit der Zeit betrachtet, da einige zeitliche Änderungen für zusätzliche Phänomene sorgen.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) beschreibt die Divergenz des elektrischen Feldes  $\vec{E}$  (elektrische Feldstärke) und besagt, dass Ladungen als Quellen bzw. Senken des elektrischen Feldes fungieren. Positive Ladungen sind dabei Quellen, von denen Feldlinien ausgehen und negative Ladungen Senken, auf denen Feldlinien enden.  $\epsilon_0$  ist dabei die Permittivität des Vakuums bzw. elektrische Feldkonstante und  $\rho$  beschreibt die Raumladungsdichte. Oftmals ist auch die Rede vom elektrischen Gauß'schen Gesetz oder dem Coulomb-Gesetz.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d}{dt}\vec{B} \quad (2.2)$$

Gleichung (2.2) sagt aus, dass ein elektrisches Feld im Ruhezustand wirbelfrei ist. Durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses  $\vec{B}$  werden allerdings Wirbel des elektrischen Feldes erzeugt. Sie wird auch Faraday'sches Induktionsgesetz genannt. Beispielsweise wird in einer Spule in einem Magnetfeld eine Spannung induziert, wenn sich der magnetische Fluss durch die Spule verändert. Das negative Vorzeichen kommt durch die Lenz'sche Regel zustande. Diese besagt, dass Ströme, Felder oder Kräfte, die durch Induktion hervorgerufen werden, ihrer Ursache entgegen wirken.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

Gleichung (2.3) beschreibt die Divergenz des magnetischen Feldes und sagt aus, dass dieses, anders als beim elektrischen Feld, keine Quellen aufweist. Das bedeutet, dass in jedes Volumen, aus dem magnetische Feldlinien austreten, auch genauso viele Feldlinien wieder eintreten müssen. Dies geht mit der Aussage einher, dass es keine magnetischen Monopole gibt. Diese Gleichung wird auch magnetisches Gauß'sches Gesetz genannt.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt}\vec{E} \quad (2.4)$$

Mithilfe von Gleichung (2.4) wird die Rotation des magnetischen Feldes beschrieben. Magnetische Felder können durch zwei Effekte verursacht werden: Zum einen durch elektrische Ströme, die in einem Leiter fließen  $\vec{j}$  (Ampere'sches Durchflutungsgesetz) und zum anderen durch zeitliche Änderungen des elektrischen Feldes  $\frac{d}{dt}\vec{E}$  (Maxwell'scher Verschiebungsstrom).  $\mu_0$  ist die magnetische Permeabilität des Vakuums oder sog. magnetische Feldkonstante.

[3, 4]

### **Betrachtung von Materie**

Wird die Interaktion von elektrischen und magnetischen Feldern oder gar elektromagnetischen Wellen mit Materialien betrachtet, so treten weitere Phänomene auf.

Durch elektrische Felder kommt es innerhalb von Materialien zur Polarisierung und aufgrund von magnetischen Feldern zur Magnetisierung. Beide Effekte sind abhängig von der Art des Mediums, weshalb materialabhängige Kennzahlen zur Ermittlung der Permittivität ( $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ) und Permeabilität ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ ) benötigt werden. [3]

An sprunghaften Übergängen zwischen verschiedenen Materialien gelten die Maxwellgleichungen in dieser Form allerdings nicht mehr, da Unstetigkeiten in den Feldgrößen und deren Ableitungen auftreten [2].

## 2.2. Elektromagnetische Wellen

Der physikalische Begriff des Feldes wurde maßgeblich durch Michael Faraday und James Maxwell geprägt. Elektromagnetische Felder wurden als physikalische Größen mit Energie und Impuls eingeführt. Die zuvor (Abschnitt 2.1) erläuterten Maxwellgleichungen beschreiben die zeitlichen und räumlichen Eigenschaften der Felder. [2]

In der Annahme, dass sich diese in weiter Entfernung befinden, werden Ladungen und Ströme ignoriert und es werden  $\rho = \vec{j} = 0$  gesetzt. Durch weiteres Umstellen können Gleichungen für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im Raum gewonnen werden. Die Herleitungen und mathematischen Darstellungen werden an dieser Stelle allerdings vernachlässigt. Stattdessen sollen in diesem Kapitel die wesentlichen Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen und weitere Zusammenhänge aus den Maxwellgleichungen zusammengefasst werden. Die Herleitung der Wellengleichungen ist in [2] und [3] zu finden.

Eine wichtige Erkenntnis, die aus den Maxwellgleichungen (2.2) und (2.4) gewonnen werden kann, ist die gegenseitige Erzeugung von elektrischen und magnetischen Feldern im dynamischen Fall. Diese Kopplung ist die Grundlage für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum. Elektromagnetische Wellen benötigen, anders als mechanische Wellen, kein Medium zur Ausbreitung, sondern diese kann auch im Vakuum erfolgen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei die Lichtgeschwindigkeit  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ . [3, 4]

Wichtig für die Charakterisierung von elektromagnetischen Wellen ist außerdem die Betrachtung von Nah- und Fernfeld. Der Übergang zwischen diesen Feldern ist fließend. Oftmals wird auch eine Übergangszone zu Hilfe genommen. Daher werden für die Abgrenzung zwischen Nah- und Fernfeld zum Teil leicht abweichende Definitionen verwendet. Unter anderem in den Literaturquellen [2] und [5] wird folgende Unterscheidung getroffen: Für  $\frac{2\pi f}{c} \cdot r \gg 1$  kann eine Betrachtung im Fernfeld angewendet werden. Das Nahfeld liegt vor für  $\frac{2\pi f}{c} \cdot r \ll 1$ . Dabei ist  $f$  die Frequenz der elektromagnetischen Welle,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $r$  der Abstand zur Antenne.

Mithilfe von Gleichung 2.5 kann der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge hergestellt werden.  $\lambda$  steht für die Wellenlänge,  $c$  für die Lichtgeschwindigkeit und  $f$  für die Frequenz der elektromagnetischen Welle.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

Dadurch kann auch eine Aussage zum Beginn des Fernfeldes anhand der Wellenlänge getroffen werden: Es beginnt ab dem Abstand  $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ . Im Fernfeld können eine Reihe von Aussagen getroffen werden, die im Nahfeld nicht gelten:

Im Fernfeld stehen magnetisches und elektrisches Feld in einer festen Beziehung zueinander. Die Vektoren der beiden Felder stehen dabei senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Aus diesem Grund wird auch die Bezeichnung als Transversalwelle angewendet. Die Ausbreitungsrichtung wird mithilfe des Poynting-Vektors  $\vec{S}$  beschrieben. Die Phasen des magnetischen und elektrischen Feldes sind im Fernfeld angeglichen und es besteht keine Phasenverschiebung. Im Fernfeld gilt der reelle Wellenwiderstand  $Z_0$  im Vakuum. Über den Wellenwiderstand sind elektrisches und magnetisches Feld gekoppelt, siehe Gleichung (2.6).  $\vec{H}$  stellt dabei die magnetische Feldstärke dar. Sie kann über die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  aus der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  berechnet werden.

[3, 6]

$$Z_0 = \frac{\mu_0 \cdot |\vec{E}|}{|\vec{B}|} = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \quad (2.6)$$

Eine weitere Eigenschaft, die elektromagnetische Wellen aufweisen, ist ihre Polarisierung. Dafür wird der Vektor des elektrischen Feldes betrachtet. Erfolgt dessen Schwingung nur in eine Richtung, handelt es sich um eine linear polarisierte Welle. Daneben gibt es auch zirkulare und elliptische Polarisierung und unpolarisierte Wellen, welche allerdings nicht weiter betrachtet werden. Für linear polarisierte Wellen spielt noch der Unterschied in der Ausrichtung eine Rolle: Schwingt der Vektor des elektrischen Feldes parallel zur Erdoberfläche, so ist die Welle horizontal polarisiert. Steht der Vektor hingegen senkrecht, wird von vertikaler Polarisierung gesprochen. [3, 7]

## 2.3. Elektromagnetische Verträglichkeit

Bei der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eines Geräts oder Systems werden zwei grundlegende Eigenschaften betrachtet: Zum einen muss das Gerät in seiner elektromagnetischen Umgebung in der Lage sein, seine Funktion ungestört auszuführen. Zum anderen darf das Gerät dabei seine Umgebung und darin befindliche Geräte nicht unzulässig beeinflussen und deren Funktion stören. [8]

Für den ersten Aspekt werden auch die Begriffe der “Störfestigkeit” oder “Störempfindlichkeit” verwendet. Von außen können über verschiedene Wege elektromagnetische Störungen in das System eingebracht werden: Entweder über elektromagnetische Felder im freien Feld oder über angeschlossene Kabel für die Versorgung des Systems mit Strom und Spannung oder über angeschlossene Datenleitungen. [9]

Der zweite Aspekt wird auch “Störaussendung” genannt. Die Störungen, die von einem elektronischen Gerät ausgehen, können sowohl leitungsgebunden über Daten- oder Versorgungsleitungen oder direkt über das freie Feld an die elektromagnetische Umgebung abgegeben werden. [9]

Bei der elektromagnetischen Verträglichkeit müssen also mehrere Geräte und Aspekte beachtet werden. Zum einen gibt es eine Quelle für die Störungen. Auf der anderen Seite gibt es ein Gerät, das gestört wird. Damit dies eintreten kann, müssen Frequenz, Amplitude und Zeitraum der Störung, welche von der Störquelle verursacht wird, zur Störsenke passen. Diese ist also anfällig für die Störung. Außerdem wird eine Übertragungsmöglichkeit der Störung vom einen Gerät auf das andere benötigt. Dies kann auf verschiedenen Wegen vonstattengehen. [10]

Die an einer EMV-Störung beteiligten Elemente werden in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Im folgenden Abschnitt werden die Übertragungswege genauer beleuchtet.

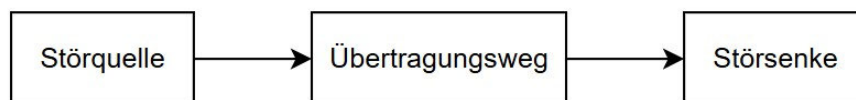


Abbildung 1: Schema der Störübertragung

### 2.3.1. Kopplungswege

Die bereits erwähnten Möglichkeiten der Ein- bzw. Auskopplung elektromagnetischer Störungen werden in verschiedene Kopplungsmechanismen unterteilt. Bei der Übertragung von Störungen können auch mehrere Kopplungen zusammen auftreten.

Die galvanische, kapazitive sowie induktive Kopplung beziehen sich auf Störeinkopplung über Leitungen. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Abmessung der Leitungen kleiner als die Wellenlänge der elektromagnetischen Störungen ist. [9]

**Impedanzkopplung / galvanische Kopplung:** Zu einer Impedanzkopplung kann es kommen, wenn verschiedene Stromkreise über eine gemeinsame Impedanz verbunden sind. Dies ist oft in Versorgungsnetzwerken der Fall z. B. bei gemeinsamen Anschluss an Ground (Masse). [10]

**Kapazitive Kopplung:** Zu kapazitiven Kopplungen kann es kommen, wenn zwischen einer Leitung, die mit einer Störung beaufschlagt ist und einer danebenliegenden Leitung eine parasitäre Kapazität entsteht. So sind die Leitungen über ein elektrisches Feld gekoppelt und die Störung kann darüber übertragen werden. [9]

**Induktive Kopplung:** Wie der Name vermuten lässt, liegt der induktiven Kopplung das Induktionsgesetz zu Grunde. Durch eine Störung werden zeitlich veränderliche Magnetfelder hervorgerufen. In Leitungen, die von diesen zeitlich veränderliche Magnetfeldern durchdrungen werden, können Störspannungen induziert werden. [9]

**Elektromagnetische Kopplung:** Hier werden Fälle betrachtet, bei denen sich die Abmessung der Schaltung in der gleichen oder einer größeren Größenordnung als die Wellenlänge der Störung befindet. Leiterbahnen, Leitungen und auch Schlitze in leitenden Strukturen können als Sende- und Empfangsantennen von elektromagnetischen Wellen fungieren. Sie können sowohl Störungen abstrahlen als auch einkoppeln. [8]

In dieser Arbeit geht es um die Störeinkopplung auf Platinen durch gestrahlte Störungen. Daher ist in erster Linie die elektromagnetische Kopplung von Interesse.

Bei der Untersuchung von komplexeren Platinen sind auch die Kopplungen zwischen den Stromkreisen innerhalb z. B. eines Sensors relevant. Diese sind allerdings kaum erfassbar und müssen i. d. R. unter möglichst genauen System-Kenntnissen modelliert werden.



### 2.3.2. EMV-Messverfahren

Insgesamt können Messungen im Feld der EMV in vier Teilgebiete unterteilt werden: Die erste Unterteilung erfolgt in Störaussendung und Störfestigkeit und die zweite Unterteilung in leitungsgebundene oder gestrahlte Störungen. In Abbildung 2 sind die EMV-Messungen, die im EMV-Labor des DLR in Braunschweig typischerweise durchgeführt werden, übersichtlich dargestellt. Außerdem ist vermerkt, welches Instrument bei den verschiedenen Messungen zum Einsatz kommt, um die Störungen zu erfassen oder zu erzeugen.

Bei geleiteten Messungen kommen Stromzangen zum Einsatz, mit denen Wechselströme auf Leitungen gemessen oder eingeprägt werden können. Diese sind für die vorliegende Arbeit nicht weiter relevant, da der Fokus auf gestrahlter Störkopplung liegt.

Bei gestrahlten Messungen werden Antennen genutzt, die zum Empfangen und Senden bestimmter Leistungen geeignet sind. Dabei muss je nach Frequenzbereich eine passende Antenne verwendet werden.

Neben den in Abbildung 2 genannten Messaufnehmern werden auch weitere Geräte zur Verarbeitung der Signale wie Spektrumanalysatoren und andere Messempfänger benötigt. Bei Messungen zur Störfestigkeit werden auch Signalgeneratoren und Verstärker eingesetzt.

Die Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, können in das Gebiet der gestrahlten Störfestigkeit eingeordnet werden. Allerdings handelt es sich um experimentelle Messungen, weshalb kein genormtes Vorgehen dafür angewendet werden kann. Das verwendete Equipment und der Aufbau für die durchgeführten Messungen werden in Kapitel 4.2 genauer erläutert.

| <div>Was wird gemessen?</div> <div>Wie wird gemessen?</div> | Emissionen                               | Störfestigkeit                                  |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| gestrahlt                                                   | gestrahlte Emissionen<br>Empfangsantenne | gestrahlte Störfestigkeit<br>Sendeantenne       |
| geleitet /<br>leitungsgebunden                              | geleitete Emissionen<br>Strommesszange   | geleitete Störfestigkeit<br>Stromeinspeisezange |

Abbildung 2: Übersicht EMV-Messungen

Alle Messungen werden in einer Halbabsorberkammer, auch EMV-Kammer genannt, durchgeführt. Dies soll unter anderem ein geeignetes Messumfeld für reproduzierbare Messungen garantieren. Die geschlossene Kammer stellt einen Faraday'schen Käfig mit hoher Dämpfung dar, damit elektromagnetische Strahlung von außen nicht in die Kammer eindringen kann. Ebenso kann die während der Messung erfolgte Abstrahlung keine Geräte außerhalb der Kammer beeinflussen. Auch der Aufbau im Inneren der Kammer spielt eine Rolle. EMV-Kammern werden an den Innenflächen mit Absorbern versehen, damit Reflexionen der Signale verhindert werden. Die EMV-Kammer, die für die Messungen in dieser Arbeit verwendet wird, ist an der Rückwand mit Hybrid-Absorbern (Kombination aus Pyramiden-Absorber und Ferrit-Absorber) ausgestattet und an den restlichen Wänden sowie der Decke mit Ferrit-Absorbern versehen. Der Boden ist nicht mit Absorbern bedeckt, weshalb der Begriff Halbabsorberkammer verwendet wird. [9]

Nach der Aufteilung wie in Abbildung 2 erfolgen auch die Messungen, welche für elektronische Geräte in verschiedenen Einsatzbereichen gefordert werden. Für die Luftfahrt und die Zulassung von Luftfahrzeugen und verbautem Equipment werden EMV-Messungen in der Norm "EUROCAE ED-14" (European Organization for Civil Aviation Equipment) bzw. "RTCA DO-160" (Radio Technical Commission for Aeronautics) beschrieben [10]. Auf die Durchführung von gestrahlten Messungen zur Störfestigkeit, wird in Kapitel 4.1 näher eingegangen.

## **2.4. Antennen**

Antennen stellen die Schnittstelle zwischen elektromagnetischen Wellen im Raum und in Leitungen dar [11].

Antennen spielen sowohl in der EMV allgemein als auch in dieser Arbeit eine große Rolle. Auf der einen Seite werden bestimmte Arten von Antennen im Rahmen von EMV-Messungen eingesetzt. Entweder bei Emissionsmessungen, um vom Equipment Under Test (EUT) ausgestrahlte Störungen zu empfangen oder um das EUT für Störfestigkeitsmessungen zu bestrahlen (vgl. Abbildung 2).

Auf der anderen Seite können sämtliche stromführenden Leitungen und Drähte oder Gehäuse als Antenne verstanden werden. Diese können erwünscht oder unerwünscht elektromagnetische Wellen abstrahlen und auch einkoppeln. Diese Phänomene müssen bei der Auslegung von elektrischen Geräten in Hinblick auf ihre eigene EMV beachtet werden. [8]

In dieser Arbeit soll es darum gehen, inwiefern die Leiterbahnen auf Platinen als Antennen zur Einkopplung von Störstrahlung genutzt werden können. Dies wird in Kapitel 3 bei der Erläuterung der Testobjekte aufgegriffen.

Daher werden in diesem Abschnitt einige wichtige Eigenschaften von Antennen eingeführt. Neben dem Hertz'schen Dipol als Einstieg in die Antennentechnik werden auch weitere Antennenformen erläutert, die in dieser Arbeit verwendet werden.

#### **2.4.1. Vom Hertz'schen Dipol zur $\lambda/2$ -Antenne**

Der Hertz'sche Dipol wird gerne als grundlegendes Beispiel für die Funktionsweise von Antennen genutzt. Als Ersatzschaltbild für einen Dipol kann eine Reihenschaltung aus Kapazität  $C$ , Induktivität  $L$  und Resistenz  $R$  herangezogen werden. Diese Schaltung ist auch als Schwingkreis bekannt und in Abbildung 3 (a) zu sehen. Bei Betrachtung von idealen Bauteilen kann die Energie entweder im Kondensator in Form eines elektrischen Feldes oder in der Spule in Form eines magnetischen Feldes gespeichert werden. Zwischen diesen beiden Zuständen oszilliert der Schwingkreis und elektrisches bzw. magnetisches Feld werden auf- bzw. abgebaut.

Der resistive Anteil repräsentiert den Anteil der Energie, der als elektromagnetische Welle an den Freiraum abgegeben wird [10]. Diese Abstrahlung ist möglich, weil es sich bei einem Dipol um einen sog. offenen Schwingkreis handelt. Dieser ist mit den repräsentierenden kapazitiven, induktiven und resistiven Anteilen in Abbildung 3 (b) dargestellt. Der Speisepunkt des Dipols in Abbildung 3 (b) befindet sich zentral zwischen den beiden Dipol-Elementen.

Im offenen Schwingkreis, also dem Hertz'schen Dipol, oszillieren die Ladungsträger entlang dessen Länge und die Ladungsverteilung wird periodisch zwischen den Enden des Dipols umgepolt. Während jeder Periode wird ein Teil der Energie als elektromagnetisches Feld abgestrahlt.

In unmittelbarer Nähe des Dipols (Nahfeld) sind die periodischen Verläufe von elektrischem und magnetischem Feld um  $90^\circ$  phasenverschoben, da Strom und Spannung im Wechselstromkreis um  $90^\circ$  phasenverschoben sind. Wie in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, gleichen sich die Phasen an und die Felder schwingen im Fernfeld phasengleich.

[3]

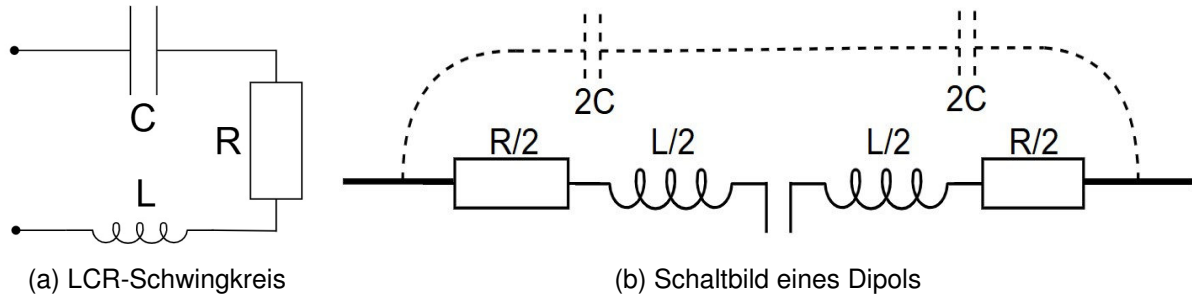


Abbildung 3: Hertz'scher Dipol als Ersatzschaltbild

Der oszillierende, offene Schwingkreis besitzt eine Resonanzfrequenz. Bei einer Resonanz ist die Reaktanz gleich Null und die Impedanz gering. Daher ist es bei der Resonanzfrequenz am einfachsten und effektivsten Energie ein- oder auszukoppeln. Bei dieser Frequenz ist die Antenne am besten geeignet, elektromagnetische Wellen zu senden oder zu empfangen. Ober- und unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Impedanz aufgrund der Eigenschaften von Spule und Kondensator sehr hoch. [10]

Bei einem Dipol steht die Resonanzfrequenz in Verbindung zur geometrischen Länge des Dipols. Der Zusammenhang wird in Gleichung (2.7) ersichtlich. Diese dient zur Berechnung der Frequenz des Wechselstroms und der Schwingung der Ladungsverschiebungen im Draht des Dipols. Eine detaillierte Herleitung kann [3] entnommen werden.

An den offenen Enden des Drahtes wird der Strom zu Null. Dadurch entstehen entlang des Dipols stehende Wellen. Dabei entspricht die Länge  $l$  des Dipols der Hälfte der Wellenlänge  $\lambda$ .

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{\pi \cdot c}{l} \quad (2.7)$$

Entspricht die Länge des Dipols einer halben Wellenlänge ( $l = \lambda/2$ ) entsteht also Resonanz [10]. Weitere Resonanzen können entstehen, wenn die Länge des Dipols Vielfachen von einer halben Wellenlänge entspricht:  $l = n \cdot \lambda/2$  mit  $n = 1, 2, 3, \dots$  [5].

Bisher wurden ideale, dünne Dipole betrachtet und die geometrische Länge konnte der elektrischen Länge gleichgesetzt werden. Diese Annahme gilt bei der Betrachtung realer Dipolantennen nur selten. Stattdessen muss beachtet werden, dass sich elektromagnetische Wellen im Material des Dipols mit einer etwas geringeren Phasengeschwindigkeit als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Durch die reale Betrachtung sorgen zwei Effekte dafür, dass die geometrische Länge des Dipols angepasst werden muss, um Resonanz bei der gewünschten Wellenlänge zu erzeugen.

Aufgrund der reduzierten Phasengeschwindigkeit in der Leitung wird auch die Wellenlänge in der Leitung gegenüber der Wellenlänge im Freiraum reduziert. Die Frequenz bleibt dabei gleich. Um nun eine Resonanz bei der gewünschten Wellenlänge im Freiraum im Dipol hervorzurufen, muss die tatsächliche Länge des Dipols gegenüber der elektrischen Länge verkürzt werden. Dafür wird ein Verkürzungsfaktor eingeführt. Dieser ist abhängig von der Materialdicke des Dipols. Außerdem können die Enden des Dipols mit einem endlich kleinen Durchmesser als Kondensatorplatten angesehen werden (vgl. Schaltbild 3 (b)). Dies erhöht die elektrische Leitungslänge ebenfalls gegenüber der Wellenlänge in der Leitung. Daher wird ein weiterer Verkürzungsfaktor benötigt, um die Wellenlänge im Leiter anzupassen und Resonanz mit der Welle im Freiraum zu erhalten.

Aufgrund dieser notwendigen Anpassungen und weiteren Einflüssen werden Antennen oftmals mithilfe iterativer, numerischer Berechnung und Simulation ausgelegt oder es werden Abschätzungen herangezogen und die Abmessungen experimentell verbessert.

[5]

## **2.4.2. Eigenschaften und Kenngrößen von Antennen**

### **Reziprozität**

Im allgemeinen Fall sind Antennen reziprok. Das bedeutet, dass das Richtdiagramm einer Antenne sowohl für ihre Anwendung als Sendeantenne als auch als Empfangsantenne gilt. Wichtig ist diese Eigenschaft auch bei der Betrachtung des Antennengewinns. Dieser Verstärkungsfaktor gilt beim Abstrahlen sowie beim Empfangen von elektromagnetischen Wellen. Richtdiagramm und Antennengewinn werden in den folgenden Absätzen erklärt.

Für die Stromverteilung gilt die Reziprozität jedoch nicht, da sich die elektromagnetischen Felder im Sende- und Empfangsfall in der unmittelbaren Umgebung der Antenne unterscheiden. Auch trifft diese Eigenschaft nicht auf Antennen zu, bei denen nicht-reziproke Materialien zum Einsatz kommen.

[11]

## Richtdiagramm

Das Richtdiagramm einer Antenne beschreibt, in welche Raumrichtungen die Antenne abstrahlt bzw. aus welchen Richtungen sie empfängt. Bei einigen Anwendungsfällen soll möglichst viel Leistung in eine bestimmte Richtung gesendet werden oder aus dieser empfangen werden. Bei anderen Anwendungen hingegen soll die Leistung in alle Richtungen gleichmäßig gestrahlt werden bzw. soll rundum empfangen werden. Daher ist die Richtwirkung einer Antenne ausschlaggebend bei der Auswahl der passenden Antenne je nach Einsatzzweck.

Im Richtdiagramm einer Antenne wird aufgetragen, wie stark sie in die jeweiligen Richtungen abstrahlen oder aus diesen Richtungen empfangen kann. Dabei werden nur die Eigenschaften im Fernfeld betrachtet.

Die gesamte Richtcharakteristik einer Antenne wird zumeist dreidimensional dargestellt. Für zweidimensionale Darstellung als Richtdiagramm werden gewöhnlich zwei Schnitte verwendet: Ein horizontaler Schnitt durch den Mittelpunkt der Antenne für die Abbildung der Azimutwinkel und ein vertikaler Schnitt zur Abbildung der Elevationswinkel. Dafür werden oftmals Polarkoordinaten genutzt.

Richtdiagramme werden häufig auf das Modell eines idealen, isotropen Kugelstrahler bezogen, der in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt. In Hauptstrahlrichtung wird im Richtdiagramm der Wert 1 oder umgerechnet 0 dB erreicht. In allen anderen Richtungen ist der Vergleichswert zum Rundstrahler kleiner als 1 oder eine negative dB-Angabe.

Antennen mit einer Richtwirkung weisen im Richtdiagramm eine sogenannte Hauptkeule auf, in dieser Richtung wirkt die Antenne am besten. Eine hohe Richtwirkung zeichnet sich durch eine schmale Hauptkeule aus. Um eine Aussage über die Richtwirkung zu treffen, wird auch der Winkelbereich herangezogen, der von der Hauptkeule abgedeckt wird, bis diese -3 dB erreicht. Dieser Winkel wird auch Halbwertsbreite oder Öffnungswinkel genannt. Bei Richtantennen in der Regel unerwünscht sind große Neben- und Rückkeulen.

Abbildung 4 zeigt ein Richtdiagramm, an dem mehrere Aspekte beispielhaft veranschaulicht werden. Bei der Darstellungsart handelt es sich um ein Polardiagramm. Die Antenne befindet sich im Ursprung und die Raumrichtungen sind in 30° Schritten gekennzeichnet. Die Skalierung erfolgt logarithmisch in dB. Bei 0° befindet sich die Hauptstrahlrichtung und die Hauptkeule erreicht 0 dB. Daneben sind auch einige Nebenkeulen und eine kleine Rückkeule erkennbar.

[5, 11]

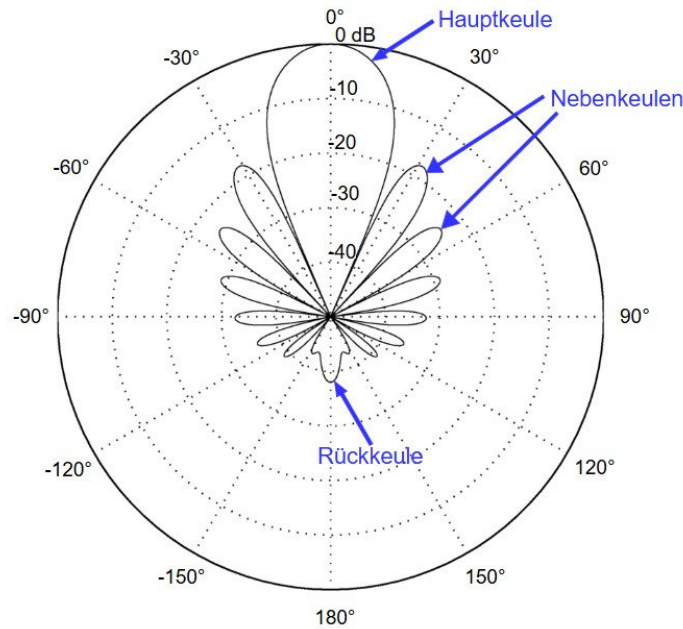


Abbildung 4: Richtdiagramm, entnommen aus [12] und überarbeitet

### Antennengewinn

Der Antennengewinn ist eine weitere Kenngröße für Antennen. Der Gewinn einer Antenne gibt an, wie sehr eine Antenne die abgestrahlte Energie in ihre Hauptstrahlrichtung bündeln und abstrahlen kann. Er gilt nicht nur für das Abstrahlen in Hauptstrahlrichtung, sondern aufgrund der Reziprozität auch für das Empfangen.

Der Antennengewinn wird ebenfalls auf einen idealen Kugelstrahler bezogen, welcher in alle Raumrichtungen gleichmäßig abstrahlt. Reale Antennen und insbesondere Richtantennen strahlen in eine Richtung bzw. einen Bereich stärker ab als der ideale Kugelstrahler. In anderen Richtungen ist die Leistung dafür kleiner als die des Referenzstrahlers.

Als Gewinn einer Antenne wird der Faktor bezeichnet, um den die Antenne in ihrer Hauptstrahlrichtung stärker abstrahlt als der ideale Kugelstrahler. Daneben gibt es den Richtfaktor als weiteren Kennwert für die Richtwirkung einer Antenne. Bei diesem werden Verluste z. B. in der Einspeisung nicht mitbetrachtet, im Gewinn sind diese enthalten. Der Zusammenhang zwischen Gewinn  $G$  und Richtfaktor  $D$  kann über die Effizienz bzw. den Antennenwirkungsgrad  $\eta$  hergestellt werden, wie in Gleichung (2.8) angegeben. Der Antennenwirkungsgrad stellt das Verhältnis aus abgestrahlter zu eingespeister Leistung dar.

[5, 11]

$$G = \eta \cdot D \quad (2.8)$$

## Polarisation

In Abschnitt 2.2 wurde erläutert, dass elektromagnetische Wellen im Raum oftmals eine Polarisation aufweisen. Daher ist dieser Aspekt auch für die Verwendung von Antennen relevant. Damit eine Antenne möglichst viel der Energie einer elektromagnetischen Welle aufnehmen kann, muss die Polarisation der Antenne mit der der Welle übereinstimmen. Bei idealer Abstimmung hinsichtlich der Polarisation würde es nicht zu Verlusten durch Fehlanpassung der Polarisation kommen. Stehen Welle und Antenne allerdings senkrecht zueinander, so ist keine Energieübertragung zwischen Welle im Feld und Antenne möglich. [5]

## Stehwellenverhältnis

Die Impedanzen zwischen der Antenne und dem Anschluss mit z. B. der Sendeeinheit, müssen angepasst sein. Bei Fehlanpassung kann es zu Reflexionen des übertragenen Signals kommen. Dadurch kann nicht die gesamte Leistung abgestrahlt werden.

Als Kennwert für die reflektierte Leistung kann das Stehwellenverhältnis, engl. Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) verwendet werden. Das VSWR bildet sich folgendermaßen:

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.9)$$

Das  $\Gamma$  in Gleichung (2.9) ist dabei der Reflexionskoeffizient und drückt aus, wie viel Leistung zwischen z. B. dem Sender und der Antenne reflektiert wurde.  $\Gamma$  kann mithilfe einer Messung des  $S_{11}$ -Parameters ermittelt werden oder durch Gleichung (2.10) ausgedrückt werden.

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_O}{Z_A + Z_O} = |S_{11}| \quad (2.10)$$

Dabei ist  $Z_A$  die Eingangsimpedanz der Antenne und  $Z_O$  die Ausgangsimpedanz der angeschlossenen Einheit, z. B. dem Sender. Aus Gleichung (2.10) und (2.9) wird ersichtlich, dass im Fall von  $Z_A = Z_O$  die beste Anpassung vorliegt, da  $\Gamma$  zu 0 und damit das VSWR zu 1 wird. In diesem Fall gäbe es keine Reflexionen und die Antenne kann bei dieser Frequenz gut genutzt werden. In der Praxis sind Werte bis 1,5 über die Bandbreite/den nutzbaren Frequenzbereich einer Antenne wünschenswert.

[5, 13]



### **$S_{11}$ -Parameter**

Wie Gleichungen 2.9 und 2.10 entnommen werden kann, kann das VSWR mithilfe einer Messung des  $S_{11}$ -Parameters bestimmt werden. Um Auskunft über die Eigenschaften einer Antenne zu gewinnen, bietet sich unter anderem eine Messung dieses Parameters an.

Beim  $S_{11}$ -Parameter handelt es sich um einen der vier Streuparameter, die zur Charakterisierung von Zweitor-Netzwerken verwendet werden können. Dabei werden die Wellen und deren Leistung betrachtet, die in den jeweiligen Port einlaufen, ablaufen oder reflektiert werden. Dazu werden die hin- und rücklaufenden Spannungswellen am Port gemessen. Die Darstellung der Streuparameter erfolgt i. d. R. in dB.

Der  $S_{11}$ -Parameter wird als Eingangsreflexionsparameter bezeichnet. Der Kehrwert wird auch als Rückflusssdämpfung oder "return loss" bezeichnet. Bei einer Antenne handelt es sich nur noch um ein Eintor, also ein System mit einem Port. Der  $S_{11}$ -Parameter bleibt aber bestehen. Streuparameter können mithilfe eines vektoriellen Netzwerkanalysators (VNA) gemessen werden. Bei einer Messung des  $S_{11}$ -Parameters wird erfasst, wie viel Leistung eines Signals, welches an Port 1 in ein System (also die Antenne) gegeben wird, an diesem Port zurückreflektiert wird. Über einen bestimmten Frequenzbereich wird also der Antenne ein Testsignal zugeführt und gleichzeitig gemessen, wie viel Reflexion bei welchen Frequenzen vorliegt. Wird die ganze Leistung reflektiert, so liefert die Messung ein Ergebnis von 0 dB, was bedeutet, dass die Antenne bei dieser Frequenz nicht abstrahlt. Je geringer der dB-Wert ist, desto besser ist die Abstrahlung der Antenne bei dieser Frequenz. Strahlt die Antenne bei der Frequenz gut ab, so wird möglichst wenig Leistung am Port reflektiert, sondern in den Raum gestrahlt. Somit ergibt sich ein hoher, negativer dB-Wert für den Reflexionsparameter. Strahlt die Antenne die Leistung bei der Frequenz hingegen weniger ab, so wird die Leistung stattdessen reflektiert, und das Ergebnis nähert sich 0 dB an.

[14]

### **Impedanzanpassung**

Falls die Impedanzen der Antenne und der Einheit  $Z_A$  und  $Z_O$  (siehe Gleichung (2.10)) hingegen nicht übereinstimmen, können Maßnahmen ergriffen werden, um eine Anpassung und damit maximale Leistungsübertragung zu erreichen. Impedanzen werden als komplexe Zahlen mit Real- und Imaginärteil ausgedrückt. Der Realteil beschreibt dabei den resistiven Anteil und der Imaginärteil den reaktiven Anteil (induktiv oder kapazitiv). Für eine Anpassung sollten  $Z_A$  und  $Z_O$  als komplex konjugiertes Paar vorliegen. [13]

Durch das Ergänzen von Induktivitäten (Spulen) oder Kapazitäten (Kondensatoren) in Reihe oder parallel zum Pfad geschaltet, können Korrekturen durchgeführt werden. Zur Veranschaulichung wird dazu i. d. R. das sogenannte Smith-Diagramm verwendet. In diesem werden die komplexen Anteile der Impedanz dargestellt, siehe Abbildung 5. Der resistive Realteil der Impedanz wird auf der horizontalen Halbachse des Kreises dargestellt. Die obere Hälfte des so geteilten Kreises repräsentiert den induktiven Anteil und die untere Hälfte den kapazitiven. Der Mittelpunkt des Kreises stellt eine reine  $50\ \Omega$ -Impedanz dar. [13]

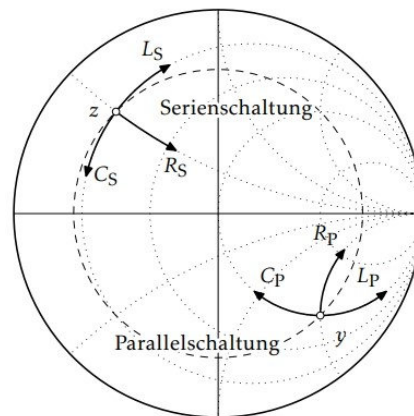


Abbildung 5: Smith-Diagramm [11]

Auf Abbildung 5 ist außerdem eingezeichnet, wie parallel oder in Reihe geschaltete Bauteile die Impedanz auf dem Smith-Diagramm beeinflussen. Ein rein ohmscher Widerstand  $R$  übt keinen Einfluss auf den Imaginärteil der Impedanz aus, die Verschiebung findet auf den in Abbildung 5 sichtbaren gestrichelten Linien statt, dort ist der Imaginärteil konstant. Das Einfügen von Spule  $L$  oder Kondensator  $C$  hat wiederum keinen Einfluss auf den Realteil, sondern erhöht oder verringert die Reaktanz. Das Ziel beim Einfügen von Elementen zur Impedanzanpassung ist es, die Eigenschaften so zu verändern, dass der Punkt mit  $50\ \Omega$  im Smith-Diagramm erreicht wird. [11, 13]

### 2.4.3. Antennenbauformen

In diesem Abschnitt werden drei verschiedene Bauformen für Antennen vorgestellt. Zunächst wird dabei auf den Aufbau von Patch-Antennen eingegangen, da diese wichtig für die verwendeten Testobjekte sind, siehe Kapitel 3.

Für die Messungen kommt zum einen eine logarithmisch-periodische Antenne und zum anderen eine Hornantenne zum Einsatz. Daher wird das Prinzip dieser Antennen ebenfalls erläutert.

## Patch-Antennen

Patch-Antennen fallen in die Kategorie der Streifenleitungstechnik bzw. der Mikrostreifenleitungstechnik. Das Ziel dieser ist es, die Größe und das Gewicht von Bauteilen zu reduzieren. Daher kommen planare Leitungen und Antennen vor allem in mobilen Geräten oder anderen Anwendungen vor, bei denen Gewicht und Größe ausschlaggebend sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie einfach und günstig hergestellt werden können, da sie als Leiterplatten umgesetzt werden können.

Bei Patch-Antennen handelt es sich um planare Antennenstrukturen, welche oftmals rechteckig ausgelegt werden. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel einer solchen Struktur. Der leitfähige Patch wird auf einem dielektrischen Substrat platziert, welches auf der Rückseite ebenfalls elektrisch leitend beschichtet ist, etwa wie bei einer doppelseitig beschichteten Leiterplatte. Dabei ist die Fläche auf der Rückseite größer als die Fläche der Patch-Antenne. Die elektrisch leitfähige Rückseite ist relevant für die Richtwirkung der Patch-Antenne. Durch eine geeignete Konfigurierung soll die Abstrahlung hauptsächlich senkrecht vom Patch erfolgen, allerdings nur einseitig und nicht auch in Richtung der Rückseite.

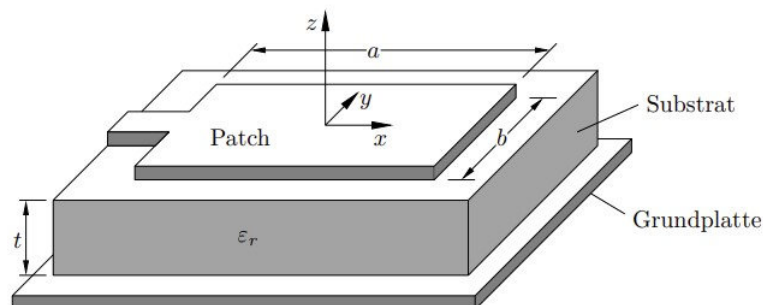


Abbildung 6: Patch-Antenne [2]

Die Wahl der Längsabmessung fällt i. d. R. so aus, dass sich längs des Patch-Elements eine Halbwellenresonanz und eine reelle Eingangsimpedanz einstellt. Gespeist werden Patchantennen meist ebenfalls über Mikrostreifenleitungen.

Ein nachteiliges Verhalten von Patch-Antennen ist ihre geringe Bandbreite. Durch die Wahl des dielektrischen Substrats (Permittivität  $\epsilon_r$ ) und dessen Dicke kann die Bandbreite beeinflusst werden. Dabei muss allerdings ein Kompromiss aus verschiedenen Eigenschaften gefunden werden. Geringe Werte der Permittivität führen zu größeren Bandbreiten und höherem Gewinn, was allgemein gewünscht ist. Ein dickeres Substrat ermöglicht ebenfalls größere Bandbreiten, verursacht aber höhere Verlustleistung und vergrößert die geometrischen Abmessungen der Antenne. Um die Bandbreite allerdings deutlich weiter anzuheben, werden Kombinationen aus

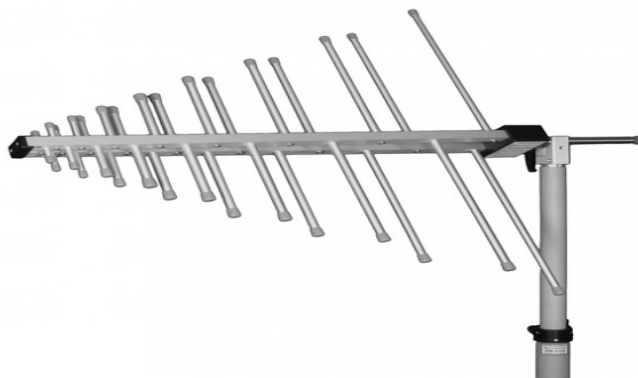
mehreren Patches benötigt (sog. stacked patches). Auch werden Schlitze in der Form der Antenne vorgesehen, um die Bandbreite zu erhöhen.

[5, 11, 15]

### Logarithmisch-periodische Antenne

In dieser Arbeit wird für Messungen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 1 GHz eine logarithmisch-periodische Antenne eingesetzt. Abbildung 7 (a) zeigt ein Exemplar einer solchen Antenne. Bei einer logarithmisch-periodischen Antenne handelt es sich um eine Konfiguration aus einzelnen, aktiven Dipolen, die zusammen eine Antenne mit hoher Bandbreite bilden. Der Speisepunkt befindet sich in der Spitze, d. h. auf der Seite des kürzesten Dipols (linke Seite in Abbildung 7 (a)). Von dort aus nehmen die Länge der Dipole und die Abstände zwischen ihnen immer weiter zu. Die einzelnen Dipole unterschiedlicher Länge sind für verschiedene Frequenzen ausgelegt. Je nach Frequenz der Anregung ist daher ein anderes Element effizient nutzbar. Die anderen Dipolelemente erfüllen dabei eine weitere nützliche Funktion: Übersteigt die effektive Länge  $\lambda/2$ , so dienen diese Elemente als Reflektoren. Die Dipole, deren effektive Länge geringer als  $\lambda/2$  ist, fungieren als Direktoren. Durch die Reflektoren hinter dem wirksamen Dipol und Direktoren vor ihm wird die Richtwirkung der Antenne gesteigert.

[5, 11]



(a) Logarithmisch-periodische Antenne [16]



(b) Hornantenne [17]

Abbildung 7: Breitbandantennen

### Hornantenne

Bei Messungen für Frequenzen ab 1 GHz wird in dieser Arbeit eine Hornantenne eingesetzt, wie sie in Abbildung 7 (b) zu sehen ist. Für hohe Frequenzen wird die Wellenlänge immer kleiner, was anhand von Gleichung (2.5) nachvollzogen werden kann. Die Länge des Dipols wird mit steigender Frequenz und damit sinkender Wellenlänge ebenfalls immer kürzer. Um eine große

Bandbreite an Frequenzen abdecken zu können, wird bei Hornantennen ein Rechteckhohlleiter verwendet. Durch die Verwendung eines pyramidenförmigen Rechteckhohlleiters wird die Antenne sowohl in der Ebene des magnetischen Feldes als auch in der des elektrischen Feldes aufgeweitet. Durch die zunehmende Aufweitung erfolgt der Übergang von der Leitungswelle zur Freiraumwelle mit wenig Reflexionen. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden Hornantennen häufig verwendet für den Einsatz in Labormessungen oder zur Speisung von Reflektorantennen. Mithilfe einer angepassten Auslegung des Hohlleiters kann eine hohe Bündelung und Richtwirkung erreicht werden.

[5, 11, 15]

#### 2.4.4. Übertragung von Leistung

In dieser Arbeit wird zur Untersuchung der Störeinkopplung auf Platinen eine Messung der Leistung zur Hilfe genommen. Daher wird an dieser Stelle zunächst beleuchtet, welche Aspekte bei der Übertragung von Leistung über elektromagnetische Strahlung eine Rolle spielen. Dafür wird eine Sendeantenne betrachtet, welche die Leistung  $P_S$  abstrahlt. Ermittelt werden soll nun, welche Leistung  $P_E$  bei der Empfangsantenne ankommen wird. Als Annäherung kann Gleichung (2.11) verwendet werden. Dabei werden zwei Antennen betrachtet, die in gleicher Polarisierung ausgerichtet sind und jeweils in Hauptstrahlrichtung die andere Antenne sehen. Außerdem befinden sich die Antennen im freien Raum. Der erste Term der Gleichung stellt die Leistungsdichte dar, dabei wird die abgestrahlte Leistung  $P_S$  mit dem Gewinn der Sendeantenne  $G_S$  multipliziert. Das  $d$  im Nenner steht für den Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne. Des Weiteren spielt die Frequenz der abgestrahlten Welle bzw. nach Gleichung (2.5) die Wellenlänge  $\lambda$  sowie der Gewinn der Empfangsantenne  $G_E$  eine Rolle.

$$P_E = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_E \quad (2.11)$$

Abgesehen von den Eigenschaften der Antennen sind also der Abstand zwischen diesen sowie die genutzte Frequenz von Relevanz. Je weiter der Abstand zwischen den Antennen, desto weniger Leistung wird übertragen, da diese mit dem Abstand im Quadrat abnimmt. Dabei muss beachtet werden, dass die Betrachtungen und Annahmen nur für das Fernfeld gelten. Im Nahfeld schwankt die Strahlungsdichte.

Weitere Faktoren, die in dieser Gleichung noch keine Rolle spielen, sind Einflüsse des Übertragungsmediums oder sogar von mehreren Übertragungsmedien. Im Übertragungsmedium kann

es zu Dämpfung und Reflexionen sowie weiteren Effekten kommen, die dazu führen, dass die Leistung an der Empfangsantenne deutlich geringer ausfällt. Ist die Funkübertragung durch die Atmosphäre relevant, so müssen die Einflüsse bei der Ausbreitung durch Luft mit wetterbedingter Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Darüber hinaus können bei der realen Anwendung der Erdboden und Reflexionen an diesem eine Rolle spielen. Durch diese Reflexion kann das Signal durch Überlagerung sowohl verstärkt als auch abgeschwächt werden.

[5, 14]

## **2.5. Drohnenabwehr**

In diesem Kapitel soll der Stand der Technik der Drohnenabwehr erläutert werden. Dafür wird zunächst (in Abschnitt 2.5.1) ein kurzer Überblick über die Klassifikation von Drohnen vorgenommen. Dabei wird der Einsatz von kommerziellen Drohnen in kriegerischen Szenarien hervorgehoben.

Anschließend werden aktuell verfügbare sowie in der Entwicklung befindliche Systeme zur Drohnenabwehr vorgestellt. Diese werden unterteilt in Abwehrmaßnahmen, die zur elektronischen Kampfführung gezählt werden können (Abschnitt 2.5.3) und Maßnahmen, die einen kinetischen bzw. mechanischen Einfluss auf die Zielobjekte nehmen sollen (Abschnitt 2.5.2). Neben dieser Unterteilung werden die Gegenmaßnahmen, auch Counter Unmanned Aircraft System (C-UAS) genannt, wie in Paper [18] in risikobasierte Kategorien unterteilt. In der ersten Kategorie geht es darum, die Drohne zu eliminieren oder zu schwächen, ohne weiteren, ungewollten Schaden anzurichten. Bei C-UAS mit mittlerem Risiko ist das Ziel, die Drohne einzufangen oder zu Boden zu führen, möglichst ohne deren Hardware zu beschädigen. Die dritte Kategorie bezeichnet Gegenmaßnahmen mit höherem Risiko, deren Ziel es ist, die Luftfahrzeuge zu zerstören. Dies wird insbesondere vorgenommen, wenn eine erhöhte Gefahr vom Unmanned Aircraft (UA) ausgehen könnte.

Andere Autoren unterteilen in physische Eliminierung, Neutralisierung der Drohne oder Erlangen von Kontrolle über die Drohne, wie es unter anderem in Paper [19] erfolgt. Daher werden diese Arten der Kategorisierung ebenfalls mitbetrachtet.

Zuletzt folgt in Abschnitt 2.5.4 eine Behandlung von Konzepten, die genutzt werden können, um Drohnen wiederum vor C-UAS-Systemen zu schützen.

### 2.5.1. Zivile und militärische Drohnen

In der Publikation [20] beschreibt die European Union Aviation Safety Agency (EASA) relevante Aspekte für die zivile Operation von Drohnen. Für die Definition wird sich dabei auf die Verordnung der EU bezogen: Ein unbemanntes Luftfahrzeug „bezeichnet ein Luftfahrzeug, das ohne einen an Bord befindlichen Piloten autonom oder ferngesteuert betrieben wird oder dafür konstruiert ist“ [21]. Auf Englisch wird der Begriff “unmanned aircraft” verwendet und mit UA abgekürzt. Als alternative Bezeichnung wird unter anderem in dieser Arbeit der Begriff “Drohne” verwendet.

Zu einem “Unmanned Aircraft System (UAS)” gehört neben dem unbemannten Luftfahrzeug auch die Steuer- und Kontrolleinheit [20].

In Europa werden zivile UAS in drei Kategorien eingestuft. Bei der Einstufung geht es um das Risiko für Personenschaden durch den Betrieb des Luftfahrzeugs: [20]

- **Offene Kategorie (Open):** geringes Risiko, keine Genehmigung notwendig, Einschränkungen und Unterkategorien im Betrieb
- **Spezielle Kategorie (Specific):** höheres Risiko, Genehmigung notwendig
- **Zulassungspflichtige Kategorie (Certified):** Operationen sind riskant für Menschen oder andere Luftfahrzeuge, UAS muss zertifiziert werden

Im militärischen Bereich gibt es jedoch eine andere Klassifizierung. In der Klassifikation für UAS der North Atlantic Treaty Organization (NATO) gibt es drei Klassen, welche nach Gewicht unterschieden werden. Diese enthalten insgesamt sieben Kategorien, welche ebenfalls nach Gewicht sowie weiteren Kriterien wie Flughöhe, Reichweite und Einsatz unterteilt werden: [22]

- Klasse I (< 150 kg) enthält Kategorien “Micro” (< 2 kg), “Mini” (2–20 kg) und “Small” (> 20 kg)
- Klasse II (150–600 kg) enthält die Kategorie “Tactical”
- Klasse III (> 600 kg) enthält Kategorien “Medium-Altitude Long-Endurance (MALE)”, “High-Altitude Long-Endurance (HALE)” und “Combat/Strike”

In Konflikten wie dem derzeitigen Krieg in der Ukraine wird eine Vielzahl von Drohnen eingesetzt. Dabei werden nicht nur große militärische Drohnen, wie die russische “Orion” Drohne, oder die Bayraktar “TB2” auf ukrainischer Seite, eingesetzt. Diese sind in Klasse III des NATO UAS-Klassifizierungssystems einzuordnen [23]. [1]

Konventionelle militärische Drohnen können oftmals weite Distanzen in großen Höhen zurücklegen und mit hochentwickeltem Equipment für verschiedene Aufgaben eingesetzt werden. Einige sind mit Waffensystemen ausgerüstet. Die Kosten für solche Systeme sind i. d. R. sehr hoch. Allerdings können einige Aufgaben auch von kommerziellen, günstigeren Drohnen erledigt werden. Zu den Einsatzmöglichkeiten gehören Spionage und Überwachung mithilfe von Kamerasystemen zusammen mit der Informationsgewinnung zu gegnerischen Standorten und Truppenbewegungen. Ein weiterer Aspekt in aktuellen Kriegen ist die Medienwirksamkeit - auch dafür können die Aufzeichnungen der Drohnen genutzt werden. Mitunter werden die Drohnen nachträglich auch für das Absetzen ballistischer Körper ausgestattet.

Die kommerziellen Drohnen, welche nicht für den Einsatz in militärischen Konflikten entwickelt wurden, sind entsprechend weniger gegen physische oder elektronische Gegenmaßnahmen geschützt. Auch haben sie eine kleinere Reichweite und weniger sichere Kommunikationskanäle. Dadurch kommt eine hohe Zahl an Verlusten zustande, welche aber aufgrund der hohen Verfügbarkeit und der niedrigen Beschaffungs- und Einsatzkosten in Kauf genommen wird. Weitere Vorteile der kommerziellen Drohnen gegenüber den konventionellen militärischen sind, dass sie keine aufwendigen Produktionsstätten benötigen, ohne komplexe Bodenstationen fungieren und für die Pilot\*innen am Boden eine kurze Ausbildung genügt.

Durch die erfolgreichen Einsätze der kommerziellen Drohnen in der Ukraine wurde demonstriert, dass diese durch Modifikationen und taktische Überlegungen ebenso als militärische Drohnen in staatlichen Einsätzen in Frage kommen. Zuvor wurden diese Methoden bereits von nicht-staatlichen Gruppierungen für Attacken oder Propaganda genutzt. [1, 24, 25]

Die Methoden zur Drohnenabwehr, welche im Folgenden diskutiert werden, beziehen sich in erster Linie auf kleinere Drohnen der Klasse I.



### **2.5.2. Kinetische Maßnahmen zur Drohnenabwehr**

Kinetisch wirkende C-UAS werden in die Kategorien mit mittlerem bis hohem Risiko eingestuft. Sie können nicht in Bereichen eingesetzt werden, in denen sich Zivilisten am Boden befinden könnten, um diese nicht zu gefährden.

#### **Netze**

Eine Maßnahme mit mittlerem Risiko, deren Ziel es ist die Drohne zu neutralisieren und zum Boden zu bringen, ist der Einsatz von speziell entwickelten Netzen. Diese werden vom Boden oder von eigenen Drohnen auf die gegnerischen Drohnen geschossen. Insbesondere Drohnen mit einem oder mehreren Propellern können diese nicht mehr nutzen und ihre Fortbewegung wird eingeschränkt. Die eingefangenen Drohnen können entweder gezielt zu Boden geführt werden z. B. mit der Hilfe von Fallschirmen oder sie stürzen unkontrolliert ab. Der erste Fall bringt den Vorteil mit sich, dass die Drohne anschließend am Boden unschädlich gemacht werden kann. Außerdem kann das UA analysiert werden und Schlüsse über das Equipment des Gegners gezogen werden. Dieses Vorgehen eignet sich besonders bei kleinen Propeller-Drohnen. Nachteilig ist allerdings, dass die Netze nur über vergleichsweise geringe Distanzen abgeschossen werden können. [18, 26, 22]

#### **Greifvögel**

Eine weitere Möglichkeit zum Einfangen von kleinen Drohnen, welche in den Veröffentlichungen [18], [19] und [22] angesprochen wird, ist der Einsatz von trainierten Greifvögeln. Die Fähigkeiten von Adlern und anderen Raubvögeln sollen genutzt werden, um speziell ausgebildete Tiere auf die Jagd von gesichteten Drohnen zu schicken. Allerdings ist die Ausbildung der Greifvögel dafür sehr zeitaufwendig.

#### **Projektil**

Eine weitere C-UAS Praxis ist der Beschuss der Drohnen mit Projektilen. Diese Vorgehensweise kann zu Abwehr von verschiedene Arten von Luftfahrzeugen eingesetzt werden. Manche Projektil werden dabei mit Suchköpfen ausgestattet, um dem Ziel folgen zu können. Der Einsatz solcher Maßnahmen wird als sehr risikobehaftet eingestuft. Daher sind erhöhte Sicherheitsbetrachtungen notwendig, um Fehlschläge oder unerwünschte Nebeneffekte zu verhindern. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kosten pro Beschuss. Diese fallen gerade dann ins Gewicht, wenn günstigere kommerzielle Drohnen abgeschossen werden. [18, 22]

## **Kollisionen zwischen Drohnen**

Zuletzt können Drohnen zur Kollision mit den gegnerischen Drohnen eingesetzt werden. Dafür werden Drohnen mit hoher Geschwindigkeit und Agilität benötigt. Sie werden mit Sprengstoff versehen, um die gegnerischen Drohnen bei der Kollision zu zerstören. Dabei können ebenfalls Menschen und Objekte zu Schaden kommen. Außerdem dauert die Neutralisierung länger als der Beschuss mit Projektilen. [22]

### **2.5.3. Elektronische Methoden zur Drohnenabwehr**

Es gibt verschiedene Wege, elektromagnetische Störungen in Elektroniksystemen hervorzurufen. Neben den ungewollten Interferenzen, welche durch das Design und die Frequenzbelegung umgangen werden sollen, gibt es auch Möglichkeiten, bewusst Störungen zu verursachen. Diese werden vor allem in der elektronischen Kampfführung, engl. Electronic Warfare (EW) eingesetzt. Im Allgemeinen geht es bei der elektronischen Kampfführung um den Zugriff auf das elektromagnetische Spektrum [27]. Während die eigene Seite dieses ungestört nutzen möchte, soll der gegnerischen Seite der Zugriff und die Nutzung des elektromagnetischen Spektrums über einen Bereich von verschiedenen Frequenzen verwehrt werden. Ersteres beinhaltet den eigenen Schutz und eventuelle Gegenmaßnahmen gegen gegnerische Vorgehen und wird in 2.5.4 genauer betrachtet. Letzteres (die Einschränkung des Gegners) wird hier weiter erläutert und kann auf verschiedene Arten erreicht werden. Dazu gehört zunächst die Aufklärung über die elektronischen Einheiten des Gegners und dessen Frequenznutzung. Mithilfe der gesammelten Informationen können Maßnahmen eingesetzt werden, um die gegnerischen elektronischen Geräte zu attackieren.

### **Jamming**

Eine der bekanntesten Methoden ist das sog. Jamming. Bei Jamming geht es darum, die Nutzsignale des zu störenden Systems so zu beeinflussen, dass sie nicht mehr sinnvoll verwendet werden können. Dafür werden bspw. breitbandige Störsender eingesetzt, die das genutzte Frequenzband mit stärkeren Signalen überdecken und so das Nutzsignal unkenntlich machen sollen. [27, 28]

Im Anwendungsfall der Drohnenabwehr ist Jamming für GNSS-Signale (Globales Navigations-satellitensystem) und Signale im HF-Bereich (Hochfrequenz) üblich. Frequenzen im HF-Bereich werden bei einigen UAS für die Kommunikation und Übertragung von Missionsdaten zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation bzw. fernsteuerndem Piloten / fernsteuernder Pilotin genutzt.

Ziel des Jammings kann es daher sein, diese Kommunikation zu unterbinden. Dies ist insb. dann wirksam, wenn die Drohne nicht voll-autonom fungieren kann.

Die Signale müssen allerdings genügend Leistung haben, um die eigentlichen Nutzsignale effektiv überlagern zu können. Außerdem müssen die genutzten Signale und Frequenzen zunächst ermittelt und analysiert werden, damit das Jamming erfolgreich ist.

[18, 19, 22]

Ein besonderer Fokus liegt auf dem Jamming des Empfangssystems für GNSS-Signale. Beim Jamming wird hier versucht, das vom Satelliten stammende Informationssignal zu überlagern, sodass beim Empfänger kein brauchbares Signal ankommt und die satellitengestützte Positionsbestimmung nicht mehr genutzt werden kann. Stattdessen könnte dies sogar zu einem Absturz der orientierungslosen Drohne führen.

Bei GNSS-Signalen kann Jamming besonders gut eingesetzt werden, da die von den Satelliten bei der Drohne ankommenden Signale nur einen geringen Leistungswert aufweisen und daher anfällig für Störungen sind. Sollte die Drohne mit einer inertialen Messeinheit, engl. Inertial Measurement Unit (IMU) ausgestattet sein, so ist das GNSS-Jamming allerdings nicht ausreichend, weil das UAS auf einen anderen Orientierungsgeber ausweichen kann. [22]

Damit keine weiteren Systeme ungewollt gestört werden, sollten für Jamming Antennen mit hoher Richtwirkung genutzt werden. Ein weiterer Vorteil dabei ist, dass die Signale in Hauptstrahlrichtung eine höhere Leistung erreichen und so die anvisierte Drohne auch noch in höheren Entfernungen beeinflussen können. [18]

## **Spoofing**

Eine weitere Technik ist das Spoofing. Ziel dabei ist es, dem System, das gestört werden soll, ein gefälschtes Nutzsignal zu liefern und so dessen Operation zu korrumpieren. [28]

Dieses Vorgehen wird in die Kategorie mit niedrigem Risiko eingestuft [18]. Es zählt zu den Techniken, bei denen die Kontrolle über die fremde Drohne erlangt werden soll [19].

Bei der Anwendung auf das Satellitennavigationssystem einer Drohne wäre es hier das Ziel, dem GNSS-System ein Signal der GNSS-Satelliten vorzugeben, dass allerdings falsche Informationen enthält. So könnte eine Drohne ebenfalls von ihrer geplanten Flugbahn abkommen und abstürzen. Kann die Kontrolle über das Navigationssystem längerfristig erlangt werden, so kann die Drohne in ein gewünschtes, sicheres Gebiet umgelenkt werden. [19]

Nicht nur auf GNSS-Signale sondern auch andere Signaltypen, wie die Datenübertragung von Nutzlastdaten und Sensoren, kann Spoofing angewendet werden. Eine große Schwierigkeit ist jedoch, dass der Aufbau des Originalsignals bekannt sein muss, um es ausreichend genau imitieren zu können und den Empfänger der Daten zu täuschen. Andernfalls kann der Täuschungsversuch schnell erkannt werden. Das macht Spoofing zu einer sehr komplizierten und schwer umsetzbaren Technik. [22]

### **Meaconing**

Die Umsetzung der beiden bisher genannten Methoden ist technisch aufwendig und Spoofing kann durch geeignete Gegenmaßnahmen i. d. R. ausreichend erkannt und ausgeglichen werden. Das sog. Meaconing ist gleichzeitig einfacher umzusetzen und schwieriger zu erkennen. Dabei wird das Originalsignal des Satelliten zunächst empfangen und aufgezeichnet und anschließend mit einer Zeitverzögerung dem zu störenden Empfänger auf der gleichen Frequenz weitergeleitet. Das zeitversetzte Originalsignal überlagert das Signal in Echtzeit und es ist schwierig, diese Täuschung zu erkennen und zu korrigieren. Auch dadurch kann z. B. einer Drohne ihre Fähigkeit zur genauen Ortung und Überwachung der Flugbahn genommen werden. [28]

### **Cyberangriffe**

Bei dieser Art von Drohnenabwehr geht es ebenfalls um das Unterbinden der Verbindung zur Bodenstation oder dem Abfangen von gesendeten Daten. Dafür sollen Protokollmechanismen der verwendeten Kommunikationsnetzwerke bzw. Schwachstellen in diesen ausfindig gemacht und als Angriffspunkte genutzt werden. Falls Schwachstellen gefunden werden können, kann zum Beispiel der Netzwerkzugriff und damit auch die Kommunikation zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation unterbunden werden.

Eine andere Möglichkeit ist das Abfangen der übertragenen Daten und anschließende Verzögerung dieser. [22]

### **Hochenergetische elektromagnetische Impulse**

Der Einsatz von HPM-Geräten (High-Power Microwave) zählt zu den Techniken mit höherem Risiko [18]. Mit den Abwehrsystemen sollen elektromagnetische Impulse, engl. Electromagnetic Pulse (EMP) erzeugt werden, die in der Lage sind, Elektronik der UAS aufgrund hoher Ströme und Spannungen zu stören oder zu zerstören. Von Vorteil ist die hohe Wirksamkeit der HPM-Systeme. Pro Schuss sind die Systeme meist günstiger als Projektile. Dafür ist die Beschaffung

sehr teuer und es besteht die Gefahr, ungewollt weitere elektronische Systeme zu stören oder zu beschädigen. Darüber hinaus könnte die abgewehrte Drohne unkontrolliert abstürzen. Da für die Erzeugung der EMPs viel Energie benötigt wird, sind diese Systeme nur in größeren mobilen oder festen Bodenstationen umsetzbar. [19, 22, 26]

## **Laser**

Eine andere Vorgehensweise, welche ebenfalls mit hohem Risiko klassifiziert wird, ist die Nutzung von hochenergetischen Lasern.

Prinzipiell können auch Laser mit niedrigerer Leistung eingesetzt werden. Sie können Schwachstellen wie elektro-optische Sensoren gezielt zerstören [22].

Hochenergetische Laser hingegen können eingesetzt werden, um thermischen und mechanischen Schaden an der äußeren Struktur des Luftfahrzeugs oder der verbauten Elektronik anzurichten. Die Technik ist derzeit noch sehr kostspielig und befindet sich in einer experimentellen Phase zur Weiterentwicklung. [18, 19, 22]

Allerdings werden bei der Firma RTX (Raytheon) bereits einsatzfähige hochenergetische Laser zur Drohnenabwehr angeboten. Laut der Angaben auf der Internetseite von RTX [29] können die Laser zur Abwehr von UAs bis zur Klasse III eingesetzt werden und erreichen 50 kW Leistung.

In dieser Arbeit soll an den Gedanken der physischen Zerstörung von elektronischen Geräten durch elektromagnetische Strahlung angeknüpft werden. Als Test- bzw. Zielobjekte sind dabei Leiterbahnen von Interesse. Es soll untersucht werden, welche Mechanismen auf Platinenebene durch die Bestrahlung mit elektromagnetischer Strahlung festgestellt werden können. Die genutzten Testobjekte werden in Kapitel 3 näher erläutert.

### **2.5.4. Schutz von Drohnen vor Drohnenabwehrmaßnahmen**

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Möglichkeiten zur Abwehr von UAS, fließen in die Entwicklung neuer Drohnen häufig schon Gedanken mit ein, wie diese vor potentiellen Abwehrmethoden geschützt werden können. Insbesondere aufgrund der Anfälligkeit der Störung von Kommunikations- oder Navigationssignalen gibt es Bestrebungen, die Luftfahrzeuge und die in ihnen verbaute Elektronik entsprechend zu schützen.

Eine der wichtigsten und effektivsten Gegenmaßnahmen ist das Ausfindig machen und Zerstören der gegnerischen Systeme [28].

Dieses Vorgehen lohnt sich nach der Veröffentlichung [30] vor allem dann, wenn in einem bestimmten Gebiet mehrere Drohnen eingesetzt werden sollen. Bei kleinen und mobilen Stationen wird die Umsetzung allerdings erschwert. Daher resultiert eine Abwägung der Kosten und Nutzen für die Mission. Einige Drohnen können selbst mit Equipment zur Aufspürung und Neutralisierung der Drohnenabwehrsysteme ausgestattet werden. Alternativ muss dies von unterstützenden Einheiten in der Luft oder am Boden durchgeführt werden. [30]

Ein Vorgehen, das vor allem gegen kinetische Gegenmaßnahmen eingesetzt werden kann, ist die Überforderung des Abwehrsystems mit einer Vielzahl an Drohnen. Damit sollen die Kapazitäten der Detektions- oder C-UAS-Systeme überschritten werden, sodass nicht alle Drohnen gleichzeitig abgewehrt werden können. Dies eignet sich insbesondere bei günstigeren, kommerziellen UAS, deren Verlust für das Erfüllen der Aufgabe in Kauf genommen werden kann. Dieser Ansatz kann außerdem mit einer weiteren Methode kombiniert werden: dem Fliegen von Ausweichmanövern. C-UAS-Methoden, die schnell operieren und größere Bereiche gleichzeitig abdecken, können auf diese Weise jedoch nicht überwunden werden. [30]

Ein ähnlicher Ansatz ist der Einsatz von Täuschobjekten. Das UA, das die Mission tatsächlich ausführen soll, wird von mehreren weiteren begleitet, die als Ablenkung der Verteidigungssysteme dienen sollen. Sie können kinetische oder energetische Beschüsse abfangen, damit das relevante Luftfahrzeug von diesen verschont bleibt. [30]

Bevor Drohnen abgewehrt werden können, müssen sie zunächst detektiert werden. Dafür ist der Einsatz von Radar weit verbreitet. Mithilfe von Tarntechniken und speziellen Materialien kann die Sichtbarkeit der Drohnen für Radaranlagen reduziert werden. Gerade kleine Propeller-Drohnen sind schwierig zu erfassen. Zu bedenken sind allerdings die Kosten und der Aufwand für die Tarnung. Bei einigen Drohnen wären diese nicht wirtschaftlich gerechtfertigt. [30]

### **Schutz gegen elektronische Kampfführung**

Einer der wichtigsten Schutzmechanismen insb. vor elektromagnetischen Impulsen (EMP) ist die Abschirmung mithilfe eines Faraday'schen Käfigs [28].

Das Paper [31] beschäftigt sich mit elektromagnetischen Impulsen und dem Schutz vor diesen. Hier wird ebenfalls der Faraday'sche Käfig zu den wichtigsten Strategien gezählt. Wie effektiv dieser die Elektronik vor äußeren elektromagnetischen Feldern schützen kann, hängt vom verwendeten Material, dessen Dicke und von Öffnungen in der Schirmung ab.

Darüber hinaus sollten Leitungen mit EMP-Überspannungsschutzgeräten geschützt und isoliert werden. Für Koaxialleitungen gibt es dabei ebenfalls spezielle Schutzgeräte. [31]

Muss allerdings mit der Außenwelt, z. B. mit Bodenstationen oder Satelliten, interagiert werden, so ist eine vollständige Abschirmung nicht möglich, da diese die Kommunikationswege behindern würde. [30]

Um eine Störung durch z. B. Jamming zu verhindern, gibt es unter anderem den Ansatz, die Nutzsignale mit einer höheren Leistung zu senden. Insbesondere im GNSS-Bereich sind einige Signale einfach zu überlagern, da sie mit nur einer geringen Leistung bei den Empfängereinheiten vorliegen. Außerdem können die Sende- und Empfangsantennen und deren gezielte Ausrichtung dazu beitragen, dass Störsignale ausgeschlossen werden können. [28]

Sofern es möglich ist, sollten Navigations- und Kommunikationssysteme redundant und integriert aufgebaut sein. Sollte ein System durch eine EW-Attacke ausfallen, so könnte auf ein anderes System zurückgegriffen werden. Am Beispiel des gestörten GNSS-Systems einer Drohne könnte diese auf ein anderes Navigationssystem zurückfallen, das im besten Fall keine Kommunikation zu Satelliten oder zum Boden benötigt. Das Umschalten auf ein alternatives, ungestörtes System ist allerdings nur unter der Voraussetzung möglich, dass die vorliegende Störung als solche erkannt werden konnte. Liegt eine Täuschung durch Spoofing oder Meaconing vor, so könnte diese unbemerkt in das System eindringen und die Falschinformationen verarbeitet werden. In der Verarbeitung muss ein Störsignal dann zuverlässig als Abweichung erkannt werden. Dies kann ebenfalls durch redundante und verschiedenartige Systeme erreicht werden. [28]

Ein ergänzender Ansatz ist es, weniger anfällig für Angriffe über das elektromagnetische Spektrum zu werden. Dazu zählt, unabhängiger von der Nutzung von GNSS zu werden und auch die Kommunikation zum Boden zu reduzieren. Zur Navigation könnten UAs optische Sensoren und einen Abgleich mit zuvor hinterlegten Karten und Satellitenbildern nutzen [30]. Allerdings würden dadurch andere Vorteile von GNSS-basierter Navigation wegfallen.

Damit auch das Jamming im HF-Bereich nicht mehr als wirksame Gegenmaßnahme eingesetzt werden kann, wird eine zunehmende Autonomie der Drohnen angestrebt. Dadurch kann die Kommunikation zum Boden oder einem Operator / einer Operatorin minimiert werden oder sogar entfallen. Voraussetzung dafür ist die technologische Weiterentwicklung von Bildverarbeitungssystemen für Drohnen und dem Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) zur Entscheidungsfindung. [30]

In der Publikation [32] werden für zehn verschiedene drahtlose Kommunikationswege Möglichkeiten des Jammings sowie des Anti-Jammings erläutert und übersichtlich zusammengestellt. Darunter werden auch Techniken für das Verhindern von GNSS-Jamming vorgestellt. Dazu gehören Ansätze aus der Signalverarbeitung und Filterung der Signale, um schmalbandige Störungen oder Jamming auf einzelnen Frequenzen zu eliminieren. Durch die Nutzung von Antennen-Arrays und Algorithmen sollen die Störsignale unterdrückt werden. Außerdem wird vorgeschlagen, mehrere Sensoren für die Navigation zu verwenden und eine Sensorfusion durchzuführen, um den Einfluss abweichender Signale zu minimieren.

Des Weiteren sollte auch die Cybersicherheit des UAS nicht vernachlässigt werden. Dazu gehört, Schwachstellen des UAS selbst zu finden und zu beheben, sodass sie vom Gegner nicht mehr genutzt werden können. Diese Aktivitäten müssen auf alle beteiligten Systeme angewendet werden, dazu gehört die Plattform der Drohne, die Kontrollstation am Boden und andere mitwirkende Systeme. [30]

Welche Vorgehensweise angewendet werden kann und sollte, ist abhängig von den Informationen, die über die eingesetzten Gegenmaßnahmen vorliegen.

Die Entwicklungen von Drohnen, Systemen zur Drohnenabwehr und wiederum die Reaktion auf diese gehen eng miteinander einher. Dabei ist auch zu beachten, wie sich die Kosten, das Gewicht und damit die Reichweite der Drohnen verändern, wenn sie gegen verschiedene Arten von C-UAS-Maßnahmen geschützt werden sollen. Auch können sich die Schutzmaßnahmen gegen unterschiedliche Bedrohungen gegenseitig beeinflussen. Hier müssen Abwägungen getroffen und Kompromisse eingegangen werden. [30]



### **3. Auswahl der Testobjekte**

Da sich die Fragestellung dieser Arbeit aus dem Kontext der Drohnenabwehr mithilfe elektromagnetischer Strahlung ergibt, sollen die verwendeten Testobjekte, auch Equipment Under Test (EUT) genannt, angepasst sein.

Daher wurden Überlegungen getroffen, welche Systeme in unbemannten Luftfahrzeugen zum Einsatz kommen und welche möglichen Einfallstore für die Einkopplung von Strahlung vorhanden sein könnten.

Das erste Testobjekt soll einer grundlegenden Untersuchung für gestrahlte Einkopplung auf Platinen dienen. Dafür wird eine Testplatine entwickelt, mithilfe derer verschiedene Arten von Leiterbahnen und Masseflächen hinsichtlich eingekoppelter Leistung getestet werden können. Die Dimensionierung dieser soll allerdings nicht willkürlich erfolgen, sondern auch zum Kontext passen, siehe Abschnitt 3.1.

Als weitere Testobjekte werden fertige Kaufteile eingesetzt, die in ähnlicher Form in unbemannten Luftfahrzeugen eingesetzt werden könnten. Diese werden in Abschnitt 3.2 detailliert vorgestellt. Dabei muss beachtet werden, dass die meiste Elektronik an Bord von modernen Drohnen durch die Außenhülle geschirmt wird.

Einige Systeme können allerdings nicht vollständig geschirmt werden, wenn Teil ihrer Aufgabe die Kommunikation mit anderen Systemen über das elektromagnetische Spektrum ist.

#### **3.1. Testplatine mit passiven Antennen**

Um zunächst ein Verständnis dafür gewinnen zu können, wie Leiterbahnen und Groundplanes (leitende Masseflächen) von Platinen auf Bestrahlung reagieren, wird zunächst eine eigene Testplatine entwickelt. Mithilfe eines überschaubaren Designs können daran Messungen durchgeführt werden, welche dazu dienen sollen, eine Einschätzung für das Verhalten von Leiterbahnen zu erlangen, wenn diese hohen elektrischen Feldstärken mit verschiedenen Frequenzen ausgesetzt werden.

Die Testplatine ist mit mehreren Leiterbahnen und Groundplanes versehen, deren Komplexität im Vergleich zu einem Mikrocontroller oder Flughardware deutlich reduziert wurde. Allerdings sind verschiedene Komplexitätsgrade vorgesehen, um den realen Bedingungen auf Platinen immer näher zu kommen.

Prinzipiell wurde die Auslegung der Längen der Testplatine an einer Frequenz aus dem GNSS-Bereich orientiert: Es wurde die L1-Frequenz des GPS (Global Positioning System) bzw. E1-Frequenz im Galileo-System ausgewählt, welche 1,57542 GHz beträgt [33]. Mithilfe von Gleichung (2.5) kann die Wellenlänge  $\lambda$  berechnet werden. Für eine Frequenz von 1,57542 GHz bedeutet dies eine Wellenlänge von 190,29 mm.

### Aufbau und Abmessungen der Testantennen

Die Platine wurde mithilfe der Software KiCad erstellt. Dabei handelt es sich um eine Software für sog. Electronic Computer-Aided Design (ECAD), welche für die Entwicklung von individuell ausgelegten Platinen geeignet ist. Die Auslegung und Herstellung der Testplatine als solche ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit. Der Anteil beschränkt sich auf die zugrundeliegenden Überlegungen und Auswahl der verschiedenen Dimensionierungen der Antennen, welche die Testplatine beinhaltet.

Wie bereits erwähnt, sollen alle Antennen für die L1-/E1-Frequenz geeignet sein und ihre Längen müssen entsprechend angepasst sein. Allerdings können die angelöteten SMA-Adapter sowie Ungenauigkeiten in den geometrischen Abmaßen die Eigenschaften der Antennen beeinflussen. Daher wurden die Dimensionen der Antennen sowohl in der Software KiCad als auch mit einem Messschieber an der gefertigten Platine erfasst.

Die Längen der Antennen wurden für  $\lambda/4$  unter Berücksichtigung einer Verkürzung auf 46,6 mm ausgelegt.

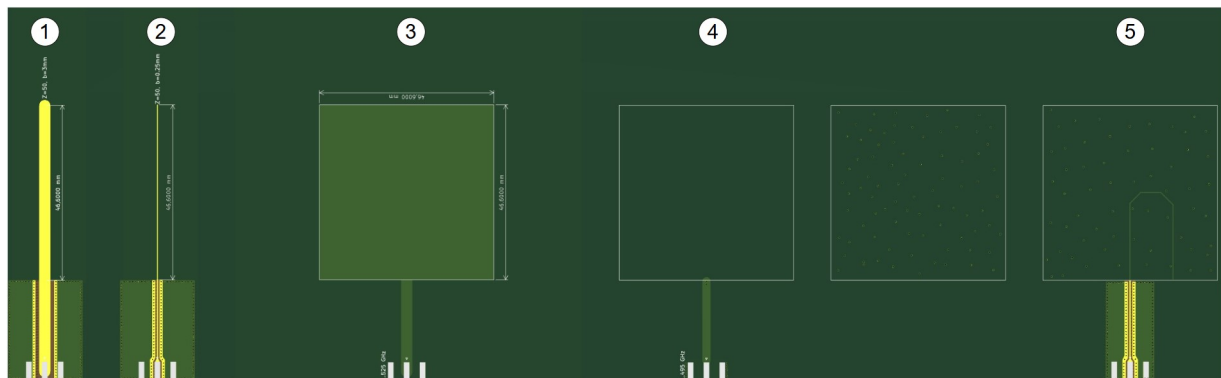


Abbildung 8: Testplatine in KiCad

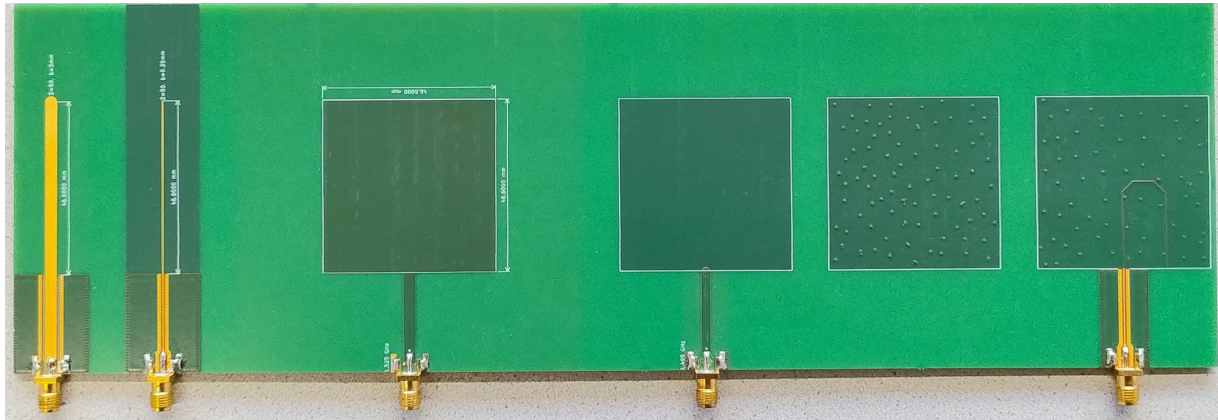


Abbildung 9: Gefertigte Testplatine

Abbildung 8 zeigt die Testplatine mit den verschiedenen Antennen. Bei dieser Darstellung handelt es sich um eine Draufsicht auf die 3D-Ansicht in KiCad. Am unteren Bildrand sind die vorgesehenen Anschlüsse für SMA-Adapter zu sehen, die an die Platine angelötet werden. Die Antennen wurden von links nach rechts durchnummeriert. Die Bezeichnung für die Antennen erfolgt im Laufe der Arbeit durchgängig anhand dieser Nummerierung. Abbildung 9 zeigt die gefertigte Platine mit angelöteten Adaptern.

Die Platine hat insgesamt vier Lagen. Der Aufbau ist dabei an die Leiterbahn-Praxis angelehnt. Die inneren beiden Lagen werden als Versorgungslagen verwendet, die jeweils nur ein Potential tragen z. B. Masse- oder Stromversorgung. Dadurch kann die ganze Lage als Platte aus leitendem Material umgesetzt werden. Auf den äußeren Lagen, also auf der Ober- und Unterseite der Platine, befinden sich die Signallagen, auf denen die Bauteile platziert werden. Mithilfe von Durchkontaktierungen, sogenannten Vias, können die benötigten Verbindungen zwischen den Lagen und damit zu Masse oder Versorgungsstrom hergestellt werden. Zwischen den leitfähigen Kupferlagen wird ein isolierendes Material verwendet, häufig der Verbundwerkstoff FR4. [34]

**Antenne 1:** Bei Antenne 1 handelt es sich um eine Leiterbahn mit einer Breite von 3 mm. Ohne Abrundung entspricht die Länge der Antenne 46,6 mm. Mit der Abrundung am oberen Ende der Antenne beträgt die Länge 48,1 mm. Die Zuleitung zum Adapter ist geschirmt. Die Anordnung auf den 4 Lagen der Platine ergibt sich folgendermaßen: Die Leiterbahn befindet sich auf der obersten Lage (Signallage). Die mittleren Lagen sind leer und die vierte Lage stellt die Masse dar. Der Aufbau ähnelt also eher einer 2-lagigen Platine mit dickerer Isolation in der Mitte.

**Antenne 2:** Antenne 2 stellt mit einer Breite von 0,25 mm eine deutlich dünnere Leiterbahn dar. Solche dünnen Breiten kommen in der Realität auf Platinen häufiger vor. Die Länge entspricht ebenfalls 46,6 mm. Auch die Verteilung der Lagen entspricht einer realistischen Anordnung. Die Leiterbahn befindet sich auf der Oberseite und die zweite Lage stellt die Masse dar.

**Antenne 3:** Bei Antenne 3 handelt es sich um eine Patch-Antenne, ähnlich wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben. Der Patch befindet sich auf der obersten Schicht und hat eine quadratische Form. Die Seiten sind ebenfalls 46,6 mm lang. Die Zuleitung zum SMA-Adapter ist 3 mm breit und 26,7 mm lang. Die Massefläche befindet sich auf der Rückseite, also auf der vierten Lage. Die inneren Lagen bleiben ungenutzt, sodass sich ein dielektrisches Substrat zwischen Patch und Massefläche befindet (vgl. Abbildung 6). Die Massefläche ist, wie bei Patch-Antennen üblich, größer als der Patch und besitzt eine Breite von 93,3 mm und eine Länge von 100 mm.

**Antenne 4:** Antenne 4 stellt eine abgewandelte Patch-Antenne dar, deren Aufbau weniger dem in Abschnitt 2.4.3 erläuterten, dafür aber eher der Realität in Leiterplatten entspricht. Patch und Massefläche sind in diesem Fall gleich groß, 46,6 mm x 46,6 mm. Außerdem befinden sie sich auf den mittleren Lagen der mehrschichtigen Platine. Wie zuvor erläutert, werden diese Schichten in der Praxis oftmals für die Spannungsversorgung genutzt und können vollständig beschichtet vorgefunden werden. Da es sich aber hier um eine vereinfachte Testplatine handelt, bleiben die Signallagen leer. Die Zuleitung zum SMA-Anschluss ist 2,4 mm breit und 26,7 mm lang.

**Antenne 5:** Der Aufbau der letzten Antenne soll am nächsten einer realistischen Platine entsprechen. Dafür wurde das Design von Antenne 4 um zwei Aspekte erweitert. Zum einen wurde eine Vielzahl an Vias zwischen den beiden quadratischen Leiterplatten hinzugefügt. Zum anderen befindet sich auf der oberen Signallage eine Leiterbahn und eine Zuleitung zum Koaxialanschluss.

### **Messung des $S_{11}$ -Parameters der Antennen**

In Abschnitt 2.4.2 wurde bereits erläutert, worum es sich beim  $S_{11}$ -Parameter handelt. Für die passiven Antennen der Testplatine soll nun eine solche Messung durchgeführt werden. Die theoretische Auslegung der Antennen kann mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet sein, sodass die Antennen ein anderes Verhalten zeigen können als erwartet. Durch Fehler in der Auslegung, Eigenheiten während der Produktion und durch die angelöteten Adapter

können Einflüsse zustande kommen, die die Eigenschaften der Antennen beeinflussen. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit ist es relevant zu wissen, bei welchen Frequenzen die Antennen besonders effektiv sind. Um herauszufinden, bei welchen Frequenzen eine Antenne gute Sende- oder Empfangseigenschaften besitzt, wird daher eine Messung des  $S_{11}$ -Parameters durchgeführt.

Mit dem Messgerät "FSH8" der Firma Rhode&Schwarz im "Network Analyzer"-Modus kann eine solche Messung durchgeführt werden.

Da die Antennen auf der Testplatine ursprünglich für die L1-/E1-Frequenz von 1,57542 GHz ausgelegt wurden, werden sie in dieser Größenordnung untersucht. Der vermessene Frequenzbereich entspricht bei jeder Antenne 0,8–4,5 GHz.

Die aufgenommenen Messdaten werden anschließend graphisch dargestellt. Abbildung 10 zeigt die graphische Darstellung anhand von Antenne 3. Auf der horizontalen Achse ist der vermessene Frequenzbereich aufgetragen, die Skalierung ist dabei auf GHz angepasst und logarithmisch. Auf der vertikalen Achse ist der Betrag des  $S_{11}$ -Parameters in dB aufgetragen. Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erwähnt, funktioniert eine Antenne umso besser bei den Frequenzen, bei denen der  $S_{11}$ -Parameter einen niedrigen Wert annimmt bzw. der Betrag der negativen Zahl möglichst hoch ist. Bei Antenne 3 wurden daher die Frequenzen 1,47 GHz, 2,98 GHz und 3,355 GHz als prägnant erfasst. Frequenzen oberhalb von 4 GHz werden nicht mehr miteinbezogen, da diese vom verwendeten Signalgenerator nicht erzeugt werden können. Außerdem liegen sie zu weit entfernt von den angestrebten Frequenzen im GNSS-Bereich.

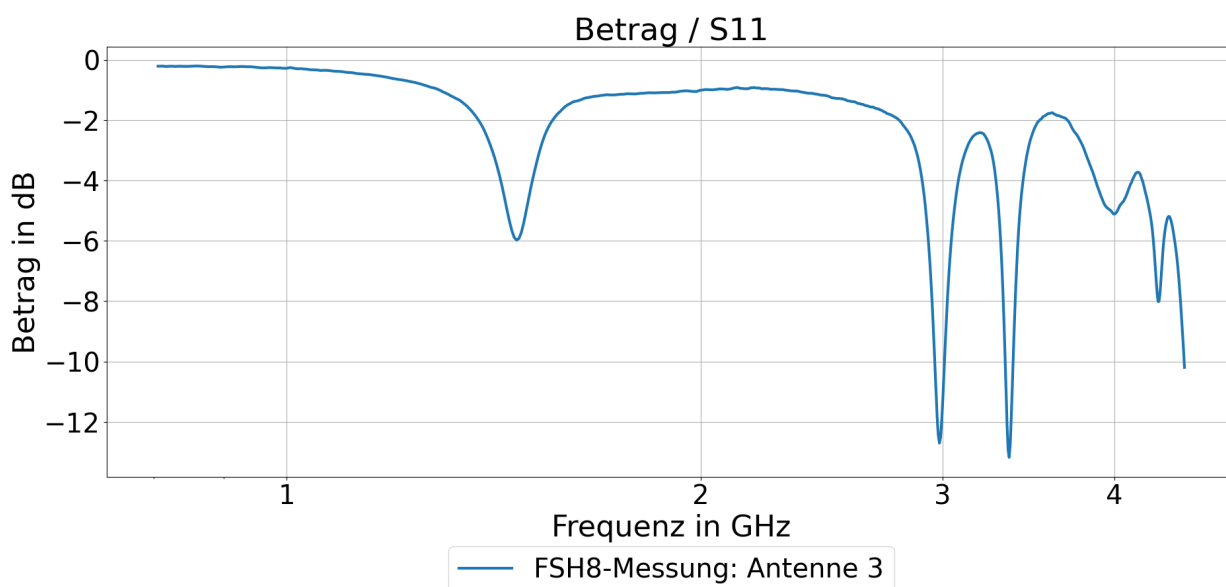


Abbildung 10: Betrag des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 3

Tabelle 2: Übersicht der Ergebnisse der  $S_{11}$ -Messung

| Antenne 1      |         | Antenne 2      |         | Antenne 3      |         | Antenne 4      |         | Antenne 5      |         |
|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| Freq.<br>[GHz] | dB-Wert | Freq.<br>[GHz] | dB-Wert | Freq.<br>[GHz] | dB-Wert | Freq.<br>[GHz] | dB-Wert | Freq.<br>[GHz] | dB-Wert |
| 1,3            | -1,2    | 1,3            | -1,8    | 1,47           | -6      | 1,45           | -7,5    | 1,3            | -1,9    |
| 2,2            | -1,8    | 2,35           | -3,25   | 2,98           | -12,7   | 2,95           | -9,9    | 2,2            | -3,3    |
| 3,44           | -3      | 3,52           | -4,9    | 3,355          | -13,2   | 3,3            | -11,5   | 3,27           | -5,2    |

Für die übrigen Antennen sind die Ergebnisse der  $S_{11}$ -Messung im Anhang unter Abbildungen 32 bis 35 zu finden. Die Diagramme in diesen Abbildungen sind analog zu Abbildung 10 aufgebaut. Die Ergebnisse der Messungen sind außerdem in Tabelle 2 zusammengefasst. Für jede Antenne wurden drei Frequenzen herausgeschrieben, bei denen niedrige  $S_{11}$ -Parameter gemessen wurden. Bei diesen Frequenzen sollen die Platinen später bestrahlt werden, da vermutet werden kann, dass die Antenne bei diesen Frequenzen am besten empfängt. Zusätzlich wurden weitere Frequenzen betrachtet, bei denen keine auffälligen Ergebnisse der  $S_{11}$ -Messung festgehalten wurden. Das heißt bei Frequenzen, bei denen keine guten Sende- bzw. Empfangseigenschaften der Antenne erwartet werden. Am Ende soll damit ein Vergleich gezogen werden zwischen Frequenzen, bei denen ein besonders niedriger  $S_{11}$ -Parameter festgestellt wurde, und Frequenzen, bei denen dies nicht der Fall war, siehe Abschnitt 5.1.5. Tabelle 3 beinhaltet daher alle zur Bestrahlung genutzten Frequenzen und welche Antennen bei diesen Frequenzen bestrahlt werden sollen. Die zu den Frequenzen nach Gleichung (2.5) zugehörigen Wellenlängen sind ebenfalls aufgelistet.

Tabelle 3: Genutzte Frequenzen und zugehörige Wellenlängen

| <b>Frequenz</b> | <b>Wellenlänge</b> | <b>Bestrahlte Antennen</b> |
|-----------------|--------------------|----------------------------|
| 1 GHz           | 29,979 cm          | Antennen 1–5               |
| 1,3 GHz         | 23,061 cm          | Antennen 1–5               |
| 1,45 GHz        | 20,675 cm          | Antenne 4                  |
| 1,47 GHz        | 20,394 cm          | Antenne 3                  |
| 1,575 GHz       | 19,034 cm          | Antennen 1–5               |
| 1,9 GHz         | 15,779 cm          | Antennen 1–5               |
| 2,2 GHz         | 13,627 cm          | Antennen 1, 3, 4, 5        |
| 2,35 GHz        | 12,757 cm          | Antenne 2                  |
| 2,5 GHz         | 11,992 cm          | Antennen 1–5               |
| 2,8 GHz         | 10,707 cm          | Antennen 1, 2, 4, 5        |
| 2,95 GHz        | 10,162 cm          | Antenne 4                  |
| 2,98 GHz        | 10,060 cm          | Antenne 3                  |
| 3,0 GHz         | 9,993 cm           | Antenne 2                  |
| 3,1 GHz         | 9,671 cm           | Antenne 1                  |
| 3,27 GHz        | 9,168 cm           | Antenne 5                  |
| 3,3 GHz         | 9,085 cm           | Antenne 4                  |
| 3,355 GHz       | 8,936 cm           | Antenne 3                  |
| 3,44 GHz        | 8,715 cm           | Antenne 1                  |
| 3,52 GHz        | 8,517 cm           | Antenne 2                  |

### 3.2. Sensoren

Als zusätzliches EUT wurden Platinen ausgewählt, welche realistisch für den Einsatz in unbemannten Luftfahrzeugen sind. Zum einen wird eine inertielle Messeinheit, engl. Inertial Measurement Unit (IMU) verwendet, und zum anderen eine aktive Antenne eines GNSS-Moduls.

Damit wird insgesamt das Navigationssystem als Angriffspunkt betrachtet und die Möglichkeiten der Störung und Zerstörung mithilfe elektromagnetischer Strahlung sollen untersucht werden. In [18] wird ebenfalls das Navigationssystem neben dem Kommunikationssystem und Hardwareelementen für die Energieversorgung sowie Flugsteuerung und -regelung als möglicher Angriffspunkt genannt. Mögliche Reaktionen auf eine Störung des Navigationssystem könnten sein: [18, 22]

- Die Drohne wird von ihrer Flugbahn abgebracht und fliegt unkontrolliert weiter/stürzt ab.
- Die Drohne führt gezwungenermaßen eine vorprogrammierte Notlandung durch.
- Es kann die Kontrolle über das Navigationssystem übernommen und die Drohne an einer vom Störer gewünschten Stelle gelandet werden.

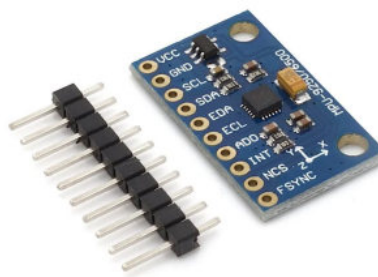


- Die Störung wird erkannt und die Drohne führt eine vorgegebene Reaktion aus. Diese könnte die Rückkehr zum Startpunkt sein. Allerdings könnte sie auch blind auf ein vorprogrammiertes Ziel steuern und ihre Mission dennoch erfolgreich beenden.

### Inertiale Messeinheit

Bei einer inertialen Messeinheit (IMU) handelt es sich um einen wichtigen Flugsensor, um unabhängig von Bodenstationen navigieren zu können. Eine IMU besteht aus drei Beschleunigungssensoren für die Translationsbewegungen und drei Drehratensensoren für die Rotationsachsen. Durch Integration und Kombination der Messwerte können Geschwindigkeit und Position des Luftfahrzeugs ermittelt werden. [35]

Für die Versuche wird der Sensor "MPU-9250", ein "digitales 9-Achsen Beschleunigungs-/Lage-/ Kompasssensor Modul" verwendet. Abbildung 11 zeigt die verwendete Platine. Dieser Sensor verfügt insgesamt über neun Sensoren: drei Gyroskope, drei Beschleunigungssensoren und drei Magnetfeldsensoren. Ebenfalls enthält das Modul einen digitalen Bewegungsprozessor, welcher die Berechnung der Messdaten übernimmt. [36]





In einem Beschleunigungssensor für eine translatorische Bewegung ist das Prinzip etwas anders. Pro Achse gibt es einen Sensor, in dem sich eine verschiebbare Prüfmasse befindet. Durch eine Beschleunigung erfährt die Prüfmasse eine Verschiebung entlang der entsprechenden Achse. Diese Verschiebung kann ebenfalls durch kapazitive Elemente erfasst werden und eine Spannung als Ausgangswert erzeugt werden. Die magnetischen Sensoren nutzen empfindliche Hall-Elemente, um das Erdmagnetfeld um die drei Raumachsen messen und Änderungen feststellen zu können. [37]

Die IMU wird mit dem Mikrocontroller "STM32" angesteuert und ausgelesen. Die Umsetzung dessen ist allerdings nicht Teil dieser Arbeit. Stattdessen soll die Messeinheit genutzt werden, um zu prüfen, inwieweit ihre Funktion durch elektromagnetische Bestrahlung gestört werden kann und ob der Sensor auch langfristig beeinflusst oder gar funktionsunfähig gemacht werden kann.

Die Ziele der Bestrahlung sollen daher sein: Zum einen den Sensor in seiner Funktion zu stören, was z. B. durch die Weitergabe von fehlerhaften Daten oder der Unterbrechung des Datenflusses geschehen kann. Zweitens soll untersucht werden, ob dem Sensor eine permanente Störung zugefügt werden kann, die nach der Bestrahlung erhalten bleibt. Zum Schluss soll betrachtet werden, ob physischer Schaden auf der Platine des Sensors durch die Bestrahlung verursacht werden konnte.

### **GNSS-Empfangseinheit**

Als weiteres Testobjekt wird eine aktive Antenne für den Empfang der L1-/E1-Frequenz ausgewählt. Heutzutage sind GNSS-Empfänger in vielen Anwendungen im Alltag zu finden. Durch die weltweite Verfügbarkeit, hohe Genauigkeit und die inzwischen einfache und günstige Herstellung von mobilen Empfangseinheiten werden die Dienste von Galileo, GPS und weiteren Systemen in vielen Bereichen eingesetzt. Sowohl in der bemannten als auch in der unbemannten Luftfahrt spielen GNSS-Systeme eine wichtige Rolle für die Navigation. [28]

Empfangsantennen für GNSS-Frequenzen eignen sich gut als Testobjekte, da diese i. d. R. in unbemannten Luftfahrzeugen zu finden sind. Außerdem können sie nur bedingt abgeschirmt werden, da die Empfangseigenschaften dadurch nicht verschlechtert werden dürfen, wie bereits in Abschnitt 2.5.4 angesprochen wurde.

Auf ihrem Weg vom Satelliten zum Empfänger durchdringen die GNSS-Signale die verschiedenen Schichten der Atmosphäre und werden in der Ionosphäre sowie der Troposphäre beeinflusst. Aufgrund von Dämpfung durch die Troposphäre und insb. Regendämpfung weisen GNSS-Signale oftmals nur eine geringe Signalstärke an der Empfangseinheit auf [28]. Daher besitzen die meisten Empfangsantennen eine geringe Empfindlichkeit. Die Sensitivität des hier verwendeten Empfangsmoduls beträgt laut Datenblatt -165 dBm ohne angeschlossene Antenne [38]. Als Antennen werden für GNSS-Empfänger meist aktive Antennen eingesetzt.

Aktive Empfangsantennen werden eingesetzt, um trotz geringer Leistung die Signale empfangen zu können. In aktive Antennen wird Elektronik integriert, welche die Signale verstärkt, filtert und/oder anderweitig verarbeitet. Bei passiven Antennen, welche zuvor in Abschnitt 2.4 beschrieben wurden, sind keine weiteren Schaltungen verbaut und nur die physische Auslegung bestimmt die Empfangsfähigkeiten der Antenne. Ein Bestandteil der meisten aktiven Antennen ist ein Verstärker. Mithilfe dessen können die empfangenen Signale vom Rausch-Level abgehoben werden. [39]

So handelt es sich bei der verwendeten Antenne um eine aktive Patch-Antenne der Firma Pulse Electronics mit der Modellnummer "W4000G197". Nach dem Datenblatt der Antenne [40] ist sie für die Frequenz von 1575,42 MHz ausgelegt, also L1/E1. Die Empfangseigenschaften sind omnidirektional und das maximale VSWR beträgt 1,5. Der Gewinn der Antenne beträgt 1,5 dBi und durch einen Verstärker wird das empfangene Signal um  $26 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$  verstärkt. Dafür wird eine Versorgungsspannung von 3 V benötigt. [40]

Das GNSS-Modul wird über einen RaspberryPi ausgelesen. Die Daten des Moduls können direkt über einen angeschlossenen Laptop beobachtet werden und können außerdem für eine spätere Analyse aufgezeichnet werden.

Abbildung 12 zeigt eine Draufsicht auf das GNSS-Modul auf der blauen Platine (oben rechts in der Abbildung). Diese befindet sich wiederum auf der grünen Platine des RaspberryPi. Links daneben befindet sich die aktive Empfangsantenne, welche über ein Kabel (links am Rand) mit dem Empfangsmodul verbunden ist.

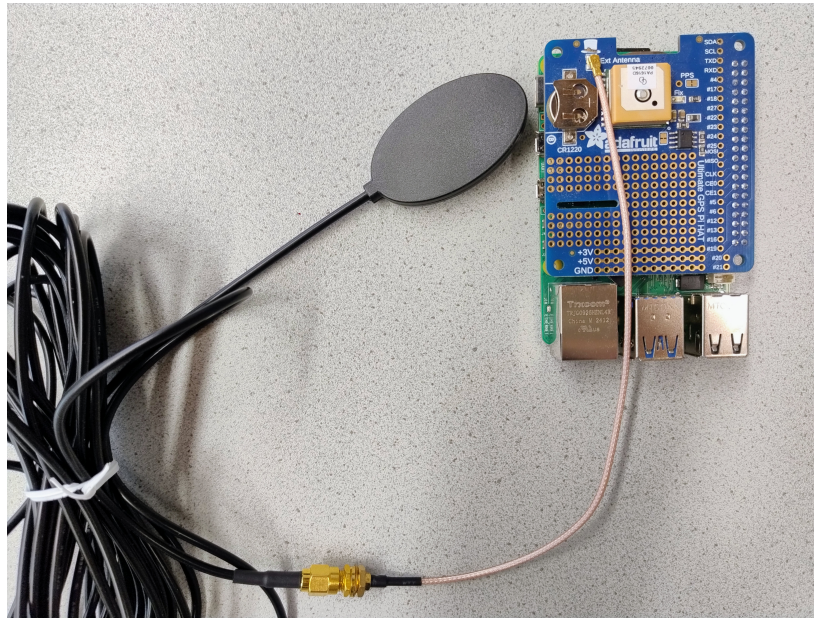


Abbildung 12: GNSS-Modul und Antenne

Ähnlich wie bei der IMU soll festgestellt werden, wie sich das Modul unter Bestrahlung mit elektromagnetischen Felder ausgewählter Frequenzen verhält. Hier soll insbesondere festgestellt werden, ob ein bleibender Schaden verursacht werden kann. Dabei ist festzustellen, ob die hohe Empfindlichkeit des Moduls für eine hohe Störeinkopplung genutzt werden kann. Der RaspberryPi und das darauf verbaute Empfangsmodul sollen allerdings nicht der direkten Bestrahlung ausgesetzt werden. Diese Bauteile können in der Praxis, z. B. wenn sie in einer Drohne verbaut sind, gut abgeschirmt werden. Daher werden sie auch für die Messung abgeschirmt. Die Antenne jedoch kann zum Empfang der Satelliten-Signale im realen Einsatz nicht abgeschirmt werden und wird daher auch für die Messung nicht abgeschirmt. In Abschnitt 4.2.3 wird der Aufbau und das Vorgehen der Messung erläutert.

## 4. Testaufbau

### 4.1. Normen zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung und Impulsen

In diesem Kapitel werden verschiedene internationale Standards behandelt und die darin beschriebenen Messaufbauten dahingehend geprüft, ob sie bei den Tests, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden sollen, angewendet werden können.

Gesucht wird ein Aufbau, dessen Ziel es ist, elektronisches Equipment, wie es an Bord von unbemannten Luftfahrzeugen eingesetzt wird, auf Störanfälligkeit und Zerstörungsmechanismen durch elektromagnetische Strahlung zu testen.

Die ED-14G bzw. DO-160 "ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND TEST PROCEDURES FOR AIRBORNE EQUIPMENT" [41] beschäftigt sich mit den Umgebungsanforderungen an Equipment in der Luftfahrt. Zu den Anforderungen für Bordausrüstung gehören auch die Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der elektrostatischen Entladung, engl. Electrostatic Discharge (ESD).

Zusätzlich werden verfügbare MIL-Standards miteinbezogen. Dabei handelt es sich um US-amerikanische Militärstandards. Zunächst wird ein allgemeiner EMV-Standard, und weiter auch spezielle Standards zum Schutz vor Gefahren durch High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) und zugehörigen Testprozeduren betrachtet.

#### **ED-14G/DO-160**

Da in diesen beiden identischen Normen verschiedene Umwelteinflüsse für Flugzeuge beschrieben werden, müssen die relevanten Aspekte herausgefiltert werden. Von Interesse sind Untersuchungen der gestrahlten Störfestigkeit durch Aufbringen von elektromagnetischen Feldern. Diese werden in Abschnitt 19 "Induced Signal Susceptibility" und Abschnitt 20 "Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)" thematisiert. Außerdem gibt es ein weiteres Kapitel zu ESD, welches ebenfalls betrachtet wird. [41]

**Abschnitt 19 "Induced Signal Susceptibility":** Beim hier beschriebenen Test werden das EUT sowie dessen Verbindungsleitungen magnetischen und elektrischen Feldern ausgesetzt. Mithilfe von Signalgeneratoren werden vorgegebene Ströme bzw. Spannungen erzeugt und über 20 cm lange Abstrahler magnetische bzw. elektrische Feldstärken in der unmittelbaren Nähe des EUT aufgebracht. Die elektrischen Felder werden von einem Abstrahler in 1 cm Entfernung zum

EUT auf dieses abgestrahlt. Um die Verbindungskabel den Feldern auszusetzen, wird anstelle des Abstrahlers die signalführende Leitung eingesetzt und um das Cable Under Test (CUT) gewickelt. Alle diese Testaufbauten zielen auf niedrige Frequenzen ab (bis max. 32 kHz). [41] Dies passt nicht zu den Tests, die in dieser Arbeit durchgeführt werden, da eine größere Entfernung eingehalten werden soll und höhere Frequenzbereiche zu untersuchen sind.

**Abschnitt 20 “Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)”:** Dieser Abschnitt behandelt die Untersuchung der Störfestigkeit des EUT. Für den angestrebten Testaufbau im Rahmen der Arbeit sind nur die gestrahlten Tests von Relevanz, welche sich außerdem auf die höheren Frequenzen von 100 MHz bis 18 GHz beschränken. In der Norm wird vorgegeben, dass die abstrahlenden Antennen einen Meter vom EUT entfernt sein sollen oder bei Abweichungen die Grenze zum Fernfeld überschritten sein muss. Diese Abstände und die Beachtung des Fernfeldes passen gut zu den hier relevanten Angaben. Daher können die Testaufbauten für gestrahlte Störfestigkeit näher in Betracht gezogen werden. Abbildung 13 zeigt den Aufbau für gestrahlte Störfestigkeitsuntersuchungen innerhalb einer Absorberkammer. [41]

Das EUT und dessen Kabel befinden sich auf einem Prüftisch im Abstand von mindestens 5 cm über einer Groundplane und 10 cm von der Tischkante entfernt. Die Antenne befindet sich 90 cm vor dem Tisch, sodass der Abstand zum EUT insgesamt 1 m beträgt. Die Stromleitungen des EUT werden in 10 cm Entfernung zur Tischplatte mit einer Länge von 1 m zu Netznachbildungen, engl. Line Impedance Stabilization Networks LISNs geführt, welche eine gefilterte Stromversorgung zur Verfügung stellen. Die Datenleitungen werden ebenfalls über eine Länge von 1 m in 10 cm Entfernung vor der Tischkante entlang geführt. Sie werden anschließend aus der Absorberkammer nach draußen geführt und an die restliche Testhardware angeschlossen. Dies kann bspw. mithilfe einer Kupferschütte erfolgen. Außerhalb der Kammer sind auch die Instrumente platziert, welche das Testsignal für die Störfestigkeitsuntersuchung erzeugen, verstärken und in die Antenne speisen. [41]

Ein solcher Testaufbau ist in der EMV-Kammer des DLR Braunschweig möglich und wird für Untersuchungen der Störfestigkeit von Bordgeräten bereits eingesetzt. Für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit kann der beschriebene Aufbau zumindest in Teilen übernommen und auf die speziellen Anforderungen angepasst werden, mehr dazu siehe Abschnitt 4.2.



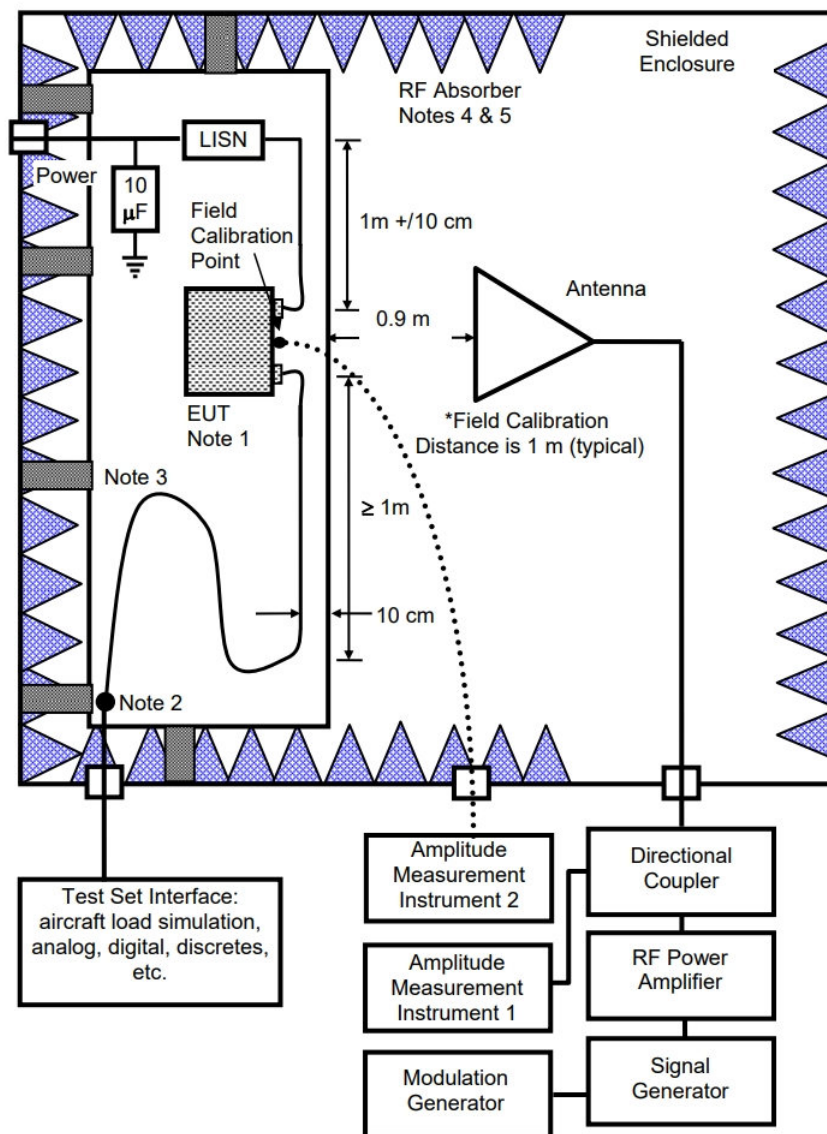


Abbildung 13: Testaufbau einer gestrahlten Störfestigkeitsmessung [41]

## MIL-STD-461G

Diese Norm befasst sich mit den Anforderungen an die Kontrolle von elektromagnetischen Störeigenschaften von Subsystemen und Geräten. Der englische Titel lautet: "REQUIREMENTS FOR THE CONTROL OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS OF SUBSYSTEMS AND EQUIPMENT". Die Version MIL-STD-461G ist die aktuellste verfügbare Version und wurde 2015 veröffentlicht.

Gestrahlte Störfestigkeit von Prüflingen wird in den Abschnitten 5.20, 5.21 und 5.22 behandelt. Abschnitt 5.20 beschäftigt sich mit der Bestrahlung des EUT mit magnetischen Feldstärken im Frequenzbereich von 30 Hz bis 100 kHz. Zur Felderzeugung wird eine abstrahlende Spule in einem Abstand von 5 cm zum EUT gebracht. Wie bereits erwähnt, ist eine solche Bestrahlung

in unmittelbarer Nähe nicht das Ziel der Tests, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden sollen.

In Abschnitt 5.21 werden gestrahlte Störfestigkeitsuntersuchungen im höheren Frequenzbereich mithilfe der Erzeugung von elektrischen Feldstärken beschrieben. Der Testaufbau ähnelt dem bereits beschriebenen aus der Norm ED-14G auf Abbildung 13. Zusätzlich gibt es im MIL-STD-461G einen Abschnitt zur Bestrahlung mit transienten elektromagnetischen Feldern (Abschnitt 5.22 des Standards), während es in der ED-14G Schilderungen zum Testen der Immunität gegenüber Blitzeinschlägen gibt ([41] Abschnitte 22 und 23). Im MIL-Standard wird dabei ein Generator für transiente Impulse verwendet, welcher allerdings nicht detailliert spezifiziert wird. Das EUT wird in einer sogenannten Transverse Electromagnetic Cell (TEM) platziert. Diese Zellen haben den Vorteil, dass trotz ihres kleinen Volumens im Vergleich zu einer EMV-Kammer näherungsweise Fernfeldbedingungen herrschen. Da das DLR in Braunschweig nicht über eine solche Zelle verfügt, werden die Tests stattdessen in der vorhandenen EMV-Kammer durchgeführt.

Die weiteren Kapitel des Standards befassen sich mit geleiteter sowie gestrahlter Emission und Störfestigkeit, aber nicht ausführlicher mit EMP oder ähnlichen Phänomenen. Stattdessen wird auf den Standard MIL-STD-188-125 Part 1 und 2 verwiesen.

[42]

### **MIL-STD-188-125-1/2**

Dieser Standard befasst sich mit dem Schutz vor elektromagnetischen Impulsen mit hoher Amplitude für bodengestützte C4I-Einrichtungen (Führungsinformationssystem, engl. Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence), die kritische und dringliche Missionen durchführen.

Der englische Titel des Dokuments heißt: "HIGH-ALTITUDE ELECTROMAGNETIC PULSE (HEMP) PROTECTION FOR GROUND-BASED C4I FACILITIES PERFORMING CRITICAL, TIME-URGENT MISSIONS". Dabei befasst sich Part 1 mit ortsfesten Einrichtungen und Part 2 mit mobilen Systemen. Die vorliegenden Versionen wurden in den Jahren 1998 (Part 1) und 1999 (Part 2) veröffentlicht.

In der Norm werden sowohl Vorschriften für das Design und die Auslegung von Systemen festgelegt als auch Testanforderungen definiert. Insbesondere letztere sind für diese Arbeit interessant. Insgesamt werden vier Testprozeduren beschrieben, welche im Anhang der beiden Dokumente zu finden sind. Die drei Prozeduren zu "shielding effectiveness", "pulsed current

injection” und “continuous wave immersion” kommen in beiden Parts der Norm vor und sind bis auf wenige EUT-spezifische Anpassungen identisch. In Part 2 kommt noch der “threat-level illumination”-Test hinzu. Von Interesse sind dabei nur gestrahlte Tests und keine leitungsgebundenen Messungen.

Allerdings ist fraglich, wie weit die beschriebenen Szenarien passend für die Anwendung in dieser Arbeit sind. Denn insgesamt richten sich alle beschriebenen Testprozeduren an Testobjekte, welche sich in ihrem Aufbau deutlich von den vorliegenden Testobjekten unterscheiden, wie sie in Kapitel 3 beschrieben wurden. Es werden in der Norm ganze Einrichtungen oder mobile bodengebundene Systeme wie z. B. Lastkraftwagen betrachtet. Diese sind um mehrere Größenordnungen größer und komplexer als die Platinen, welche bestrahlt werden sollen. So werden die Tests im Freifeld beschrieben und nicht in einer EMV-Kammer.

Die Testprozeduren des MIL-STD-188-125 geben also einen guten Überblick. Die Testprozeduren und Aspekte, die dabei beachtet werden sollen, sind jedoch nicht passend für diese Arbeit und können nicht übernommen werden. Sollten in folgenden Arbeiten hingegen Freifeld-Tests im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit und insb. bei gepulsten Abstrahlungen vonnöten sein, so kann aus der Norm entnommen werden, wie eine Referenzmessung des Testaufbaus durchgeführt werden sollte.

Auch tiefergehende Informationen zu benötigten Feldstärken je nach Frequenzbereich für die Tests sind in dieser Norm nicht enthalten. Stattdessen wird auf die Norm “MIL-STD-2169: HIGH-ALTITUDE ELECTROMAGNETIC PULSE (HEMP) ENVIRONMENT” verwiesen. In dieser sollen mögliche Gefahr-Umgebungen durch EMP beschrieben werden, allerdings ist dieser Standard nicht einsehbar.

[43, 44]



## 4.2. Erarbeiteter Testaufbau und Vorgehen

### 4.2.1. Bestrahlung der Testplatte

Wie in Kapitel 4.1 erläutert wurde, gibt es für diese Art der Messung keine exakt passende Norm oder einen standardisierten Aufbau, der übernommen werden kann. Stattdessen wird ein eigener Versuchsaufbau entwickelt. Bei diesem wird sich an den erprobten Aufbauten aus den beschriebenen Normen für die Durchführung von Störfestigkeitsmessungen orientiert. Daher ähnelt der grundlegende Aufbau dem in Abbildung 13 gezeigtem Aufbau für gestrahlte Störfestigkeitsmessungen.

Zunächst wird die kontinuierliche Bestrahlung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Testplatte umgesetzt:

Mit einem Signalgenerator werden Signale bei einer bestimmten Frequenz erzeugt. Dabei werden die Signaleigenschaften Frequenz, Amplitude und Wellenform festgelegt. Mit einem Signalgenerator der Firma HP "E4433B ESG-D Series Signal Generator" können Sinussignale über einen Frequenzbereich von 250 kHz bis 4 GHz erzeugt werden. Damit sind die Frequenzen, welche zur Bestrahlung der Testplatte genutzt werden sollen, abgedeckt.

Die erzeugten Signale werden anschließend in einen Signalverstärker geleitet, bevor sie innerhalb der EMV-Kammer abgestrahlt werden. Für die Verstärkung der Signale steht ein Verstärker-Rack der Firma Rhode&Schwarz zur Verfügung. In diesem sind insgesamt vier Verstärker verbaut, um verschiedene Frequenzbereiche abzudecken. Tabelle 4 enthält die verfügbaren Verstärker. Neben dem Frequenzbereich sind auch die Ausgangs- und Eingangsleistungen der Verstärker aufgelistet. Die Ausgangsleistungen variieren allerdings mit der Frequenz, wie dem Datenblatt [45] entnommen werden kann. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, die Verstärkung am jeweiligen Verstärker manuell zu verringern oder zu erhöhen, bis die maximale Ausgangsleistung erreicht ist.

Abbildung 14 zeigt ein Bild des Aufbaus zur Signalerzeugung außerhalb der EMV-Kammer. Dort befindet sich ein Verstärker-Rack mit den vier verschiedenen Verstärkern und einem externen Signalgenerator. Ein Koaxialkabel führt vom Signalgenerator auf die Rückseite des Racks, wo es mit dem Eingangskanal des aktuell genutzten Verstärkers verbunden wird.

Tabelle 4: Übersicht "Broadband Amplifier" von Rhode&Schwarz

| Modell           | Frequenzbereich      | max. Ausgangsleistung<br>in W | max. Ausgangsleistung<br>in dBm | nom. Eingangsleistung<br>in dBm |
|------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| R&S®BBA150-AB350 | 4 kHz–400 MHz        | 350                           | 55,5                            | -3,4                            |
| R&S®BBA150-BC70  | 80 MHz–1 GHz         | 70                            | 48,5                            | -3,4                            |
| R&S®BBA150-D30   | 0,69 GHz–<br>3,2 GHz | 30                            | 44,8                            | -3,4                            |
| R&S®BBA150-E15   | 2,5 GHz–6 GHz        | 15                            | 41,8                            | -3,4                            |



Abbildung 14: Aufbau zur Signalerzeugung außerhalb der EMV-Kammer

Innerhalb der Absorberkammer wird eine Sendeantenne aufgebaut, welche die erzeugten Signale auf die Testplatte strahlt. Als Sendeantenne wird die Hornantenne "BBHA 9210" der Firma Schwarzbeck eingesetzt. Diese ist für 1–18 GHz ausgelegt und deckt somit den benötigten Frequenzbereich ab [46]. Außerdem hat diese, wie Hornantennen allgemein (siehe Kapitel 2.4.3) eine gute Richtwirkung, weshalb diese Art der Antenne gut für die Bestrahlung geeignet ist.

Gegenüber der Sendeantenne wird im Abstand von 1 m die Testplatine platziert. Antenne und Platine befinden sich 130 cm über dem Boden der EMV-Kammer.

Zur Beobachtung und Aufzeichnung der Effekte werden folgende Messgeräte eingesetzt:

- **Feldsonde (Narda “NBM-550” mit dem Sensor Typ “EF1891”):** Mithilfe einer elektrischen Feldsonde wird die Feldstärke im Inneren der EMV-Kammer überwacht, welche der Platine durch die Bestrahlung ausgesetzt wird. Über eine optische Verbindung kann die Messung der Feldsonde außerhalb der Kammer an einem Laptop über die zugehörige Software überwacht werden.
- **Messgerät “FSH8” der Firma Rhode&Schwarz im Modus “Power Meter”:** Der “FSH8” dient zur Messung der Leistung, welche in die Antennen der Testplatine eingekoppelt wird. Das Messgerät wird außerhalb der Kammer aufgebaut. Das Signal wird an der getesteten Antenne über ein Koaxialkabel abgenommen und an das Messgerät geleitet. Für diese Zwecke gibt es eine vorgesehene abgedichtete Durchführung in der Wand der EMV-Kammer. Für den Einsatz des “FSH8” zur Leistungsmessung wird außerdem die Sonde “FSH-Z1” verwendet.
- **EMV-gehärtetes Kamerasystem “dAV-Cr-HD-10-ww” der Firma mk-messtechnik GmbH:** Die Kamera dient zur Überwachung des Aufbaus innerhalb der EMV-Kammer und damit als Sicherheitsvorkehrung, da die Vorgänge andernfalls von außen nicht einsehbar sind. Außerhalb der Kammer wird das Live-Bild auf einem Monitor angezeigt. Die Signale werden über Glasfaser übertragen.

Abbildung 15 zeigt den Aufbau innerhalb der Kammer. Von links nach rechts sind die wichtigsten Elemente nummeriert. Nummer 1 zeigt die Narda Feldsonde, mit der die elektrische Feldstärke gemessen werden kann. Sie wurde auf Kartons platziert, um die gleiche Höhe wie die Testplatine zu erreichen. Die Testplatine ist mit der Nummer 2 versehen. Um diese zu stabilisieren und gerade positionieren zu können, wurde sie an einem Holzbrett befestigt.

Die Feldsonde und die Testplatine werden mithilfe eines Kamerasystems überwacht. Dafür wurde das EMV-gehärtete Kamerasystem (Nummer 3) hinter der Sendeantenne (Nummer 4) platziert und auf die Testplatine ausgerichtet. Die Hornantenne, welche als Sendeantenne eingesetzt wird, ist ebenfalls auf die Testplatine ausgerichtet. Die zu testende Antenne der Testplatine und die Sendeantenne befinden sich auf derselben Höhe. Auch der horizontale Abstand ist definiert, in Abbildung 15 beträgt er 1 m. Für den Aufbau wurden ausschließlich Materialien verwendet, welche nicht leitend sind (Holz, Pappe), damit die Messungen möglichst nicht durch

Reflexionen verfälscht werden. In Abbildung 16 sind der Aufbau innerhalb und außerhalb der Kammer zusammen dargestellt. Die Darstellung ist nicht maßstabsgetreu, sondern soll einen Überblick über den gesamten Aufbau bieten. Die Elemente von Abbildung 14 befinden sich auf der rechten Seite außerhalb der Kammer. Durch Koaxialanschlüsse, die in der Wand der EMV-Kammer vorhanden sind, können die Signale von außen nach innen geführt werden. Dies wird für die Verbindung des erzeugten und verstärkten Signals zur Sendeantenne benötigt. Andersherum wird das an der getesteten Antenne abgenommene Signal zum Messgerät "FSH8" nach außen geführt. Die wesentlichen Bestandteile der Messung, die in Abbildung 15 zu sehen sind, finden sich in umrahmten Bereich der EMV-Kammer wieder. In der Skizze 16 sind ebenfalls die Hybrid-Absorber an der Rückseite der Kammer zu verzeichnen. Anzahl und Größe sind allerdings ebenfalls nicht maßstabsgetreu. Die Ferrit-Absorber wurden nicht einzeln eingefügt, sind aber in Abbildung 15 an den Wänden zu erkennen.

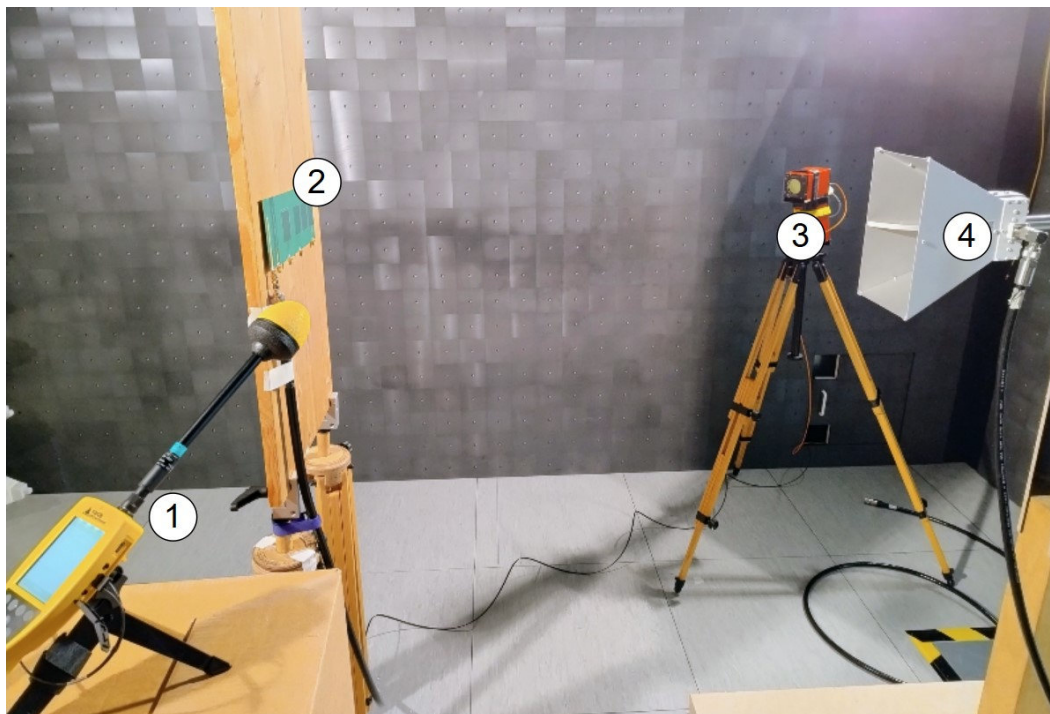


Abbildung 15: Aufbau innerhalb der EMV-Kammer

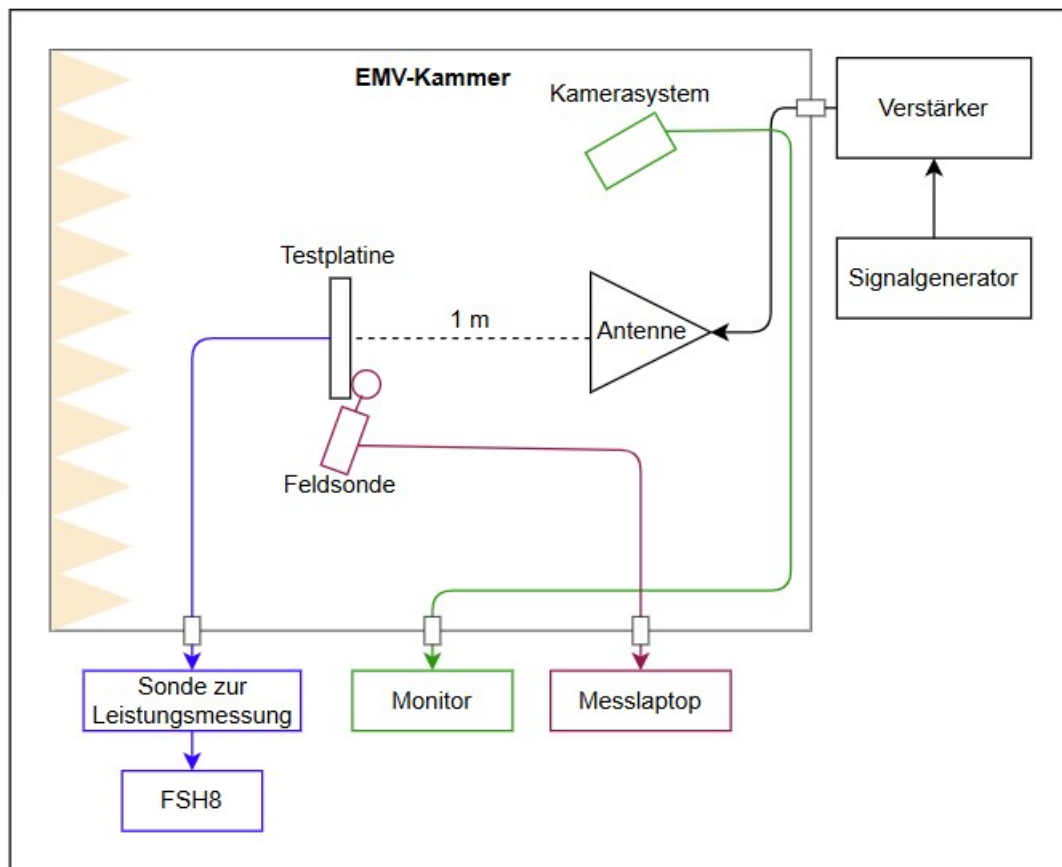


Abbildung 16: Skizze des gesamten Aufbaus

### Ablauf der Messungen

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Bestrahlung der Testplatte vorgestellt. Die bestrahlte Antenne der Testplatte wurde über den angelöteten SMA-Adapter mit einem Koaxialkabel verbunden, das zum "FSH8" außerhalb der Kammer geführt wurde, vgl. Abbildung 16. So kann die Leistung gemessen werden, die in die Platine eingekoppelt wird.

Für jede der Platinen bzw. passiven Antennen wurden Frequenzen bestimmt, bei denen bestrahlt werden soll. Eine Übersicht über die gewählten Frequenzen kann Tabellen 2 und 3 entnommen werden. Der Signalgenerator und der entsprechende Verstärker wurden zur Erzeugung des Signals auf die Frequenz eingestellt. Ebenso wurden die Einstellungen der Feldsonde und des "FSH8" auf die aktuelle Testfrequenz angepasst. Am Verstärker wurde zunächst eine niedrige Ausgangsleistung ausgewählt. Diese wurde anschließend in Schritten von 1 bis 2 dBm erhöht. Pro Schritt am Verstärker wurden die Messergebnisse notiert: die eingestellte Stufe am Verstärker, die gemessene Feldstärke und die eingekoppelte Leistung. Dies wurde so lange wiederholt, bis am Verstärker die maximale Ausgangsleistung erreicht wurde. Für die Frequenzen zwischen 1 GHz bis 3,2 GHz wurde der Verstärker "BBA150-D30" verwendet,

welcher maximal 30 W ausgeben kann und für höhere Frequenzen wurde umgestellt auf den Verstärker "BBA150-E15", welcher maximal 15 W Ausgangsleistung erreicht, vgl. Tabelle 4.

Dieses Vorgehen wurde bei jeder der Antennen der Testplatine und bei jeder ausgewählten Frequenz mit horizontaler und vertikaler Polarisation der Sendeantenne durchgeführt. Die Ausrichtung der Testplatine wurde allerdings nicht verändert, sodass zwischen beiden Polarisation abhängig von der Sendeantenne unterschieden werden kann.

Zuletzt wurde der Abstand zwischen Sendeantenne und Testplatine von 1 m auf 0,5 m reduziert. Die Messungen wurden anschließend im neuen Abstand wiederholt und ebenfalls die Polarisation verändert. Der Grund für die Verringerung des Abstandes ist, die erzeugte Feldstärke an der Testplatine zu erhöhen, da diese abhängig vom Abstand ist [3]. Weitere Effekte durch die Verringerung des Abstands werden in Kapitel 5.1.2 erläutert.

#### **4.2.2. Bestrahlung der inertialen Messeinheit**

Für die Bestrahlung der inertialen Messeinheit wurde ein ähnlicher Aufbau verwendet, wie er in Abbildung 13 und der Skizze in Abbildung 16 zu sehen ist.

Die kontinuierlichen, sinusförmigen Signale für die Bestrahlung werden ebenfalls von einem Signalgenerator erzeugt und anschließend von einem Verstärker im zuvor beschriebenen Verstärker-Rack von Rhode&Schwarz verstärkt. Als Signalgenerator wird im Gegensatz zu vorherigen Messungen der im Rack verbaute Generator "SMB100B" von Rhode&Schwarz verwendet.

In der EMV-Kammer wird erneut das EMV-gehärtete Kamerasystem zur Überwachung der Tests über einen Monitor verwendet. Auch die Feldsonde zur Messung der elektrischen Feldstärke wird erneut eingesetzt. Der "FSH8" zur Leistungsmessung kommt hier nicht weiter zum Einsatz. Als Sendeantennen werden in dieser Messung eine logarithmisch-periodische und eine Hornantenne eingesetzt. Für Frequenzen ab 1 GHz kommt erneut die Hornantenne "BBHA 9210" von Schwarzbeck zur Anwendung. Die logarithmisch-periodische Antenne "VUSLP 9111" erweitert den Frequenzbereich nach unten bis zu einer Frequenz von 300 MHz [47]. Diese Antenne ist in Abbildung 17 zu sehen. Beide Antennen werden in einem horizontalen Abstand von 1 m vom EUT platziert und befinden sich mit diesem auf der gleichen Höhe. Im Verlauf der Messung wird ebenfalls die Polarisation der Antennen zwischen horizontal und vertikal gewechselt.



Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt des Aufbaus innerhalb der EMV-Kammer. Da sich zum Zeitpunkt der Durchführung kein Tisch in der Kammer befand, wurden Pappkartons verwendet, um eine erhöhte Ablage für das EUT bereitzustellen. Darauf befindet sich auch die Narda Feldsonde, welche schon in Abbildung 15 gezeigt wurde. Das Kamerasystem ist in Abbildung 17 nicht zu sehen.



Abbildung 17: Aufbau zur Bestrahlung der IMU



Abbildung 18: Nahaufnahme der IMU

Bei der Bestrahlung soll nur die Platine der IMU auf Störanfälligkeit untersucht werden. Das “STM32”-Board, über welches der Sensor angesteuert wird, soll hingegen nicht durch die Bestrahlung beeinflusst oder sogar beschädigt werden. Daher wird die weitere Elektronik mithilfe von Alufolie abgeschirmt. Dabei ist zu beachten, dass durch die leitfähige Abschirmung keine Kurzschlüsse erzeugt werden. Abbildung 18 zeigt die IMU, welche nicht abgeschirmt ist, sowie die Abschirmung mithilfe der Alufolie. Damit die Schirmung wirksam ist, wird eine Groundplane verwendet und das EUT darauf platziert. Die Groundplane ist mit dem Erdungsanschluss der EMV-Kammer verbunden.

An den “STM32” werden zwei Verbindungsleitungen angeschlossen und mit einem Laptop außerhalb der EMV-Kammer verbunden. Dafür wird eine Kupferschütte in der Wand der EMV-Kammer genutzt. Diese ist in Abbildung 19 zu sehen. Die Kupferschütte dient dazu, Datenleitungen zwischen dem EUT und einem angeschlossenen Computer zu ermöglichen, ohne dabei die Dämpfungs- und Abschirmungseigenschaften der Absorberkammer zu beeinträchtigen.

Dadurch können die Messdaten von der IMU während der Messung in der EMV-Kammer am Laptop außerhalb der Kammer abgerufen werden. So kann auch kontrolliert werden, ob die Sensoren gestört werden. Phänomene wie Änderungen im Datenfluss oder gar ein Verlust des Datenstroms, die durch die Bestrahlung hervorgerufen werden können, sind so schon während der Messung ersichtlich. Da der “STM32” darüber ebenfalls mit Spannung versorgt wird, werden für den Aufbau keine LISNs benötigt, wie sie in Abbildung 13 zur Versorgung des EUT vorgesehen sind.

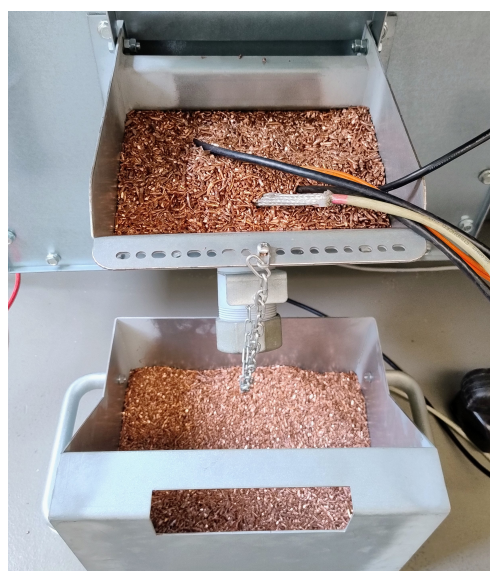


Abbildung 19: Kupferschütte



## **Ablauf der Messungen**

Zunächst wird der Sensor im beschriebenen Aufbau innerhalb der Kammer in Betrieb genommen. Dabei wird überprüft, ob ein kontinuierlicher und zuverlässiger Strom der Messdaten gelingt. Dann wird die Platine auf verschiedenen Frequenzen bestrahlt. Der genutzte Frequenzbereich wird von 300 MHz bis 3 GHz festgelegt. Im Bereich von 300 MHz bis 1 GHz wurden die Frequenzen in Schritten von 50 MHz erhöht. Ab 1 GHz wurden die Schritte auf 200 MHz erhöht und ab 2 GHz wurden nur noch zwei Schritte je 500 MHz vorgenommen. Sollte in einem Bereich eine Störanfälligkeit auftreten, so wird der Frequenzbereich verkleinert und nach expliziten Frequenzen gesucht, bei denen eine Störung erwartet werden kann. Bei jeder Frequenz wird am Verstärker zunächst eine geringe Ausgangsleistung eingestellt und diese schrittweise erhöht, damit festgestellt werden kann, ab welcher Verstärkung und elektrischen Feldstärke die IMU beeinflusst werden kann.

Um eine Einschätzung dafür zu bekommen, auf welchen Frequenzen der Sensor und die verbaute Elektronik arbeiten, wurde das Datenblatt [37] der 'MPU-9250' zur Hilfe genommen. Allerdings liegen die Frequenzen im kHz- bis unteren MHz-Bereich. Sie sind zu niedrig, um Signale zur Bestrahlung erzeugen zu können, da im EMV-Labor des DLR keine Sendeantenne für diesen Frequenzbereich zur Verfügung steht.

Eine Analyse der Bestrahlung der IMU folgt in Kapitel 5.2.1.

#### 4.2.3. Bestrahlung der GNSS-Empfangseinheit

Die Messung des GNSS-Moduls innerhalb der EMV-Kammer stellt eine größere Herausforderung dar. Die Bestrahlung muss innerhalb der Kammer erfolgen, allerdings ist die GNSS-Antenne dort nicht in der Lage, Signale von Satelliten zu empfangen. Es ist also nicht möglich, ähnlich wie es bei der IMU erfolgt ist, die Antenne und das Modul in der EMV-Kammer in Betrieb zu nehmen und währenddessen zu bestrahlen. So ist es schwieriger, eine Aussage darüber treffen zu können, ob der Betrieb gestört wird oder nicht. Damit GNSS-Antenne und -Empfangsmodul dennoch getestet werden können, werden zwei unterschiedliche Testaufbauten verwendet.

Für den ersten Aufbau wird die GNSS-Antenne außerhalb der Kammer platziert. Dort wird sie außen auf der Fensterbank positioniert, um Signale von möglichst vielen Satelliten empfangen zu können. Das Kabel der Antenne wird über die Kupferschütte (siehe Abbildung 19) in die EMV-Kammer geführt. In der Kammer befindet sich der RaspberryPi inklusive Empfangsmodul. Mit diesem wird die Antenne verbunden. So können die empfangenen Daten an das Modul innerhalb der EMV-Kammer geleitet und dort verarbeitet werden. Der RaspberryPi ist über eine geschirmte Leitung, welche ebenfalls durch die Kupferschütte geführt wird, mit einem Laptop außerhalb der Kammer verbunden. Dort können die vom GNSS-Modul verarbeiteten Daten während der Messung in Echtzeit eingesehen werden.

Innerhalb der EMV-Kammer wurde das RaspberryPi-Board mit Empfangsmodul in Alufolie verpackt und auf der Groundplane auf einem Tisch platziert. Dadurch soll diese Elektronik nicht beeinflusst werden und keine Schäden von der Bestrahlung davontragen. In der Kammer können also hauptsächlich die geführten Kabel durch die Bestrahlung beeinflusst werden. Insbesondere das Antennenkabel, da dieses nicht geschirmt ist.

Darüber hinaus befindet sich das Equipment zur Bestrahlung in der Kammer. Für die Abstrahlung wird die Hornantenne verwendet. Außerdem wird die erzeugte elektrische Feldstärke mithilfe der Feldsonde aufgezeichnet. Zuletzt wird ebenfalls das EMV-gehärtete Kamerasystem genutzt, um mögliche Geschehnisse innerhalb der Kammer von außen überwachen zu können. Abbildung 20 zeigt den beschriebenen Aufbau. Da für die Stromversorgung ein USB-C-Stecker benötigt wird, werden nicht die LISNs verwendet, welche links auf dem Tisch in Abbildung 20 zu sehen sind. Stattdessen wird eine Steckdose innerhalb der EMV-Kammer genutzt.

Der Aufbau außerhalb der EMV-Kammer entspricht den zuvor beschriebenen Aufbauten mit Signalgenerator und angeschlossenem Verstärker "R&S@BBA150-D30" (siehe Tabelle 4).

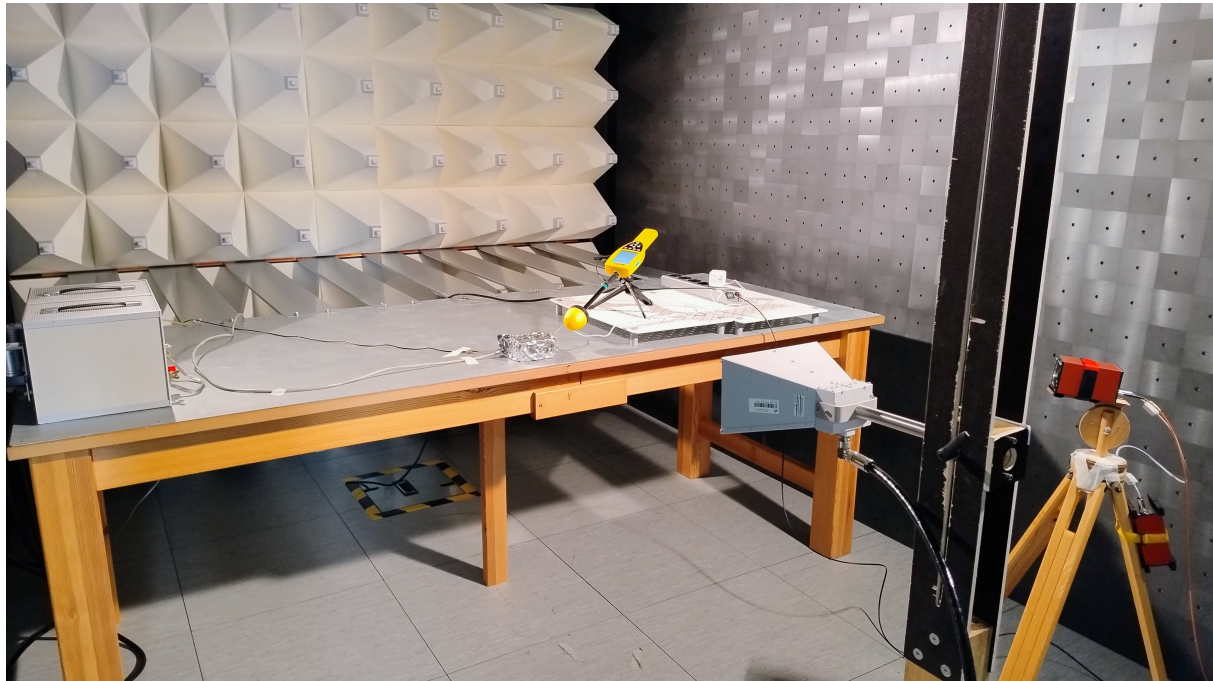


Abbildung 20: Aufbau zur Bestrahlung des GNSS-Moduls

Als zweiter Aufbau wird die GNSS-Antenne in der EMV-Kammer platziert und der RaspberryPi mitsamt dem Empfangsmodul außerhalb der Kammer aufgebaut. Die Kuperschütze dient erneut dazu, die Antenne und das Modul über das Antennenkabel verbinden zu können.

In der geschlossenen Absorberkammer kann die Antenne nun keine Satelliten-Signale mehr empfangen. Durch die Bestrahlung der Antenne soll festgestellt werden, ob entweder die aktive Antenne, die direkt der Bestrahlung ausgesetzt ist, oder das angeschlossene Empfangsmodul durch die Einkopplung von Strahlung hoher Feldstärke einen Schaden davon tragen.

### **Ablauf der Messungen**

Für die Bestrahlung wird in beiden Fällen ein Sinus mit einer Frequenz von 1,57542 GHz verwendet, um erneut der L1-/E1-Frequenz zu entsprechen, für welche das Modul und die Antenne ausgelegt sind.

Aufgrund der geringen Empfindlichkeit des Empfangsmoduls wurde der Verstärker zunächst auf die geringste mögliche Ausgangsleistung eingestellt und damit zunächst geringe Feldstärken von unter 5 V/m erzeugt. Anschließend wurde die Verstärkung stufenweise erhöht und beobachtet, ab welchen Feldstärken eine Störung auftritt.

Die Ergebnisse der Bestrahlungen werden in Kapitel 5.2.2 aufgeführt.

## 5. Auswertung der Messungen

### 5.1. Einkoppelte Leistungen auf der Testplatte

Während der Messungen wurden die erzeugten elektrischen Feldstärken in V/m mit einer Feldsonde gemessen und zusammen mit der eingekoppelten Leistung auf der Platte notiert.

Die Kombination aus Signalgenerator und Verstärker liefert trotz gleicher Einstellungen unterschiedliche elektrische Feldstärken innerhalb der Kammer. Dies lässt sich vor allem damit erklären, dass die Ausgangsleistung der Verstärker von der Frequenz abhängig ist [45]. Außerdem ist der Ausgang des Verstärkers über ein Koaxialkabel mit der abstrahlenden Antenne in der Kammer verbunden. Die Dämpfung, die ein Signal bei der Übertragung durch ein solches Kabel erfährt, ist ebenfalls frequenzabhängig und steigt mit zunehmender Frequenz. Um diese Dämpfung in der Betrachtung der Messergebnisse zu korrigieren, wurde eine Dämpfungsmessung des Kabels in der gleichen Position liegend durchgeführt. Die Messdaten können um den Einfluss des Kabels korrigiert werden, siehe Abschnitt 5.1.1.

Damit die Ergebnisse bei verschiedenen Messungen und unterschiedlichen Frequenzen vergleichbar sind, werden nicht die eingestellten Stufen am Verstärker, sondern die elektrischen Feldstärken herangezogen, welche mithilfe der Feldsonde gemessen wurden. Diese werden interpoliert, um eine konstante Feldstärke auswählen zu können und über mehrere Messungen mit unterschiedlicher Frequenz hinweg die eingekoppelte Leistung vergleichen zu können.

Für die Auswertung der Messdaten wurde ein Python-Skript geschrieben. Mithilfe dieses Skripts können die Daten eingelesen, verarbeitet und in Plots dargestellt werden. Zur Verarbeitung der Daten gehört unter anderem die Interpolation der Datenpunkte. Wurden mindestens vier Datenpunkte aufgezeichnet, so wird eine kubische Spline-Interpolation durchgeführt. Bei weniger Messpunkten wird angenähert linear oder gar nicht interpoliert.

Außerdem können nach Wunsch die Messwerte bei einer bestimmten Frequenz mit den gemessenen Werten für die Kabeldämpfung bei der gleichen Frequenz korrigiert werden.

#### 5.1.1. Einfluss der Kabeldämpfung

Wie bereits erwähnt, kann das Kabel, welches die Test-Antennen mit dem Messgerät zur Leistungsmessung verbindet, eine frequenzabhängige Dämpfung verursachen. In diesem Abschnitt soll daher untersucht werden, welchen Einfluss es hat, die Dämpfung mithilfe einer Referenzmessung der Kabel zu kompensieren.

In Abbildung 21 ist ein Graph dargestellt, welcher die gemessene Kabeldämpfung über der Frequenz darstellt. Da die Messung nur an 630 diskreten Frequenzpunkten erfolgt, werden die Daten interpoliert. Dadurch soll ermöglicht werden, dass bei jeder gewünschten Frequenz ein Wert zur Korrektur der Kabeldämpfung zur Verfügung steht. Die Kabeldämpfung in dB ist in Abbildung 21 auf der Ordinate aufgetragen und wurde über einen Frequenzbereich von 1,0 GHz bis 4,0 GHz gemessen. Die Frequenz ist auf der Abszisse in GHz linear abgebildet.

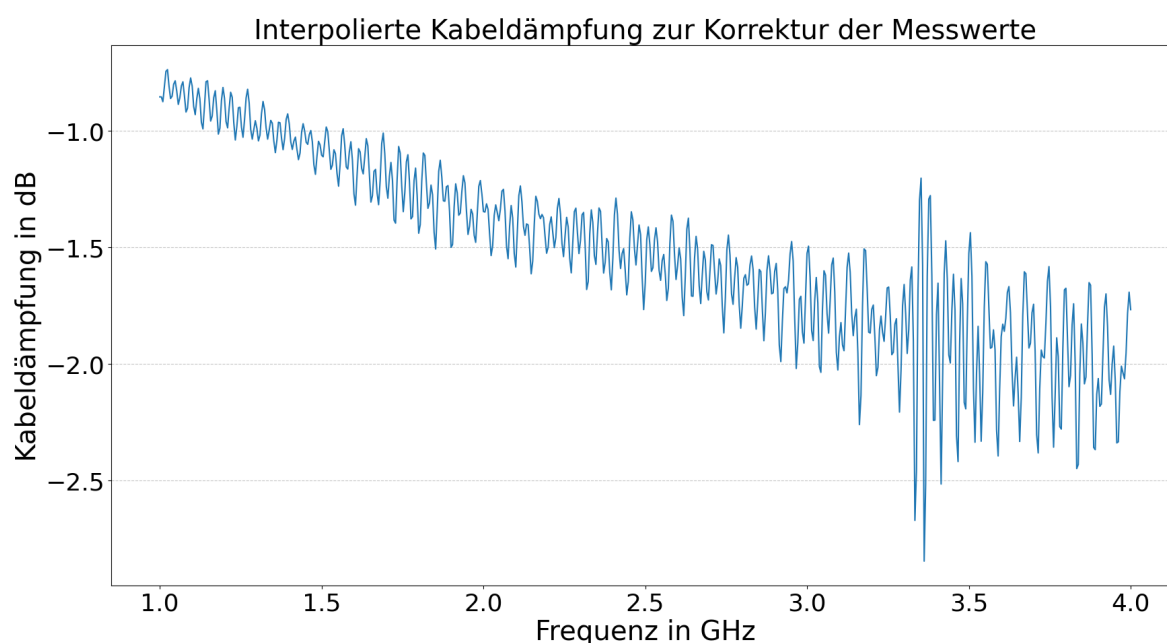


Abbildung 21: Kabeldämpfung in Abhängigkeit der Frequenz

Mithilfe dieser Daten kann eine Korrektur der aufgezeichneten Messwerte der eingekoppelten Leistung in den Platinen durchgeführt werden. Abbildung 22 zeigt beispielhaft an Antenne 2 bei vier verschiedenen Frequenzen den Einfluss der Kabeldämpfung. Zur Veranschaulichung wurden die aufgenommenen Messpunkte bei 1,3 GHz, 1,9 GHz, 2,5 GHz sowie 3,0 GHz ausgewählt. In Abbildung 22 ist die elektrische Feldstärke in V/m auf der horizontalen Achse und die eingekoppelte Leistung in dBm auf der vertikalen Achse abgebildet. Für jede Frequenz wurden die Daten der Messung in 1 m Entfernung und horizontaler Polarisation der Sendeantenne verwendet und einmal ohne Korrektur der Kabeldämpfung (blaue, grüne, violette und pinke Kurve) und einmal unter Berücksichtigung der Kabeldämpfung (orange, rote, braune und türkise Kurve) dargestellt. Bei allen vier exemplarischen Vergleichen ist zu sehen, dass der Wert der eingekoppelten Leistung durch die Berücksichtigung der Kabeldämpfung zunimmt. Außerdem ist der Einfluss grundsätzlich umso größer, je höher die Frequenz ist. Dies geht auch mit

der dargestellten Kabeldämpfung über der Frequenz in Abbildung 21 einher. Mit steigender Frequenz fällt die Kurve immer weiter, und der Betrag der Kabeldämpfung nimmt zu. Aufgrund des ungleichmäßigen Verlaufs kann es bei einzelnen Frequenzen Abweichungen von diesem Trend geben. So beträgt die Kabeldämpfung bei den Frequenzen welche für Abbildung 22 verwendet wurden: -0,98 dB bei 1,3 GHz; -1,5 dB bei 1,9 GHz; -1,65 dB bei 2,5 GHz aber nur -1,53 dB bei 3,0 GHz.

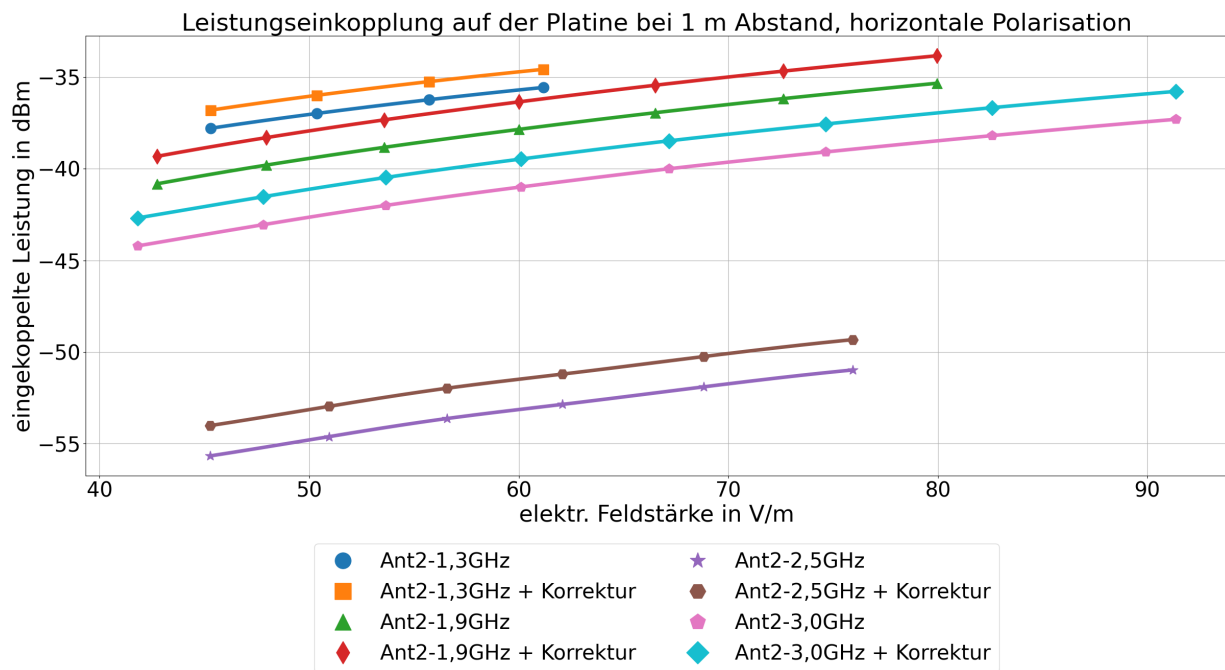


Abbildung 22: Einfluss der Kabeldämpfung auf die Messdaten

Aufgrund dieser Feststellung werden bei den folgenden Auswertungen der Messdaten die gemessenen Daten für die eingekoppelte Leistung bei jeder Frequenz um den zugehörigen Wert für die Kabeldämpfung korrigiert.



### 5.1.2. Einfluss des Abstands zwischen Sendeantenne und Platine

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden die Hornantenne als Sendeantenne und die Testplatine mit den Empfangsantennen zunächst in 1 m horizontaler Entfernung platziert. Während der Messungen konnte bereits festgestellt werden, dass nur wenig Leistung in die Platinen eingekoppelt wurde. Um die Feldstärke am Ort der Testplatine weiter zu erhöhen und so möglicherweise mehr Leistung einkoppeln zu können, wurde der Abstand zwischen der Sendeantenne und der Testplatine auf 0,5 m verringert.

In diesem Abschnitt soll betrachtet werden, welche Auswirkungen durch die Verringerung des Abstandes beobachtet werden können und welche Effekte im Vergleich zu einem größerem Abstand beachtet werden müssen.

Die erste Erwartungshaltung durch die Verringerung des Abstandes war es, dass nun eine deutlich höhere elektrische Feldstärke am Ort der Testplatine herrscht. Um zu untersuchen, ob der Zusammenhang der eingekoppelten Leistung bei gleicher Feldstärke, aber geringerem Abstand gleich bleibt, wurde die Verstärkung des Signals zur Bestrahlung zunächst so weit reduziert, dass eine ähnliche Feldstärke gemessen werden konnte, wie bei weitem Abstand. Dies wurde für beide Polarisierungen der Sendeantenne, alle Empfangsantennen und die jeweils untersuchten Frequenzen durchgeführt.

Nur für vier Messreihen wurde die Erwartung erfüllt, dass sich die Messkurven in den beiden Abständen überschneiden und bei gleichen Feldstärken ähnlich oder gleich viel Leistung eingekoppelt wird. Dies war der Fall bei: Antenne 2, Bestrahlung mit 1,575 GHz in horizontaler Polarisation, Antenne 3 bei Bestrahlung mit 1,5 GHz in horizontaler Polarisation, Antenne 4, 3,3 GHz in vertikaler Polarisation und bei Antenne 5 bei der Bestrahlung mit 2,8 GHz in vertikaler Polarisation. Bei allen anderen Messreihen, bei anderen Frequenzen und Polarisierungen, konnte beim Vergleich der Messkurven festgestellt werden, dass trotz gleicher gemessener elektrischer Feldstärke an der Empfangsantenne unterschiedlich viel Leistung eingekoppelt wurde. In den meisten Fällen wurde bei der gleichen Empfangsantenne, gleicher Frequenz und Polarisation beim geringeren Abstand von 0,5 m mehr Leistung eingekoppelt. Dies trifft aber nicht allgemein zu. Bei einigen Messreihen war festzustellen, dass im größeren Abstand von 1 m mehr Leistung eingekoppelt werden konnte.



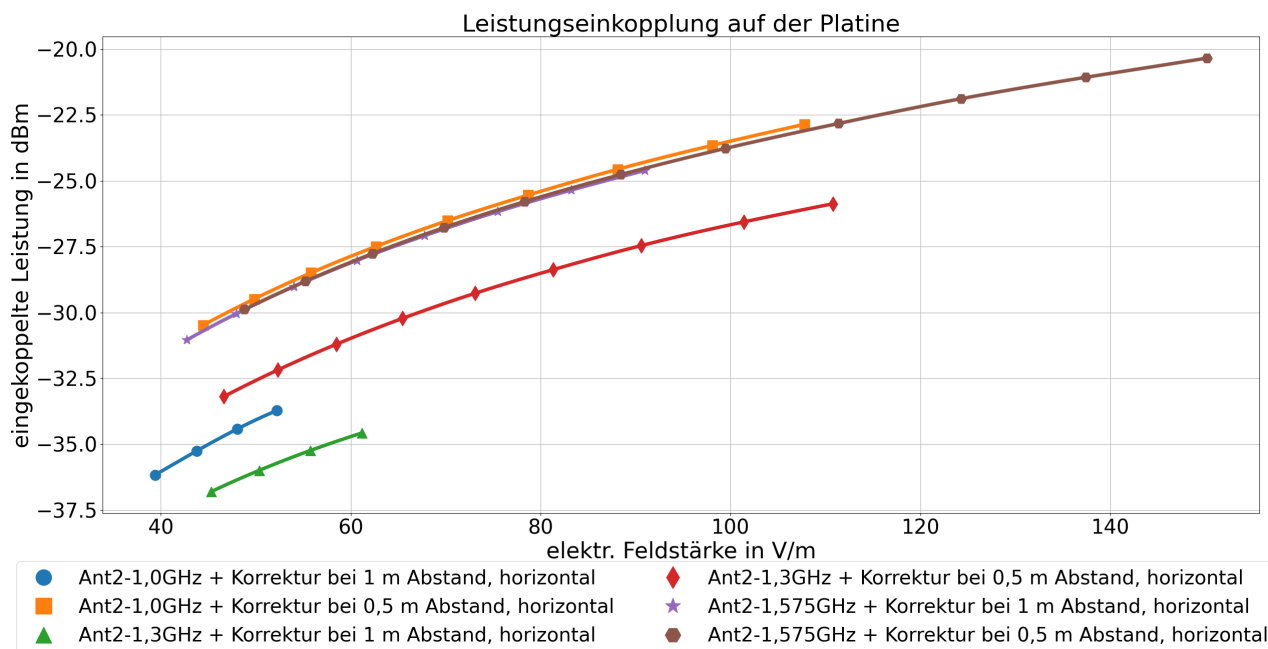


Abbildung 23: Exemplarischer Vergleich 1 m und 0,5 m Abstand der Sendeantenne

Abbildung 23 zeigt beispielhaft den Vergleich dreier Messreihen an Antenne 2. Verglichen wurden die Messungen bei den Frequenzen 1 GHz, 1,3 GHz und 1,575 GHz jeweils in horizontaler Ausrichtung der Sendeantenne, aber bei unterschiedlichen Abständen dieser. Die blaue, grüne und violette Kurve zeigen die Messwerte der drei Frequenzen bei einem Abstand von 1 m zwischen Sendeantenne und Antenne 2. Bei der orangen, roten und braunen Kurve wurde der Abstand auf 0,5 m reduziert. Auf der Ordinate ist die eingekoppelte Leistung in dBm, welche an Antenne 2 gemessen wurde und auf der Abszisse die elektrische Feldstärke in V/m aufgetragen. In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei den Messreihen im halben Abstand mehr Messpunkte aufgezeichnet wurden. Das liegt daran, dass die Verstärkung des erzeugten Signals zunächst so weit reduziert wurde, bis vergleichbare Feldstärken gemessen wurden, wie bei der zugehörigen Messreihe im größeren Abstand. Dadurch sollte eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Messreihen entstehen und ein eventueller Übergang ermöglicht werden. Bei den Messungen bei 1,575 GHz in Abbildung 23 ist ein solcher Übergang zu sehen (violette Kurve bei 1 m Abstand und braune Kurve bei 0,5 m Abstand). Da die Verstärkung des Signals stufenweise immer weiter erhöht wurde, bis das Limit des Verstärkers erreicht wurde, erstreckt sich die Messung bei 0,5 m Abstand zu deutlich höheren Feldstärken, die im Abstand von 1 m bei gleicher Ausgangsleistung nicht erreicht werden konnten. Auch bei den anderen Messungen bei geringerer Entfernung der Antennen konnten höhere Feldstärken erreicht werden, wie auch an den orangen und roten Kurven im Vergleich zur blauen und grünen Kurve nachvollziehbar ist.

Da nur bei den wenigsten Messungen die eingekoppelte Leistung trotz gleicher Feldstärke aber unterschiedlichem Abstand übereinstimmte, stellt sich die Frage, welche Einflüsse zu dieser Beobachtung geführt haben können. Auch ist auffällig, dass es zwar eine Tendenz gibt, dass bei geringerem Abstand und gleicher Feldstärke mehr Leistung eingekoppelt wird als bei größerer Entfernung, allerdings trifft das auf einige Messungen nicht zu.

Ein Faktor, der bei der Auswertung beachtet werden muss, ist die Unsicherheit der Feldsonde. Durch die Änderung des Abstandes der Sendeantenne ändert sich auch ihre Position zur Feldsonde. In Abschnitt 5.1.7 wird beschrieben, wie sich Änderungen in der Positionierung von Feldsonde und Sendeantenne auf die Messgenauigkeit auswirken.

Ein weiterer Aspekt sind die elektromagnetischen Phänomene, welche zwischen den Antennen auftreten und die durch einen veränderten Abstand beeinflusst werden. Dabei ist zunächst die Unterscheidung von Fern- und Nahfeld relevant. In Kapitel 2.2 wurden bereits einige grundlegende Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen erläutert. Für die Berechnung der Wellenlänge im Raum aus der Frequenz wird die bereits vorgestellte Gleichung (2.5) verwendet. Tabelle 3 beinhaltet alle Wellenlängen für die Frequenzen, die bei der Bestrahlung der Antennen untersucht wurden. Bei einem Abstand  $r$  von 50 cm kann nicht mehr für alle genutzten Frequenzen die Annahme getroffen werden, dass sich die Testplatine im Fernfeld der Sendeantenne befindet. Daher kann es zu komplexeren Feldverteilungen in der Umgebung der Sendeantenne kommen. Für höhere Frequenzen kann die Abschätzung, dass sich das EUT im Fernfeld befindet, weiterhin getroffen werden. Allerdings können die elektromagnetischen Wellen in der reduzierten Distanz unterschiedlich mit der Umgebung und dem EUT interagieren. So kann erklärt werden, dass die eingekoppelte Leistung andere Werte annimmt als zunächst erwartet.

### **5.1.3. Einfluss der Polarisation der Sendeantenne**

In der Beschreibung der Durchführung in Kapitel 4.2.1 wurde bereits erwähnt, dass die Bestrahlung bei jeder Frequenz und jeder Entfernung in zwei verschiedenen Polarisationen der Sendeantenne durchgeführt wurde. Die Testplatine mit den Empfangsantennen blieb dabei in der gleichen Ausrichtung.

In diesem Abschnitt soll daher analysiert werden, ob Unterschiede in der eingekoppelten Leistung abhängig von der Polarisation festgestellt werden können. Um die Messungen vergleichen zu können, werden die Werte für die eingekoppelte Leistung bei gleichen gemessenen Feldstärken verglichen.

Insgesamt wurde festgestellt, dass bei der Bestrahlung in vertikaler Polarisation mehr Leistung eingekoppelt werden konnte. Diese Aussage trifft bis auf drei Abweichungen auf alle Antennen bei der Bestrahlung mit allen Frequenzen und beiden Abständen zu. Bei Antenne 1 und Antenne 5 wurde bei allen Messungen in der vertikalen Polarisation mehr Leistung eingekoppelt. Bei Antenne 2 wurde im Abstand von 1 m bei der Bestrahlung mit 3,52 GHz mehr Leistung durch die horizontal polarisierte Strahlung eingekoppelt. Ebenso bei Antenne 3 bei Bestrahlung mit 2,98 GHz in beiden Abständen zwischen Sendeantenne und Testplatine (1 m und 0,5 m) sowie bei Antenne 4 bei der Frequenz 2,95 GHz in 1 m Abstand konnte in horizontaler Polarisation eine höhere Leistungseinkopplung verzeichnet werden. Ansonsten liegen die Leistungswerte, die bei gleicher Feldstärke in vertikaler Polarisation gemessen wurden, höher.

Diese Unterschiede in den Ergebnissen zwischen horizontaler und vertikaler Polarisation können mit den Abmessungen der Antennen der Testplatine erklärt werden. Diese sind in Abbildungen 8 und 9 in Kapitel 3.1 zu sehen. In diesem Kapitel wurden ebenfalls die Abmessungen beschrieben. Die Abbildungen zeigen die Ausrichtung der Testplatine, in welcher sie auch bestrahlt wurde. Bei Antennen 1 und 2 ist ersichtlich, dass die längere Abmessung der Antenne, welche zum Frequenzbereich der Bestrahlung passt, ebenfalls vertikal ausgerichtet ist. Antennen 3, 4 und 5 weisen hingegen eine quadratische Fläche auf. Sie sollten daher in beiden Polarisationen ähnliche Eigenschaften aufweisen. Dies konnte allerdings nicht beobachtet werden. Ein Unterschied ist allerdings, dass die Zuleitung zum SMA-Anschluss in vertikaler Richtung verläuft. Diese Zuleitung könnte also die Abmessung in vertikaler Richtung vergrößern und so die höhere Leistungseinkopplung erklären.

#### **5.1.4. Vergleich zwischen den Testantennen**

In diesem Abschnitt sollen die verschieden aufgebauten Platinen verglichen werden. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, sind die passiven Antennen auf der Testplatine durch unterschiedliche Konzepte der Leiterplatten-Auslegung gekennzeichnet. Nun soll analysiert werden, bei welcher der Strukturen mehr Leistung eingekoppelt werden konnte.

Wie Tabelle 3 entnommen werden kann, wurden alle Antennen bei den Frequenzen 1 GHz, 1,3 GHz, 1,575 GHz, 1,9 GHz und 2,5 GHz bestrahlt. Bei diesen Frequenzen wird ein Vergleich zwischen den eingekoppelten Leistungen bei gleichen Feldstärken vollzogen. Dabei werden die Messreihen in vertikaler und horizontaler Polarisation bei Bestrahlung im Abstand von 1 m verwendet.

Bei 1 GHz wurde in beiden Polarisationen bei Antenne 4 die meiste Leistung eingekoppelt, gefolgt von Antenne 1.

Bei der Bestrahlung mit einer Frequenz von 1,3 GHz konnte bei horizontaler Polarisation der Sendeantenne in Antenne 4 am meisten Leistung eingekoppelt werden, bei vertikaler Polarisation hingegen in Antenne 3.

Bei der angestrebten L1-/E1-Frequenz von 1,575 GHz konnte durch die Bestrahlung in beiden Polarisationen bei Antenne 3 die höchste eingekoppelte Leistung gemessen werden.

Bei 1,9 GHz wurde in beiden Polarisationsrichtungen in Antenne 1 die meiste Leistung eingekoppelt.

Bei der letzten zum Vergleich genutzten Frequenz von 2,5 GHz wurde durch horizontal polarisierte Bestrahlung in Antenne 4 die höchsten Leistungswerte festgestellt. Die Werte der vertikal polarisierten Bestrahlung sind weniger eindeutig, Antennen 3 und 4 erreichen die höchsten Werte, dicht gefolgt von Antenne 1.

Demnach dienen Antennen 2 und 5 insgesamt am schlechtesten und Antennen 1, 3 und 4 als Empfangsantennen und für die Einkopplung elektromagnetischer Strahlung. Die guten Empfangseigenschaften von Antennen 3 und 4 können mit ihrem Aufbau als Patch-Antenne erklärt werden. Außerdem weisen sie die niedrigsten  $S_{11}$ -Parameter auf, wie Tabelle 2 entnommen werden kann, und versprechen anhand dieser Messung eine bessere Eignung als Empfangsantennen.

Auch Antenne 1 kann als Patch-Antenne angesehen werden. Dabei handelt es sich um einen rechteckigen, lang gezogenen Patch, der mit 3 mm eine deutlich höhere Breite aufweist als Antenne 2 mit einer Breite von 0,25 mm. Außerdem befindet sich die Massefläche bei Antenne 1 auf der untersten der vier Lagen. Dadurch bildet sich eine dickere Substrat-Schicht, welche die Eigenschaften als Patch-Antenne positiv beeinflussen könnte.

Antenne 5 unterscheidet sich von Antenne 4 durch die Verbindungen (Vias) zwischen den beiden Kupferflächen. Außerdem befindet sich eine dünne Leiterbahn auf der ersten Lage, worüber die Leistung abgeführt wird. Für diese Konfiguration wurden bei den Messungen schlechte Eigenschaften der Leistungseinkopplung festgestellt.

### 5.1.5. Vergleich zwischen den genutzten Frequenzen

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, welchen Einfluss die Wahl der Frequenzen zur Bestrahlung beiträgt. Dabei wird vor allem analysiert, ob bei den Frequenzen, die bei der Messung der  $S_{11}$ -Parameter ausgewählt wurden, mehr Leistung eingekoppelt wird als bei anderen. Für jede Antenne wurden drei Frequenzen ermittelt, bei denen der  $S_{11}$ -Parameter einen vergleichsweise niedrigen dB-Wert angenommen hat, siehe Tabelle 2 in Kapitel 3.1. Bei den anderen Frequenzen lag der Wert des  $S_{11}$ -Parameters entsprechend höher. Wie in Kapitel 3.1 bereits erläutert, wird die Vermutung aufgestellt, dass die Antennen bei den ausgewählten Frequenzen bessere Empfangseigenschaften aufweisen und daher auch mehr Leistung eingekoppelt wird als bei Frequenzen mit höherem  $S_{11}$ -Parameter. Diese These wird im Folgenden untersucht.

Tabelle 5 zeigt für jede Antenne in den genutzten Polarisierungen und Abständen die Frequenz, bei der am meisten Leistung eingekoppelt werden konnte. Um dies zu analysieren, wurden die Messreihen mithilfe des Python-Skripts graphisch dargestellt und bei gleicher gemessener Feldstärke die eingekoppelte Leistung verglichen. Abbildung 24 zeigt für Antenne 4 bei der Bestrahlung in vertikaler Polarisation im Abstand von 0,5 m den Vergleich zwischen allen genutzten Frequenzen. Um die eingekoppelten Leistungen in dBm (auf der Ordinate) zwischen den Messungen vergleichen zu können, werden die Werte bei einer elektrischen Feldstärke von etwa 85 V/m (auf der Abszisse) betrachtet. Bei dieser Feldstärke liegen Messdaten von allen Kurven vor. Dabei ist leicht festzustellen, dass bei einer Frequenz von 1,45 GHz (grüne Kurve) bei gleichen Feldstärken mehr Leistung eingekoppelt wurde, als bei anderen Frequenzen.

Die Messung des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 4 ist in Abbildung 34 zu sehen. Die Frequenz von 1,45 GHz besitzt im Gegensatz zu anderen Frequenzen zwischen 1 GHz und 2 GHz einen auffällig niedrigen  $S_{11}$ -Wert. Daher ist diese Frequenz auch in Tabelle 2 gelistet.

In Tabelle 5 sind die Frequenzen, bei denen am meisten Leistung eingekoppelt wurde und die zuvor aufgrund des  $S_{11}$ -Parameters für die Bestrahlung ausgesucht wurden, grün hinterlegt.

Das Vorgehen wie am Beispiel von Abbildung 24 wurde für alle Bestrahlungen der Antennen wiederholt und in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Frequenzen mit der höchsten Leistungseinkopplung

| Art der Bestrahlung       | Antenne 1 | Antenne 2 | Antenne 3 | Antenne 4           | Antenne 5 |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|-----------|
| 1 m Abstand, horizontal   | 1 GHz     | 1,575 GHz | 2,98 GHz  | 1,45 GHz & 2,95 GHz | 3,27 GHz  |
| 0,5 m Abstand, horizontal | 1 GHz     | 1 GHz     | 1,47 GHz  | 2,95 GHz            | 3,27 GHz  |
| 1 m Abstand, vertikal     | 1,3 GHz   | 2,8 GHz   | 1,47 GHz  | 1,45 GHz            | 2,8 GHz   |
| 0,5 m Abstand, vertikal   | 1 GHz     | 2,8 GHz   | 1,47 GHz  | 1,45 GHz            | 2,8 GHz   |

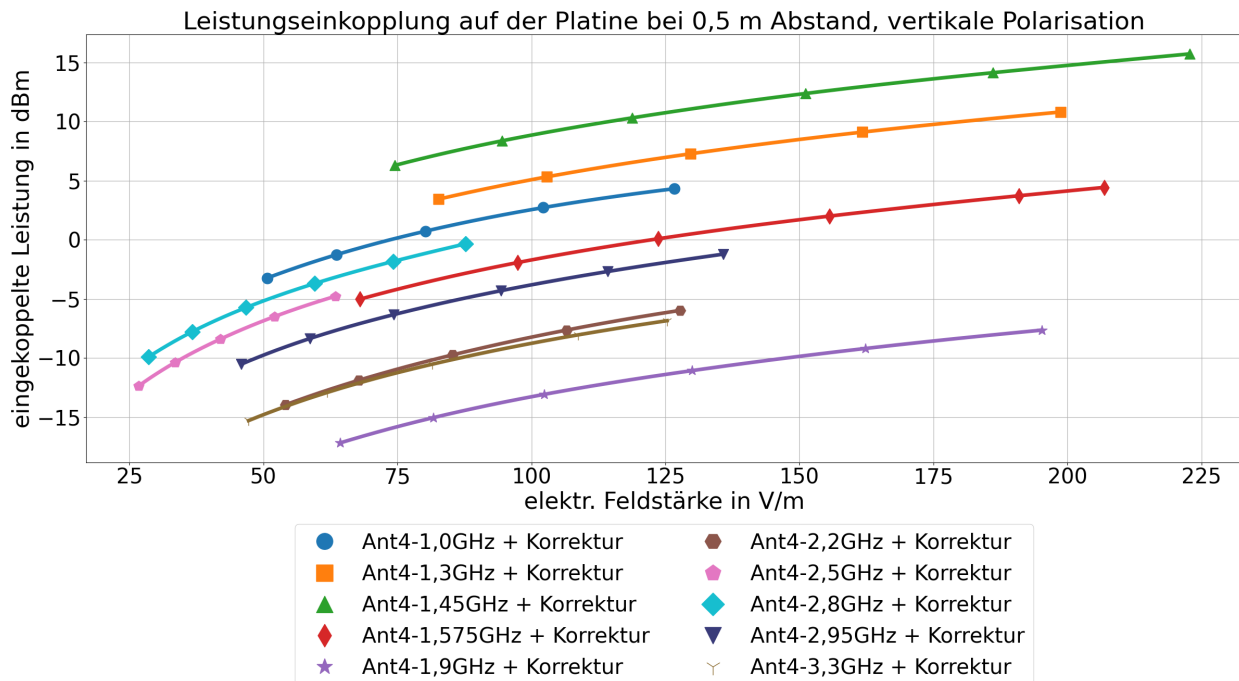


Abbildung 24: Vergleich aller Frequenzen bei Antenne 4

Bei Antennen 3 und 4 wurden jeweils bei einer zuvor ausgewählten Frequenz mit niedrigem  $S_{11}$ -Parameter die höchsten Leistungswerte gemessen. Bei Antenne 5 war dies bei zwei Messreihen der Bestrahlung der Fall und bei Antenne 1 nur noch einmal. Bei Antenne 2 konnte kein einziges Mal bei einer Frequenz aus Tabelle 2 die höchste Leistungseinkopplung festgestellt werden. In Tabelle 2 ist zu sehen, dass Antennen 3 und 4 im Vergleich zu den anderen Antennen insgesamt deutlich niedrigere Werte für den  $S_{11}$ -Parameter erreichen. Daher werden für diese Antennen die besten Empfangseigenschaften bei den untersuchten Frequenzen erwartet. Auch wurde in Abschnitt 5.1.4 festgestellt, dass Antennen 3 und 4 die besten Empfangsantennen darstellen. Damit ist nachvollziehbar, dass für diese Antennen die Vermutung bestätigt werden konnte. Antenne 5 besitzt bei 3,27 GHz mit -5,2 dB einen im Vergleich zu den anderen Frequenzen geringeren  $S_{11}$ -Wert. Insgesamt sind die gemessenen Werte bei Antennen 1, 2 und 5

jedoch nicht niedrig genug, um wirklich gute Empfangseigenschaften zu versprechen, auch bei den in Tabelle 2 aufgelisteten Frequenzen. Daher konnte hier die Erwartung nicht erfüllt werden und die Empfangseigenschaften sind weniger gut, wie auch in Abschnitt 5.1.4 untersucht wurde.

#### **5.1.6. Beurteilung der physischen Einflüsse auf die Platine**

Insgesamt konnte keine physische Zerstörung oder Deformation der Platinen festgestellt werden. Die Werte der eingekoppelten Leistungen befinden sich im geringen Watt-Bereich. Die Leistung wurde in der logarithmischen Einheit dBm erfasst. Die Umrechnung von dBm zu Watt erfolgt mithilfe von Gleichung (5.1). Bei den meisten Messungen lag der Wert der eingekoppelten Leistung niedriger als 0 dBm. 0 dBm sind umgerechnet 0,001 W. Als höchste eingekoppelte Leistung wurden 18,97 dBm bei der Bestrahlung von Antenne 3 mit einer Frequenz von 1,47 GHz im Abstand von 0,5 m erreicht. Dies entspricht circa 0,079 W.

$$P[W] = 10^{\frac{P[dBm]}{10}} \cdot 10^{-3}[W] \quad (5.1)$$

#### **Erfassung der erzeugten Wärme**

Um festzustellen, ob die Platine durch die Bestrahlung erhitzt wird, wurde eine Wärmebildkamera eingesetzt. Dabei handelt es sich um das Modell "Ti25" von Fluke. Mit dieser wurde die Temperatur der Platine vor und unmittelbar nach der Bestrahlung gemessen. Dafür wurde eine Antenne und Frequenz gewählt, bei der viel Leistung eingekoppelt wurde, um möglichst deutliche Ergebnisse zu erhalten. Die Wahl fiel dabei auf Antenne 3 und eine Bestrahlung mit einer Frequenz von 1,47 GHz im Abstand von 0,5 m. Wie zuvor erwähnt, wurde bei diesen Einstellungen am meisten Leistung eingekoppelt. Außerdem befindet sich bei Antenne 3 die oberste leitende Schicht auf der ersten Lage der vierlagigen Platine. Daher lässt sich die Wärme bei dieser Antenne besser erfassen, als auf einer der mittleren Lagen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Messungen, bei denen es nur um den Wert der eingekoppelten Leistung ging, wurde die Platine über einen längeren Zeitraum bestrahlt. Zunächst für 10 min und anschließend für 20 min. Allerdings konnte keine gezielte Erwärmung der Kupferfläche der Antenne auf der Testplatine festgestellt werden.

Insgesamt konnte demnach keine physische Beeinflussung der Leiterbahnen festgestellt werden.



### 5.1.7. Untersuchung der Unsicherheit der Feldsonde

In diesem Kapitel wird die Unsicherheit der verwendeten Narda Feldsonde zur Messung elektrischer Feldstärken innerhalb der Kammer untersucht. Die Feldsonde und die damit gemessenen Feldstärken sollen als Referenz und Basis der Vergleichbarkeit für die Messungen dienen. Allerdings ist während der Messungen und deren Auswertung aufgefallen, dass die gemessenen Feldstärken, trotz gleicher Einstellungen aller Messgeräte, durchaus variieren können.

Dabei muss bedacht werden, dass nicht auszuschließen ist, dass sich die Positionierung der Feldsonde über den Verlauf der Messungen leicht geändert hat. Zum einen musste die Position leicht verändert werden, wenn die angeschlossene Antenne auf der Platine gewechselt wurde. Zum anderen konnten die Messungen aufgrund ihrer Dauer nicht unmittelbar nacheinander durchgeführt werden, weshalb der Aufbau ab- und wieder neu aufgebaut werden musste. Trotz gemessener Abstände ist es nicht auszuschließen, dass sich die Positionierung der Feldsonde zur Sendeantenne sowie zur Testplatine in Winkel und Abstand verändert hat.

Aus diesen Gründen stellt sich die Frage, welchen Unsicherheiten die aufgezeichneten Messpunkte unterliegen. Um die Zuverlässigkeit der Feldsonde zu prüfen, wurde ein einfacher Testaufbau ohne Testplatine herangezogen, bei dem die Positionsabhängigkeit der Feldsonde bestätigt werden konnte. Wie Abbildung 25 zeigt, wurde die Feldsonde zunächst zentral vor die Sendeantenne gestellt. Der Abstand zwischen Feldsonde und Antenne beträgt in der Ausgangsposition 1 m. Außerdem befinden sich Antenne und Feldsonde auf der gleichen Höhe von 130 cm über dem Boden, wie es auch während der Messungen der Fall war. Anschließend wurden leichte Änderungen in der Position oder Ausrichtung der Sonde durchgeführt:

- Drehung der Sonde um  $10^\circ$  nach rechts und links (um die senkrechte Achse) ausgehend von der geraden Ausgangsposition ( $0^\circ$  Drehung)
- Änderung der Höhe um 5 cm nach unten, ohne Drehung
- Verschiebung der Sonde um 5 cm nach links und rechts aus der Ausgangsposition, ohne Drehung



Abbildung 25: Untersuchung der Feldsonde, Ausgangsposition

In diesen verschiedenen Positionen wurde die Feldsonde bestrahlt und die gemessenen Feldstärken in den unterschiedlichen Positionierungen analysiert. Als Frequenz für die Bestrahlung wurde 1 GHz als niedrigste verwendete Frequenz ausgewählt. Um zusätzlich eine höhere Frequenz zu testen, wurden die Messungen mit 2,8 GHz wiederholt. Die Einstellungen am Signalgenerator und Verstärker blieben unverändert, damit bei der jeweiligen Frequenz immer die gleiche Leistung abgestrahlt wird.

Zuletzt wurde die Sendeantenne bei jeder Messung sowohl in horizontaler als auch vertikaler Polarisation verwendet.

In Tabelle 8 im Anhang sind die genauen Ergebnisse aufgelistet. In dieser sind die gemessenen Feldstärken in V/m zu den verschiedenen Positionierungen der Feldsonde zugeordnet. Außerdem wird zwischen den beiden untersuchten Frequenzen und der Polarisation der Sendeantenne unterschieden.

Bei der Bestrahlung mit 1 GHz liegt eine Differenz von 2,68 V/m zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert der Feldstärke. Die höchste Abweichung vom Durchschnittswert (36,32 V/m) liegt bei 1,62 V/m. Bei der Bestrahlung mit einer Frequenz von 2,8 GHz sind die Schwankungen deutlich größer. Die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wert liegt bei 15,49 V/m. Die höchste Abweichung vom Durchschnittswert (49,48 V/m) liegt bei 12,71 V/m.

Die Abweichung zwischen den Werten der beiden Frequenzen lässt sich mit der zusätzlichen Frequenzabhängigkeit des Verstärkers begründen.

Bei der exemplarischen Untersuchung wurde tendenziell in vertikaler Polarisation der Sendean-  
tenne eine höhere Feldstärke gemessen. Zusätzlich wurden die notierten, erzeugten Feldstärken  
während den zuvor durchgeführten Bestrahlungen der Testplatine analysiert. Dabei konnte die-  
ser Trend nicht festgestellt werden. Hier war das Verhältnis, ob bei vertikaler oder horizontaler  
Polarisation eine höhere Feldstärke erzeugt wurde, ausgeglichen.

Letztendlich ist die Verwendung der Feldsonde als Referenz für den Vergleich der verschiedenen  
Messungen kritisch zu bewerten. Die erstellten Messkurven werden daher nur qualitativ betrach-  
tet und nicht quantitativ. Eine Zuordnung von exakter eingekoppelter Leistung zu gemessener  
elektrischer Feldstärke wäre keine reproduzierbare Größe, sondern auch abhängig von der  
Position und Ausrichtung der Feldsonde. Gerade die hier festgestellten Abweichungen bei der  
höheren Frequenz würden zu großen Unsicherheiten in quantitativen Aussagen führen.

## 5.2. Bestrahlung der Sensoren

### 5.2.1. Inertiale Messeinheit

Bei der Bestrahlung der inertialen Messeinheit konnte bei einigen Frequenzen eine Störung des Systems anhand des aufgezeichneten Messsignals festgestellt werden. Für die drei Sensoren der IMU wurde ein Skript geschrieben, dass die Messwerte über die Zeit aufnimmt und graphisch darstellt. Die Entwicklung dieses Skripts ist ebenso wie die Inbetriebnahme der IMU nicht Teil dieser Arbeit. Das Skript wurde dafür genutzt, die Funktionalität der Sensoren während der Bestrahlung zu überwachen und Störungen aufzuzeichnen. Anschließend wurde ein weiteres Skript zur Auswertung entworfen, mithilfe dessen die Messergebnisse im Rahmen der Arbeit analysiert werden können.

Eine permanente Störung der Sensoren oder eine physische Beschädigung der Platine konnte nicht erzeugt werden. Daher werden in der Auswertung der Messergebnisse nur die Störungen aufgrund der Bestrahlung erläutert.

Tabelle 6 zeigt, bei welchen Frequenzen und welchen Feldstärken eine Störung festgestellt werden konnte. In der linken Spalte sind alle Frequenzen aufgelistet, bei denen eine Störung aufgetreten ist. Dazu wird unterschieden, ob dies bei horizontaler oder vertikaler Polarisation der Sendeantenne der Fall war. Durch einen Haken in der zweiten oder vierten Spalte wird eine erfolgreiche Störung gekennzeichnet. Mit der Feldsonde wurde überprüft, welche elektrischen Feldstärken am Ort des EUT während der Bestrahlung herrschten. Die eingetragenen Feldstärken in Tabelle 6 sind die niedrigsten Feldstärken, ab welchen schon eine Störung verzeichnet werden konnte.

Wurde die Verstärkung des Signals zur Bestrahlung weiter erhöht, nahm auch die gemessene Feldstärke zu und die Störung wurde ebenfalls deutlicher. Dies wird auf Abbildung 26 deutlich.

Tabelle 6: Störung der inertialen Messeinheit

| Frequenz [MHz] | horizontale Polarisation | Feldstärke [V/m] | vertikale Polarisation | Feldstärke [V/m] |
|----------------|--------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| 350            | ✓                        | 14,8             | ×                      | —                |
| 375            | ✓                        | 10,8             | ×                      | —                |
| 400            | ✓                        | 29,6             | ✓                      | 82               |
| 500            | ×                        | —                | ✓                      | 107              |
| 790            | ×                        | —                | ✓                      | 105,4            |
| 850            | ×                        | —                | ✓                      | 72               |
| 900            | ×                        | —                | ✓                      | 92               |

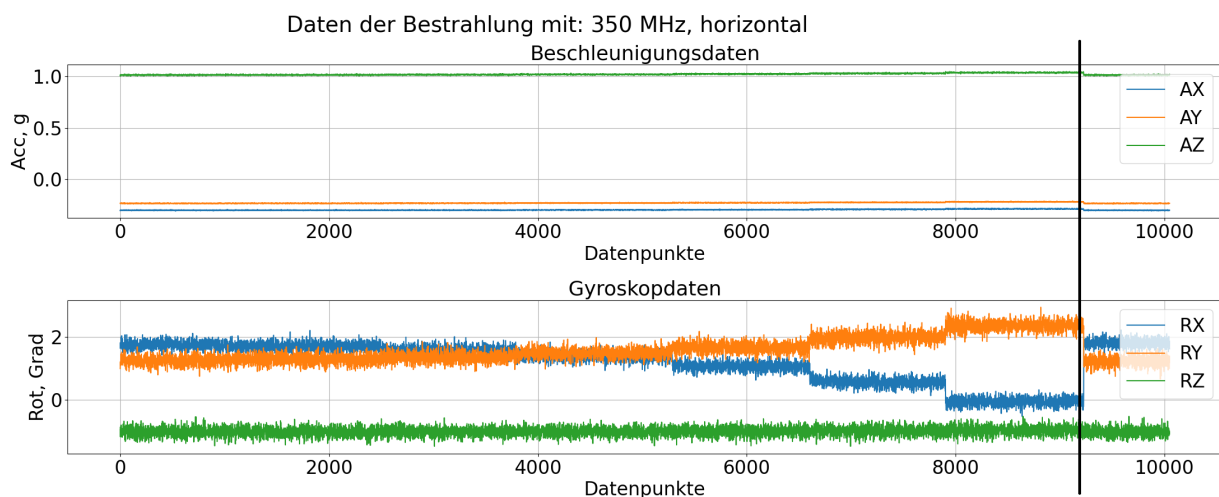


Abbildung 26: Aufzeichnung gestörter Messdaten der IMU

Abbildung 26 zeigt eine Aufnahme der Messdaten der IMU während der Bestrahlung mit einer Frequenz von 350 MHz in horizontaler Polarisation der Sendeantenne. Im oberen Diagramm sind die Ausgangswerte der Beschleunigungssensoren in der x-Achse (grün), y-Achse (orange) und z-Achse (blau) dargestellt. Das zweite Diagramm zeigt die Daten der Drehratensensoren für die x-Achse (blau), y-Achse (orange) und z-Achse (grün). Die Daten des Magnetometers werden nicht dargestellt, da dieses nicht verwendet wurde.

Wie Tabelle 6 entnommen werden kann, wurde bei 350 MHz in horizontaler Polarisation die erste Störung bei einer Feldstärke von 14,8 V/m festgestellt. Anschließend wurde die Bestrahlung in fünf weiteren Stufen erhöht und erreichte am Ende einen Wert von 28,9 V/m. In Abbildung 26 sind die insgesamt sechs Stufen der Bestrahlung anhand der Gyroskopdaten gut zu erkennen. Während die Daten für Rotation um die z-Achse unverändert bleiben, werden die Daten für die Rotation um die x- und y-Achse zunehmend gestört. Die Störung äußert sich in diesem Fall durch einen Versatz in den Messdaten. Dieser Versatz nimmt mit zunehmender Feldstärke zu.

Die Beschleunigungsdaten werden in allen drei Achsen gestört. Diese Störung äußert sich ebenfalls als Versatz, ist aber in Abbildung 26 nur leicht zu erkennen.

Unmittelbar nach der eingefügten vertikalen Abtrennung ist der Verlauf der Messdaten nach dem Abschalten der Bestrahlung zu sehen. Die Störung geht unmittelbar zurück und die Sensordaten nehmen die ursprünglichen Werte an. Auch absichtliche Bewegungen des Sensors werden wieder korrekt erkannt und ausgegeben. Eine permanente Störung konnte also nicht verursacht werden.

Die Störungen bei anderen Frequenzen und Polarisationen zeigen ein vergleichbares Bild, wie das in Abbildung 26 gezeigte und erläuterte: Es wurden ebenfalls leichte Abweichungen in den Messdaten aller drei Achsen der Beschleunigungssensoren festgestellt. Auch beschränkten sich die Abweichungen in den Daten des Gyroskops auf die Werte für die x- und y-Achse und die Daten für die z-Achse blieben unverändert.

Nur bei einer Messung konnte eine abweichender Verlauf der Störung beobachtet werden, dieser ist in Abbildung 27 zu sehen. Bei der Bestrahlung mit einer Frequenz von 375 MHz in horizontaler Polarisation der Sendeantenne wurden die Beschleunigungsdaten der x-Achse (blau) und die Gyroskopdaten für die y-Achse (orange) mit einem Rauschen überlagert.

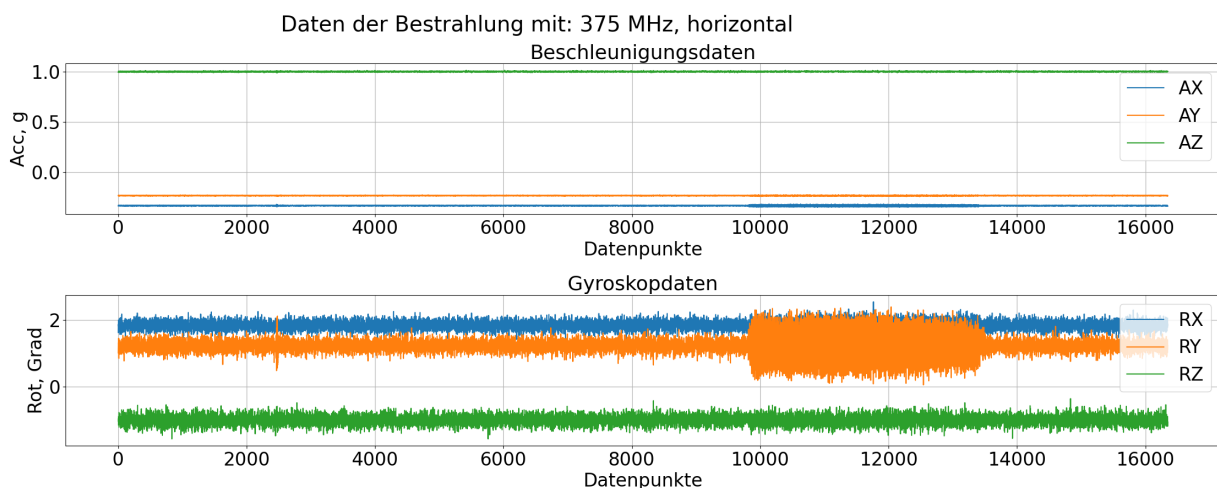


Abbildung 27: Störung der IMU bei 375 MHz, horizontal

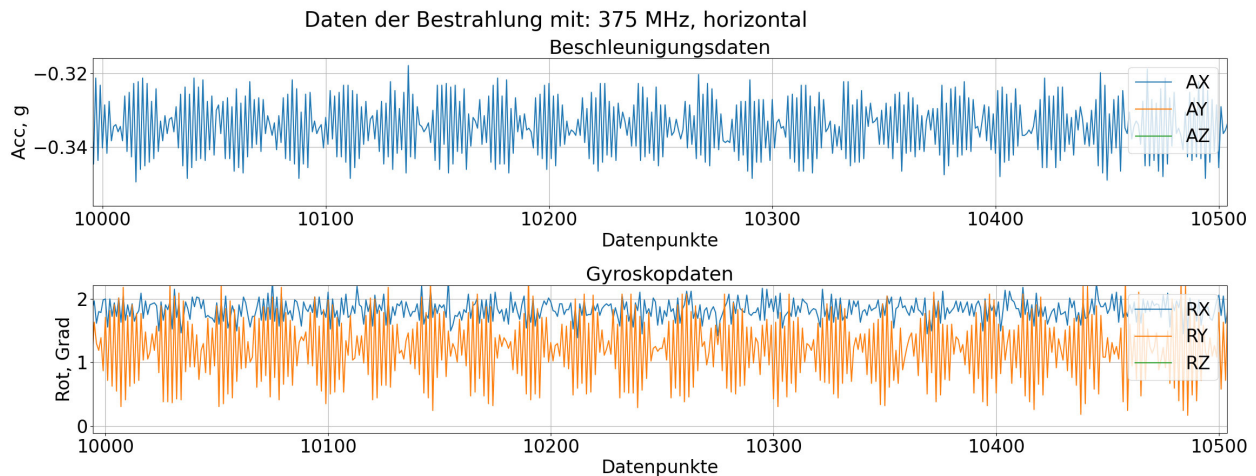


Abbildung 28: Störung der IMU bei 375 MHz, horizontal - Detailaufnahme

Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt der Störung aus Abbildung 27. Hier ist zu erkennen, dass die Struktur der Messdaten gegenüber den ungestörten Daten verändert wurde. In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass die Störung eine periodische Struktur aufweist. Zwischen Datenpunkten 10200 und 10300 auf der horizontalen Achse wiederholt sich das Schema der Störung etwas mehr als vier mal. Da die Aufnahme mit 10 Hz erfolgt ist, entspricht das betrachtete Fenster 10 sek. Somit liegt die Wiederholfrequenz bei circa 0,4 Hz.

Zuletzt stellt sich die Frage, wie genau die Störungen der Sensoren zustande gekommen sind und warum bei den in Tabelle 6 aufgelisteten Frequenzen eine Störung verursacht werden konnte und bei anderen Frequenzen nicht.

Um Frequenzen zu ermitteln, die während des Betriebs von der IMU ausgehen, wurde eine Emissionsmessung durchgeführt. Die logarithmisch-periodische Antenne sowie die Hornantenne können ebenfalls als Empfangsantenne eingesetzt werden. Dafür bleiben sie in der gleichen Positionierung, aber werden mit einem EMV-Messempfänger verbunden, anstatt mit einem Signalgenerator. Abbildungen 29 und 30 zeigen die Aufnahmen der gemessenen Emissionen mit dem EMV-Messempfänger "ESR26" der Firma Rhode&Schwarz. Die in Abbildung 29 gezeigte Messung wurde mithilfe der logarithmisch-periodischen Antenne über den Frequenzbereich von 250 MHz bis 1,5 GHz in horizontaler Polarisation durchgeführt. Abbildung 30 ergänzt dies in vertikaler Polarisation.

Abbildungen 36 und 37 im Anhang zeigen Leermessungen in der EMV-Kammer mit den gleichen Einstellungen und der gleichen Positionierung der Antenne. Dabei befand sich die IMU nicht in Betrieb. So kann sichergestellt werden, dass die gemessenen Emissionen tatsächlich von der



IMU oder dem angeschlossenen “STM32” kommen. Zwar ist das “STM32”-Board mithilfe von Alufolie abgeschirmt, vgl. Abbildung 18, jedoch kann durch Öffnungen in der Abschirmung für die IMU und die Kabel nicht ausgeschlossen werden, dass von diesem nicht auch Abstrahlungen erfolgen.

Die Abbildungen zeigen die aufgenommenen Emissionsspektren. Auf der horizontalen Achse ist der Frequenzbereich in logarithmischer Skalierung von 250 MHz bis 1,5 GHz aufgetragen. Auf der vertikalen Achse ist der Pegel der gemessenen Abstrahlung in dBm zu sehen. Die Frequenzen mit den höchsten Pegeln sind mit Markern versehen. In einer Tabelle unterhalb des aufgezeichneten Spektrums sind diese mitsamt Frequenz und Leistungspegel aufgelistet.

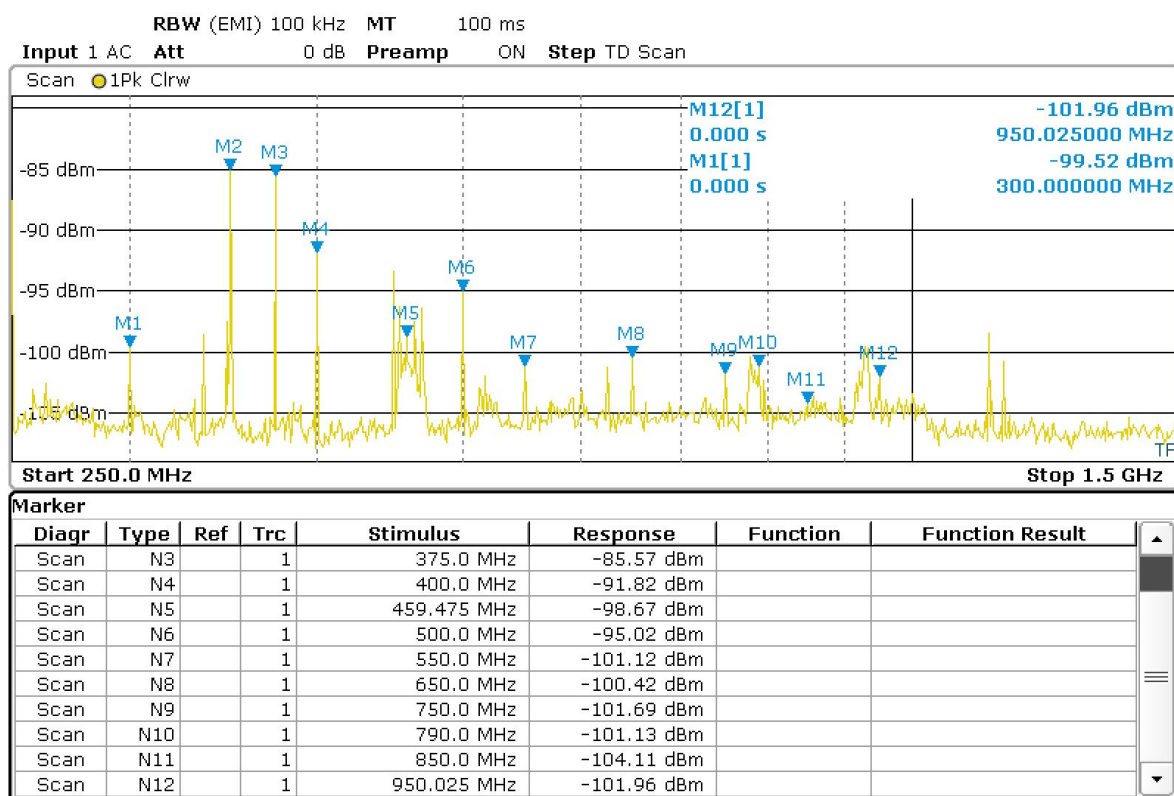


Abbildung 29: Abstrahlung der IMU bei 250 MHz–1,5 GHz, horizontal

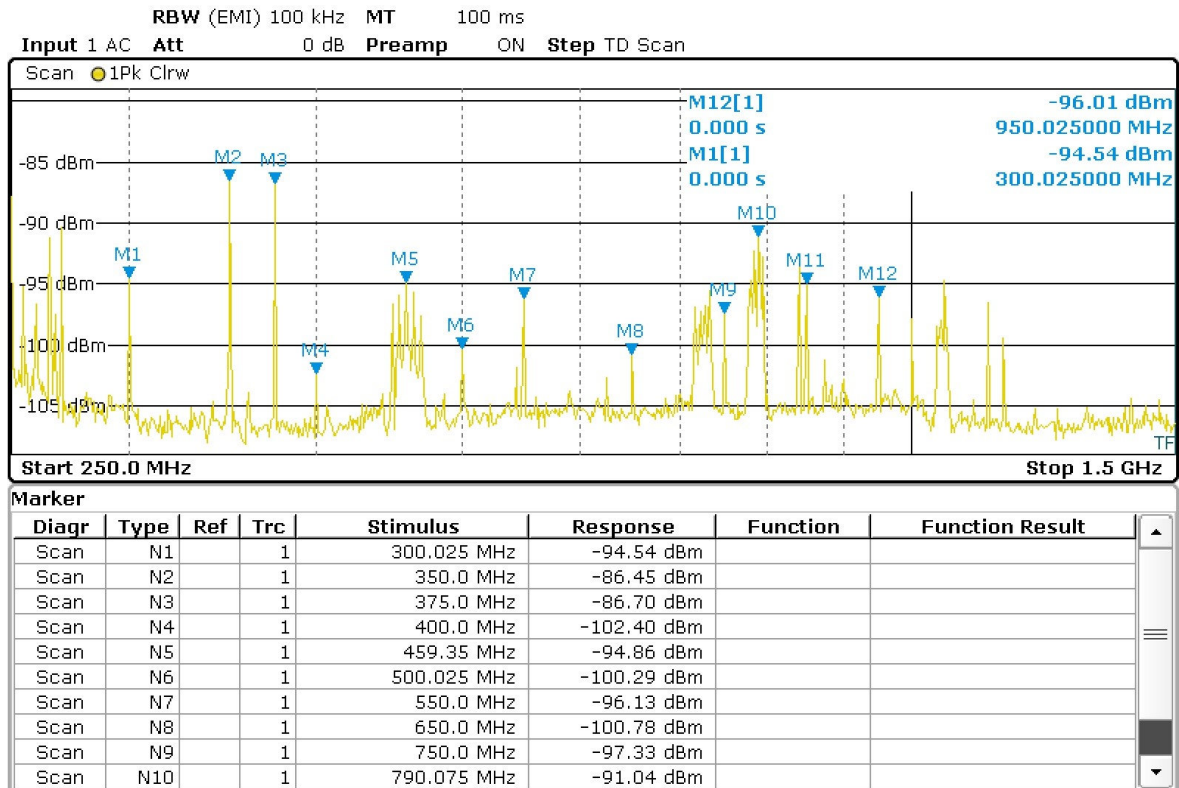


Abbildung 30: Abstrahlung der IMU bei 250 MHz–1,5 GHz, vertikal

Die hohen Pegel bei bestimmten Frequenzen können auf mehrere Aussagen hindeuten. Eine Möglichkeit ist, dass der Sensor bei genau diesen Frequenzen arbeitet und es sich um eine Taktfrequenz eines Bauteils handelt. Eine andere Möglichkeit ist, dass es sich dabei um Harmonische von niedrigeren Taktfrequenzen handelt, die aber bis in höhere Frequenzbereiche zu sehen sind. Im Datenblatt [37] der IMU können keine passenden Frequenzen gefunden werden. Im Datenblatt [48] des “STM32”-Boards wird hingegen angegeben, dass die Ethernet-Verbindung mit einem 50 MHz-Oszillator arbeitet. Da die Daten der IMU über eine Ethernet-Verbindung an den angeschlossenen Laptop übertragen werden, ist es naheliegend, dass hier der Grund für die Abstände von 50 MHz zwischen einigen der Frequenzen liegt, vgl. Abbildungen 29 und 30. Dies könnte darauf hindeuten, dass durch die Bestrahlung die Übertragung gestört werden könnte, obwohl das verwendete Ethernet-Kabel geschirmt ist. Was allerdings gegen diese Erklärung spricht, ist, dass nicht alle übertragenen Daten beeinflusst wurden. Wie zuvor beschrieben, blieben die Daten des Gyroskops für die z-Achse bei allen Bestrahlungen unberührt. Eine Störung der Kommunikation über Ethernet würde eine Störung aller Datenströme zur Folge haben. Daher gilt es zu klären, ob die Störungen auf eine Einkopplung in die Datenleitung zurückzuführen sind, oder durch andere Effekte hervorgerufen wurden, von denen das Gyro-

skop für die z-Achse nicht betroffen war. Ein weiterer denkbarer Effekt wäre beispielsweise die Störung der Sensoren, welche auf einem kapazitiven Funktionsprinzip basieren (siehe Abschnitt 3.2), durch die erzeugten elektromagnetischen Felder.

Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass in horizontaler Polarisation eine Störung bei den Frequenzen 350 MHz, 375 MHz und 400 MHz verursacht werden konnte. Diese Frequenzen werden mit den gemessenen Leistungspegeln verglichen, welche in Abbildung 29 zu sehen sind. Bei den Markern M2, M3 und M4 sind die höchsten Pegel zu erkennen. Diese entsprechen den Frequenzen M2: 350 MHz, M3: 375 MHz und M4: 400 MHz. Die Pegel bei 350 MHz und 375 MHz sind dabei deutlich höher als bei 400 MHz. Dies geht damit einher, dass bei diesen Frequenzen eine Störung verursacht werden konnte. Außerdem wurde bei der Bestrahlung mit 400 MHz eine annähernd doppelt so große Feldstärke benötigt, um eine Störung in den Sensordaten hervorzurufen, vgl. Tabelle 6. Bei den Frequenzen mit noch niedrigeren Pegeln reicht hingegen die erzeugte Feldstärke nicht aus für das Erzeugen einer Störung.

Für die Bestrahlung in vertikaler Polarisation konnte bei den Frequenzen 400 MHz, 500 MHz, 790 MHz, 850 MHz und 900 MHz eine Störung der IMU erreicht werden, vgl. Tabelle 6. In Abbildung 30 sind diese Frequenzen auch in der Emissionsmessung zu finden: Marker M4: 400 MHz, M6: 500 MHz, M10: 790 MHz, M11: 850 MHz. 900 MHz sind nicht extra markiert, sondern liegen auf der gestrichelten Linie zwischen Marker M11 und M12 und es ist kein besonders hoher Pegel erkennbar. Hier sind trotz der deutlich höheren Pegel bei 350 MHz und 375 MHz keine Störungen bei diesen Frequenzen festgestellt worden, stattdessen aber auch bei Frequenzen mit niedrigeren abgestrahlten Leistungen. Dabei ist zu beachten, dass deutlich höhere Feldstärken für die Erzeugung einer Störung benötigt wurden, wie Tabelle 6 zu entnehmen ist.

### **5.2.2. GNSS-Antenne**

#### **Erster Aufbau: Bestrahlung der Empfangseinheit mit Kabel**

Wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, wurde die Empfangsantenne beim ersten Aufbau außerhalb der Absorberkammer platziert. So konnten Satelliten-Signale empfangen werden. Diese werden zur Verarbeitung über ein Antennenkabel an die Empfangseinheit weitergeleitet, welche sich innerhalb der Kammer befindet. Die empfangenen und verarbeiteten Daten können während der Messung von einem Laptop außerhalb der Kammer verfolgt werden.

Bei der Bestrahlung konnte festgestellt werden, dass die Übertragung der Daten schon bei geringen Feldstärken gestört und sogar völlig unterbrochen werden kann. Zu den ausgegebenen Daten gehört die Uhrzeit, die Position sowie Parameter, die eine Aussage über die Qualität der

Verbindung ermöglichen. Dazu gehört die Anzahl der Satelliten, von der die Antenne Signale empfängt und ein weiterer Qualitätsfaktor, die Horizontal Dilution Of Precision (HDOP). Je geringer dieser Wert ist, desto geringer ist die Unsicherheit der Positionsdaten in horizontaler Ebene. Im normalen Betrieb sollte der Wert unter 1 liegen. [28, 38]

Schon bei geringen aufgebrachten Feldstärken konnte beobachtet werden, dass die Qualität der Daten abnimmt. Mit einer weiteren Erhöhung der Bestrahlungsleistung konnte die Datenübertragung völlig unterbunden werden. Eine vollständige Unterbrechung konnte schon ab Feldstärken von 7–8 V/m festgestellt werden. Dies war sowohl für die Bestrahlung in horizontaler als auch in vertikaler Polarisation der Fall. Das schon geringe Feldstärken für eine Störung ausreichen, lässt sich damit erklären, dass die Empfänger für GNSS-Signale sehr empfindlich sind, wie in Abschnitt 3.2 erläutert.

Wurde die Bestrahlung allerdings beendet, so wurde nach kurzem Warten der ursprüngliche Datenstrom mit hoher Qualität wieder hergestellt.

Abbildung 31 zeigt die Daten, die von der GNSS-Einheit empfangen wurden und während der Bestrahlung überwacht werden konnten.

Im Datenblatt des GNSS-Moduls [38] sind die Datenformate erläutert. Sie basieren auf dem Standard der National Marine Electronics Association (NMEA). In Abbildung 31 zu sehen sind die Datenformate “GGA” und “RMC”. Die blau umrahmten Daten stellen die Uhrzeit in der Zeitzone der koordinierten Weltzeit dar. Die violetten Kästen enthalten die Positionsdaten. Die Anzahl der genutzten Satelliten ist bei den “GNGGA-Daten” im orangen Rahmen zu sehen und der Qualitätsfaktor HDOP ist rot umrahmt. Bei den “GNRMC-Daten” ist der Status grün umrahmt. “A” steht dabei für gültige Daten und “V” für ungültige Daten. Die weiteren übertragenen Daten sind hier nicht weiter relevant, können aber im Datenblatt nachgelesen werden. [38]

### GNGGA-Daten:

ohne Störung:

```
(74) $GNGGA,084217.000,5218.8462,N,01033.7047,E,2,10,0.84,180.1,M,47.0,M,,*7C
```

mit Störung:

```
(74) $GNGGA,085459.000,5218.8470,N,01033.6849,E,2,03,27.06,84.3,M,47.0,M,,*7F
(74) $GNGGA,085500.000,5218.8468,N,01033.6846,E,2,03,27.05,84.3,M,47.0,M,,*77
(73) $GNGGA,085501.000,5218.8465,N,01033.6844,E,6,2,99.99,84.3,M,47.0,M,,*4C
(39) $GNGGA,085502.000,,,,,0,0,,M,,M,,*5C
(39) $GNGGA,085503.000,,,,,0,0,,M,,M,,*5D
(39) $GNGGA,085504.000,,,,,0,0,,M,,M,,*5A
```

### GNRMC-Daten:

ohne Störung:

```
(72) $GNRMC,084217.000,A,5218.8462,N,01033.7047,E,0.23,269.29,030925,,,D*74
```

mit Störung:

```
(72) $GNRMC,085459.000,A,5218.8470,N,01033.6849,E,0.16,155.60,030925,,,D*7A
(72) $GNRMC,085500.000,A,5218.8468,N,01033.6846,E,0.11,155.60,030925,,,D*76
(51) $GNRMC,085501.000,V,,,,,0.18,155.60,030925,,,E*52
(51) $GNRMC,085502.000,V,,,,,0.72,331.91,030925,,,N*58
(51) $GNRMC,085503.000,V,,,,,0.09,331.91,030925,,,N*55
(51) $GNRMC,085504.000,V,,,,,1.50,144.11,030925,,,N*57
```

Abbildung 31: Empfangene Daten der GNSS-Einheit

Die jeweils oberste Zeile, zur Zeit 08:42:17 Uhr, zeigt beispielhaft wie die Daten im ungestörten Betrieb aussehen. Bei den "GNGGA-Daten" sind 10 genutzte Satelliten zu sehen und die HDOP liegt mit 0.84 bei einem niedrigen Wert – es liegt also eine gute Signalqualität vor.

Die jeweils 6 unteren Zeilen (ab der Zeit 08:54:59 Uhr) zeigen die Signale während der Bestrahlung. Zunächst werden noch Daten übertragen, die jedoch eine verminderte Qualität aufweisen: Die Anzahl der Satelliten nimmt ab und die HDOP steigt erheblich an. Die letzten drei Zeilen bei den "GNGGA-Daten" bzw. letzten vier Zeilen der "GNRMC-Daten" zeigen den unterbrochenen Datenfluss. Bei den "GNRMC-Daten" wird der Status von "A" auf "V" gesetzt.

### **Zweiter Aufbau: Bestrahlung der aktiven Empfangsantenne**

Bei einem zweiten Aufbau wurde nur die Empfangsantenne für GNSS-Signale in der EMV-Kammer platziert und bestrahlt. Dabei soll beobachtet werden, ob die aktive Antenne oder das über ein Antennenkabel angeschlossene Empfangsmodul beschädigt werden können. Die empfangenen Daten der GNSS-Antenne waren von Beginn an ungültig, da die Antenne in der abgeschirmten Kammer keine Signale von Satelliten empfangen kann.

Die Bestrahlung bei der Frequenz von 1575,42 MHz wurde erneut bei niedriger Verstärkung begonnen und bis zum Maximum des Verstärkers bei 30 W erhöht. In horizontaler Polarisation wurde eine Feldstärke von maximal 77 V/m erzeugt und in vertikaler Polarisation eine maximale Feldstärke von 60 V/m. Allerdings konnten keine Auffälligkeiten bei der Empfangsantenne oder dem -Modul festgestellt werden. Trotz der aktiven Bauteile und hohen Empfindlichkeit konnte keine physische Beschädigung oder eine bleibende Beeinträchtigung durch die Bestrahlung verursacht werden.



## 6. Fazit

Zusammenfassend wurden in dieser Arbeit verschiedene Platinen hinsichtlich der Einkopplung elektromagnetischer Strahlung untersucht. Die ausgewählten Testobjekte orientieren sich am Navigationssystem einer Drohne und könnten dort eingesetzt werden.

Anhand einer Testplatine wurden grundlegende Einflüsse auf die Einkopplung elektromagnetischer Strahlung in Platinen untersucht. Für die Analyse der Testplatine wurde ein neu erprobter Messaufbau verwendet, mithilfe dessen die eingekoppelte Leistung auf Platinen ausgewertet werden kann. Dabei wurden verschiedene Abmessungen und Konfigurationen für passive Antennen sowie der Einfluss der genutzten Frequenz auf die Einkopplung von Leistung durch hochfrequente Bestrahlung analysiert.

Resultierende Unterschiede in der Leistungseinkopplung konnten diskutiert werden. Die aufgebrachte Bestrahlung reichte allerdings nicht aus, um physische Veränderungen und Beschädigungen an den Leiterbahnen zu verursachen. Auch eine erhöhte Wärmeentwicklung in den Kupferleitungen konnte nicht festgestellt werden. Mithilfe des entwickelten Messaufbaus und der erarbeiteten Testplatine konnten erste aufschlussreiche Erfahrungen zur Störeinkopplung auf Platinen gesammelt werden.

Als weitere Testobjekte dienten eine inertielle Messeinheit und eine GNSS-Antenne mit Empfangsmodul. Diese Sensoren sind für den Einsatz im Navigationssystem einer Drohne realistisch. Durch eine Bestrahlung sollte festgestellt werden, welche Störeinkopplung in tatsächlichen Platinen erzeugt werden kann. Dabei konnten in erster Linie Störungen in den Datenströmen hervorgerufen werden. Diese Störungen konnten allerdings nur während der Bestrahlung beobachtet werden und blieben nicht dauerhaft bestehen. Auch eine physische Beeinflussung auf den Platinen konnte nicht verursacht werden.

Als Begründung für die nicht erreichte physische Zerstörung der Platinen kann in erster Linie die verfügbare Leistung für die Bestrahlung gesehen werden. Die verwendeten Verstärker sind dafür ausgelegt, bei Störfestigkeitsmessungen im Rahmen von EMV-Messungen für Equipment für die Forschungsflugzeuge des DLR eingesetzt zu werden.

Zwar konnte mit der verwendeten Leistung noch kein physischer Schaden an den Testobjekten verursacht werden, jedoch kann auf den Erkenntnissen dieser Arbeit aufgebaut werden. Im Ausblick 7 werden einige Ansätze dargestellt, die zur weiteren Bearbeitung der Fragestellung dienen sollen.



## 7. Ausblick

In diesem Kapitel werden abschließend Wege aufgezeigt, wie an diese Arbeit angeknüpft und das Thema weiter erforscht werden kann.

Der Testaufbau für die Bestrahlung der Testplatine wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und zum ersten Mal in dieser Form verwendet. Daher können Aufbau und Vorgehen für zukünftige Messungen mit dem gleichen Ziel weiterentwickelt werden.

Als erster Punkt ist hierbei die Automatisierung der Messung zu nennen. Die Messungen in dieser Arbeit wurden manuell durchgeführt. Das heißt, die Einstellungen an den verwendeten Messgeräten wurden für jede Messung neu eingestellt und die Ergebnisse mussten einzeln abgelesen und anschließend notiert werden. Dies hat den Nachteil, dass der Ablauf der Messungen zeitaufwendig ist und sich menschliche Fehler einschleichen können. Als Lösung bietet sich eine Automatisierung der Messungen an: Die Messgeräte könnten verknüpft werden und die einzustellenden Parameter wie Frequenz, Ausgangsleistung für die Messreihen könnten automatisiert übernommen werden. Auch die Messergebnisse könnten maschinell erfasst werden, um die Dauer der Messung und Fehler durch das Ablesen zu minimieren.

Im zeitlichen Rahmen dieser Bachelorarbeit war die Umsetzung einer Automatisierung nicht effizient, sollte aber aus den genannten Gründen für künftige Messreihen vorgenommen werden.

Bei einer Überarbeitung des Messaufbaus sollte außerdem die Feldsonde und deren Einfluss auf die Messunsicherheit betrachtet werden. In Abschnitt 5.1.7 wurde bereits eine Messung und Diskussion der verursachten Unsicherheit durchgeführt. Für künftige Messungen sollte eine solche Untersuchung für weitere Frequenzen und mögliche Positionierungen in einem ausführlicheren Rahmen durchgeführt und analysiert werden.

Als zusätzliche Erweiterung des Vorgehens könnten verschiedene Arten von Signalen zur Bestrahlung genutzt werden. In dieser Arbeit wurden Sinussignale bei einer festgelegten Frequenz genutzt. Die Signale könnten aber auch moduliert werden, um den Nutzen einer breitbandigen Störung im Vergleich zu einer einzigen genutzten Frequenz zu analysieren.

Wie in Abschnitt 5.1.6 erläutert, wurde insgesamt nur sehr wenig Leistung eingekoppelt im Vergleich zur Leistung, die vom Verstärker erzeugt wurde. Als Untersuchung des Messaufbaus könnte in Betracht gezogen werden, eine Referenzmessung für das Messverfahren der

Leistungseinkopplung durchzuführen. Dabei soll ermittelt werden, wie viel der abgestrahlten Leistung tatsächlich eingekoppelt werden kann. Die vom Verstärker abgegebene Leistung wird abhängig von der Frequenz von den Koaxialkabeln zwischen Verstärker und Sendeantenne sowie von der Sendeantenne selbst beeinflusst. Als Empfangsantenne könnte eine Antenne mit vom Hersteller kalibrierten Werten eingesetzt werden, idealerweise sogar eine Antenne mit gleicher Bauform wie die Sendeantenne. Mithilfe dieses Aufbaus könnte ermittelt werden, wie viel der abgestrahlten Leistung tatsächlich in eine andere Antenne eingekoppelt werden kann, die für die Frequenzbereiche geeignet ist. Außerdem könnte dann eine theoretische Prüfung der Leistungsübertragung erfolgen, wie in Abschnitt 2.4.4 eingeführt. Auch könnte geprüft werden, inwieweit Gleichung (2.11) auf die Messung angewendet werden kann, sofern alle benötigten Werte vorliegen.

Ein weiterer Aspekt, der näher diskutiert werden sollte, ist die Eignung einer Leistungsmessung für das Ziel der Bestrahlung. Das Ziel allgemein ist es, zu ermitteln, welche Phänomene zur physischen Zerstörung von Platinen festgestellt werden können. Die Messung der eingekoppelten Leistung wurde in dieser Arbeit als ein Indikator dafür genutzt, wie gut sich verschiedene Aufbauten von Platinen als Empfangsantennen anbieten.

Die Spannung, die in einer Antenne durch eine Bestrahlung induziert wird, ist nach [10] abhängig von der erzeugten Feldstärke und der effektiven Länge der Antenne - nicht aber von der Frequenz. Die Leistung, die am Anschluss der Antenne gemessen werden kann, ist hingegen abhängig von der Frequenz. Denn eine Auskopplung der induzierten Spannung kann nur erfolgen, wenn die Impedanz der Antenne bei der vorliegenden Frequenz angepasst ist (siehe Abschnitt 2.4.2). Möglicherweise reicht es für die Zerstörung der Antennenstruktur und damit einer Leiterbahn oder Massefläche einer Platine aus, eine ausreichend hohe Spannung zu induzieren, unabhängig von der Resonanzfrequenz der Antenne.

Über eine Messung der Leistung an den Anschlüssen können daher möglicherweise nicht alle relevanten Aspekte analysiert werden. Daher wurde zusätzlich eine Wärmebildkamera genutzt, um eine mögliche Aufheizung des Kupfers festzustellen. Gegebenenfalls sollten künftig weitere Methoden zur Untersuchung eingesetzt werden.

In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sowohl die eingekoppelte Leistung als auch die Störung von Sensoren mit zunehmender Feldstärke zunimmt. Daher ist naheliegend, dass bei zukünftigen Versuchen höhere Feldstärken erzeugt werden sollten, um zu ermitteln, wie Platinen physischer

Schaden zugefügt werden kann. Die verwendeten Verstärker wurden jedoch bereits am Limit ihrer verfügbaren Ausgangsleistung betrieben.

Aus diesem Grund sollte ebenfalls eine andere Art der Erzeugung elektromagnetischer Strahlung in Betracht gezogen werden.

Um zunächst für kurze Zeit hohe Feldstärken zu erzeugen, können verschiedene Möglichkeiten der Erzeugung von elektromagnetischen Impulsen erwogen werden.

Als abschließende Möglichkeit für die Weiterarbeit an diesem Thema sollten weitere Testobjekte ausgewählt werden. Es könnten zum Beispiel weitere elektrische Systeme, die in Drohnen zum Einsatz kommen, analysiert werden. Auch der Einfluss von Abschirmung bzw. Schlitzten darin können für die Bestrahlung relevant sein.

Ein weiteres interessantes Testobjekt wäre die Verwendung einer kommerziell erhältlichen Drohne – beispielsweise in der Art, wie sie im Krieg in der Ukraine eingesetzt werden. Dadurch könnte ein realistisches Szenario untersucht werden. Auch kann beurteilt werden, welche Abschirmung bei kommerziellen Drohnen tatsächlich angewendet wird und ob die verbauten Systeme zum einen gestört und zum anderen beschädigt werden können.

## Literaturverzeichnis

- [1] Franke U./Söderström J. "Star tech enterprise: Emerging technologies in Russia's war on Ukraine". In: *European Council on Foreign Relations* (2023. Zuletzt abgerufen am: 15.08.2025). URL: <https://ecfr.eu/publication/star-tech-enterprise-emerging-technologies-in-russias-war-on-ukraine/>.
- [2] Henke H. *Elektromagnetische Felder. Theorie und Anwendung*. 6. Auflage. Springer Vieweg Berlin, 2020.
- [3] Pfeiler W. *Experimentalphysik. Band 3: Elektrizität, Magnetismus, Elektromagnetische Schwingungen und Wellen*. 2. Auflage. De Gruyter Berlin/Boston, 2021.
- [4] Poppe M. *Die Maxwell'sche Theorie. Für Ingenieure und Master-Studenten. essentials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [5] Kark K. W. *Antennen und Strahlungsfelder. Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. 8. Auflage. Springer Vieweg Wiesbaden, 2020.
- [6] Lehner G. *Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker*. 7. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [7] Jackson J. D. *Klassische Elektrodynamik*. 5. Auflage. De Gruyter GmbH Berlin/Boston, 2014.
- [8] Franz J. *EMV. Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen*. 5. Auflage. Springer Vieweg Wiesbaden, 2013.
- [9] Meckelburg H-J. *Theorie der Elektromagnetischen Verträglichkeit. EMV-Anforderungen, Allgemeines EMV-Modell, Störquellen, Kopplungsmodelle, Maßnahmen und EMV-Nachweis*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2024.
- [10] Ott H. W. *Electromagnetic Compatability. Engineering*. John Wiley & Sons New Jersey, 2009.
- [11] Dettfelsen J./Siart U. *Grundlagen der Hochfrequenztechnik*. 3. Auflage. Oldenbourg Verlag München, 2009.
- [12] Arbabi A./Safavi-Naeini S. "Maximum Gain of a Lossy Antenna". In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* Band 60 (2012).
- [13] Govind A. "Antenna Impedance Matching – Simplified". In: *Abacron* (2020).

- [14] Gustrau F. *Hochfrequenztechnik. Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik*. 2. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2013.
- [15] Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. 2. Auflage. John Wiley & Sons, 2005.
- [16] Schwarzbeck Messelektronik. *Standard LPDA*. Zuletzt abgerufen am: 01.09.2025. URL: <https://schwarzbeck.de/en/antennas/logarithmic-periodic-broadband-antennas/standard-lpda.html>.
- [17] Schwarzbeck Messelektronik. *Double-Ridged Horn Antennas*. Zuletzt abgerufen am: 01.09.2025. URL: <https://schwarzbeck.de/en/antennas/broadband-horn-antennas/double-ridged-horn-antenna.html>.
- [18] Ghazlane Y. et al. "Anti-drone systems: Current intelligent countermeasures from low to high risks". In: *2023 7th IEEE Congress on Information Science and Technology* (2023).
- [19] Kanu N. J. et al. "A Few Suggestions to Improve Anti-drone Measures for Combating Against the Drone Menace". In: *The Institution of Engineers (India) 2024*. Springer Verlag (2024).
- [20] EASA. "Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems". In: *EASA eRules* (2024).
- [21] EASA. "VERORDNUNG (EU) 2018/1139 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES. Artikel 3 Begriffsbestimmungen". In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2018), S. 20.
- [22] Castrillo V. U. et al. "A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones". In: *Drones* (2022).
- [23] BAYKAR. *Bayraktar TB2*. Zuletzt abgerufen am: 19.08.2025. URL: <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>.
- [24] Chavez K./Swed O. "Emulating underdogs: Tactical drones in the Russia-Ukraine war". In: *Contemporary Security Policy* (2023).
- [25] Chaari M. "A Growing Integration of Weaponized Commercial Drones in Battlefield Operations". In: *2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense)* (2024).
- [26] Kompan J. et al. "Conceptual framework for EOD operations as part of Counter-UAS approach in Peace Support Operations". In: *2025 International Conference on Military Technologies* (2025).

- [27] Tang G. et al. *Techniques and System Design of Radar Active Jamming*. Springer Nature Singapore, 2023.
- [28] Dodel H./Häupler D. *Satellitenavigation*. 2. Auflage. Springer Heidelberg, 2010.
- [29] Raytheon An RTX Business. *High-Energy Lasers*. Zuletzt abgerufen am: 21.08.2025. URL: <https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/integrated-air-and-missile-defense/lasers>.
- [30] Kallenborn Z./Plichta M. "Breaking the Shield: Countering Drone Defenses". In: *National Defense University Press* (2024).
- [31] Rashid R./Gilani S. "Electromagnetic Pulse (EMP): A Study of General Trends, Simulation Analysis of E1 HEMP Coupling and Protection Strategies". In: *2021 International Conference on Cyber Warfare and Security* (2021).
- [32] Pirayesh H./Zeng H. "Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey". In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* Band 24, 2. Ausgabe (2022).
- [33] Bauer M. *Vermessung und Ortung mit Satelliten. Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. 7. Auflage. Wichmann-Fachmedien, 2018.
- [34] Zickert G. *Leiterplatten. Stromlaufplan, Layout und Fertigung*. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag München, 2023.
- [35] Flühr H. *Avionik und Flugsicherungstechnik. Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance*. 3. Auflage. Springer Vieweg Berlin, 2022.
- [36] BerryBase The Maker Shop. *Datenblatt zu MPU-9250 digitales 9-Achsen Beschleunigungs-/Lage-/ Kompasssensor Modul*. o. J.
- [37] InvenSense. *MPU-9250 Product Specification. Document Number: PS-MPU-9250A-01*. Revision 1.1. 2016.
- [38] GlobalTop Technology Inc. *FGPMMOPA6H GPS Standalone Module Data Sheet*. V0A. 2011.
- [39] TESSWAVE Antenna Solutions. *What Is An Active Antenna? The Complete Guide*. Zuletzt abgerufen am: 04.09.2025. URL: <https://www.tesswave.com/de/what-is-an-active-antenna/>.
- [40] Pulse Electronics. *Active GPS Antenna. Pulse Part Number W4000 Family*. L111.B. 2011.

- [41] The European Organisation for Civil Aviation Equipment. *EUROCAE ED-14G. ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND TEST PROCEDURES FOR AIRBORNE EQUIPMENT*. 2011.
- [42] Department of defense interface standard. *MIL-STD-461G. REQUIREMENTS FOR THE CONTROL OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS OF SUBSYSTEMS AND EQUIPMENT*. 2015.
- [43] Department of defense interface standard. *MIL-STD-188-125-1. HIGH-ALTITUDE ELECTROMAGNETIC PULSE (HEMP) PROTECTION FOR GROUND-BASED C4I FACILITIES PERFORMING CRITICAL, TIME-URGENT MISSIONS PART 1 FIXED FACILITIES*. 1998.
- [44] Department of defense interface standard. *MIL-STD-188-125-2. HIGH-ALTITUDE ELECTROMAGNETIC PULSE (HEMP) PROTECTION FOR GROUND-BASED C4I FACILITIES PERFORMING CRITICAL, TIME-URGENT MISSIONS PART 2 TRANSPORTABLE SYSTEMS*. 1999.
- [45] Rhode&Schwarz. *R&S@BBA150 BROADBAND AMPLIFIER. Specifications*. Version 24.00. 2023.
- [46] Schwarzbeck Messelektronik. *Handbuch BBHA 9120 D. Kalibrierte Doppelsteg Breitband Hornantenne*. o. J.
- [47] Schwarzbeck Messelektronik. *Handbuch VUSLP 9111. Log.-Periodische Antenne*. o. J.
- [48] STMicroelectronics. *UM1974 User manual. STM32 Nucleo-144 boards (MB1137)*. Rev. 11. 2025.



## A. Anhang

### A.1. Tabellen

Tabelle 7: Nutzung von Werkzeugen basierend auf künstlicher Intelligenz

| Werkzeug | Beschreibung der Nutzung                                                                |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| SlickGPT | Hilfe bei der Programmierung der Skripte für die Auswertung der verschiedenen Messungen |

Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchung der Unsicherheit der Feldsonde

| Positionierung   | Feldstärke [V/m]<br>bei 1 GHz |          | Feldstärke [V/m]<br>bei 2,8 GHz |          |
|------------------|-------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
|                  | horizontal                    | vertikal | horizontal                      | vertikal |
| Ausgangsposition | 35,38                         | 37,27    | 36,77                           | 43,76    |
| 10° nach rechts  | 34,70                         | 36,31    | 47,19                           | 50,67    |
| 10° nach links   | 37,24                         | 36,54    | 48,04                           | 51,85    |
| 5 cm nach rechts | 35,27                         | 37,38    | 48,12                           | 52,17    |
| 5 cm nach links  | 35,52                         | 37,16    | 41,90                           | 57,94    |
| 5 cm nach unten  | 36,31                         | 36,75    | 56,26                           | 59,10    |

### A.2. Abbildungen

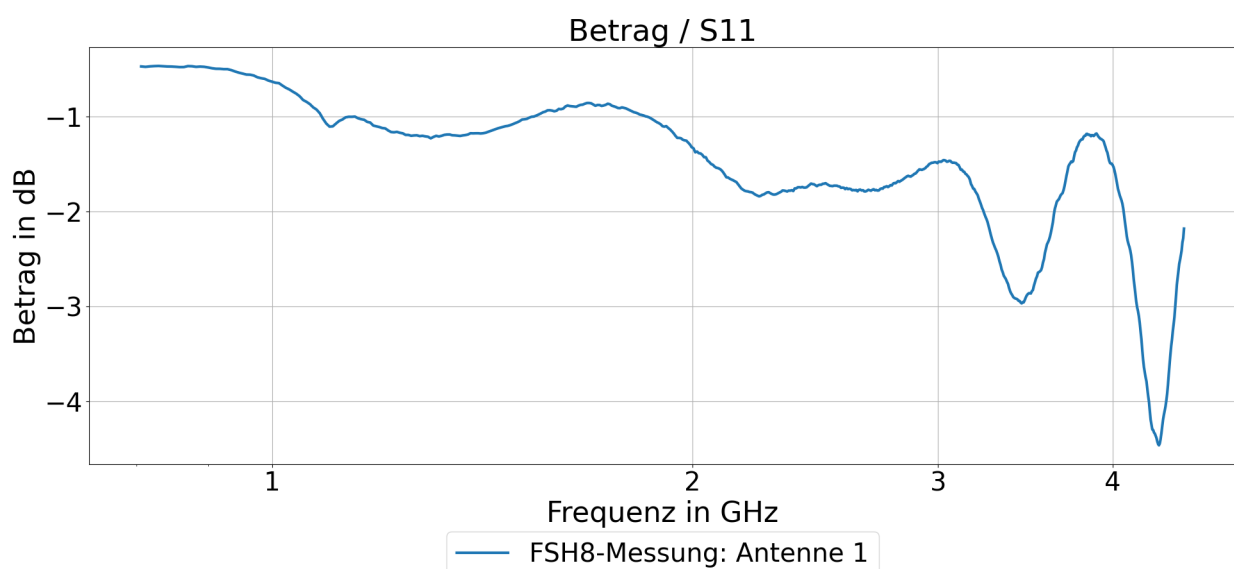


Abbildung 32: Betrag des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 1

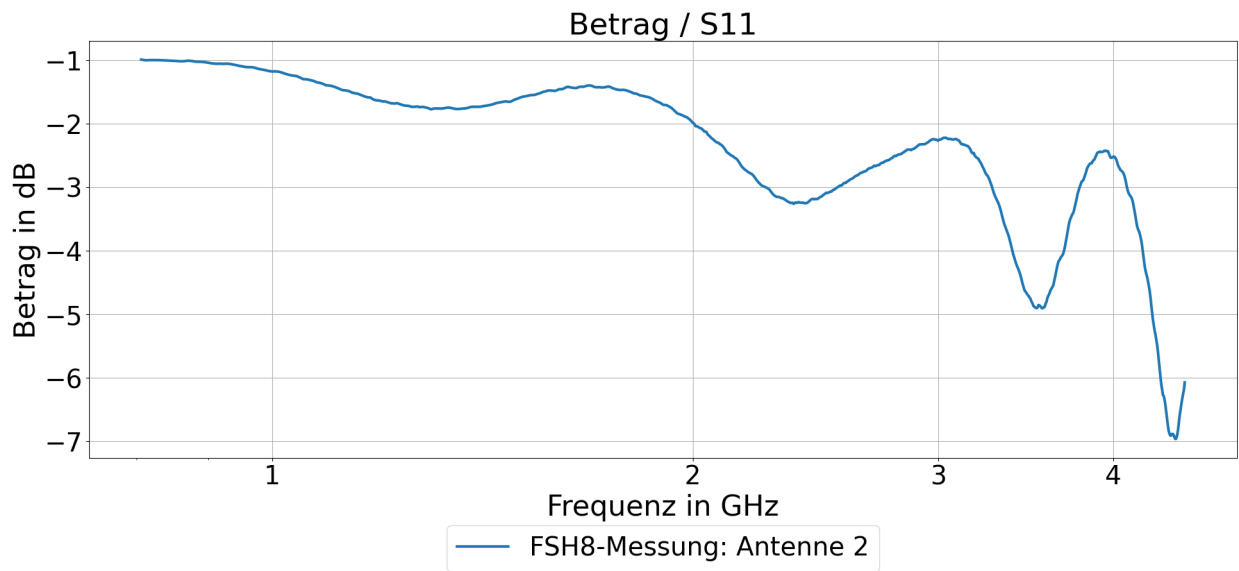


Abbildung 33: Betrag des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 2

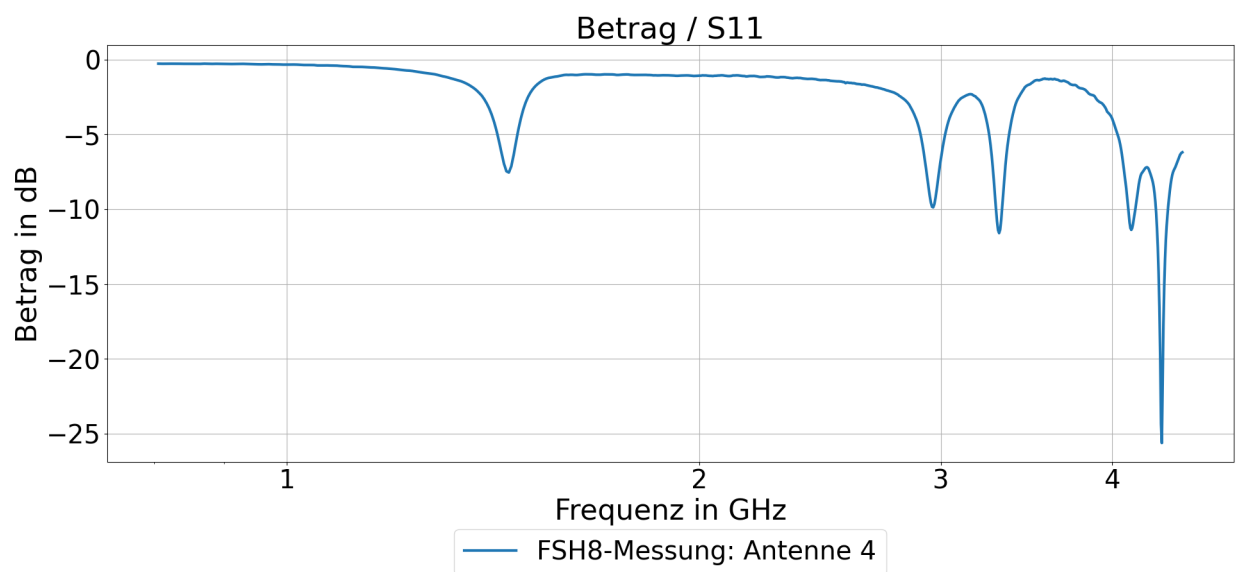


Abbildung 34: Betrag des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 4

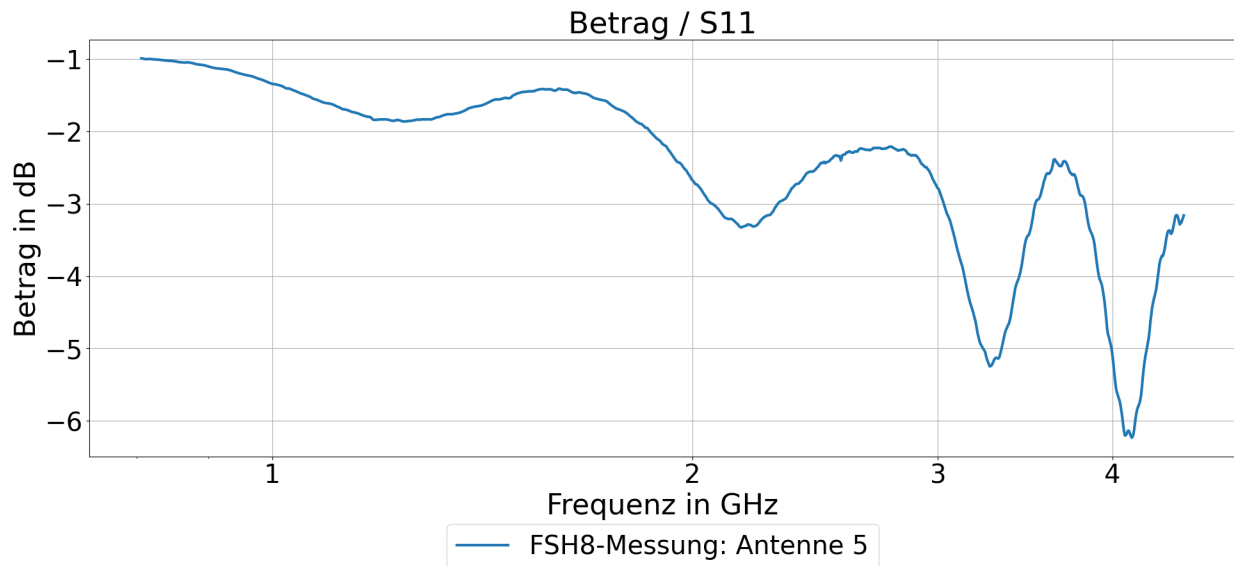


Abbildung 35: Betrag des  $S_{11}$ -Parameters von Antenne 5

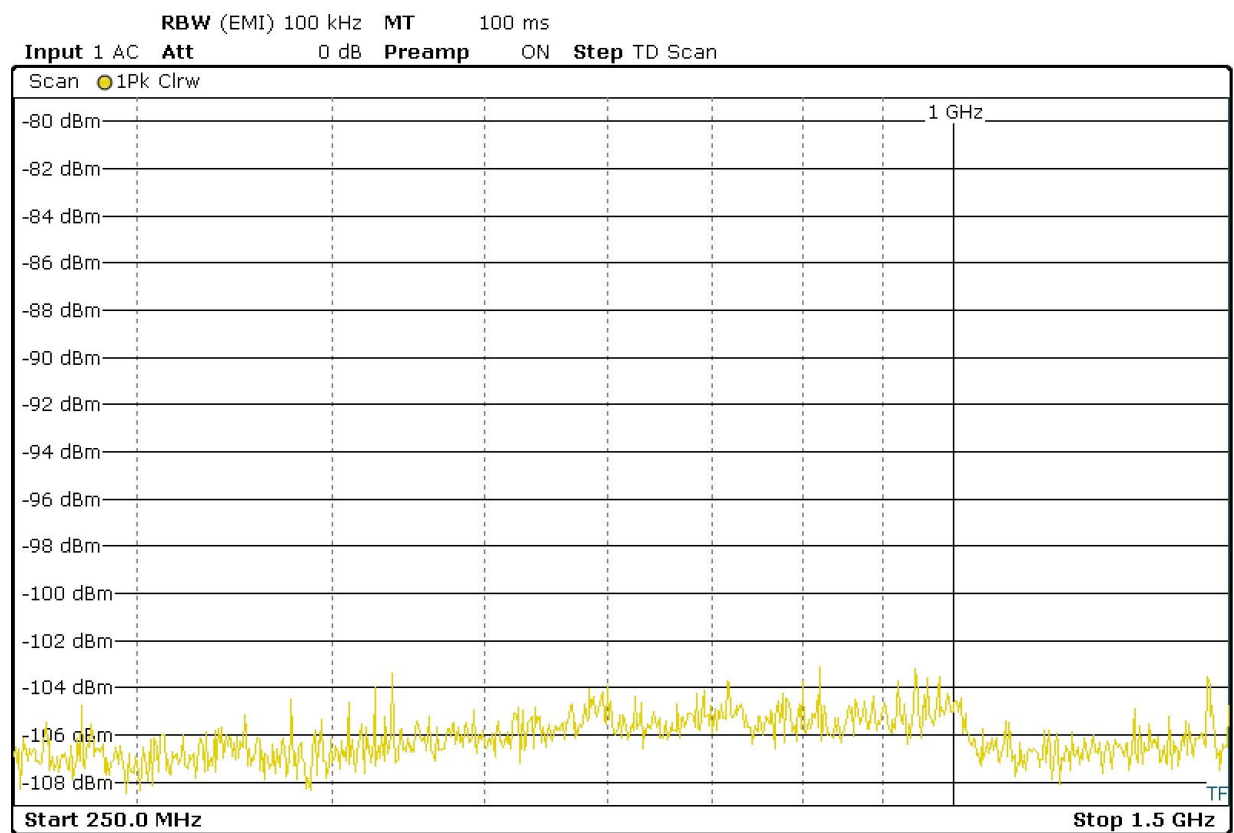


Abbildung 36: Leermessung bei 250 MHz–1,5 GHz, horizontal

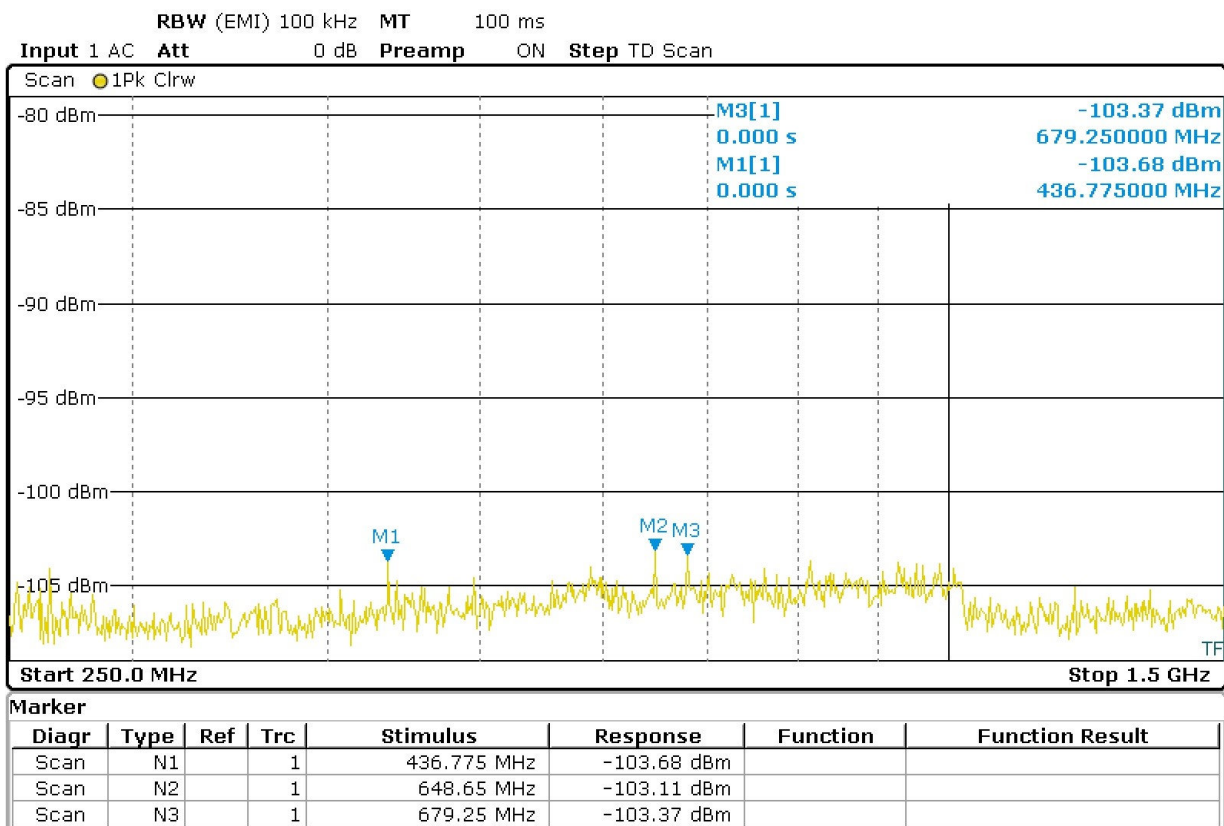


Abbildung 37: Leermessung bei 250 MHz–1,5 GHz, vertikal