

Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2024-198

Elektromagnetische Verträglichkeitsuntersuchungen zu Kabeleigenschaften einer Powerline Communication für Luftfahrtanwendungen

Hochschulschrift

Keanu Gene Gehring

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht
DLR-IB-FT-BS-2024-198

**Elektromagnetische Verträglichkeitsuntersuchungen zu
Kabeleigenschaften einer Powerline Communication für
Luftfahrtanwendungen**

Keanu Gene Gehring

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

102 Seiten
31 Abbildungen
8 Tabellen
59 Referenzen

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.**

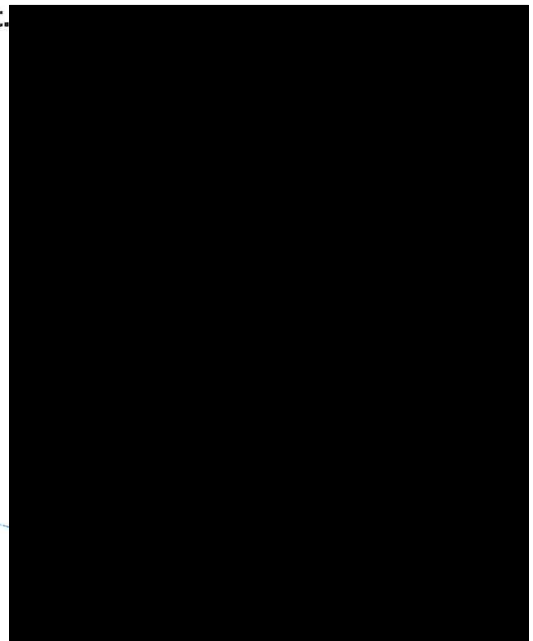
Braunschweig, den 26.11.2024

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleitung: Dr. Oertel, Carl-Henrik

Betreuer:in: Dr. Oertel, Carl-Henrik

Verfasser:in: Keanu Gene Gehring





**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**
German Aerospace Center



Elektromagnetische Verträglichkeitsuntersuchungen zu Kabeleigenschaften einer Powerline Communication für Luftfahrtanwendungen

Bachelorarbeit

für die Prüfung zum Bachelor of Engineering des Studienganges Luft- und
Raumfahrtelektronik an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Campus
Friedrichshafen

von

Keanu Gene Gehring

22. September 2024

Bearbeitungszeitraum

12 Wochen

Matrikelnummer, Kurs



Ausbildungsfirma

DLR e.V., Braunschweig

Betreuer der Ausbildungsfirma

Dr. Oertel, Carl-Henrik

Gutachter der Dualen Hochschule

Prof. Dr.-Ing. Philipp Krämer

Erklärung

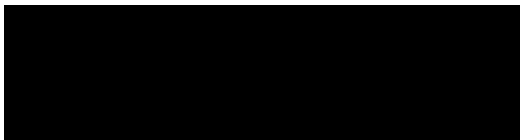
Gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017 in der Fassung vom 25.07.2018.

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema

„Elektromagnetische Verträglichkeitsuntersuchungen zu Kabeleigenschaften einer Powerline Communication für Luftfahrtanwendungen“

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

Braunschweig, 22. September 2024

A solid black rectangular box used to redact the signature of the student.

Keanu Gene Gehring

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der elektromagnetischen Verträglichkeitsuntersuchung der Kabeleigenschaften einer Powerline Communication für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen.

Hierfür werden zunächst unter Berücksichtigung von Anforderungen an die Luftfahrttauglichkeit und den Versuchsaufbau Kabel ausgelegt.

Im nächsten Schritt wird anhand der erarbeiteten Anforderungen und der Norm für „Environmental conditions and test procedures for airborne equipment“ ED-14G ein Versuchsaufbau entwickelt. Die Durchführung der Untersuchung wird daraufhin geschildert. Anschließend erfolgt eine Evaluierung der Ergebnisse.

Basierend auf den Erkenntnissen wird eine Empfehlung ausgesprochen, welche Faktoren bei der Integration der Powerline Communication in sicherheitskritischen Anwendungen in Luftfahrzeugen berücksichtigt werden sollten.

Abstract

The purpose of this thesis is to investigate the electromagnetic compatibility of the cable properties of a Powerline Communication for safety-critical aviation applications.

First, cables are designed, taking into account the requirements for airborne equipment and the test environment.

In the next step, a test setup is developed based on the requirements and the standard for „Environmental conditions and test procedures for airborne equipment“ ED-14G. The execution of the test is then described and the results are evaluated. A recommendation with factors that should be considered for the integration of Powerline Communication in safety-critical applications in aircraft is proposed.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten für die Unterstützung bei der Realisierung dieser Arbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Jürgen Späh und Tobias Gut von Diehl Aerospace für die Bereitstellung der PLC-Modems samt Zubehör sowie für ihre wertvolle technische Unterstützung. Des Weiteren ist Stephen Dominiak, Ulrich Dersch und Jürgen Wassner der Firma PLC-tec für die Unterstützung bei technischen Fragestellungen sowie die Bereitstellung essenzieller Informationen zu danken.

Bei Maximilian Schubert-Zhang und Dr. Henrik Oertel möchte ich mich herzlich für die exzellente Betreuung und Unterstützung in der Realisierung dieses Projektes bedanken.

Simon Niebuhr und Jan Warda möchte ich für die schnelle und hochwertige Fertigung aller technischen Komponenten danken.

Zuletzt würde ich mich gerne bei Prof. Dr. Phillip Krämer für die Betreuung der Arbeit seitens der DHBW bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
Formelverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele	4
2 Einführung in die Theorie	5
2.1 Powerline Communication	5
2.1.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing	7
2.1.2 Einkopplungsmechanismen für Powerline Communication	9
2.1.3 Standardisierung	10
2.1.4 Elektrisches Rauschen einer Versorgungsleitung	11
2.2 Alternative Datenübertragungssysteme in der Luftfahrt	12
2.2.1 Controller Area Network (Aeronautical Radio Incorporated 825)	13
2.2.2 Aeronautical Radio Incorporated 429	16
2.2.3 Aeronautical Radio Incorporated 629	17
2.2.4 Avionics Full Duplex Switched Ethernet (Aeronautical Radio Incorporated 664)	17
2.2.5 Vergleich der Datenübertragungssysteme	18
2.3 Grundlagen der elektromagnetischen Verträglichkeit	20
2.3.1 Gestrahlte Emissionen	22
2.3.2 Gestrahlte Störfestigkeit	23
2.3.3 Leitungsgebundene Emissionen	24
2.3.4 Leitungsgebundene Störfestigkeit	26

2.3.5	Kopplungsmechanismen	26
2.4	Kabelcharakteristiken	28
2.4.1	American Wire Gauge	28
2.4.2	Strombelastbarkeit	29
2.4.3	Kabelschirme	30
3	Anforderungen an den Versuchsaufbau	33
3.1	Anforderungen aus dem Projekt	33
3.2	Auslegung der elektrischen Last	34
3.3	Randbedingungen des Aufbaus	35
4	Kabelauslegung für den Versuchsaufbau	38
4.1	Kabelauswahl	38
4.2	Steckerauswahl	39
5	Testumgebung und Messtechnik	41
5.1	Konfiguration der Testumgebung	41
5.1.1	Messtechnik	43
5.1.2	Kalibrierung	48
6	Versuchsaufbau	51
6.1	Konfiguration der elektromagnetischen Emissionsmessungen	52
6.1.1	Aufbau der gestrahlten Emissionsmessungen	52
6.1.2	Aufbau der leitungsgebundenen Emissionsmessungen	55
6.2	Konfiguration der elektromagnetischen Störfestigkeitsuntersuchung	56
6.2.1	Aufbau der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchung	56
6.2.2	Aufbau der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung	57
7	Versuchsdurchführung und Auswertung	59
7.1	Versuchsdurchführung	59
7.1.1	Durchführung der Störfestigkeitsuntersuchung	62
7.2	Ergebnisse der Emissionsmessungen	62

7.2.1	Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung	63
7.2.2	Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionen	66
7.3	Ergebnisse der Störfestigkeitsuntersuchungen	75
7.3.1	Ergebnisse der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchung	75
7.3.2	Ergebnisse der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung	75
8	Empfehlung zur Schirmung für Luftfahrtkabel	77
9	Fazit	79
9.1	Zusammenfassung	79
9.2	Kritische Reflexion	80
9.3	Ausblick	80
9.4	Hilfsmittel	82
10	Literaturverzeichnis	83
A	Anhang	90
A.1	Abbildungen	90
A.2	Tabellen	92
A.3	Integration in den WISDOM Demonstrator	96
A.3.1	Aufbau des Demonstrators	96
A.3.2	Randbedingungen der PLC-Modems	97
A.3.3	Konzepte zur Integration der PLC-Modems	98
A.3.4	Schnittstellen	102

Abkürzungen

ACK	Acknowledgement
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AFDX	Avionics Full Duplex Switched Ethernet
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
AWG	American Wire Gauge
BOP	Break-Out-Panel
CAN	Controller Area Network
C und M	Control und Monitor
CRC	Cyclic Redundancy Checks
DAL	Design Assurance Level
DLC	Data Length Code
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMA	Electro-Mechanical Actuator
EMS	Elektromagnetische Störfestigkeit
ESR	R&S® ESR Funkstörmessempfänger
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment
EUT	Equipment Under Test
FCC	Flight Control Computer
GPS	Global Positioning System

IDE	Identifier Extension
IFS	Intermission Frame Space
LAN	Local Area Network
LISN	Line Impedance Stabilization Network
LFZ	Luftfahrzeug
LRU	Line Replacable Units
MIL	Military
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSP	Open Switch and Control Platform
PLC	Powerline Communication
PWM	Pulsweitenmodulation
RT	Real Time
RTR	Remote Transmission Request
STD	Standard
TDMA	Time Division Multiple Access
UPS	Uninterruptible Power Supply
VHF	Very High frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WISDOM	Wing Integrated Systems Demonstration On Mechatronic Rig
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

1.1	Konzept zur Integration von Powerline Communication in ein Flugsteu- rungssystem	2
1.2	PLC-tec Powerline Communication Modem in der Version zwei	4
2.1	Vergleich von Powerline Communication als Lösung mit Modems und als integrierte Lösung mit existierenden Implementierungen der Datenüber- tragung	6
2.2	Darstellung des Orthogonal Frequency Division Multiplexing Modulati- onsverfahrens	8
2.3	Konzeptionelle Darstellung der kapazitiven Kopplung	9
2.4	Konzeptionelle Darstellung der induktiven Kopplung	10
2.5	Darstellung eines Controller Area Network Frames inklusive Bitstreams und Flanken von CAN-High und Low	14
2.6	Die vier Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit	21
2.7	Messung von Gleichtakt- und Gegentaktstörungen	25
3.1	Bemaßung der EMV-Kammer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Braunschweig	35
5.1	EMV-Kammer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Braun- schweig mit Kennzeichnung der Hauptbestandteile	41
5.2	Kalibrieraufbau für Referenzkalibrierungen bei leitungsgebundenen Stör- festigkeitsuntersuchungen	49
6.1	Prüfstandskonfiguration für gestrahlte Emissionsmessungen mit 28 V DC	52
6.2	Prüfstandskonfiguration für gestrahlte Emissionsmessungen mit 230 V AC	55
6.3	Prüfstandskonfiguration für leitungsgebundene Emissionsmessungen mit 28 V DC	56
6.4	Prüfstandskonfiguration für leitungsgebundene Störfestigkeitsuntersuchun- gen mit 28 V DC	57
7.1	Umsetzung des DC-Aufbaus innerhalb der EMV-Kammer mit angeschlos- sener Strommesszange	59

7.2	Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei horizontaler Antennenausrichtung	63
7.3	Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei vertikaler Antennenausrichtung	65
7.4	Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen	66
7.5	Ergebnisse der Vergleichsmessung verschiedener Schirmungen	68
7.6	Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen	70
7.7	Ausschnitt von 0.7 bis 2 MHz der leitungsgebundenen Emissionsmessungen beim AC- und DC-Aufbau mit einseitig aufgelegter Schirmung .	72
7.8	Ausschnitt bei 7 bis 10 MHz der leitungsgebundenen Emissionsmessungen beim AC und DC Fall mit einseitig aufgelegter Schirmung	73
A.1	Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei vertikaler Antennenausrichtung	90
A.2	Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei horizontaler Antennenausrichtung	90
A.3	Ergebnisse der Nachforschung für Unterschiede zwischen dem AC- und DC-Aufbau	91
A.4	Aufbau des Wing Integrated Systems Demonstration On Mechatronic Rig Demonstrators	96
A.5	Integrationskonzept der PLC-Modems zwischen Flight Control Computer und Electro-Mechanical Actuator Control Rack	99
A.6	Integrationskonzept der PLC-Modems zwischen Flight Control Computer und Real Time Rack	100
A.7	Beispielhafter Signalverlauf des Aufbaus mit PLC-Modems zwischen FCC und RT Rack	101

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Eigenschaften von Datenübertragungssystemen für Luftfahrtanwendungen	18
5.1	Untersuchbare Kategorien der ED-14G für gestrahlte Störfestigkeit . . .	46
5.2	Untersuchbare Kategorien der ED-14G für leitungsgebundene Störfestigkeit	47
6.1	Kennzeichnung aller Kabel und zugehörige Beziehungen	51
A.1	Frequenzen und Feldstärken der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchung	92
A.2	Frequenzen und Feldstärken der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung	92
A.3	Fertigungstabelle aller Kabel	93
A.4	Testplan für den DC Aufbau mit Doppelschirm	94

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
FS	—	Flügelstreckung
s	m	Spannweite
A	m^2	Fläche
x	—	Anzahl PLC-Modems
G_{PLC}	kg	Gewicht eines PLC-Modems
$G_{Leitung}$	kg	Leitungsgewicht
P	W	Elektrische Leistung
R	Ω	Widerstand
U	V	Elektrische Spannung
I	A	Elektrischer Strom
d_{AWG}	AWG	„American Wire Gauge“ (Kabeldurchmesser)
U_S	V	Induzierte Störspannung
U_1	V	Spannung im störenden Leiter
C_{12}	F	Streukapazität zwischen zwei parallelen Leitern
C_{1G}	F	Kapazität vom störenden Leiter gegenüber der Erde
C_{2G}	F	Kapazität vom gestörten Leiter gegenüber der Erde
C_{1S}	F	Streukapazität zwischen störender Leitung und Schirm
C	F	Kapazität
U_{Ind}	V	Induzierte Spannung
E	$\frac{V}{m}$	Elektrische Feldstärke
B	T	Magnetfeld
ϕ	Tm^2	Magnetischer Fluss
ω	$\frac{1}{s}$	Kreisfrequenz
f	Hz	Frequenz

1 Einleitung

Fortschritte in der Entwicklung von Technologien in der Luftfahrt ermöglichen es, leichtere, effizientere und komplexere Luftfahrzeuge zu entwickeln. Die Verwendung neuer Technologien zur Datenübertragung spielt dabei eine entscheidende Rolle. Neue Konzepte wie Flugzeuge mit einer großen Flügelstreckung können zukünftig von diesen Entwicklungen profitieren. Sie haben große Spannweiten und daher lange Wege für die Datenübertragung. Die gängigen Methoden zur Datenübertragung in Luftfahrzeugen sind aufgrund der erheblichen Kabellängen, des resultierenden Gewichts und des umfangreichen Wartungsaufwands ungeeignet.

Der Einsatz von Powerline Communication (PLC) bietet ein erhebliches Potenzial für die Datenübertragung von Flugzeugen mit großer Spannweite, ohne die Nachteile herkömmlicher Lösungen.

1.1 Motivation

Aufgrund von steigenden Kosten, einem hohen wirtschaftlichen Druck und der stetig wachsenden Relevanz vom Umweltschutz sind technologische Weiterentwicklungen in der Luftfahrt wichtig. Verschiedene Ansätze, um die Effizienz von Luftfahrzeugen zu erhöhen und operationale Kosten zu senken, umfassen Verbesserungen von Antriebstechnologien, Entwicklung von leichteren Materialien sowie Verbesserungen in der Aerodynamik durch Reduktion des Luftwiderstands. [1]

Im Hinblick auf aerodynamische Verbesserungen zeigt sich ein deutlicher Trend zur Zunahme der Flügelstreckung [2]. Diese kann mit der nachfolgenden Formel berechnet werden:

$$FS = \frac{s^2}{A} \quad (1.1)$$

AR beschreibt die Flügelstreckung, s die Spannweite und A die Flügelfläche [3].

Größere Flügelstreckungen können mittels „Wing-Tip-Devices“ erzielt werden, welche eine erhebliche Reduktion des induzierten Widerstands bewirken. Aktuelle Entwicklun-

gen tendieren zu Flügeln mit großer Spannweite s und geringer Fläche A , um den induzierten Widerstand gering zu halten [2]. Solche Geometrien weisen oft ein instabiles Flatterverhalten auf, was zu einem fatalen strukturellen Versagen führen kann [4]. Aus diesem Grund sind aktive Regler und Steuersysteme notwendig, um dieses Phänomen zu kontrollieren.

Im Zuge des Projekts Wing Integrated Systems Demonstration On Mechatronic Rig (WISDOM) soll eine Demonstrations- und Testplattform für ein vollständiges Flugsteuerungssystem eines Flugzeuges mit hochgestreckten Flügeln aufgebaut werden. Dafür werden neue Technologien für Lastminderung, multifunktionale Steuerflächen und aktive Flatterunterdrückung entwickelt. Innovative Technologien wie die PLC für die Datenübertragung sind dabei von zentraler Bedeutung. [5]

Ein Anwendungsbereich der PLC ist die Nutzung für die Datenübertragung im Rahmen einer Fly-by-Wire Flugsteuerung. In Abbildung 1.1 ist ein Konzept zur Integration einer PLC in ein Fly-by-Wire Flugsteuerungssystem zum Ansteuern eines Querruders dargestellt.

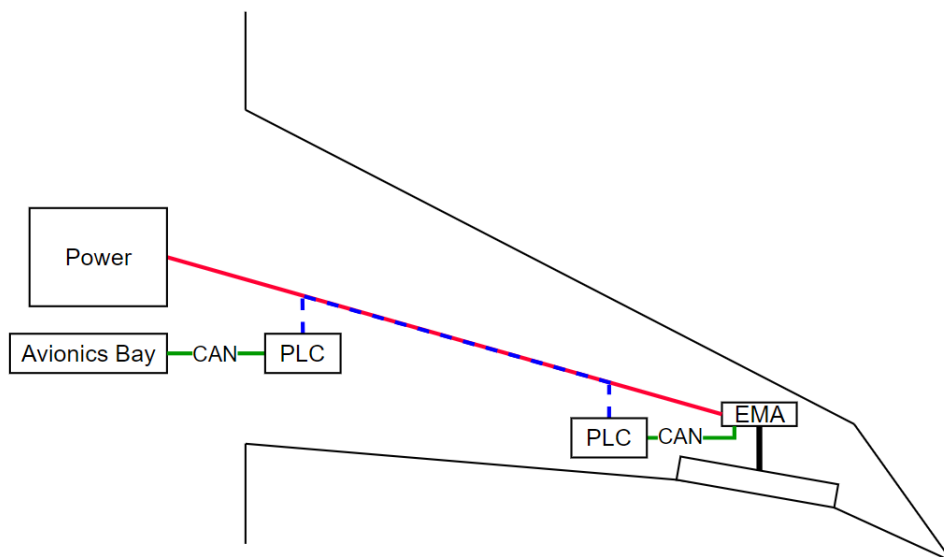


Abbildung 1.1: Konzept zur Integration von Powerline Communication in ein Flugsteuerungssystem

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass die PLC Steuerinformationen für den Electro-Mechanical Actuator (EMA) weiterleitet. Diese Informationen werden über Controller Area Network (CAN), in Grün dargestellt, von der Avionics Bay zum PLC-Modem geleitet. Das Modem ist dazu in der Lage, die Informationen auf die in Rot gekennzeichnete Versorgungsleitung des EMA einzukoppeln. Die Steuerinformationen werden entlang des blau gestrichelten Pfads übertragen und vom Empfängermodem aufgenommen. Somit können die Steuerinformationen abermals mittels CAN an den EMA geleitet und umgesetzt werden.

Heutige Luftfahrzeuge nutzen getrennte Strom- und Datenleitungen. Durch eine PLC wird nur noch eine Leitung für Strom und Daten benötigt, was eine Reduktion vom Gewicht der Kabelbäume bewirkt. Dies äußert sich in Kosten- und Emissionseinsparungen. Außerdem reduziert sich der Wartungsaufwand, da die Kontrolle Datenleitungen wegfällt. Es müssen lediglich die Versorgungsleitung und die Modems gewartet werden. Zusätzlich bietet eine PLC eine einfache Möglichkeit bereits bestehende Systeme ohne großen Aufwand zu erweitern, da bestehende Leitungen verwendet werden können und keine zusätzlichen Kabel zu installieren sind. [6]

In Kooperation mit Diehl Aerospace und der Hochschule Luzern hat die Firma PLC-tec eine PLC für die Verwendung in Luftfahrtanwendungen entwickelt [7]. Die PLC Modems wurden unter Berücksichtigung von Standards und Richtlinien für Luftfahrtanwendungen nach Design Assurance Level (DAL) A entwickelt und sind somit auch für den Einsatz in sicherheitskritischen Systemen geeignet. Es gilt nachzuweisen, dass die Modems auch den Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) für solche Systeme entsprechen. Um hierbei eine Optimierung des Gewichts und Einbauaufwands vorzunehmen, sollen verschiedene Schirmungen auf Störfestigkeit und Emissionen untersucht werden. Abbildung 1.2 zeigt ein PLC-Modem der Firma PLC-tec in der Version zwei.

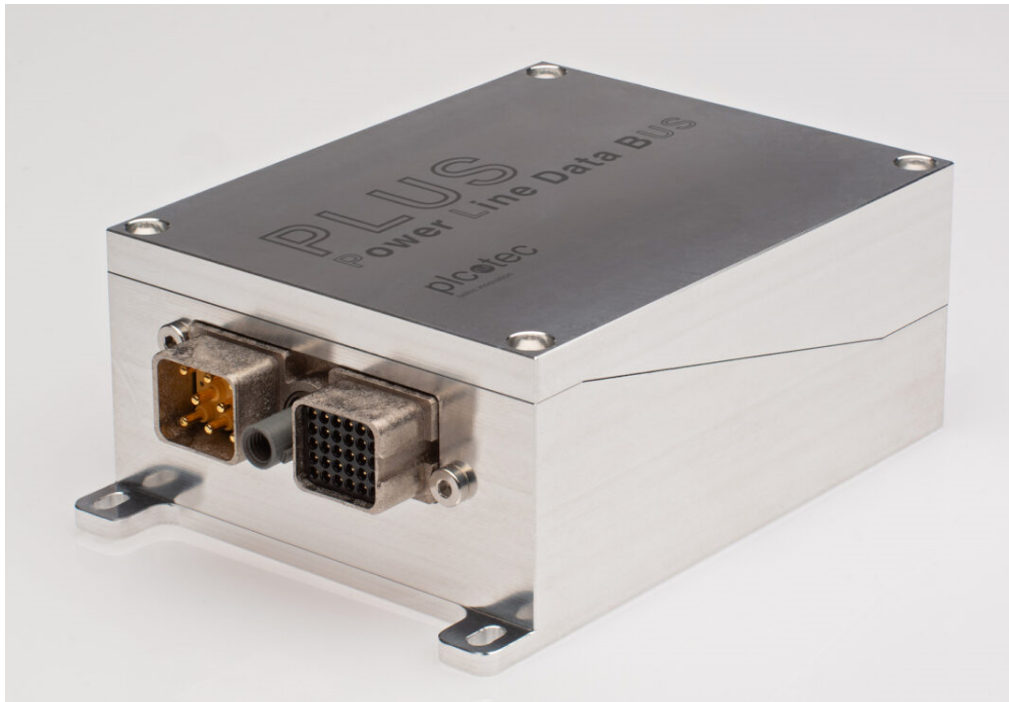


Abbildung 1.2: PLC-tec Powerline Communication Modem in der Version zwei [8]

1.2 Ziele

Zielsetzung in dieser Bachelorarbeit ist zunächst die Konzeptionierung und Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus in Übereinstimmung mit den Anforderungen aus dem Luftfahrtstandard für Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment DO-160G, auch als ED-14G bekannt [9]. Hierbei sollen luftfahrttaugliche Kabel ausgelegt und mit verschiedenen Schirmungen versehen werden.

Anlässlich der EMV-Untersuchung erfolgt zunächst eine Analyse der gestrahlten und leitungsgebundenen Emissionen des Testaufbaus. Anschließend werden die leitungsgebundene und gestrahlte elektromagnetische Störfestigkeit (EMS) untersucht, um zum Schluss eine geeignete Schirmkonfiguration mit einem optimalen Gewicht und geeignetem Schutz vor elektromagnetischer Strahlung zu empfehlen. Des Weiteren soll ein Konzept für die Integration der PLC in den Demonstrator des Projektes WISDOM erstellt und aufgezeigt werden, welches im Anhang unter Abschnitt A.3 aufzufinden ist.

2 Einführung in die Theorie

Dieses Kapitel dient als theoretische Grundlage für alle nachfolgenden Inhalte dieser Arbeit. Bei den Grundlagen sollen zentrale Aspekte wie die Funktionsweise der verwendeten PLC Modems, Kabelcharakteristiken und die Grundlagen der EMV betrachtet werden.

2.1 Powerline Communication

Unter einer Powerline Communication wird allgemein die Übertragung von Daten über eine Versorgungsleitung verstanden. Sie stellt eine Alternative zur herkömmlichen Datenübertragung über separate Leitungen dar. Mittels PLC können komplexe und umfangreiche Netzwerke mit mehreren Empfängern und Sendern aufgebaut werden. Aufgrund der einfachen Integration von PLC in bestehende Versorgungsleitungen und dem Internet-Boom erfuhr die PLC Technologie einen starken Aufschwung in den 90er Jahren. Da Haushalte bereits ein umfangreiches Netz an Versorgungsleitungen verlegt haben, lag die Überlegung, diese für die Übertragung von Daten mit einer hohen Bandbreite zu nutzen, nahe. [10]

Auch im Automobilsektor und in der Luftfahrt gibt es ähnliche Konzepte zur Nutzung von PLC für die Datenübertragung. [11] [7]

In Abbildung 2.1 sind exemplarisch drei Möglichkeiten zur Übertragung von Daten in Luftfahrtanwendungen zu erkennen. Erste Möglichkeit, im oberen Teil von Abbildung 2.1 dargestellt, ist eine herkömmliche Form der Datenübertragung. In diesem Beispiel wird CAN für die Datenübertragung verwendet. Neben CAN sind Aeronautical Radio Incorporated (ARINC) 429, ARINC 629 und Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) ebenfalls etablierte Datenübertragungssysteme in der Luftfahrt.

Parallel zu der Leitung für die Datenübertragung existiert eine Versorgungsleitung, welche mit beiden Teilnehmern verbunden ist. Nun kommt der Aspekt der einfachen Integration einer PLC ins Spiel, da anstelle der Datenübertragung über die CAN-Leitung

die bestehende Versorgungsleitung genutzt werden kann.

Eine solche nachträgliche Integration ist im mittleren Teil von Abbildung 2.1 dargestellt. Auf Sender und Empfängerseite müssen lediglich PLC-Modems angeschlossen werden, welche eine Verbindung zur Versorgungsleitung besitzen. Basierend auf diesem Prinzip kann eine PLC bei diversen bestehenden Versorgungsleitungen nachgerüstet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung einer PLC ist eine integrierte Lösung, in Abbildung 2.1 unten dargestellt. Hier soll die Hardware der PLC-Modems bereits in ein System integriert sein, um externe Komponenten wie separate Spannungsversorgungen zur Speisung der PLC-Modems zu vermeiden.

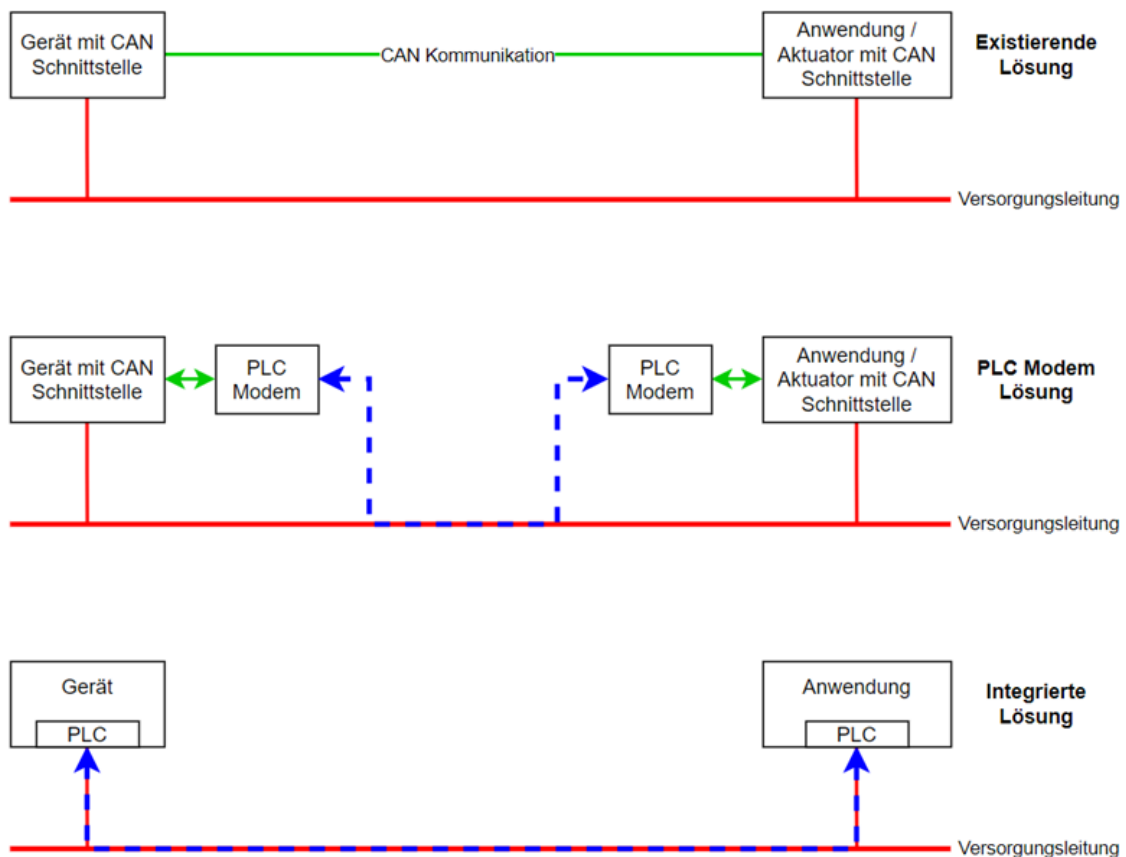


Abbildung 2.1: Vergleich von Powerline Communication als Lösung mit Modems und als integrierte Lösung mit existierenden Implementierungen der Datenübertragung

Die Sinnhaftigkeit der Verwendung einer PLC ist gegeben, wenn das gemeinsame Gewicht der notwendigen PLC-Modems geringer ist als das Gewicht der alternativ verlegten Leitungen. Diese Bedingung ist in Formel 2.1 präsentiert.

$$x * G_{PLC} < G_{Leitung} \quad (2.1)$$

x steht hier für die Anzahl an notwendigen PLC-Modems, G_{PLC} für das Gewicht eines PLC-Modems und $G_{Leitung}$ für das Gewicht der Leitung eines alternativen Datenübertragungssystems.

Heute findet PLC Einsatz in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten. Neben der Verwendung zur Distribution von Local Area Network (LAN) und Fernsehen in privaten Haushalten findet die PLC in der Industrie oft Anwendung zum niederfrequenten Transport von Sensordaten bei der Überwachung von Großanlagen. [12] [13]

Obwohl der Einsatz von PLC heutzutage weit verbreitet ist, ist die Technologie noch nicht ausgereift und durch eine Vielzahl von Problemen geprägt. Folgende fünf Probleme stellen eine große Herausforderung dar [10] [12] [14]:

1. Fehlende Standardisierung
2. Signaldämpfung
3. Rauschen auf der Versorgungsleitung
4. Elektromagnetische Emissionen
5. Elektromagnetische Störfestigkeit

2.1.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Die PLC-Modems der Firma PLC-tec verwenden aufgrund der Anforderung an hohe Redundanz, hohe Datenübertragungsgeschwindigkeiten und einer großen Bandbreite das Modulationsverfahren Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) für die Datenübertragung [15]. Bei diesem Verfahren wird der Datenstrom im gegebenen Frequenzbereich auf schmale Frequenzträger aufgeteilt. Dies geschieht mittels der Parallelisierung des seriellen Datenstroms und anschließender Frequenzzuweisung. Nach-

dem die Signale parallel auf einem Frequenzband vorliegen, werden diese so überlappt, dass in einem Hochpunkt eines Signals die benachbarten Signale einen gemeinsamen Tiefpunkt besitzen. Der Begriff Orthogonalität beschreibt dass bei der Verschiebung die einzelnen Träger unabhängig voneinander bleiben und keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet. In Abbildung 2.2 ist dieses Prinzip dargestellt. [16]

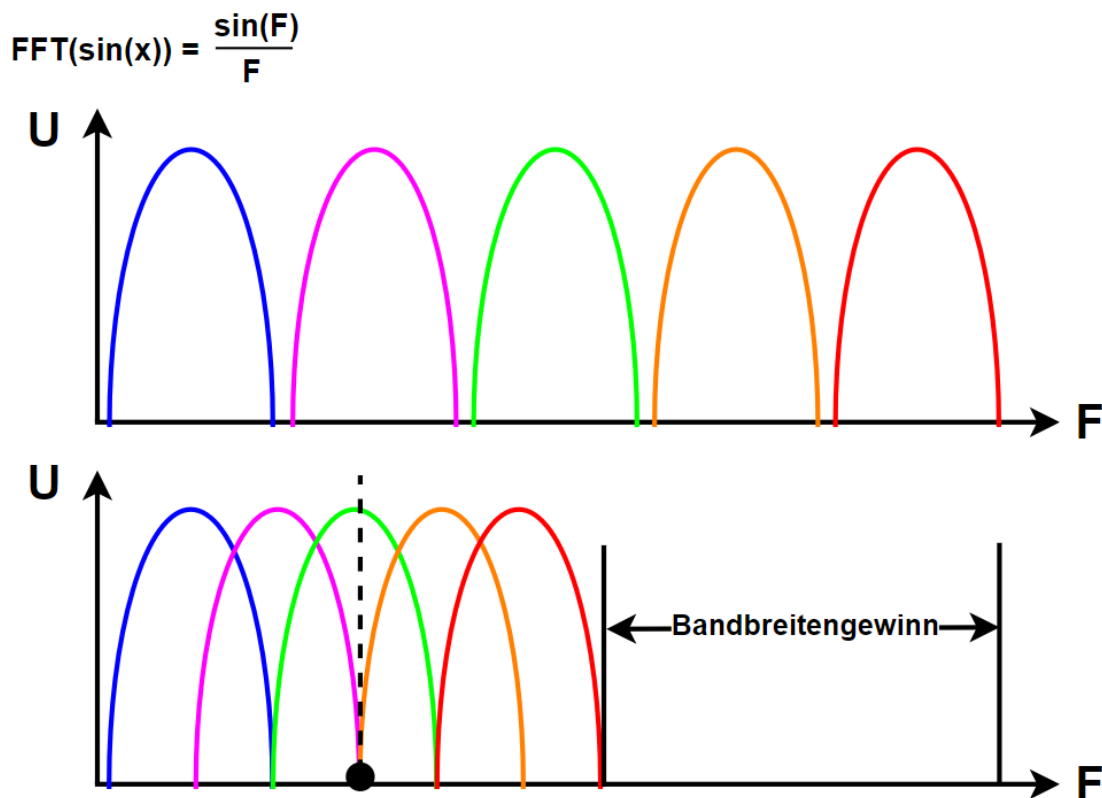


Abbildung 2.2: Darstellung des Orthogonal Frequency Division Multiplexing Modulationsverfahrens

Bei den in Abbildung 2.2 dargestellten Funktionen handelt es sich um Funktionen vom Typ $\frac{\sin(F)}{F}$. Für eine übersichtlichere Darstellungsweise wurde bei den Funktionen auf die Abbildung der Kurvenverläufe links und rechts der dargestellten Maxima verzichtet. Im oberen Teil von Abbildung 2.2 sind die parallelisierten Datenströme bei unterschiedlichen Frequenzen zu erkennen. Die Datenströme werden daraufhin überlappt. Anhand der grünen Kurve ist zu erkennen, dass die benachbarten gelben und lila Signale an der Stelle des Extremums vom grünen Signal Null sind. Durch diese Überlappung resultiert ein immenser Bandbreitengewinn, so wie er in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

Die PLC-tec Modems übertragen die Signale mittels OFDM mit 1536 Trägern in einem Frequenzbereich von 2 bis 34 MHz [7].

2.1.2 Einkopplungsmechanismen für Powerline Communication

Zum Einkoppeln der Signale in die Versorgungsleitung gibt es zwei Möglichkeiten: Kapazitive und induktive Kopplung [17].

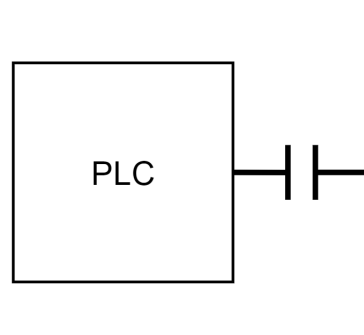


Abbildung 2.3: Konzeptionelle Darstellung der kapazitiven Kopplung

Bei der kapazitiven Kopplung wird ein Kondensator, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, zwischen zwei Systeme, in diesem Fall die Versorgungsleitung und dem PLC-Modem, gesetzt. Über den Kondensator können direkt AC Signale verlustfrei übertragen werden. DC Signale werden geblockt. [18]

Induktive Kopplung nutzt zwei Spulen: Eine auf der Sendeseite und eine auf der Empfangsseite. Die Übertragung erfolgt durch elektromagnetische Induktion in der Empfängerspule. Das Prinzip der elektromagnetischen Induktion beruht auf der Änderung des Magnetfeldes, welches durch Wechselstrom erzeugt wird. Daher ist die induktive Kopplung für AC Signale geeignet. Im Gegensatz dazu können DC Signale aufgrund der fehlenden zeitlichen Änderung des Magnetfeldes nicht übertragen werden. [19]

Abbildung 2.4 zeigt einen Aufbau der induktiven Kopplung.

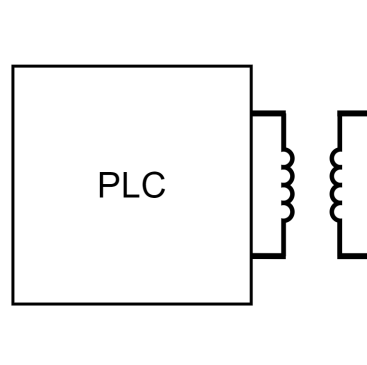


Abbildung 2.4: Konzeptionelle Darstellung der induktiven Kopplung

Die induktive Kopplung ist aufgrund höherer Energieverluste bei der Übertragung anfälliger für Datenverluste. Zudem ist sie empfindlicher im Vergleich zur kapazitiven Kopplung, da die Spulen stets exakt zueinander ausgerichtet sein müssen. Sie ist damit nicht für die Nutzung in sicherheitskritischen Anwendungen geeignet. Das PLC-Modem in dieser Arbeit verwendet kapazitive Kopplung. [15]

Durch die Kombination von kapazitiver Kopplung und OFDM kann das PLC-tec Modem Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 205 Mbit/s erreichen. [7]

2.1.3 Standardisierung

Ein hinderlicher Aspekt bei der Verbreitung von PLC für die kommerzielle Nutzung ist eine mangelnde Standardisierung. In Anbetracht der Nutzung für die Distribution von LAN gibt es Probleme betreffend der Zuordnung eines dedizierten und angemessenen Frequenzbands, über welches die Signale der PLC übertragen werden können. [13]

Eine besondere Problematik bei der Integration von PLC in ein Energieversorgungsnetz ist die potenzielle Störung oder Interferenz mit Gerätschaften und anderen Systemen im gleichen Netz. Erste Standards, die Frequenzen und Emissionspegel reglementieren, existieren bereits. Die Standards werden in schmalbandige und breitbandige PLC-Anwendungen unterteilt. Die entsprechenden europäischen Standards sind die EN 50065 und EN 50561-1. [14]

Standards für die Entwicklung und Verwendung von PLC in der Luftfahrt existieren noch nicht. Dieselben Problematiken, welche im vorausgehenden Absatz genannt wurden, müssen auch bei der Verwendung im Luftfahrzeug (LFZ) berücksichtigt werden. Die Gefahr der Störung anderer Elektroniken, welche am selben Bordnetz des LFZ hängen, bilden ein großes Risiko.

Um das Stören von Gerätschaften im gleichen Netz zu verhindern, werden in dieser Arbeit die leitungsgebundenen Emissionen einer PLC in einer realen Konfiguration untersucht. Die Ergebnisse können als Grundlage für die Entwicklung eines entsprechenden Standards hinzugezogen werden.

2.1.4 Elektrisches Rauschen einer Versorgungsleitung

Ein Phänomen bei Versorgungsleitungen ist die Propagation von niederfrequenten leitungsgebundenen Störungen. Die Quellen dieser Störungen sind alle Teilnehmer, welche an das Netz angeschlossen sind. Beispiele hierfür können Handys sein, welche geladen werden, Fernseher, Radios oder ähnliches. Resultierendes Rauschen kann in vier Typen aufgeteilt werden. [13]

Der erste Typ wird als farbiges Rauschen bezeichnet und liegt im niederen Frequenzbereich. Es wird meist durch kleinere Motoren, wie sie beispielsweise in Küchengeräten vorliegen, erzeugt und nimmt bei steigender Frequenz ab. [13]

Periodisches Impuls Rauschen ist eine weitere Form des Rauschens. Es wird von Geräten erzeugt, welche harmonische Frequenzen zu den Netzfrequenzen 50 oder 100 Hz erzeugen. [13]

Eine weitere Form ist das Niederband Rauschen. Diese Form von Rauschen besteht aus einem Sinus Signal mit modulierten Amplituden. Vorwiegend wird es von Applikationen mit Empfängern, wie Radios, erzeugt. [13]

Die letzte Form des Rauschens ist das asynchrone Impuls Rauschen. Dies wird durch schnelle Schaltvorgänge in Netzteilnehmern erzeugt. Ein häufiges Beispiel sind DC/DC Wandler. [13]

Rauschen auf Versorgungsleitungen ist für PLC wegen des hohen Störpotentials bei der Übertragung von Daten ungünstig. Signale können durch die Überlagerung mit Rauschen verloren gehen oder verfälscht werden.

Ähnliche Effekte lassen sich auch in Luftfahrzeugen auffinden. In Anbetracht von sicherheitskritischen Anwendungen wären solche Effekte fatal, weswegen in der Entwicklung der hier untersuchten PLC entsprechende Schutzvorkehrungen getroffen wurden. [7]

2.2 Alternative Datenübertragungssysteme in der Luftfahrt

Die PLC bietet eine innovative Technologie für die Luftfahrt, die darauf abzielt, bestehende Systeme zu ersetzen und eine vollwertige Alternative zu herkömmlichen Datenübertragungslösungen zu schaffen. Die PLC lässt sich flexibel in verschiedene Netzwerktopologien anordnen.

Bei älteren Netzwerktopologien sind alle Teilnehmer an einer gemeinsamen Busleitung angeschlossen und übertragen ihre Datenpakete über diese. Moderne Netzwerktopologien, wie sie beispielsweise bei AFDX verwendet werden, ermöglichen die gezielte Weiterleitung von Datenpaketen durch einen Switch, der die Übertragung an die jeweiligen Teilnehmer steuert.[20] [21]

In dem nachfolgenden Abschnitt werden CAN (ARINC 852), ARINC 429, ARINC 629 und ADFX (ARINC 664) mit der PLC aus dieser Arbeit verglichen, um die Sinnhaftigkeit der Nutzung einer PLC für Luftfahrtanwendungen zu untersuchen.

CAN wird in diesem Kapitel mit einem höheren Detailgrad als die anderen Bussysteme und Netzwerke behandelt. Dies ist dadurch begründet, dass die im Projekt verwendete PLC die zu übertragenden Daten als CAN-Nachricht empfängt und nach der Übertragung über die Powerleitung wieder als CAN-Nachricht an den Empfänger weiterleitet.

2.2.1 Controller Area Network (Aeronautical Radio Incorporated 825)

Das CAN-Protokoll wurde 1983 von Bosch für den Einsatz in Autos entwickelt. Ziel war eine Reduktion des Gewichts und der Komplexität in immer größer werdenden Kabelbäumen. Neben dem Einsatz in der Automobilbranche findet CAN wegen seiner hohen Störsicherheit und Echtzeitfähigkeit Anwendung in vielen anderen Industrien wie beispielsweise in der Luftfahrt. [22]

CAN spielt heutzutage eine zentrale Rolle als Bussystem in der Luftfahrt und wird in Luftfahrzeugen wie dem Airbus A380, A350 und der Boeing 787 verwendet. Die Anwendung von CAN in der Luftfahrt wurde im ARINC 825 Standard festgehalten. Notwendige Interfaces und Schnittstellen sind dort definiert. Eine universelle Anwendbarkeit des Standards auf verschiedene Luftfahrzeuge ist vorgesehen. [23]

Hauptbestandteil einer CAN-Verbindung ist ein geschirmtes Kabel mit drei Leitungen: CAN-High, CAN-Low und CAN-GND. Beide Leitungsenden müssen mit $120\ \Omega$ terminiert werden. Über die Leitungen wird ein differentielles Signal übertragen. Das bedeutet, dass ein Bit gleichzeitig auf zwei Leitungen mit einer entgegengesetzten Flanke übertragen wird. Diese Form der Übertragung verleiht CAN seine hohe Störsicherheit, da beide Signale gleichermaßen entgegengesetzt gestört werden müssten, um das Signal am Empfänger nicht mehr eindeutig identifizieren zu können. [22]

Wenn auf dem Bus zwei dominante Signale vorliegen, also auf den CAN-High und -Low Leitungen entgegen gesetzte Flanken bestehen, wird der Zustand als dominant bezeichnet. Logisch entspricht dieser Zustand einer 0.

Wenn beide Pegel identisch sind und auf Null Volt liegen, ist der Zustand rezessiv. Logisch entspricht dies einer 1.

Die logische 1 kann auch mit einem dritten Zustand hochohmig erreicht werden. [22]

Die Zustände sind im unteren Teil von Abbildung 2.5 dargestellt.

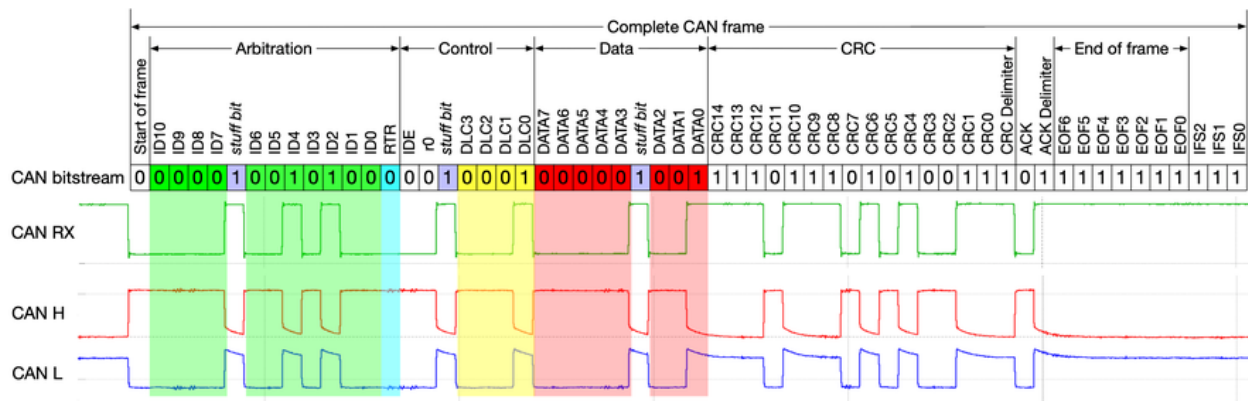


Abbildung 2.5: Darstellung eines Controller Area Network Frames inklusive Bitstreams und Flanken von CAN-High und Low [24]

Als Beispiel für den rezessiven Zustand kann das sechste Bit (stuff bit) von links in Abbildung 2.5 hinzugezogen werden. Um binär eine 1 darzustellen, werden die CAN H (rot) und CAN L (blau) Leitungen auf Null Volt gezogen.

Der dominante Zustand kann in Abbildung 2.5 am ersten Bit von links (start of frame) erkannt werden. CAN H (rot) wird auf High gezogen und CAN L (blau) auf Low. Somit nehmen beide Leitungen einen entgegengesetzten Zustand ein, welcher binär als eine 0 interpretiert wird.

In Abbildung 2.5 ist ein kompletter CAN-Frame abgebildet. Anhand der Funktionen der einzelnen Bits können sie, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, in sechs Kennfelder zusammengefasst werden.

Das erste Bit ist das „Start of frame“-Bit und dient der Synchronisation.

Daraufhin folgen 11 „Identifizier“-Bits. Mittels dieser können Nachrichten priorisiert werden und Informationen für den Empfänger werden hier hinterlegt. Auf die „Identifizier“-Bits folgt ein Remote Transmission Request (RTR)-Bit, welches zum Unterschieden zwischen Data und Remote Frame genutzt wird. In Abbildung 2.5 werden die „Identifizier“- und RTR-Bits unter „Arbitration“, also Arbitrierung zusammengefasst. [22]

Der Bereich „Control“ in Abbildung 2.5 umfasst das Identifier Extension (IDE)-, r0- und vier Data Length Code (DLC)-Bits.

Mittels dieser Bits können weitere „Identifizier“ Informationen sowie Hinweise auf Reservierungen und Nachrichtenlängen übermittelt werden. [22]

Auf diesen Abschnitt folgen null bis acht „Data“-Bits, mit welchen Informationen übertragen werden. Zur Verifikation der korrekten Übertragung der CAN-Nachricht folgen sechzehn Cyclic Redundancy Checks (CRC)-Bits. Nach den CRC-Bits folgen Acknowledgement (ACK)-Bits, welche den Teilnehmern dazu dient zu bestätigen, dass die Nachrichten korrekt erhalten wurden. [22]

Eine CAN-Nachricht wird mit sieben „End of frame“-Bits abgeschlossen. Sie indizieren das Ende der Nachricht und werden von drei Intermission Frame Space (IFS)-Bits gefolgt. Die IFS-Bits dienen als Abstandhalter für die nächste CAN-Nachricht. [22]

Neben den normalen Bits sind in Abbildung 2.5 sogenannte „Stuffing-Bits“ enthalten. Aufgrund der vorgegebenen synchronen Verarbeitung der CAN-Nachrichten durch alle Teilnehmer und der Ableitung der Taktraten aus den Bus-Signalen sind Unregelmäßigkeiten durch fehlende Flankenwechsel unerwünscht. Für die Synchronisation wird daher nach fünf identischen Bits ein „Stuffing-Bit“ angeführt und auf den entgegengesetzten Wert gesetzt. Das Bit hat keinen Einfluss auf den Inhalt der Nachricht. Ein Beispiel für ein „Stuffing-Bit“ kann in Abbildung 2.5 gefunden werden. Das sechste Bit von links ist auf 1 gesetzt und dient als „Stuffing-Bit“, da die vorherigen Bits alle 0 sind. [25]

Mit CAN sind Bitraten von bis zu 1 Mbit/s möglich. Die mögliche Übertragungsgeschwindigkeit ist allerdings von der Kabellänge abhängig. Beispielsweise ist die maximale Bitrate bei einer Kabellänge von 125 m 500 kbit/s [22]. In Anbetracht der langen Kabelstrecken in Luftfahrzeugen ist dies ein limitierender Faktor für den Einsatz von CAN für manche Anwendungsfälle.

Im Zuge dieser Arbeit war der Inhalt der versendeten CAN-Frames nicht relevant. Daher wurden sie mit willkürlichen Daten versehen, um potenzielle Schwachstellen zu erkennen, falls bei der Übertragung die Inhalte verändert wurden.

Es darf im CAN-Bus jeweils ein Teilnehmer gleichzeitig eine Nachricht versenden. Allerdings sind die Abstände und Reihenfolge, wie und von wem die Nachrichten versendet werden dürfen, nicht geregelt. Daher gibt es eine Kollisionsprüfung. Mittels der „Identifier“ Bits kann eine Priorisierung der einzelnen Nachrichten vorgenommen werden, um eine Kollision zu verhindern. [22]

2.2.2 Aeronautical Radio Incorporated 429

ARINC 429 ist ein unidirektionaler Datenbus und wurde in den 1970ern entwickelt. Er besteht aus einem Sender und bis zu 20 Empfängern. Für die Übertragung werden geschirmte und verdrehte Zweidrahtleitungen benötigt, mit einer Leitungsimpedanz von $75\ \Omega$.

Die Übertragung findet ebenfalls wie bei CAN über einen differentiellen Betrieb statt. Drei Zustände sind definiert. Wenn Leitung A gegenüber Leitung B mit 7.25 V bis 11 V positiv ist, wird er Zustand High also binär 1 abgebildet. Sollte Leitung A gegenüber B mit -7.25 V bis -11 V negativ sein, wird der Zustand Low, binär 0 abgebildet. Wenn beide Leitungen in einem Bereich zwischen -0.5 V und +0.5 V vorliegen, wird der Zustand Null dargestellt. Demnach werden vom Sender Datenwörter oder der Nullzustand übermittelt. [20]

ARINC 429 kann Daten mit zwei verschiedenen Datenraten übertragen. Im Highspeed Betrieb werden Daten mit 100 kbit/s übertragen. Bei der Lowspeed Übertragung liegen die Datenraten zwischen 12 und 14.5 kbit/s. [20]

2.2.3 Aeronautical Radio Incorporated 629

Der bidirektionale Datenbus ARINC 629 wurde von Boeing für das Verkehrsflugzeug Boeing B777 entwickelt und ist eine Weiterentwicklung von ARINC 429. Dazu nutzt der Bus verdrehte Zweidrahtleitungen mit einem Busabschluss von $130\ \Omega$. Der Standard kann auch auf die Übertragung mittels Glasfaserleitungen erweitert werden. [20]

Am Bus können gleichzeitig bis zu 120 Teilnehmer partizipieren. In diesem Fall sind die Teilnehmer meist Line Replacable Units (LRU). Mehrfachzugriffe werden mittels Time Division Multiple Access (TDMA) ermöglicht. Datenkollisionen werden von LRUs erkannt. Die Signale werden nach bipolar Manchester II codiert und mittels eines aktiven Buskopplers induktiv aufgekoppelt. Sendedaten werden mit $\pm 4.5\text{ V}$ übertragen. Die Empfangsschwelle liegt bei $\pm 0.7\text{ V}$ mit einer Variabilität von $\pm 1\text{ V}$. Eine maximale Datenrate von 2 Mbit/s ist mit diesem Bus möglich. [20]

2.2.4 Avionics Full Duplex Switched Ethernet (Aeronautical Radio Incorporated 664)

AFDX, auch als ARINC 664 bekannt, ist eine von Airbus entwickelte Erweiterung des Ethernet Standards IEEE 802.3. Es findet Einsatz in Luftfahrzeugen wie dem Airbus A350, A400M, A380 und der Boeing B787.

Dank der Zweifachredundanz durch zwei Sende- und Empfangskabelpaare sowie der Vollduplex-Architektur, die Kollisionen von Datenpaketen verhindert, eignet sich AFDX ebenso wie die anderen hier genannten Datenübertragungssysteme für sicherheitskritische Anwendungen. Als Verkabelung werden paarweise verdrehte, ungeschirmte Zweifachleitungen verwendet. AFDX bietet eine hohe Datenrate von bis zu 100 Mbit/s. [20]

Da es sich bei AFDX um einen Netzwerkstandard handelt, unterscheidet sich die Topologie von den vorher genannten Bussystemen. Alle Subsysteme werden mittels eines Empfänger- und Senderleitungspaares mit einem AFDX Switch verbunden. Im Switch

wird anhand von der „Virtual Link ID“ und einer im Switch hinterlegten Tabelle entschieden, wer der Empfänger der Datenpakete ist. [20]

2.2.5 Vergleich der Datenübertragungssysteme

Für einen einheitlichen Vergleich aller genannten Datenübertragungssysteme dienen folgende Kategorien als gemeinsame Vergleichsgrundlage: Datenrate, Sender pro Bus, Kabelschirm und Aderanzahl. Diese Kategorien wurden gewählt, da sie zentrale Aspekte dieser Systeme unterstreichen. Die Datenrate und Sender pro Bus geben Aufschluss über die Fähigkeiten des Systems. Die Notwendigkeit eines Kabelschirms und die Aderanzahl sind wichtige Indizien für potenzielle Gewichtseinsparungen und die Störfestigkeit der Systeme. Zudem sind dies Bereiche, wo die PLC Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Systemen verspricht, ohne an anderen Stellen Nachteile aufzuweisen. Tabelle 2.1 listet einen Vergleich der festgelegten Kategorien der hier erklärten Datenkommunikationssysteme auf.

Tabelle 2.1: Vergleich der Eigenschaften von Datenübertragungssystemen für Luftfahrtanwendungen

	CAN / ARINC 852	ARINC 429	ARINC 629	AFDX / ARINC 664	PLC- Modem
Datenrate	1 Mbit/s	500 kbit/s	2 Mbit/s	100 Mbit/s	205 Mbit/s
Sender pro Bus	N/S	1 Sender 20 Empfänger	120	N/S	N/S
Kabelschirm	Ja	Ja	Ja	Nein	N/A
Aderanzahl	3	2	2	Paarweise Kabeln mit à 2 Adern	1-2

Der Kategorie Datenrate aus Tabelle 2.1 ist zu entnehmen, dass das verwendete PLC-Modem mit 205 Mbit/s die höchsten Übertragungsgeschwindigkeiten hat. Dadurch ist das PLC-Modem für anspruchsvolle Anwendungen geeignet. Ein Beispiel für eine sol-

che Anwendung könnte eine Flugregelung sein, welche von einer hohen Abtastrate profitieren kann.

Bei CAN, AFDX und dem PLC-Modem sind keine maximalen Teilnehmerzahlen spezifiziert. Anlässlich der Nutzung der gegebenen PLC Modems ist die Teilnehmerzahl durch die Anzahl an verwendeten Modems begrenzt. Somit existiert die Möglichkeit, einen Großteil an Teilnehmern mittels PLC zu verknüpfen. Wegen der mangelnden Informationen über die Teilnehmerzahl bei CAN, AFDX und dem PLC-Modem kann keine eindeutige Aussage in der Kategorie Sender pro Bus getroffen werden.

Im Kontext der Nutzung eines Kabelschirms ist AFDX die einzige Datenübertragungstechnologie, bei der kein Schirm vorgesehen ist. Bei Kabelschirmen muss mit einem erheblichen Gewicht gerechnet werden.

Erste Untersuchungen der PLC-Modems ergaben, dass ein beidseitig aufgelegter Kabelschirm für die Erfüllung der Anforderungen der ED-14E genügen würde [7]. Allerdings war der Testaufbau nicht getreu einer Integration in ein LFZ. Zudem müssen aktuelle Untersuchungen nach der ED-14G und somit anhand einer neueren Norm mit strengeren Grenzwerten durchgeführt werden [9].

Eine Aussage über eine Empfehlung eines Kabelschirms für die Nutzung der PLC in LFZ wird anhand der Ergebnisse dieser Arbeit getroffen.

In Anbetracht der notwendigen Aderanzahl wird aus Tabelle 2.1 deutlich, dass die PLC-Modems auch mit einer einzigen Ader auskommen. Zudem basieren die anderen Technologien auf einer Datenübertragung über getrennte Kabel bei der Versorgungsleitung und Datenleitung. Da die PLC für die Datenübertragung lediglich die Versorgungsleitung mit einer Ader benötigt, ist sie in dem Aspekt den anderen Technologien überlegen. Versorgungsleitungen mit einer Ader können in Luftfahrzeugen gefunden werden, wo die Flugzeugzelle als Rückleiter dient.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass für den Einsatz in sicherheitskritischen An-

wendungen eine weitere Redundanzebene benötigt wird. Hierdurch kommen weitere Kabel hinzu, welche beispielsweise bei AFDX bereits in der Auflistung in Tabelle 2.1 berücksichtigt wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die PLC in vielen der ausgeführten Kategorien eindeutige Vorteile bietet. Speziell in den Kategorien der Datenrate und Aderanzahl konnte die PLC überzeugen.

Da die Datenübertragung über eine Versorgungsleitung stattfindet, können hohe Emissionen auf dieser Leitung erwartet werden. Dies kann mit einem aufwendigen und schweren Kabelschirm einhergehen. Eine Empfehlung zur Nutzung eines Kabelschirms bei der Verwendung einer PLC in Luftfahrzeugen kann in Abschnitt 8 gefunden werden.

2.3 Grundlagen der elektromagnetischen Verträglichkeit

Alle elektronischen Geräte senden elektromagnetische Felder aus. Neben den gewollten elektromagnetischen Feldern, wie beispielsweise bei Funk, sind die Felder meistens unerwünscht. Oftmals werden sie ungewollt erzeugt und können das Gerät, von dem sie emittiert werden, oder umliegende Geräte stören. Als Resultat wird die Funktionalität degradiert oder im schlimmsten Fall komplett herabgesetzt. Solche Störungen, wie sie im Alltag auftreten, äußern sich beispielsweise durch Rauschen oder Knacken im Funk oder durch Bildstörungen auf Monitoren. Daher versteht sich unter der elektromagnetischen Verträglichkeit, dass ein Gerät in einer elektromagnetischen Umgebung ungestört funktionieren kann und zeitgleich umliegende Geräte nicht durch elektromagnetische Strahlung stört. [26]

An der elektromagnetischen Wechselwirkung, wie sie bei der Übertragung von Emissionen vorliegt, sind drei Komponenten beteiligt: Der Sender (die Störquelle), der Übertragungsweg (Koppelmechanismen) und der Empfänger (Störsenke). Aus diesen Komponenten können drei zentrale Aufgaben zum Verbessern der elektromagnetischen Verträglichkeit abgeleitet werden: Die Emissionen an der Quelle reduzieren oder be-

seitigen, den Kopplungspfad so ineffizient wie möglich gestalten und den Empfänger so störfest wie möglich auslegen. Welche der Möglichkeiten oder ob alle umgesetzt werden ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Beispielsweise ist es nicht immer möglich eine Störquelle zu identifizieren, weswegen dann beispielsweise die Störfestigkeit des gestörten Gerätes erhöht werden muss. Zusätzlich muss ständig beachtet werden, ob es sich um Inter- oder Intrasystem-Beeinflussungen handelt. Dies bedeutet, dass untersucht werden muss, ob die festgestellten Störungen von außerhalb oder innerhalb der Systemgrenzen emittiert und eingekoppelt werden. [27] [28]

In der EMV kann zwischen vier Aspekten unterschieden werden. Sie sind in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt.

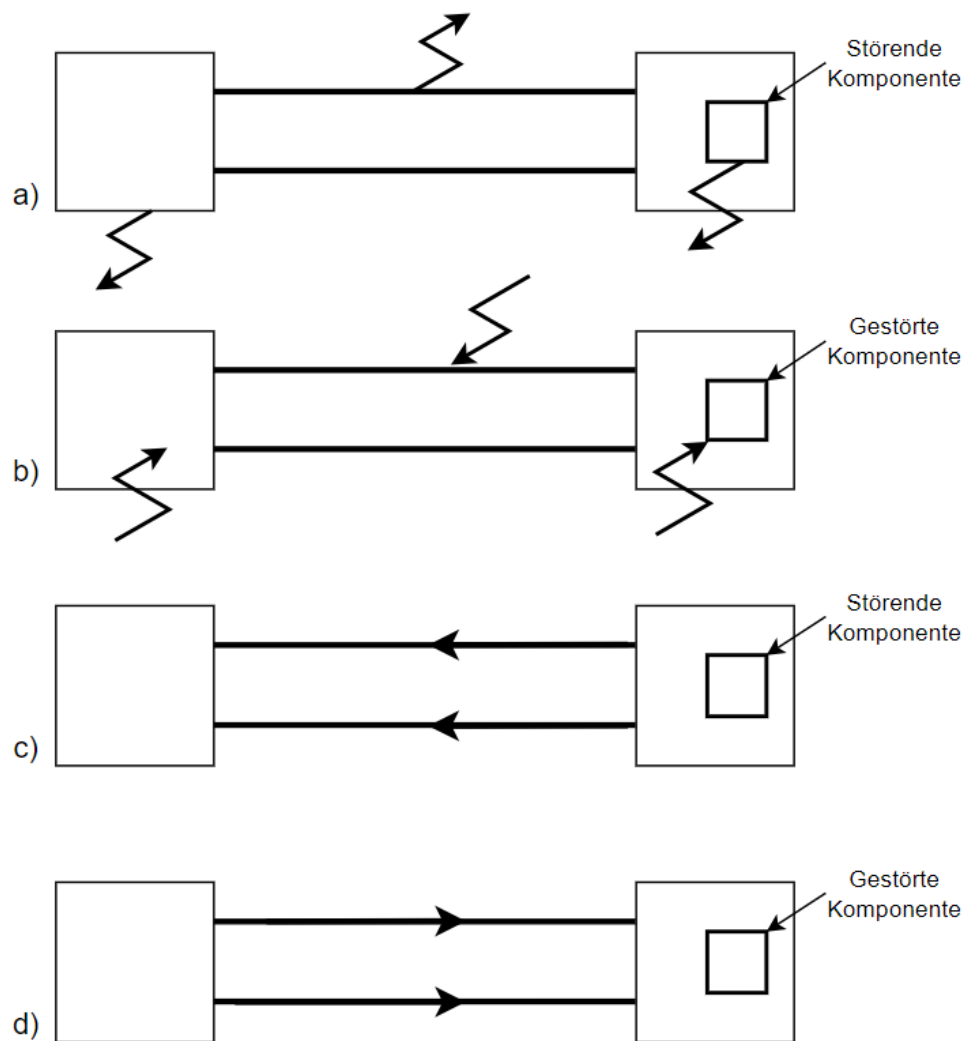


Abbildung 2.6: Die vier Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit

Die vier Aspekte, wie sie in Abbildung 2.6 abgebildet sind, werden als gestrahlte Emissionen (a), gestrahlte Störfestigkeit (b), leitungsgebundene Emissionen (c) und leitungsgebundene Störfestigkeit (d) bezeichnet. In den nachfolgenden Abschnitten werden sie im Detail beschrieben.

2.3.1 Gestrahlte Emissionen

Der erste Aspekt ist in Abbildung 2.6 mit a) gekennzeichnet. Dargestellt werden die gestrahlten Emissionen. Zeitvariable Ströme erzeugen elektromagnetische Felder, welche abhängig vom Frequenzbereich, auch als gestrahlte Emissionen gemessen werden können. Meist sind die Ursachen für solche Störungen hochfrequent taktende Komponenten. Störungen können sowohl von der Komponente selbst als auch von den umliegenden Komponenten und Kabeln abgestrahlt werden. [27] [28]

Laut der ED-14G Sektion 21 soll bei den gestrahlten Emissionen ein Frequenzbereich von 100 MHz bis 6 GHz gemessen werden [9]. Dafür werden verschiedene Antennen für unterschiedliche Frequenzbereiche verwendet. Zudem wird ein Messempfänger genutzt, um die gemessenen Signale aufzunehmen. Die Antennen, zugehörige Frequenzbereiche und Messempfänger sind in Abschnitt 5.1.1 detailliert beschrieben. Da es sich bei elektromagnetischen Wellen um Transversalwellen handelt, bestehen sie aus zwei orthogonalen Feldern, welche als horizontale und vertikale Komponente, auch Polarisation genannt, aufgefasst werden können [27]. Daher werden bei allen gestrahlten Emissionsmessungen vertikale und horizontale Ausrichtungen der Antennen gemessen [9].

In der ED-14G Sektion 21 sind unterschiedliche Grenzwerte für den Einbau des Equipments under Test (EUT) an verschiedenen Stellen im Luftfahrzeug vorgeschrieben. Die Kategorien für den Einbau des EUTs innerhalb des Luftfahrzeugs sind am wenigsten streng, da sich die Geräte nicht im Empfangsbereich der Antennen befinden. Die Kategorien CAT-B, CAT-L und CAT-M gelten für den Einbau innerhalb des Luftfahrzeugs,

wobei CAT-M die höchsten Anforderungen an die Emissionswerte stellt.

In den Kategorien CAT-H, CAT-P und CAT-Q wird der Einbau des EUTs außerhalb des Luftfahrzeugs berücksichtigt. Dort befindet sich das EUT im Empfangsbereich von Antennen wie der Very High frequency (VHF)- und Global Positioning System (GPS)-Antennen. [9]

Die Messungen der gestrahlten Emissionen werden nach Vorschrift innerhalb einer EMV-Kammer durchgeführt [9]. Sie gewährleistet eine ungestörte Umgebung, frei von gestrahlten elektromagnetischen Feldern, um reproduzierbar Messungen durchzuführen. Es muss zwischen Vollabsorber-Kammern und Halbabsorber-Kammern unterschieden werden. Bei Vollabsorber-Kammern sind alle Flächen mit Urethan Pyramidenabsorbern bedeckt. Sie helfen Reflexionen der elektromagnetischen Strahlung mittels Energieabsorption zu minimieren. Bei Halbabsorber-Kammern sind nicht alle Oberflächen mit Urethan Pyramidenabsorbern bedeckt. Zusätzlich besteht der Boden einer Halbabsorber-Kammer aus einer Metallplatte. In beiden Fällen sind alle Wände mit Ferritkacheln bedeckt. [29]

In Abschnitt 5.1 ist die EMV-Kammer, welche in dieser Arbeit verwendet wird, sowie weitere zugehörige Komponenten detailliert beschrieben.

2.3.2 Gestrahlte Störfestigkeit

Der zweite Aspekt, welcher in Abbildung 2.6 mit b) gekennzeichnet ist, bezieht sich auf die gestrahlte Störfestigkeit. Elektromagnetische Strahlung, welche von umliegenden Geräten emittiert wird, kann über verschiedene Mechanismen eingekoppelt werden. Dies geschieht durch umliegende Gerätschaften, Kabel oder direkt am gestörten Gerät. [27] [28]

Zur Untersuchung der gestrahlten Störfestigkeit werden, wie bei der gestrahlten Emissionsmessung, verschiedene Antennen abhängig vom Frequenzbereich verwendet. Im

Abschnitt 5.1.1 werden sie näher beschrieben. Der untersuchte Frequenzbereich ist identisch zur gestrahlten Emissionsmessung. Um verschiedene Polarisationen zu untersuchen werden die Antennen einmal vertikal und einmal horizontal ausgerichtet. [9] Bei Störfestigkeitsuntersuchungen wird ein Verstärkerrack verwendet [9]. Das Verstärkerrack wird in Abschnitt 5.1.1 beschrieben. Eine genaue Beschreibung des Aufbaus befindet sich in Abschnitt 6.2.

Die ED-14G Sektion 20 sieht für gestrahlte EMS Untersuchungen verschiedene Kategorien vor. Sie unterscheiden sich primär in ihren Feldstärken, abhängig von der vorgesehenen Einbauposition im LFZ. Zudem gibt es hier auch Unterschiede in der Modulation der ausgestrahlten Felder innerhalb der unterschiedlichen Kategorien. In der Tabelle A.1 im Anhang sind alle Kategorien mit ihren frequenz- und modulationsabhängigen Feldstärken festgehalten. Die Abkürzung „PM“ steht in Tabelle A.1 für Puls Modulation, „CW“ für kontinuierliche Welle und „SW“ für Rechtecksignal. Sie beschreiben die verschiedenen Modulationen, die untersucht werden können. Die für diese Arbeit notwendigen Kategorien sind in Abschnitt 5.1.1 spezifiziert.

Zusätzlich sind bei gestrahlten EMS Untersuchungen höhere Frequenzen von bis zu 18 GHz vorgesehen, im Vergleich zu den maximal 6 GHz bei den gestrahlten Emissionsmessungen. Aufgrund von Hardwarelimitierungen wird der obere Frequenzbereich in dieser Arbeit nicht untersucht.

2.3.3 Leitungsgebundene Emissionen

Der dritte Aspekt in Abbildung 2.6, welcher mit c) gekennzeichnet ist, sind die leitungsgebundenen Emissionen. Im Gegensatz zu den gestrahlten Emissionen, werden hier keine Felder, sondern Ströme betrachtet.

Leitungsgebundene Emissionen können als Gleichtakt- und Gegentaktstörungen klassifiziert werden. Bei Gleichtaktstörungen fließt der Störstrom bei zwei parallelen Adern in dieselbe Richtung. Ursachen für diese Form von leitungsgebundenen Störungen sind

häufig Potenzialdifferenzen im Erdungsnetz und die daraus resultierenden Ausgleichsströme, die Einkopplung magnetischer Störfelder oder die Einkopplung gestrahlter elektromagnetischer Felder. Gegentaktstörungen liegen vor, wenn der Störstrom entgegengesetzt auf zwei parallelen Adern fließt. Sie entstehen meist durch galvanische Kopplung, magnetische Kopplung, Gleichtakt- / Gegentakt-Konversion oder feldgebundene Störbeeinflussung. [28]

Ab 30 MHz können abhängig von der Leitungslänge und Stromstärke leitungsgebundene Emissionen auch als gestrahlte Emissionen wahrgenommen werden [27].

Um Gleich- und Gegentaktstörungen zu messen, wird eine Strommesszange und ein Messempfänger benötigt. Die für diese Arbeit genutzten Instrumente werden in Abschnitt 5.1.1 erläutert. Zusätzlich zu den benötigten Messinstrumenten müssen die Kabel wie in Abbildung 2.7 in der Strommesszange platziert werden.

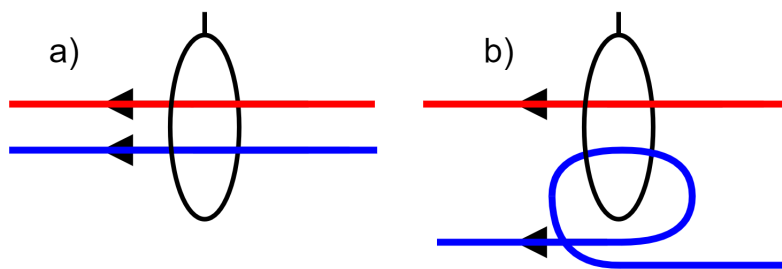


Abbildung 2.7: Messung von Gleichtakt- und Gegentaktstörungen

a) kennzeichnet in Abbildung 2.7 die Messung von Gleichtaktstörungen. Da die Leitungen parallel liegen, annullieren sich die entgegengesetzten Ströme der Gegentaktstörungen. Umgekehrt zeigt b) in Abbildung 2.7 die Messung der Gegentaktstörungen. Einer der Leitungen muss als Schlaufe durch die Strommesszange gelegt werden. Dadurch werden die zuvor parallelen Ströme nun zu entgegengesetzten und die Gleichtaktstörungen annullieren sich. So können die Gegentaktstörungen gemessen werden.

Äquivalent zu den gestrahlten Emissionen sieht die ED-14G Sektion 21 auch für leitungsgebundene Emissionen unterschiedliche Grenzwerte abhängig von vorgesehenen Einbauort der EUT im LFZ vor. Hierbei sind die Kategorien identisch zu denen der

gestrahlten Emissionen. Nur der Frequenzbereich und entsprechende Einkerbungen im Grenzwert unterscheiden sich. Der betrachtete Frequenzbereich liegt von 150 kHz bis 152 MHz.

2.3.4 Leitungsgebundene Störfestigkeit

Der letzte Aspekt in der EMV ist die leitungsgebundene Störfestigkeit. In Abbildung 2.6 ist sie unter dem Punkt d) abgebildet.

Äquivalent zur gestrahlten Störfestigkeit stören leitungsgebundene Emissionen umliegende Komponenten. Bei Gegentakstörungen könne beispielsweise Nutzsignale vorgetäuscht werden, die zu einer inkorrekten Funktionalität des EUT führen. Gleichtaktstörungen bewirken beispielsweise eine indirekte Funktionsstörung. [28]

Um die leitungsgebundene Störfestigkeit zu untersuchen, wird eine „Current-Injection-Probe“ verwendet. Der Aufbau für eine leitungsgebundene Störfestigkeitsuntersuchung wird in Abschnitt 6.2.2 beschrieben. Zusätzlich zu der „Current-Injection-Probe“ werden eine Strommesszange, Kalibriervorrichtung, Messempfänger und ein Verstärker benötigt. Die Instrumente werden in Abschnitt 5.1.1 näher beschrieben. Die Durchführung der Kalibrierung wird in Abschnitt 5.1.2 erläutert. [9]

Auch hier sieht die Norm unterschiedliche Kategorien für die Untersuchung der Störfestigkeit vor. Im Anhang sind die unterschiedlichen Kategorien mit Frequenzen und Strömen in der Tabelle A.2 aufgelistet. [9]

Die für diese Arbeit relevanten Kategorien sind in Abschnitt 5.1.1 dargestellt.

2.3.5 Kopplungsmechanismen

Elektromagnetische Emissionen können sich über verschiedene Mechanismen in Systeme einkoppeln. Es ist wichtig, diese Mechanismen zu kennen, um die Ursache von potenziellen Störungen zu verstehen. Der nachfolgende Abschnitt schildert die vier ty-

pischen Kopplungsmechanismen.

Der erste Mechanismus ist die galvanische Kopplung. Wenn zwei Stromkreise ein gemeinsames Leitungsstück nutzen, liegt ein gemeinsamer Bezugs- oder Rückleiter vor. Es existiert eine gemeinsame Impedanz. Über sie können Emissionen von einem Stromkreis in den anderen übertragen werden. [28] [30]

Gegebenenfalls kann es auch zur Erdschleifenbildung kommen, was je nach Konfiguration in Gleich- oder Gegentakstörungen resultieren kann. [28]

Folgende Gegenmaßnahmen sind zur Reduktion oder Vermeidung der galvanischen Kopplung möglich: Trennen der Stromkreise, Kurzhalten von gemeinsamen Zuleitungen, Verzweigungspunkte möglichst nah an Stromquellen legen und gemeinsame Leiterstücke niederohmig und induktivitätsarm auslegen. [30]

Ein weiterer Kopplungsmechanismus ist die kapazitive Kopplung. Ursache für eine kapazitive Kopplung sind elektrische Wechselfelder mit Spannung als Störgröße. Wenn beispielsweise zwei Leiter parallel über längere Strecken verlegt sind verhalten sie sich wie zwei gegenüberliegende Kondensatorplatten. Für hochfrequente Signale stellen sie einen Kurzschluss dar. [30]

Maßnahmen zur Verringerung der kapazitiven Kopplung umfassen das Vermeiden langer paralleler Leitungsführungen, das Schaffen größerer Abstände zwischen den Leitungen, das einseitige Auflegen eines Kabelschirms sowie das Verdrillen von Leitungspaaren. [30]

Induktive Kopplung beschreibt das Einkoppeln von Emissionen über ein magnetisches Wechselfeld. Stromdurchflossene Leiter erzeugen ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld beeinflusst parallele Leiter und induziert in ihnen eine Spannung. Daraus resultiert eine induzierte Spannung im gestörten Leiter. [30]

Maßnahmen zur Reduzierung der induktiven Kopplung umfassen das Vergrößern des Abstands von Stromkabeln auf mindestens 1 Meter, das Minimieren paralleler Leitungs-

führungen, das Verdrillen der Leitungen sowie den Einsatz beidseitig aufgelegter Schirme. [30]

Die Kombination aus induktiver und galvanischer Kopplung wird als Leitungskopplung bezeichnet [28] [27].

Der letzte hier behandelte Kopplungsmechanismus ist die strahlungsgebundene Kopplung. Hier können elektrische oder magnetische Felder die Störung verursachen. Dabei ist dies je nach Störtyp unterschiedlich. Allgemein sorgen Ströme für ein magnetisches- und Spannungen für ein elektrisches-Feld. Bei strahlungsgebundener Kopplung handelt es sich um hochfrequente Felder. Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 beschrieben werden Störungen als Felder mit einer Frequenz höher als 30 MHz von Leitungen abgestrahlt. Die Felder können in umliegende Kabel eingekoppelt werden und störend wirken. [30] [28]

Als Gegenmaßnahme für die strahlungsgebundene Kopplung sollten Schirme mit einem hohen Reflexions- und Absorptionsvermögen eingesetzt werden. [30]

2.4 Kabelcharakteristiken

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist die Auslegung luftfahrttauglicher Kabel mit verschiedenen Schirmungen. Dabei sind wichtige Aspekte bezüglich der Kabeleigenschaften zu berücksichtigen. Der folgende Abschnitt beleuchtet daher die grundlegenden Charakteristiken von Kabeln.

2.4.1 American Wire Gauge

Der Durchmesser von Kabeln wird mittels der Größe American Wire Gauge (AWG) angegeben. Sie wurde im neunzehnten Jahrhundert von Joseph Roger Brown entwickelt. Die Größe basiert auf dem Herstellverfahren von Drähten, wobei die Größe die Anzahl der Ziehschritte angibt. Somit bedeutet eine hohe AWG-Zahl, dass die Drähte immer dünner werden. [31]

Das Durchmesser Verhältnis der aufeinanderfolgenden AWG-Größen kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\frac{d_{AWG-1}}{d_{AWG}} = \sqrt[39]{\frac{0.46}{0.005}} = 1.1229322 \quad (2.2)$$

Die Zahlenwerte in dieser Formel werden in Inch angegeben. Mit einer geeigneten Konversion und Umstellung kann der Durchmesser der AWG Zahl mittels folgender Formel in mm umgerechnet werden:

$$d_{mm} = 0.127mm * 92^{\frac{36-AWG}{39}} \quad (2.3)$$

Kabel, welche einen größeren Durchmesser als 0 AWG haben, werden mit mehreren Nullen gekennzeichnet [31].

2.4.2 Strombelastbarkeit

Eine weitere wichtige dimensionierende Größe bei Kabeln ist die Strombelastbarkeit. Durch den Fluss von elektrischem Strom entsteht Wärme. Je größer der Strom, desto größer die resultierende Wärme. Somit ist die Strombelastbarkeit als der Strom definiert, bei dem die Isolation oder die Leitung durch die resultierende Wärme schmelzen. Weitere Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, sind die Umgebungstemperatur, die Zahl an gebündelten Leitungen und der Durchmesser der Leitungen. [32]

Bei hohen Umgebungstemperaturen wird eine kleinere Wärmeentwicklung benötigt, um die Schmelztemperatur zu erreichen [32]. Der Faktor ist in begrenzten Bauräumen für elektrische Einrichtungen mit schlechter Wärmeabfuhr relevant.

Wenn mehr Adern mit individueller Isolation gebündelt vorliegen, kann weniger Wärme abgeführt werden. Dies resultiert in einer schnelleren Wärmezunahme. [32]

Zuletzt ist ausschlaggebend welchen Durchmesser die Leitungen aufweisen. Je größer der Durchmesser desto höher die Strombelastbarkeit. Dabei muss auch die maximale Temperatur der Isolation berücksichtigt werden. [32]

In den Datenblättern sind die maximale Temperatur, der Leitungsdurchmesser und die Zahl an Leitungen angegeben. Zusätzlich muss die maximale Umgebungstemperatur der Anwendung bekannt sein. Mittels dieser Faktoren und unter Zuhilfenahme von Tabellen aus Standards wie beispielsweise der VDE 0298-4 kann der maximale Strom berechnet werden, den das Kabel führen kann. In den Tabellen sind abhängig vom Durchmesser, maximaler Temperatur und der Aderanzahl entsprechende Ströme und Aufschläge aufgeführt. [33]

2.4.3 Kabelschirme

In diesem Abschnitt werden drei Schirmungsarten betrachtet: der einseitig aufgelegte Schirm, der beidseitig aufgelegte Schirm sowie der Doppelschirm, bei dem der innere Schirm einseitig und der äußere Schirm beidseitig aufgelegt ist.

Der einseitig aufgelegte Kabelschirm ist effektiv gegen das Einkoppeln von elektrischen Feldern durch kapazitive Kopplung sowie gegen das Abstrahlen dieser Felder. Gleichzeitig basiert das Wirkungsprinzip auf der kapazitiven Kopplung zwischen der Schirmung und dem störenden Leiter. [29]

Bei der kapazitiven Kopplung ist die Spannung die dimensionierende Größe. Die ungewollte, im Nebenleiter induzierte Spannung wird als U_S bezeichnet. Da das elektrische Feld, welches für die Induktion der ungewollten Störspannung verantwortlich ist, von der Spannung im störenden Leiter abhängt, ist sie als U_1 beschrieben.

Zusätzlich müssen für die Modellierung der kapazitiven Kopplung die Kapazitäten der parallelen Leitungen gegenüber der Erde berücksichtigt werden. Die Kapazität des störenden Kabels gegenüber der Erde wird als C_{1G} beschrieben. Bei dem gestörten Kabel wird sie als C_{2G} ausgedrückt.

Die Streukapazität zwischen den beiden Leitern wird als C_{12} beschrieben. [29]

Unter der Annahme, dass die Impedanz zur Erde der gestörten Leitung kleiner als die kombinierte Impedanz von C_{2G} und C_{12} ist, kann die resultierende Störspannung U_S mit der nachfolgenden Formel berechnet werden [29].

$$U_S = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right) * U_1 \quad (2.4)$$

Der einseitig aufgelegte Schirm kann äquivalent zu einem parallelen Leiter mit einseitig aufgelegter Erde gesehen werden. Daher ist Gleichung 2.4 für den Nachweis der Eliminierung von elektrischen Feldern durch einen einseitig angebundenen Schirm anwendbar.

Die induzierte Spannung im Schirm kann mit der nachfolgenden Modifikation der Gleichung 2.4 beschrieben werden. [29]

$$U_{Schirm} = \left(\frac{C_{1S}}{C_{1S} + C_{2SG}} \right) * U_1 \quad (2.5)$$

C_{1S} beschreibt die Streukapazität zwischen dem Schirm und der störenden Leitung und C_{2SG} die Kapazität des Schirmes gegenüber der Erde. Um die Störspannung auf Null zu bekommen, müssen alle Kapazitäten zu Null werden. Dies wird durch das einseitige niederohmige Erden des Schirms erreicht, was die Kapazitäten eliminiert. Durch das Erden des Schirms können die induzierten Ladungen abgeleitet werden. Dadurch können sich keine Störspannungen im geschirmten Leiter aufbauen. [29]

Der beidseitig aufgelegte Schirm ist effektiv gegen das Einkoppeln und Abstrahlen von magnetischen Wechselfeldern durch induktive Kopplung.

Es sei eine Leitung betrachtet, die über eine leitende Platte aufgespannt ist. Wenn nun ein magnetisches Wechselfeld durch die aufgespannte Fläche von Leitung und Platte fällt, wird dadurch eine induzierte Spannung an einer beliebigen Stelle der Leitung gemessen. Zur Berechnung des Magnetfelds $\vec{B}$ kann die Maxwell-Gleichung des Fara-

day'schen Gesetzes (Gleichung 2.6) verwendet werden. Die linke Seite von Gleichung 2.6 gibt das Wegintegral eines elektrischen Feldes $\vec{E}$ entlang einer geschlossenen Kurve an. Auf der rechten Seite von Gleichung 2.6 ist das Flächenintegral über die zeitliche Ableitung des magnetischen Flusses dargestellt.

Zur Berechnung der induzierten Spannung U_{Ind} wird Formel 2.7 verwendet. $\frac{d\phi}{dt}$ beschreibt die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses ϕ , wobei sich ϕ aus dem Produkt des Magnetfelds B und der Fläche A zusammensetzt. [34]

$$\oint \vec{E} * d\vec{s} = - \int \frac{\delta}{\delta t} * \vec{B} * d\vec{A} \quad (2.6)$$

$$U_{Ind}(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{mit} \quad \phi = B * A \quad (2.7)$$

Jetzt wird eine kurzgeschlossene Leitung neben der ursprünglichen Leitung angebracht. Diese Leitung repräsentiert einen Kabelschirm. Durch die neue aufgespannte Fläche, durch den Kurzschlussleiter, strömt ebenfalls der magnetische Fluss. Er induziert einen Strom I_2 . Durch den Strom wird im Kurzschlussleiter ein magnetisches Gegenfeld erzeugt. Dieses arbeitet entgegengesetzt zum Magnetfeld, welches auch in der Ursprungsleitung wirkt. So kann dem Einkoppeln oder Abstrahlen von magnetischen Wechselfeldern entgegengewirkt werden. [30]

Bei einem beidseitig angebundenen Schirm muss acht gegeben werden, dass sich durch das Aufziehen einer Erdschleife über den Schirm keine Gleich- oder Gegentakstörungen bilden. [27]

Ein Doppelschirm ist eine Kombination aus einem einseitig aufgelegtem Schirm und einem darüber gespannten beidseitig aufgelegtem Schirm. Diese Form von Schirmung bietet Schutz vor der Einkopplung und Abstrahlung von elektrischen und magnetischen Felder. Dennoch hat sie deutliche Nachteile in Bezug auf die Flexibilität und das Gewicht der Kabel. [30]

3 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Die Komplexität des Aufbaus, der begrenzte Platz im EMV-Labor, die begrenzten Ressourcen, die ED-14G und die Anforderungen der Stakeholder des Projektes WISDOM führen zu einer Vielzahl von Anforderungen, die bei der Auslegung der Kabel und des Aufbaus berücksichtigt werden müssen.

3.1 Anforderungen aus dem Projekt

Die Auswahl der Kabelschirme erfolgte unter Berücksichtigung von Faktoren wie Gewicht, Effektivität gegen verschiedene Felder, Flexibilität des Kabels und Anwendbarkeit für Luftfahrtanwendungen. Nach ausgiebiger Recherche und Konsolidierung mit Entwicklungsingenieuren wurden drei Schirmungen zur Untersuchung gewählt: Ein Doppelschirm, ein beidseitig aufgelegter Schirm und ein einseitig aufgelegter Schirm. Zudem soll die EMV-Untersuchung auch mit ungeschirmten Testkabeln durchgeführt werden. Ihre Effektivität gegen die Einkopplung und Abstrahlung verschiedener Felder sowie ihr Funktionsprinzip wurden im Detail in Abschnitt 2.4.3 erläutert.

Die beste Schirmwirkung wird bei einem Doppelschirm erwartet. Allerdings hat der Doppelschirm das größte Gewicht, was die potenzielle Effektivität der PLC-Modems als eine leichte Alternative zu bestehenden Systemen entkräften würde. Die Effektivität der beiden Konfigurationen mit Einfachschirmung hängt von der Art der Emissionen ab. Optimal wäre ein Verzicht auf einen Schirm für das beste Gewicht.

Für die EMV-Untersuchung werden PLC-Modems der Firma PLC-tec verwendet. Sie benötigen für den Betrieb folgende Kabel: 28 V DC Leitungen für die Spannungsversorgung der PLC-Modems, CAN-Leitungen für das Übertragen und Empfangen der CAN-Nachrichten, Ethernet Leitungen zur Konfiguration der Modems, Reset und Erdleitungen für den sicheren Betrieb sowie die Testkabel für die Übertragung der Signale über eine Versorgungsleitung. Die Adern der Kabel sollen verdreht sein. Außerdem müssen alle Kabel, mit Ausnahme des Testkabels, geschirmt sein. Am Testkabel, was die

Kommunikation zwischen den beiden PLC-Modems übernimmt, sollen verschiedene Schirmungen untersucht werden. [35]

3.2 Auslegung der elektrischen Last

Abgesehen von der Variation der Schirmung ist vorgesehen, den Prüfstand einmal mit 28 V DC und 230 V AC zu betreiben. Dies soll die Flexibilität der Modems in unterschiedlichen Betriebsmodi demonstrieren. [35] [36]

Da in den Untersuchungen die zwei genannten Spannungsversorgungsfälle betrachtet werden, muss der Widerstandswert der vorgesehenen elektrischen Last beachtet werden. Bei zu kleinen Widerstandswerten besteht im Wechselstrombetrieb, aufgrund der hohen Spannungswerte, die Gefahr einer extremen Wärmeentwicklung. Da die Anzahl an möglichen Störfaktoren in der EMV-Kammer gering gehalten werden sollen, wird keine aktive Kühlung verwendet. Um möglichst kosteneffektiv vorzugehen, wurden daher bereits gekaufte Widerstände mit den Werten $47\ \Omega$, $100\ \Omega$ und $470\ \Omega$ in Reihe geschaltet, um einen gesamten Widerstandswert von $617\ \Omega$ zu erreichen. Die Widerstände können hierbei einer maximalen Leistung von 3 kW standhalten. [37]

Mittels der Formel 3.1 kann nun die erwartete Leistung P mithilfe der Spannung U und dem Widerstand R berechnet werden.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.1)$$

Für den Gleichstrombetrieb ergibt sich aus der Formel 3.1 eine Leistung von circa 1,27 W und beim Wechselstrombetrieb eine Leistung von 85,73 W.

Da die Widerstände für eine maximale Leistung von 3 kW geeignet sind, besitzen sie entsprechende strukturelle Eigenschaften, um eine entstehende Abwärme in dem hier berechneten Bereich sicher ohne aktive Kühlung abzuleiten. [37]

Hierfür wurden alle relevanten Dimensionen der EMV-Kammer eingemessen. Die Dimensionen sowie wichtige Bestandteile der EMV-Kammer, welche in der Auslegung

berücksichtigt werden müssen, werden in Abbildung 3.1 abgebildet.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Antenne einen Abstand von 90 cm zur Tischkante haben muss. Des Weiteren sind 10 cm Abstand von der Tischkante zur Positionierung des EUT auf dem Tisch vorgesehen. Diese Vorgaben sind der ED-14G für gestrahlte Emissionsmessung und Störfestigkeitsuntersuchungen zu entnehmen [9].

3.3 Randbedingungen des Aufbaus

Aufgrund des begrenzten Platzes in der verfügbaren EMV-Kammer musste im Voraus ein detailliertes Konzept für die Positionierung aller Elemente und zur Bestimmung der benötigten Kabellängen erstellt werden. Hierfür wurden alle relevanten Dimensionen der EMV-Kammer eingemessen. Die Dimensionen sowie wichtige Bestandteile der EMV-Kammer, welche in der Auslegung berücksichtigt werden müssen, werden in Abbildung 3.1 dargestellt.

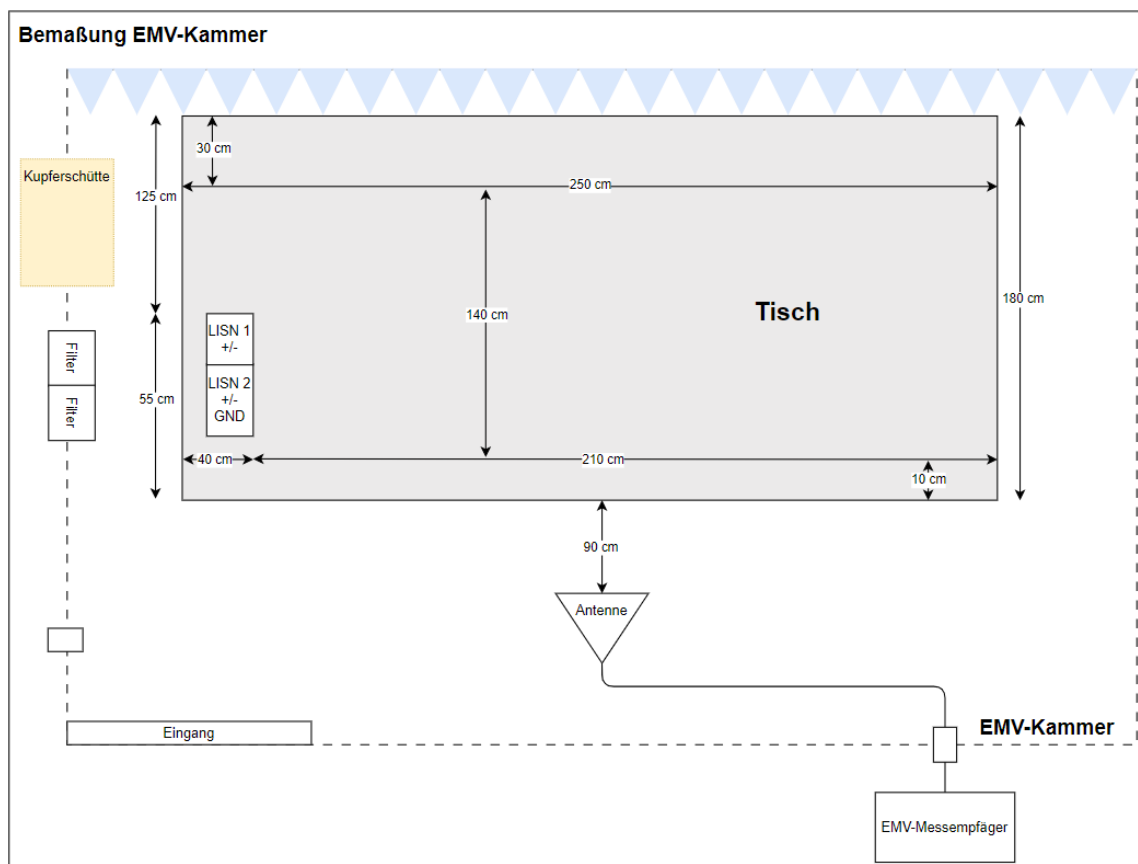


Abbildung 3.1: Bemaßung der EMV-Kammer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Braunschweig

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Antenne einen Abstand von 90 cm zur Tischkante haben muss. Des Weiteren sind 10 cm Abstand von der Tischkante zur Positionierung des EUT auf dem Tisch vorgesehen. Diese Vorgaben sind der ED-14G für gestrahlte Emissionsmessung und Störfestigkeitsuntersuchungen zu entnehmen [9].

Weitere Elemente, welche in Abbildung 3.1 erkennbar sind, sind zwei Filter und eine Kupferschüttung. Da bei vielen Versuchsaufbauten ein Teil des Equipments außerhalb der EMV-Kammer ist, muss es eine Möglichkeit geben, Kabel von Außen ins Innere der EMV-Kammer zu führen. Allerdings können dadurch leitungsgebundene Emissionen, die außerhalb der EMV-Kammer eingekoppelt, unerwünscht in die Kammer geführt und dort abgestrahlt oder in benachbarte Kabel eingekoppelt werden. Durch die Kupferschüttung wird die Menge an eingeleiteten Störungen gering gehalten. Durch das Kupfergranulat, welches mit leitenden Elementen wie Steckergehäuse in Kontakt kommt, werden ungewollte Emissionen auf die Kammererde abgeleitet.

Die Filter dienen als Durchführung der Spannungskabel, welche an eine externe Spannungsversorgung angeschlossen werden. Dies eliminiert ungewollte Emissionen, die meist aus dem Spannungsnetz stammen.

In Abbildung 3.1 ist die grobe Position der Filter und Kupferschüttung festgehalten, um sie als Referenz für die Auslegung der benötigten Kabellängen der nach außen zu führenden Kabel zu nutzen.

Relevant für die Auslegung der Kabellängen ist die Positionierung des Line Impedance Stabilization Network (LISN). An sie müssen die PLC-Modems angeschlossen werden. Zusätzlich ist in Abbildung 3.1 zu erkennen, dass die LISN's ein Stück der verfügbaren Fläche auf dem Tisch einnehmen, was ein limitierender Faktor beim Auslegen des Testkabels ist.

In der oberen Hälfte von Abbildung 3.1 ist ein Abstand von 30 cm zur oberen Tischkante markiert. Dieser Abstand ist erforderlich, um die Kabel für die Kommunikation über CAN, Ethernet, die 28-Volt Spannungsversorgung sowie die Erdung der PLC-Modems unterzubringen. So können die Kabel normgerecht zu den LISNs und der Kupferschützte geführt werden.

Somit ergibt sich aus Abbildung 3.1 eine Fläche mit einer Tiefe von 140 cm und einer Breite von 210 cm für das Verlegen des Testkabels. Die ED-14G sieht vor, eine ähnliche Länge der Kabel, wie sie für den Einbau in das LFZ vorgesehen ist, zu verwenden. Im Rahmen dieser Vorgabe wird eine maximale Länge von 15 m für den Aufbau in der EMV-Kammer empfohlen. Zusätzlich sieht die Norm ein mäanderförmiges Verlegen der Kabel vor. [9]

Ein weiterer limitierender Faktor ist die Notwendigkeit weitere Kabel für die Kommunikation über CAN, Ethernet, die Spannungsversorgung der Modems und für das interne Erden der Modems zu verlegen. Aus der ED-14G geht eine Empfehlung hervor, die Kabel mit einem ausreichenden Abstand voneinander zu verlegen, um ein gegenseitiges Einkoppeln der Signale zu verhindern [9]. Es wurde hier entschieden einen Abstand von 5 bis 10 cm zwischen den Kabeln einzuhalten.

Aus diesen Limitierungen ergab sich, dass eine reale Kabellänge, wie sie in einem Luftfahrzeug existieren würde, nicht in dem gegebenen Raum untergebracht werden könnte. Daher wird die von der ED-14G empfohlene Kabellänge von 15 m genutzt.

4 Kabelauslegung für den Versuchsaufbau

Im nachfolgenden Abschnitt sollen anhand der Anforderungen aus Abschnitt 3 die Kabel für den Versuchsaufbau ausgelegt werden.

4.1 Kabelauswahl

Für den Betrieb der PLC-Modems werden Kabel mit 16 AWG für die Versorgungsleitungen und 22 AWG für die Datenleitungen verwendet. 16 AWG entspricht einem Durchmesser von 1.29 mm und 22 AWG einem Durchmesser von 0.64 mm [31] [35]. Bei den Kabeln mit einem 22 AWG werden vier Kabel mit drei Adern, vier Kabel mit vier Adern und vier Kabel mit zwei Adern benötigt.

Die dreiadrigen Kabel sind für die CAN-Kommunikation zuständig. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass bei CAN-Leitungen ein 120 Ohm Abschlusswiderstand benötigt wird. In den PLC-Modems sind die Abschlusswiderstände bereits integriert. Daher werden sie nur seitens des CAN-Analyzers gebraucht.

Von den dreiadrigen 22 AWG Kabeln wird eine Länge von insgesamt 11.8 m verwendet. Zusätzlich muss das Kabel geschirmt und auch für die Anwendung in Luftfahrzeugen tauglich sein. Die Auswahl fiel auf das Kabel mit der Bezeichnung MIL-C-27500-22TG [38]. Durch die Konformität nach MIL-C-27500 ist es für den Einsatz in Luftfahrzeugen geeignet.

Die vieradrigen 22 AWG Kabel werden für die Ethernet Verbindung zu den PLC-Modems benötigt. Hierfür hat das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Braunschweig dedizierte Ethernet Kabel vorrätig, welche auch in einer Länge von 12.4 m für den Aufbau genutzt wurden.

Bei den zweiadrigen 22 AWG Kabeln, welche für die Erdung und Reset benötigt werden, fiel die Wahl auf das Kabel mit der Bezeichnung EN2713-012B004F [39]. Das Kabel ist

EN 2267-009 konform, was bedeutet, dass es für den zivilen Einsatz in Luftfahrzeugen geeignet ist. Zudem ist es geschirmt. Eine gesamte Länge von 10.6 Metern wird für den Aufbau benötigt.

Für die 16 AWG Kabel zur Übertragung der PLC-Signale wird das dreiadrige XQF16-001 Kabel verwendet. Dieses ist ungeschirmt und erhält für den Experimentalaufbau verschiedene Schirmungen. Das Kabel ist ebenfalls EN 2267-009 konform. [40]

Insgesamt werden circa 18 m von dem Kabel benötigt.

Alle genannten Längen, Beziehungen, Kabeldesignationen und weitere fertigungsrelevante Informationen können der Tabelle A.3 im Anhang entnommen werden.

4.2 Steckerauswahl

Hier wird die Auswahl der Stecker für die Verbindung der PLC-Leitungen beschrieben. Aufgrund einer gewünschten Modularität im Aufbau, zum schnellen Ausbau und Modifizieren des Testkabels, wurde entschieden, die PLC-Kabel mittels Military (MIL) - Standard (STD) Stecker aufzutrennen. Der MIL-STD wurde ausgewählt, da die Stecker für die Verwendung in LFZ geeignet sind. Zudem bieten sie die Möglichkeit, Kabelschirme rundum (360°) anzubinden. Bei MIL-STD Steckern gibt es verschiedene Steckertypen, abhängig von Ihrem Anwendungsbereich. Dabei bilden die MIL-5015 Stecker die Standardlinie ab. Die Stecker sind in ihrer Auswahl modular aufgebaut und können in den Herstellerkatalogen abhängig von dem gewünschten Anwendungsfall flexibel zusammengesucht werden.

Für den Aufbau werden zwei Stecker mit drei Pins und einer Gehäusegröße von 14S benötigt. Anhand der Gehäusegröße kann im Katalog die Kontaktgröße recherchiert werden. Im Falle von dem Stecker 14S-07 sind drei Pins mit einer Größe von 16 vorhanden [41]. Die 16 ist hier mit 16 AWG gleichzusetzen. Wichtig zu erwähnen ist, dass es sich hierbei um Lötpins handelt und nicht um Pins zum Crimpen.

Nun müssen passende Male und Female Komponenten gefunden werden. Im Falle der

hier gewählten Stecker werden die Male Fassungen mit S, und die Female Gegenstücke mit P gekennzeichnet [41].

Die final gewählten Steckerkomponenten haben die Bezeichnungen MIL-14S-7P und MIL-14S-7S.

Ergänzend zu den zwei MIL-14S-7 wird ein MIL-16-10 Stecker benötigt. Um ein PLC-Modem und die Versorgungsleitung für die Übertragung der PLC-Signale zusammenzuführen, müssen die Adern des Versorgungskabels und des Kabels von den PLC-Modems auf gemeinsame Pins in einem Stecker gelötet werden. Die Umsetzung dessen erfordert Stecker mit drei Pins der Größe von 12, was bei den MIL-16-10 Steckern der Fall ist. [41].

Neben den Steckern müssen auch passende Zugentlastungen mit Schirmanbindungen ausgewählt werden.

Ein limitierender Faktor in der Auslegung von Kabeln, speziell bei zeitkritischen Arbeiten, ist die Verfügbarkeit und Lieferzeit der Stecker. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Stecker sind nicht immer alle Varianten erhältlich. Zusätzlich sind die Stecker meist nicht regional verfügbar und müssen aus dem Ausland bestellt werden.

5 Testumgebung und Messtechnik

Diese Sektion befasst sich mit der Testumgebung, dem Testaufbau und allen zugehörigen Komponenten und Besonderheiten. Eine Differenzierung zwischen Störfestigkeitsuntersuchungen und Emissionsmessung wird vorgenommen.

5.1 Konfiguration der Testumgebung

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sehen die Sektionen 20 für „Radio Frequency Susceptibility“ und 21 für „Emission of Radio Frequency Energy“ der ED-14G einen standardisierten Aufbau in einer EMV-Kammer vor. [9]

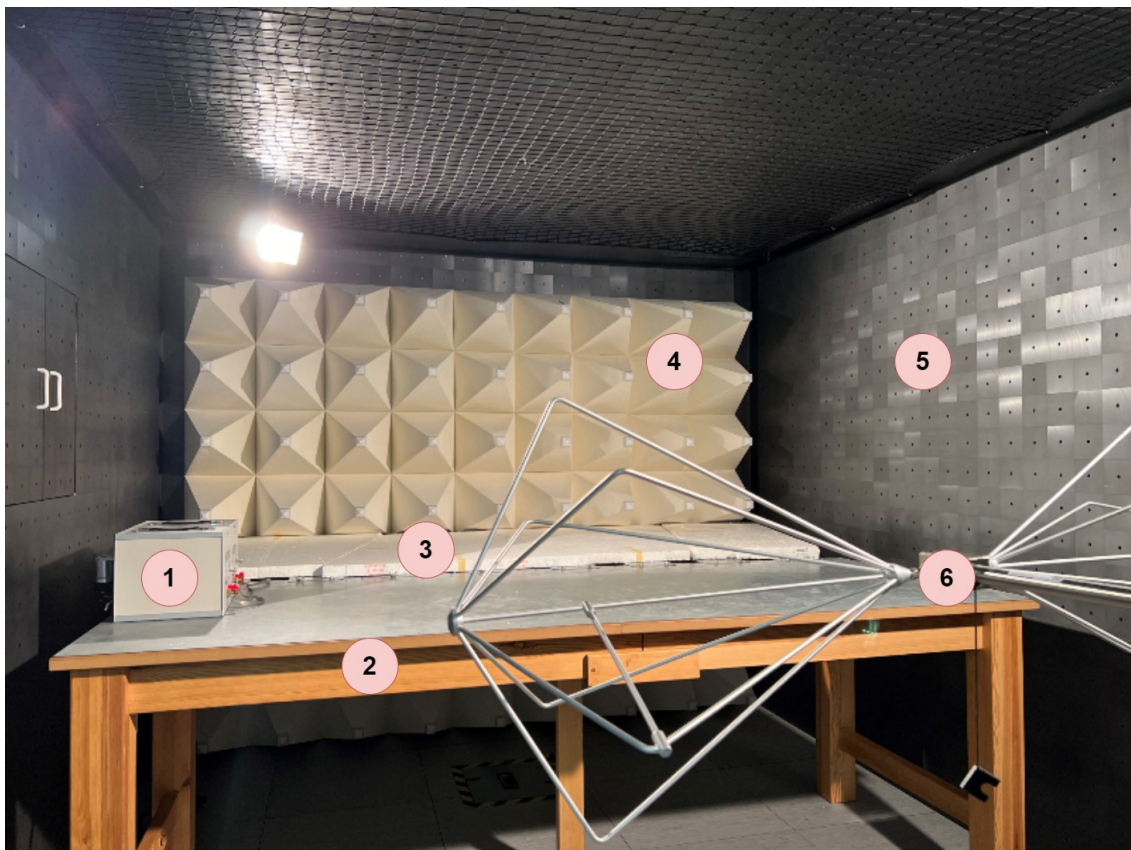


Abbildung 5.1: EMV-Kammer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Braunschweig mit Kennzeichnung der Hauptbestandteile

In Abbildung 5.1 sind die Bestandteile der EMV-Kammer des DLR-Braunschweig mit Zahlen von links nach rechts gekennzeichnet und werden im Folgenden näher erläutert.

Die mit der Nummer 1 in Abbildung 5.1 gekennzeichnete Komponente bildet eine LISN ab. Sie stellt dem EUT eine normierte Spannungszufuhr und Impedanz zur Verfügung, um wiederholt reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Dies erreicht sie mittels einer Filterfunktionalität, durch die äußere Störungen vom Stromnetz minimiert werden können. Leitungsgebundene Emissionen könne über einen Anschluss gemessen werden. [42]

Die Nummer 2 in Abbildung 5.1 bezieht sich auf den Tisch mit darauf befindlicher Metallplatte. In der ED-14G ist ein Tisch aus einem nicht leitenden Material mit einer darauf befindlichen 0.25 mm dicken Massefläche aus Aluminium vorgesehen. Wie in Abbildung 5.1 erkennbar ist, wird ein Holztisch verwendet. Die Aluminiumplatte muss mit weniger als $2.5\text{ m}\Omega$ mit der Erde der EMV-Kammer verbunden sein. Das EUT soll auf der Aluminiumplatte wie im Luftfahrzeug platziert werden. Vom Hersteller des EUT vorgegebene Werte der Gehäusebindung müssen hierbei berücksichtigt werden. [9]

Nummer 3 kennzeichnet geschäumtes Polystyrol, welches dazu dient, die Kabel 50 mm über der Masseplatte zu positionieren. Geschäumtes Polystyrol wurde aufgrund seiner nicht leitenden Fähigkeiten gewählt. [9]

Mit der Nummer 4 werden in Abbildung 5.1 die Urethan Pyramidenabsorber gekennzeichnet. Sie eliminieren ungewollte Reflexion der Strahlung durch Umleiten dieser und wiederholtes Reflektieren zwischen Absorbern, bis der Strahlung die gesamte Energie entzogen wurde [43]. Bei der EMV-Kammer des DLR-Braunschweig handelt es sich um eine Halbabsorber-Kammer. Die Unterschiede zwischen einer Halbabsorber- und Vollabsorber-Kammer sind in Abschnitt 2.3.1 beschrieben.

Die Nummer 5 kennzeichnet Ferritkacheln. Sie bestehen aus einem ferromagnetischen Material und dienen der Absorption von gestrahlten Emissionen in einem Frequenzbereich zwischen 30 und 1000 MHz. [44]

Zuletzt kennzeichnet die Nummer 6 eine Antenne. Nach ED-14G ist es vorgesehen, dass die Antenne in einem Abstand von 90 cm zur Tischkante auf einer Höhe von 120 cm steht. [9]

5.1.1 Messtechnik

Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen, wie beispielsweise diverse untersuchte Frequenzbereiche, müssen verschiedene Antennen, Sonden und gegebenenfalls Messinstrumente verwendet werden. Folgender Abschnitt gibt einen Überblick über das verwendete Messequipment und dessen Eigenschaften.

Allgemein ist wichtig zu beachten, dass das verwendete Equipment stets kalibriert und für die Verwendung für Messungen nach ED-14G geeignet ist. Zusätzlich sind die maximalen Leistungen und Feldstärken der EUT zu beachten, um ein versehentliches Beschädigen der Messinstrumentierung zu verhindern. Die gemessenen Frequenzbereiche sind von der ED-14G vorgegeben und sind unabhängig von der aktuell gemessenen Kategorie identisch [9]. Bei den gestrahlten Emissionsmessungen werden drei verschiedene Antennen verwendet.

Im Bereich von 100 bis 230 MHz wird eine bikonische Antenne vom Typ Schwarzbeck VHBB 9124 BBA 9106 verwendet, welche in Abbildung 5.1 unter Punkt 6 sichtbar ist. Sie empfängt oder sendet in einem Frequenzbereich von 30 bis 300 MHz bei einer Leistung von 10 W [45].

Der Frequenzbereich von 230 bis 960 MHz wird mit einer Logarithmisch-Periodischen Antenne gemessen. Das DLR Braunschweig verwendet eine Antenne vom Typ Schwarzbeck VUSLP 9111. Die Antenne besitzt die Fähigkeit in einem Frequenzbereich von 230 bis 2.3 GHz zu empfangen und auszusenden, mit einer Leistung von 1000 W bei 230 MHz und 300 W bei 1 GHz [46].

Um im Frequenzbereich von 0.96 bis 8 GHz zu messen, wird eine Hornantenne vom Typ Schwarzbeck BBHA 9120 D verwendet.

Nominell hat die Antenne einen Frequenzbereich von 0.8 bis 18 GHz. Die maximale Leistung liegt bei 500 W Spitze und für den kontinuierlichen Betrieb bei 300 W. [47]

Die leitungsgebundene Emissionsmessung findet unter Benutzung einer Strommesszange vom Typ Fischer F-57 statt.

Aufgrund der Nähe der Strommesszange zum EUT ist besonders auf die erwarteten Ströme zu achten. Ein Überschreiten der angegebenen Maximalwerte führt schnell zu einer ungewollten Beschädigung des Equipments und falschen Messwerten.

Mittels der berechneten Leistung P und den gegebenen Widerstandswerten R , wie sie bereits in Abschnitt 3.2 behandelt wurden, wird mittels der Formel 5.1 der maximal erwartete Strom I im Normalbetrieb berechnet.

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (5.1)$$

Nach Einsetzen der Werte wird ein maximaler Strom von 0.372 A errechnet. Die Strommesszange ist laut Datenblatt für einen maximalen Strom von 100 A angegeben, so dass keine Bedenken vorliegen [48].

Da bei der leitungsgebundenen EMS die Strommesszange als Sensor für die effektiv induzierten Werte genutzt werden kann, muss an der Stelle ebenfalls geprüft werden, dass es zu keinen Überschreitungen der maximalen Ströme der Strommesszange kommt. Die Untersuchung nach ED-14G CAT-R, welche die höchste hier getestete Kategorie ist, sieht eine maximale Feldstärke von 89.5 dB μ A vor [9]. Umgerechnet ergibt dies einen maximalen induzierten Strom von 20 mA, was ebenfalls unbedenklich für die genutzte Strommesszange ist.

Im Rahmen der gestrahlten EMS sind alle Antennen bis auf die bikonische Antenne identisch mit der gestrahlten Emissionsmessung. Aufgrund der unzureichenden Leistung von 10 W bei der bikonischen Antenne vom Typ Schwarzbeck VHBB 9124 BBA

9106 wurde eine weitere bikonische Antenne vom Typ Schwarzbeck VHBA 9123 BBA 9106 angeschafft. Sie weist eine maximale Leistung von 100 W in einem Frequenzbereich von 30 bis 300 MHz auf [49].

Für die Erstellung der Referenzkalibrierungen, welche als Vorlage für EMS dient, wird ein „Narda Broadband Field Meter“ NBM-550 verwendet. Mit einer entsprechenden E-Feld-Sonde, welche auf dem Field Meter zu montieren ist, können Felder in einem Frequenzbereich von 3 MHz bis 18 GHz vermessen werden [50].

Für die leitungsgebundene EMS wird eine „Current-Injection-Probe“ vom Typ Fischer F-120-8F verwendet. Sie weist eine maximale Leistung von 200 W in einem Frequenzbereich von 0.01 bis 400 MHz auf. Für die Erstellung der Referenzkalibrierungen wird eine zugehörige „Calibration Fixture“ vom Typ Fischer F-17042-1008-1 verwendet. [51]

Das primär für die Aufnahme von gestrahlten und leitungsgebundenen Emissionen verwendete Gerät ist der R&S® ESR Funkstörmessempfänger (ESR) 26. Er besitzt die Fähigkeit in einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 26.5 GHz Signale zu messen. [52]. Des Weiteren wird ein Handheld Spektrumanalysator vom Typ Rohde und Schwarz FSH-8 verwendet. Signale in einem Frequenzbereich von 100 kHz bis 8 GHz können mit diesem Gerät empfangen werden [53].

Für die Aufzeichnung der empfangenen Daten wird ein vom DLR eigens in LabView entwickeltes Programm verwendet.

Bei der Auswertung wird ebenfalls ein intern entwickeltes Programm verwendet. Dieses ist in der Entwicklungsumgebung Diadem entstanden.

Um Störfestigkeitsuntersuchungen durchzuführen, wird ein vollständiges Rack von Rohde und Schwarz mit Signalgenerator, Verstärkern und einer Open Switch and Control Platform (OSP) verwendet. Um alle notwendigen Frequenzbereiche und Feldstärken abzudecken, werden vier Verstärker benötigt. Die Verstärker basieren alle auf dem

Haupttyp Rohde und Schwarz BBA-150, jedoch liegen sie in unterschiedlichen Varianten vor [54]. Variante AB350 deckt einen Frequenzbereich von 4 kHz bis 400 MHz mit einer maximalen Ausgabeleistung von 350 W ab [55]. Somit dient dieser Verstärker primär dem Einspeisen von leitungsgebundenen Emissionen. Im Frequenzbereich von 80 MHz wird der Verstärker der Variante C70 mit einer Ausgangsleistung von 70 W eingesetzt [55]. Für Frequenzen zwischen 690 MHz und 3.2 GHz wird der Verstärker C30 genutzt. Dieser hat eine maximale Ausgangsleistung von 30 W [55]. Der obere Frequenzbereich von 2.5 bis 6 GHz wird durch den Verstärker der Variante E15 bedient. Dieser hat eine maximale Ausgangsleistung von 15 W [55]. Zum Schalten der notwendigen Verstärker bei verschiedenen Frequenzbereichen wird eine OSP verwendet. Das ausgegebene Signal wird von einem Rohde und Schwarz SMB100B mit der Frequenzoption SMBB-B106 erzeugt. Es können Signale mit verschiedenen Modulationen in einem Frequenzbereich von 8 kHz bis 6 GHz generiert werden. Die ausgegebene Leistung variiert und kann bis zu 20 mW betragen. [56]

Zum Steuern des Verstärker Rack wird die Software EMC 32 verwendet.

Mit diesem Verstärkerrack können verschiedene Kategorien der ED-14G, Sektion 20, untersucht werden. In nachfolgenden Tabellen 5.1 und 5.2 sind die untersuchbaren Kategorien für die gestrahlte und leitungsgebundene Störfestigkeit festgehalten.

Tabelle 5.1: Untersuchbare Kategorien der ED-14G für gestrahlte Störfestigkeit

Frequenz (MHz)	Kategorien und zugehörige Pegel (V/m)			
	CAT-T	10 V/m	CAT-B	CAT-D
100-230	5	10	20	25
230-400	5	10	20	25
400-700	5	10	20	20
700-1000	5	10	20	25
1000-6000	5	10	25	50

Aus Tabelle 5.1 ist zu entnehmen, dass vier verschiedene Kategorien untersucht werden. Alle Kategorien werden mit der CW Modulation untersucht. Neben den Kategorien der ED-14G gibt es eine weitere Abstufung, wonach über alle Frequenzen eine konstante Feldstärke von 10 V/m untersucht wird. Dies soll als eine Zwischenstufe dienen, um graduell die Feldstärken zu steigern.

Zusätzlich sind in der ED-14G weitere Kategorien für gestrahlte EMS Untersuchungen vorgesehen. Aufgrund fehlender Fähigkeiten, ausreichende Feldstärken mit dem Verstärkerrack zu generieren, können diese derzeit nicht untersucht werden. CAT-D ist die zurzeit höchste untersuchbare Kategorie.

In der ED-14G werden bei allen Kategorien im oberen Frequenzbereich Messungen bis 18 GHz vorgesehen. Der untersuchte Frequenzbereich von 100 MHz bis 6 GHz stimmt mit dem gemessenen Bereich der gestrahlten Emissionen überein, weshalb das bestehende Equipment für beide Untersuchungen genutzt werden kann.

Tabelle 5.2: Untersuchbare Kategorien der ED-14G für leitungsgebundene Störfestigkeit

Frequenz (MHz)	Kategorien und zugehörige Pegel (mA)		
	CAT-S	CAT-T	CAT-R
0.01	0.03	0.15	0.6
0.5	1.5	7.5	30
1	1.5	7.5	30
30	1.5	7.5	30
40	1.5	7.5	30
100	*	*	*
400	0.15	0.75	3

Die mit Stern in Tabelle 5.2 gekennzeichneten Zellen deuten auf eine Interpolation der Werte hin. Sie sind für das Abfahren einer in der ED-14G vorgesehenen Flanke notwendig.

In der ED-14G sind weitere Kategorien für leitungsgebundene EMS Untersuchungen

vorgesehen, welche in der Tabelle 5.2 nicht aufgelistet sind. Aufgrund einer software-technischen Limitierung im Verstärker Rack BBA-150-AB350 konnten diese nicht untersucht werden.

5.1.2 Kalibrierung

Die Durchführung von EMS Untersuchungen kann mittels zweier Verfahren geschehen. Zum einen wird die Messung anhand einer Referenzkalibrierung durchgeführt. Alternativ kann eine Sonde zur Überwachung der induzierten Werte verwendet werden.

Die effektiv induzierten Werte können durch den Einsatz einer Sonde kontinuierlich überwacht werden. Demnach lässt sich ableiten, dass die Ausgabe der Verstärker anhand der effektiv induzierten Werte justiert wird. Dies impliziert, dass die ausgegebenen Werte bei jeder Messung variieren und keine Reproduzierbarkeit gegeben ist. Die Diskrepanzen resultieren aus Reflexionen an den Kabeln oder Strukturen des EUT, welche die von der Sonde erfassten Werte beeinflussen.

Referenzkalibrierungen werden strikt nach Norm durchgeführt und benötigen teilweise besondere Vorrichtungen, wie beispielsweise Feldsonden oder Kalibriervorrichtungen. Bei jeder Messung mit der gleichen Referenzkalibrierung sind die induzierten Werte identisch.

Bei der Erstellung von gestrahlten EMS Referenzkalibrierungen wird das „Narda Broadband Field Meter“ genutzt, um die Feldstärken einzumessen. Dazu muss die Sonde in einem Abstand von 10 cm von der Tischkante und in einer Höhe von 30 cm montiert werden [9].

Die Referenzkalibrierung für leitungsgebundene EMS Untersuchungen ist aufwendiger und benötigt besonderes Equipment, welches in Abbildung 5.2 sichtbar ist. Die einzelnen Komponenten des Kalibrieraufbaus sind chronologisch von links nach rechts mit Nummern gekennzeichnet.

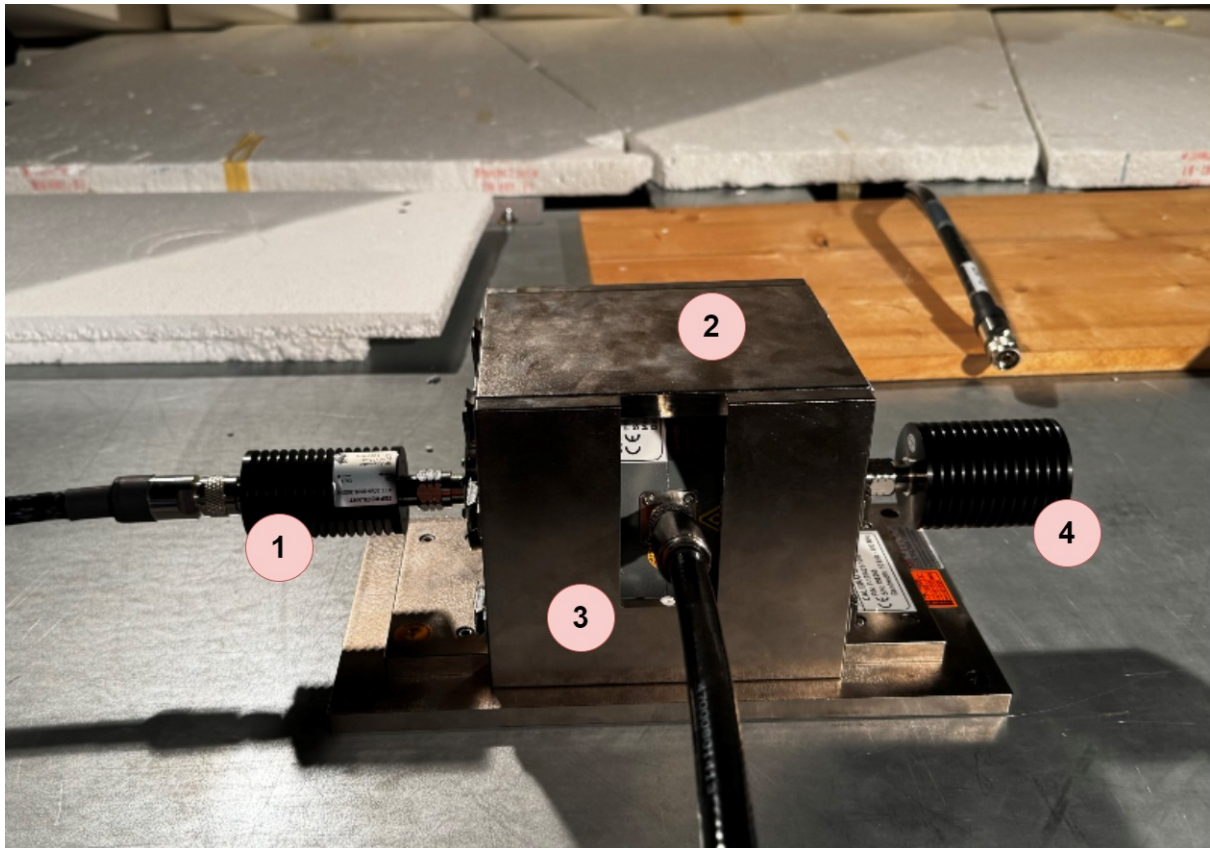


Abbildung 5.2: Kalibrier Aufbau für Referenzkalibrierungen bei leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchungen

Das zentrale Element ist in Abbildung 5.2 mit der Nummer 2 gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um die „Calibration Fixture“ vom Typ Fischer F-17042-1008-1, welche bereits in Abschnitt 5.1.1 genannt wurde. An ihr wird die „Current-Injection-Probe“ vom Typ Fischer F-120-8F angebracht. Sie ist in Abbildung 5.2 mit der Nummer 3 gekennzeichnet. An die „Current-Injection-Probe“ wird das Verstärkerrack angeschlossen, welches bereits in Abschnitt 5.1.1 näher beleuchtet wurde.

Links in Abbildung 5.2 ist ein 30-dB-Dämpfungsglied mit einem Widerstand von $50\ \Omega$ und einem Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) von weniger als 1.2:1 dargestellt. Zudem schreibt die ED-14G Sektion 20 eine Mindestleistung von 5 W für das Dämpfungsglied vor. [9]

Das Dämpfungsglied ist mit der 1 gekennzeichnet. Nach ED-14G soll die „Calibration

Fixture“ über das Dämpfungsglied mit dem ESR 26 Messempfänger verbunden werden [9].

Ein $50\ \Omega$ Abschlusswiderstand mit denselben Eigenschaften wie das Dämpfungsglied ist in Abbildung 5.2 mit der Nummer 4 gekennzeichnet. Dieser wird auf der gegenüberliegenden Seite des Dämpfungsglieds an der „Calibration Fixture“ angebracht und wird ebenfalls durch die ED-14G vorgegeben [9].

Die Referenzkalibrierung wird mittels der Software EMC32 von Rohde und Schwarz durchgeführt. Für alle Kategorien der ED-14G Sektion 20 werden eigene Profile mit den Einstellungen und Eigenschaften der Geräte erstellt. Jede Kategorie muss bei der Referenzkalibrierung einzeln eingemessen werden. Bei der Ausführung einer leitungsgebundenen EMS Messung können dann die gesammelten Werte von der Referenzkalibrierung erneut vom Verstärker abgerufen werden.

6 Versuchsaufbau

Im nachfolgenden Kapitel sollen die Aufbauten für die unterschiedlichen Messungen im Detail erläutert werden. Der Fokus liegt dabei unter anderem auf die Verlegung der benötigten Kabel, dem Aufbau außerhalb und innerhalb der EMV-Kammer sowie notwendigen Schnittstellen.

Für den Versuchsaufbau sind 16 Kabel notwendig. Sie sind mit einer Kennung und der zugehörigen Beziehung in Tabelle 6.1 festgehalten. Sie werden für die Beschreibung des Versuchsaufbaus verwendet.

Tabelle 6.1: Kennzeichnung aller Kabel und zugehörige Beziehungen

Kennung:	Beziehung:
CAN-PLC1-IN	CAN: Schütte-PLC1
CAN-PLC1-OUT	CAN: CANalyzer (Port:1)-Schütte
CAN-PLC2-IN	CAN: Schütte-PLC2
CAN-PLC2-OUT	CAN: CANalyzer (Port:2)-Schütte
ETH-PLC1-IN	Ethernet: Schütte-PLC1
ETH-PLC1-OUT	Ethernet: Switch-Schütte
ETH-PLC2-IN	Ethernet: Schütte-PLC2
ETH-PLC2-OUT	Ethernet: Switch-Schütte
PWR-PLC1-28V	PWR:LISN2-PLC1
PWR-PLC2-28V	PWR:LISN2-PLC2
RST-GND-PLC1	RSTGND: LISN-PLC1
RST-GND-PLC2	RSTGND: LISN-PLC2
PLC-1	PLC: LISN1-MIL14(1)
PLC-2	PLC: MIL14(1)-PLC1,MIL16
PLC-3 (Testkabel)	PLC: MIL16-MIL14(2)
PLC-4	PLC: MIL14(2)-PLC2,LAST

6.1 Konfiguration der elektromagnetischen Emissionsmessungen

Folgender Abschnitt erörtert den Aufbau für gestrahlte und leitungsgebundene Emissionsmessungen.

6.1.1 Aufbau der gestrahlten Emissionsmessungen

In Abbildung 6.1 ist die Prüfstandskonfiguration für eine gestrahlte Emissionsmessung unter Verwendung einer 28 V DC Spannungsversorgung der PLC dargestellt.

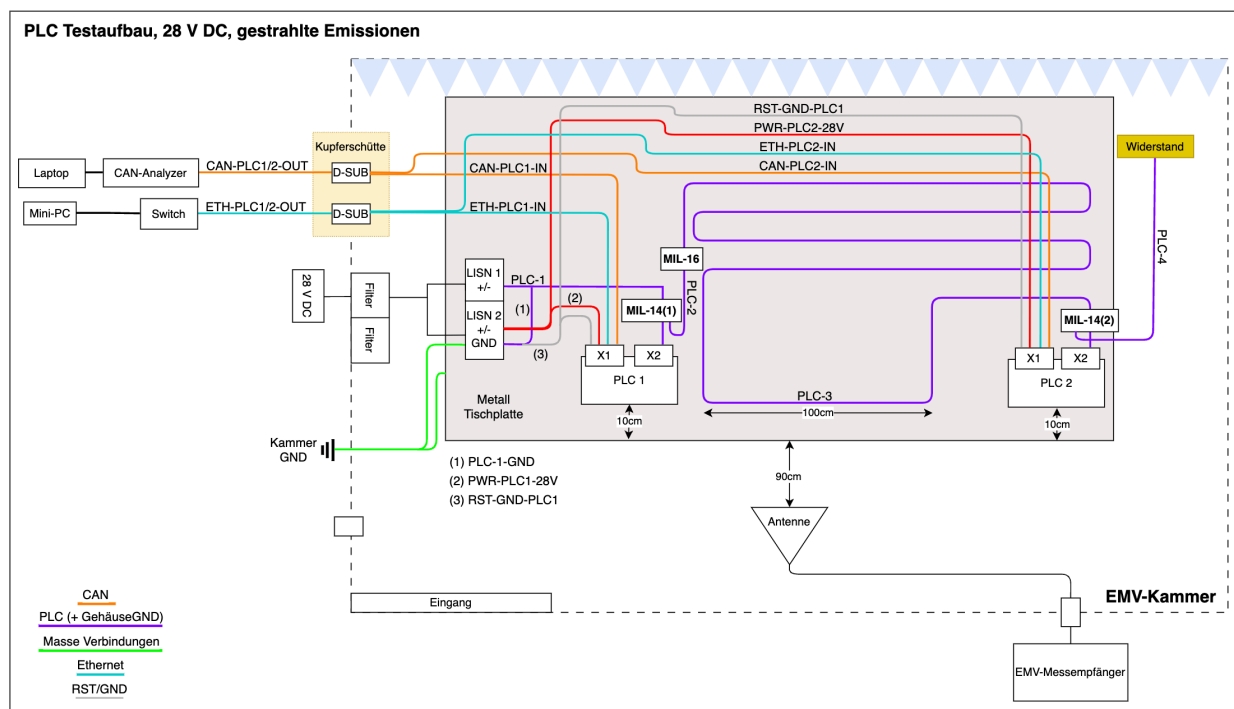


Abbildung 6.1: Prüfstandskonfiguration für gestrahlte Emissionsmessungen mit 28 V DC

Dem Aufbau in Abbildung 6.1 ist zu entnehmen, dass zwei PLC-Modems verwendet werden, welche zu Zwecken der Powerline Communication mit einer nach European Organization for Civil Aviation Equipment (EUROCAE) ED-14G empfohlenen 15 Meter langen Leitung (PLC-3) verbunden sind [9].

Da die Leitung PLC-3 das primäre Testkabel ist und mit verschiedenen Schirmungen versehen werden soll wurden die Stecker MIL-16 und MIL-14(2) zwischen den PLC-Modems ergänzt. Sie erlauben eine schnelle Austauschbarkeit des Kabels und gewährleisten eine normgerechte Schirmanbindung.

Zusätzlich ist wichtig zu erwähnen, dass innerhalb der PLC-Kabel mit den Leitungen PLC(+) und PLC(-) ebenfalls der Neutraleiter des PLC-Gehäuses mitgeführt wird. Die drei Leitungen sind miteinander verdreht und werden eingangsseitig am PLC-1 Kabel an ein Line Impedance Stabilisation Network (LISN-1) sowie an der Kammererde angeschlossen. Eine weitere Besonderheit lässt sich an dem PLC-4 Kabel wiederfinden, welches die Leitungen PLC(+) und PLC(-) mitführt, da sie am Ausgang an die in Abschnitt 3.2 erläuterten Widerstände angeschlossen wird, welche als elektrische Verbraucher dienen. Der Widerstand wird möglichst weit hinten und unterhalb des Tisches platziert, um diesen als potenziellen Störfaktor während der Untersuchungen auszuschließen.

Um die PLC-Modems anzusteuern und zu überwachen, werden geschirmte CAN-Leitungen zu den jeweiligen Modems gelegt. Die CAN-Leitungen werden über eine Kupferschüttung nach außen geführt, wo sie an einen CAN-Analyzer angeschlossen werden, welcher wiederum mit einem Laptop verbunden wird. Dieser Laptop dient zum Senden und Überwachen der CAN-Daten, um potenzielle Abweichungen, welche primär durch gestrahlte EMS auftreten können, festzustellen. Innerhalb der Kupferschüttung werden die CAN-Leitungen jeweils mit einem SUB-D Stecker mit Metallgehäuse versehen, um eine ausreichende Masseanbindung des Kabelschirms an die EMV-Kammer zu gewährleisten.

Ein zusätzliches Instrument zur Überwachung der Funktionalität und Konfiguration der PLC-Modems ist die Verwendung eines Mini-PC außerhalb der EMV-Kammer, welcher mittels eines Switch über geschirmte Ethernet-Kabel (ETH-PLC1 und ETH-PLC2) mit den PLC-Modems innerhalb der EMV-Kammer verbunden ist. Die Ethernet-Kabel werden in der Kupferschüttung abermals mit einem SUB-D Stecker aufgetrennt, welcher denselben Zweck erfüllen soll wie bei den CAN-Leitungen. Des Weiteren werden die PLC-Modems über die Power-Kabel PWR-PLC1/2-28V mit ihrer Betriebsspannung versorgt. Angeschlossen werden diese Leitungen an die LISN-2.

Mittels der RST-GND-PLC1/2 Kabel wird eine Erdverbindung für interne Komponenten des Modems hergestellt, um eine korrekte Funktion zu gewährleisten.

In dem Aufbau aus Abbildung 6.1 soll die PLC mit 28 V DC betrieben werden, weshalb außerhalb der EMV-Kammer eine einzelne Spannungsversorgung über einen Filter mit den LISN's innerhalb der Kammer verbunden wird.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden die gestrahlten Emissionen gemessen. Hierzu werden innerhalb der EMV-Kammer, abhängig von der jeweils untersuchten Frequenz, verschiedene Antennen in einem 90 cm Abstand zur Tischkante platziert, um den in der ED-14G definierten Messaufbau zu gewährleisten. [9]. Das Koaxialkabel, welches mit der Antenne verbunden ist, wird nach außen geführt, wo es mit einem EMV-Messempfänger verbunden ist. Die genauen Antennen und Instrumente wurden in Abschnitt 5.1.1 näher erläutert.

Im Untersuchungsfall, wie er in Abbildung 6.2 dargestellt ist, soll der Aufbau bei 230 V Wechselspannung gemessen werden. Um dies zu realisieren, wird zusätzlich zu der 28 V DC-Spannungsquelle, welche für den Betrieb der PLC-Modems benötigt wird, eine 230 V AC Spannungsquelle an LISN-1 angeschlossen. Um den Aufbau mit einer 230 V AC Spannungsquelle zu realisieren, befinden sich zwei LISN's in einer Metallkiste, wo sie an das gefilterte 230 V AC Netz der EMV-Kammer angeschlossen werden. Die Metallkiste steht unter dem Tisch und dient zum Schutz des Bedieners. Versehentliche Berührungen mit dem Wechselstrom werden so verhindert. Die LISN's werden über ein separates Kabel an die Kammererde angeschlossen, statt an die Metallplatte auf dem Tisch. Ansonsten ergeben sich keine Unterschiede in dem Aufbau verglichen mit dem 28 V Aufbau.

Die gestrahlten Emissionsmessungen werden für alle zu untersuchenden Kabelschirmungen durchgeführt.

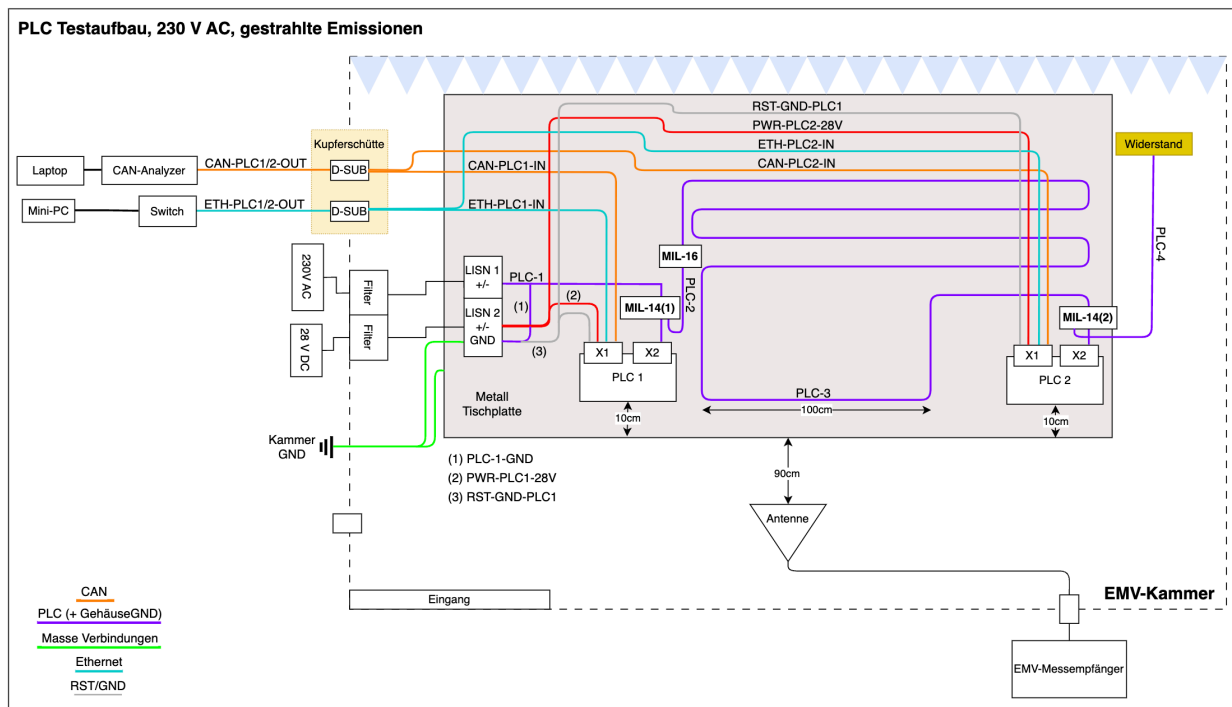


Abbildung 6.2: Prüfstandskonfiguration für gestrahlte Emissionsmessungen mit 230 V AC

Die Ergebnisse der obigen Untersuchungen werden mit der Kategorie M aus der ED-14G Sektion 21 abgeglichen [9].

Diese Kategorie wurde gewählt, da sie für den Einbau von Equipment in elektromagnetisch signifikanten Bereichen, wie im Cockpit, Kabine oder in der Avionics Bay, gültig ist.

6.1.2 Aufbau der leitungsgebundenen Emissionsmessungen

Neben den gestrahlten Emissionsmessungen sollen auch entsprechend der ED-14G die leitungsgebundenen Emissionen gemessen und mit der Kategorie M für Versorgungsleitungen abgeglichen werden.

Auch an dieser Stelle sollen alle vorgesehenen Kabelschirme bei gleichbleibendem Aufbau, wie er bereits in Abschnitt 6.1.1 für 28 V DC und 230 V AC erläutert wurde, untersucht werden. In Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass die Strommesszange, welche für diesen Aufbau verwendet wird, am Testkabel PLC-3 an der hintersten Stelle mon-

len ebenfalls alle vorgesehenen Schirmungen untersucht werden.

Im Zuge dieser Untersuchungen werden die Antennen nicht an den ESR-Messempfänger, sondern an das Verstärkerrack angeschlossen. Mit Ausnahme der bikonischen Antenne weisen alle Antennen identische Leistungseigenschaften auf. Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 erläutert, ist die bikonische Antenne aufgrund ihrer zu geringen Leistung für den Einsatz bei gestrahlter EMS ungeeignet. Alle anderen Antennen können sowohl für EMS-Untersuchungen als auch für Emissionsmessungen verwendet werden.

6.2.2 Aufbau der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung

In Abbildung 6.4 ist erkennbar, dass der Aufbau des EUT wieder identisch zu dem ist, wie bei den leitungsgebundenen Emissionsmessungen. Allerdings gibt es große Unterschiede bei der Platzierung des Messequipments.

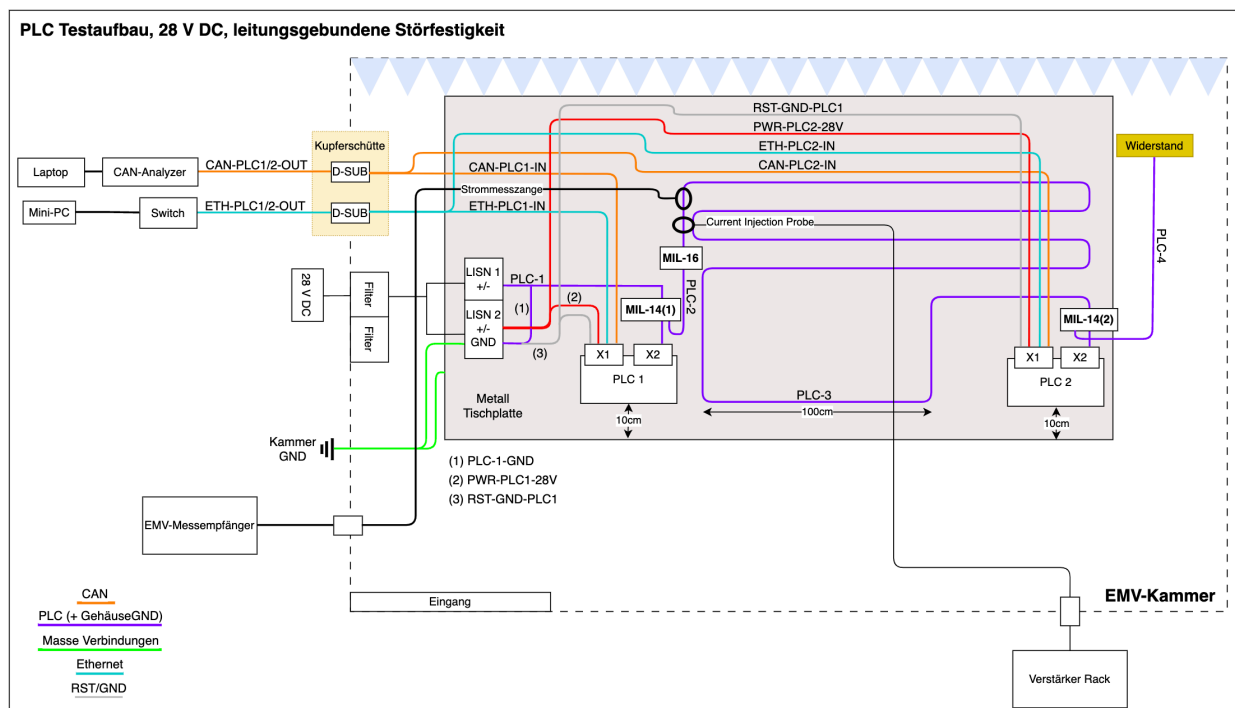


Abbildung 6.4: Prüfstandskonfiguration für leitungsgebundene Störfestigkeitsuntersuchungen mit 28 V DC

Zusätzlich zur Strommesszange wird in 5 cm Abstand zum Stecker MIL-16, so wie er in Abbildung 6.4 zu erkennen ist, eine „Current-Injection-Probe“ platziert [9]. Sie erzeugt

ein magnetisches Wechselfeld, dass in der Leitung einen Strom induziert. Verbunden wird die „Current-Injection-Probe“ mit dem Verstärkerrack. Die Notwendigkeit der Verwendung einer Strommesszange ist dadurch begründet, dass eine ständige Kontrolle des induzierten Stroms erforderlich ist.

Alle vorgesehenen Kabelschirme werden in dieser Untersuchung überprüft. Im Hinblick auf den Extremfall wird die „Current-Injection-Probe“ nahe dem Stecker platziert, da sie eine Schwachstelle im Aufbau darstellt. Der MIL-16 Stecker ist eine starke Schwachstelle, da auf dieser Seite in einigen Fällen der Schirm nicht aufgelegt wird.

Bei den Untersuchungen mit 230 V AC wird ebenfalls wie bei anderen Untersuchungen eine 230 V AC-Spannungsversorgung an LISN-1 angeschlossen. Bei den zu untersuchenden Kategorien wird mit der schwächsten Kategorie (CAT-S) begonnen werden und bis zur stärksten testbaren Kategorie (CAT-Y) gesteigert werden. Für den Ablauf des Tests gelten wieder dieselben Anforderungen wie bei den gestrahlten EMS.

7 Versuchsdurchführung und Auswertung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Durchführung und Auswertung der EMV Untersuchungen. Es wird zunächst die Durchführung der Messreihe näher beschrieben. Daraufhin werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen und EMS Untersuchungen betrachtet.

7.1 Versuchsdurchführung

Die finale Form des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 7.1 abgebildet.

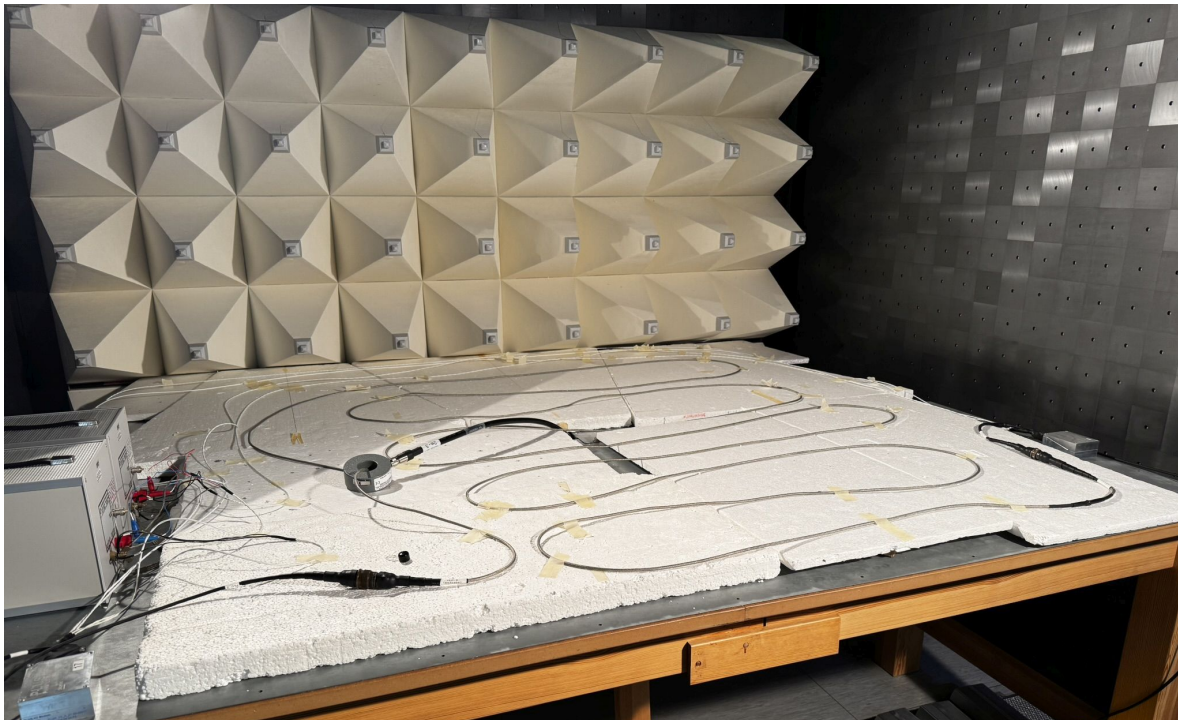


Abbildung 7.1: Umsetzungen des DC-Aufbaus innerhalb der EMV-Kammer mit angeschlossener Strommesszange

Auf der linken Seite von Abbildung 7.1 sind die zwei LISN's zu sehen. Unterhalb von den LISN's ist das PLC-1 Modem zu erkennen. Der äußere Rand zeigt die geschirmten CAN- und Ethernetleitungen. Das PLC-2 Modem ist am rechten Rand, und im Vordergrund das geschirmte Testkabel zu sehen. Um das Kabel herum ist eine Strommesszange für die Messung der leitungsgebundenen Gleichtaktstörungen geklemmt.

Um die Durchführung der Untersuchungskampagne zu gewährleisten, wurde ein Testplan erstellt. Er umfasst eine Auflistung aller Messungen. Zusätzlich sind in dem Testplan dedizierte Felder vorhanden, welche Besonderheiten wie die Ausrichtung der Antenne umfassen oder die Möglichkeit bieten, Effekte der Störfestigkeitsuntersuchungen zu notieren. Für die Übersichtlichkeit wurden auch Felder zum Abhaken durchgeführter Messungen vorgesehen. Ein exemplarischer Ausschnitt aus dem Testplan ist im Anhang unter Tabelle A.4 zu finden.

Folgende Konfigurationen sollen untersucht werden:

1. Doppelschirm-DC-Konfiguration
2. Doppelschirm-AC-Konfiguration
3. Einfacher Schirm beidseitig aufgelegt-DC-Konfiguration
4. Einfacher Schirm beidseitig aufgelegt-AC-Konfiguration
5. Einfacher Schirm einseitig aufgelegt-DC-Konfiguration
6. Einfacher Schirm einseitig aufgelegt-AC-Konfiguration
7. Kein Schirm-DC-Konfiguration
8. Kein Schirm-AC-Konfiguration

In jeder dieser Konfigurationen müssen verschiedene Messungen durchgeführt werden. Die Messungen sind vom Ablauf identisch.

Aus der Tabelle A.4 ist zu entnehmen, dass bei jeder Konfiguration zunächst die Leermessung für gestrahlte und leitungsgebundene Emissionen durchgeführt wird. Aufgrund von lokalen Gegebenheiten kann die Umgebungsstrahlung bei jeder Konfiguration unterschiedlich eingekoppelt werden.

Um später die Auswertung zu vereinfachen und die gemessenen Werte vergleichen zu können, wurden die Extrema der einzelnen Leermessungen zusammengeführt und eine gemeinsame „Referenzleermessung“ erstellt.

Im nächsten Schritt, so wie er in Tabelle A.4 abgebildet ist, sollen die gestrahlten und leitungsgebundenen Emissionsmessungen durchgeführt werden. Hier muss die Polarisation der Antenne beachtet werden sowie die Positionierung der Messsonden nach ED-14G [9].

Der nächste Schritt ist die Durchführung der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchungen. In Abschnitt 5.1.1 wurden die hier untersuchten Kategorien inklusive Feldstärken und Frequenzen in Tabelle 5.1 aufgelistet. Bei den zu untersuchenden Kategorien wird mit der harmlosesten Kategorie aus Sektion 20 der ED-14G begonnen und bis zur stärksten Kategorie gesteigert. Dies dient zum Schutz des EUT, um potenzielle Gefährdungen früh zu erkennen und eine Zerstörung des Equipments zu verhindern. Sobald bei einer niedrigeren Kategorie ein merkbarer Einfluss auf die Modems durch die Überwachung erkannt wird, muss anhand der Erkenntnisse entschieden werden, ob höhere Störfestigkeitskategorien getestet werden können. Wenn Erfahrungswerte über das Verhalten der PLC bei verschiedenen Feldstärken gesammelt wurden, können von Fall zu Fall die niedrigen Feldstärken übersprungen werden. Auch bei dieser Untersuchung muss die Polarisation jeder Antenne variiert werden.

Die letzte Untersuchung, welche für alle Konfigurationen durchgeführt werden muss, ist die leitungsgebundene Störfestigkeit. Wie auch bei den gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchungen wurden die untersuchbaren Kategorien in Abschnitt 5.1.1 in Tabelle 5.2 aufgelistet. Hier können ebenfalls nach Sammeln von Erfahrungswerten die unteren Kategorien übersprungen werden.

Neben diesen Untersuchungen wurden Nachforschungen im Bereich der Erdung und bei Effekten durch Unterschiede im AC- und DC-Aufbau durchgeführt.

7.1.1 Durchführung der Störfestigkeitsuntersuchung

Abschnitt 5.1.2 stellt zwei Optionen für die Durchführung von EMS-Untersuchungen vor. Dabei wurde erwähnt, dass es in einigen Fällen sinnvoll ist, die Messung mit einer aktiven Überwachung mittels einer Sonde statt einer Referenzkalibrierung durchzuführen. Dies war auch bei der Durchführung der Versuchsreihe der Fall: Die gestrahlten Untersuchungen wurden mittels Referenzkalibrierung, die leitungsgebundenen EMS-Untersuchungen hingegen mithilfe einer Referenzsonde durchgeführt.

Bei der gestrahlten EMS Untersuchung wurde festgestellt, dass sich die Werte der erzeugten Feldstärken unter Verwendung einer Referenz Sonde deutlich von den Feldstärken nach Referenzkalibrierung unterscheiden. Dies liegt daran, dass das Reflexionsverhalten der Kammer nicht vollständig bekannt ist und deshalb bei den Messungen nicht berücksichtigt werden kann. Um reproduzierbar die Untersuchung durchführen zu können, wird eine Referenzkalibrierung verwendet.

Im Falle der leitungsgebundenen EMS Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Unterschiede der ausgegebenen Leistung am Verstärker bei Verwendung von Referenzkalibrierung und Referenz Sonde klein sind. Außerdem müssen hier Effekte wie die Reflexion innerhalb der EMV-Kammer nicht berücksichtigt werden. Um genauer die Werte anzufahren und zugleich den gemessenen Strom durch die Sonde zu überwachen, wird hier die Variante mit der Referenzsonde verwendet.

7.2 Ergebnisse der Emissionsmessungen

Nachfolgender Abschnitt erörtert die Ergebnisse der Emissionsmessungen. In diesem Zusammenhang wird zwischen gestrahlter und leitungsgebundener Emissionsmessung unterschieden. Zudem wird zwischen dem AC und DC-Aufbau differenziert und die Ergebnisse untereinander verglichen.

7.2.1 Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung

Beim Betrachten der gestrahlten Emissionen im DC-Aufbau wurden alle Messungen der verschiedenen Schirmungen übereinander gelegt und in Abbildung 7.2 dargestellt.

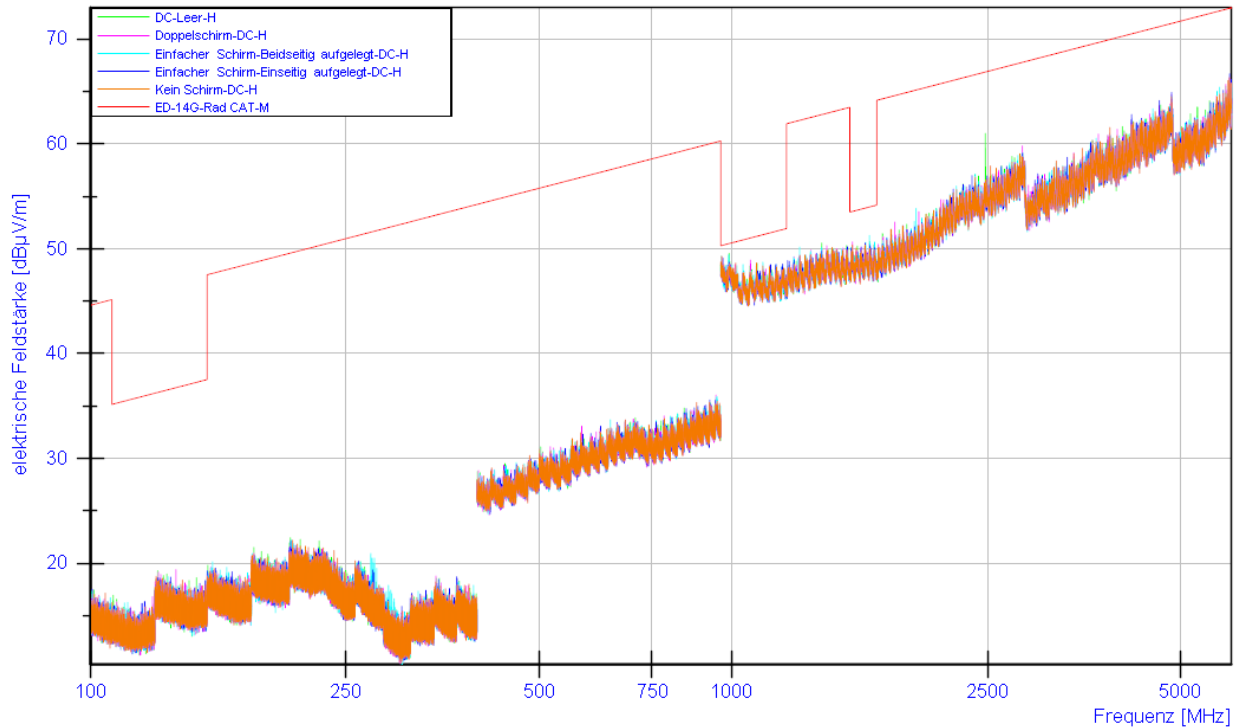


Abbildung 7.2: Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei horizontaler Antennenausrichtung

In der Darstellung der Ergebnisse der gestrahlten Emissionen werden die Pegel in $dB\mu\frac{V}{m}$ auf der Y-Achse, und auf der X-Achse die Frequenzen in MHz abgebildet.

Die verschiedenen Schirmungen sind in Abbildung 7.2 farblich gekennzeichnet. Die Ergebnisse, in denen alle Schirme aufgelistet sind, verwenden dieselben Farbcodierungen. Mit grün sind die Ergebnisse der Leermessungen markiert. Lila wurde für die Konfiguration mit dem Doppelschirm gewählt. Beim Einfachschirm sind die Messungen mit einer beidseitigen Auflegung mit hellblau und die mit einer einseitigen Auflegung mit dunkelblau gekennzeichnet. Die Konfiguration ohne Schirmung ist mit orange gekennzeichnet.

Die Leermessung (DC-Leer-H, grün) mit abgeschalteten Geräten dient als Referenz zum Identifizieren potenzieller Spitzenwerte, welche nicht von dem EUT stammen, sondern aus der Umgebung aufgenommen wurden.

Bei einer Frequenz von 2.4 GHz ist ein Spitzenwert in der Kurve der Leermessung (DC-Leer-H, grün) zu erkennen. Die Frequenz ist bekannt und kann auf umliegendes Wireless Local Area Network (WLAN) oder Bluetooth zurückgeführt werden. Aus Erfahrungswerten hat sich gezeigt, dass sich Emissionen auf dieser Frequenz durch zwei Effekte in die Kammer einkoppeln können.

Wenn während der Messung mobile Endgeräte nicht in den Flugmodus gestellt werden, kann es sein, dass sich die Emissionen bei 2.4 GHz aufgrund von einer Undichtigkeit in der Steckerverbinung von Messempfänger und Antennenkabel einkoppeln können. Da während allen Messungen umliegende mobile Endgeräte im Flugmodus waren, ist dies als Grund auszuschließen.

Die zweite Ursache könnten die in die Kammer geführten CAN und Ethernet Kabel sein. Zwar sollte die Kupferschütte einen Großteil der Emissionen ableiten, allerdings kann trotzdem ein Teil der Störung in die Kammer weitergeleitet und dort abgestrahlt werden. Dies ist der wahrscheinliche Grund, weshalb die 2.4 GHz in der Messung zu erkennen sind.

Anderweitig ist aus Abbildung 7.2 zu entnehmen, dass alle gemessenen Werte unter dem Grenzwert liegen. Zudem sind zwischen den verschiedenen Schirmungen keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen.

Beim Betrachten der gestrahlten Emissionsmessung mit einem identischen Aufbau, ebenfalls in der DC Konfiguration, mit vertikaler Ausrichtung der Antenne, ergibt sich ein weitestgehend identisches Frequenzbild, wie es im Anhang in Abbildung A.1 erkennbar ist. Die gemessenen Werte befinden sich alle unter den Grenzwerten.

Beim Betrachten der Ergebnisse des AC-Aufbaus sind ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. In Abbildung 7.3 sind die Ergebnisse aller Schirmungen, inklusive einer Leermessung als Referenz, im AC-Aufbau dargestellt. Die horizontale Polarisation wurde gemessen.

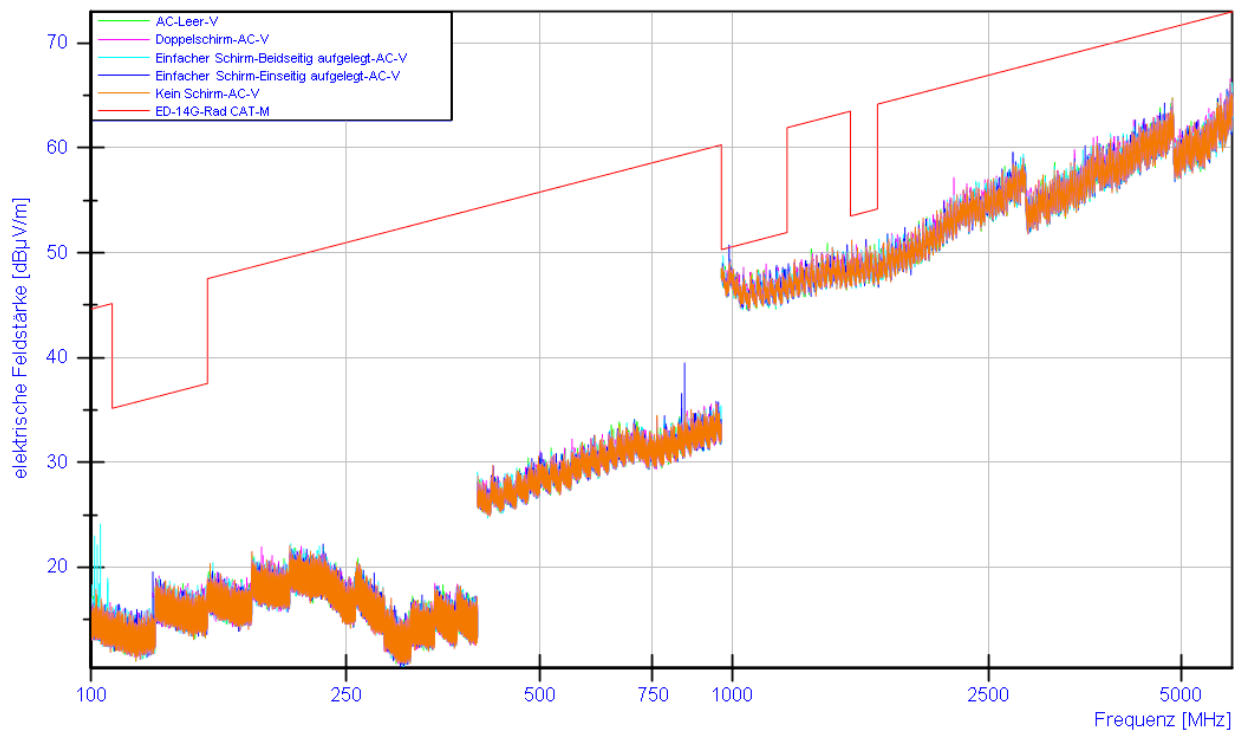


Abbildung 7.3: Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei vertikaler Antennenausrichtung

Es fällt bei der Konfiguration mit dem einseitig aufgelegten Schirm (Einfacher Schirm-Einseitig aufgelegt-AC-V, Dunkelblau) auf, dass bei einer Frequenz von 978 MHz eine kleine Grenzwertüberschreitung vorliegt. Sie ist zu vernachlässigen, da sie auf die Übertragungsfrequenz des Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) zurückzuführen ist. Eine These ist, dass zum Zeitpunkt der Aufnahme ein LFZ über das Gebäude mit dem EMV-Labor geflogen ist. Die Außen liegenden Leitungen für CAN und Ethernet haben das Signal über strahlungsgebundene Kopplung eingekoppelt und in die Kammer geleitet. Hier wurde das Signal erneut von dem Aufbau abgestrahlt.

Bei derselben Konfiguration (Einfacher Schirm-Einseitig aufgelegt-AC-V, Dunkelblau) sind in Abbildung 7.3 im Frequenzbereich von 800 MHz leichte Überhöhungen zu er-

kennen. Die Frequenz ist auf das LTE-Band zurückzuführen. Vermutlich wurde von einem in der Nähe befindlichen mobilen Endgerät das Signal über denselben Weg wie beim ADS-B eingekoppelt.

Die identische Konfiguration bei Messung der horizontalen Polarisation weist keinerlei Auffälligkeiten auf. Die Ergebnisse sind im Anhang unter Abbildung A.2 aufzufinden.

7.2.2 Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionen

Bei den leitungsgebundenen Emissionen wurden alle Konfigurationen vermessen. Hierbei sind einige Auffälligkeiten festgestellt worden.

In Abbildung 7.4 sind die Ergebnisse aller Schirmkonfigurationen im AC-Aufbau abgebildet. Die farbliche Kennzeichnung entspricht der bereits in Abschnitt 7.2.1 erläuterten Darstellung.

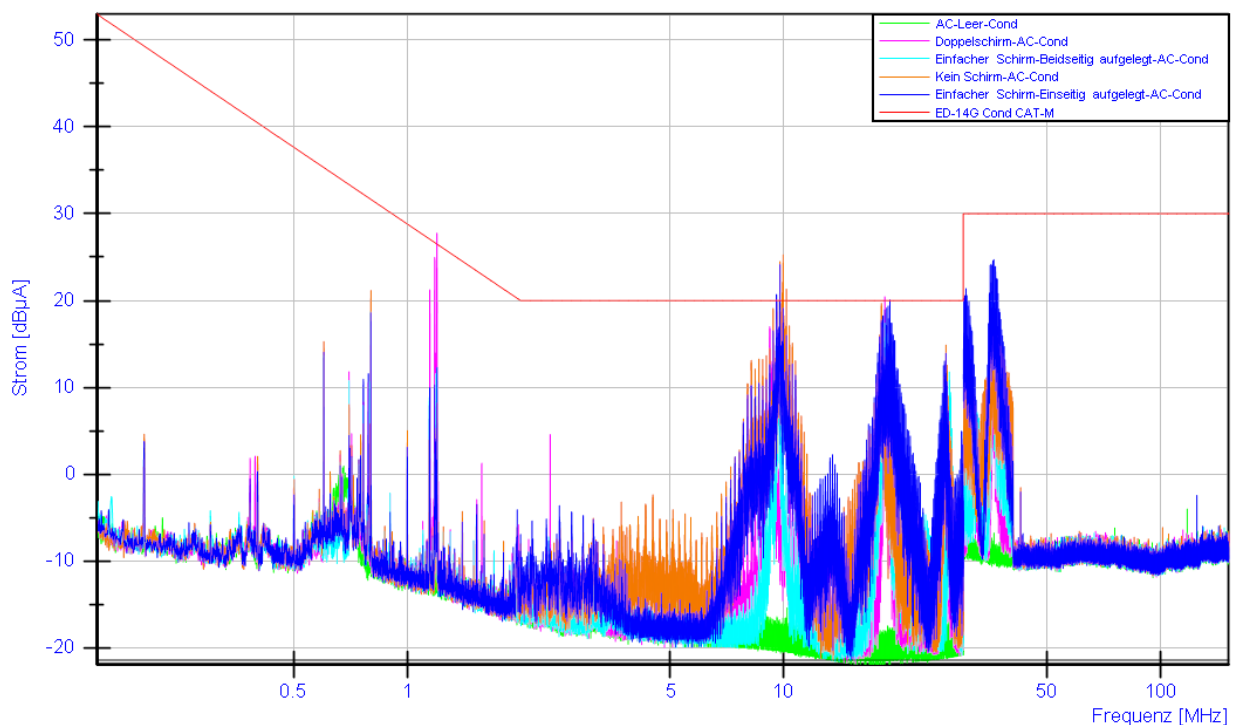


Abbildung 7.4: Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen

Hier sind drei Überschreitungen der Grenzwerte erkennbar. Angefangen bei dem Spitzenwert, welcher bei 1.2 MHz sichtbar ist. In der Konfiguration mit dem Doppelschirm

(Doppelschirm-AC-Cond, Lila) findet bei dieser Frequenz eine Grenzwertüberschreitung statt.

Zusätzlich können aus Abbildung 7.4 weitere Grenzwertüberschreitungen bei circa 10 MHz in den Konfigurationen mit dem einseitig aufgelegten Schirm (Einfacher Schirm-Einseitig aufgelegt-AC-Cond, Dunkelblau) und der Konfiguration ohne Schirm (Kein Schirm-AC-Cond, Orange) festgestellt werden.

Die dritte Grenzwertüberschreitung wurde bei 18.15 MHz festgestellt. Sie findet bei der Konfiguration mit dem Doppelschirm (Doppelschirm-AC-Cond, Lila) statt.

Bei dem Spitzenwert bei 1.2 MHz ergaben weitere Analysen, dass es sich um eine Harmonische der Basisfrequenz von 200 kHz des im Modem verbauten DC/DC Wandlers handelt. Aufgrund dessen, dass dieser Spitzenwert bei allen anderen Schirmungen nicht in dieser Ausprägung auftritt, wurden weitere Nachforschungen angestellt, um die wesentlichen Unterschiede zu identifizieren.

Eine Vermutung für die gemessenen Unterschiede war eine Variation in der Erdanbindung des Aluminiumgehäuses der PLC-Modems an den geerdeten Experimentaltisch. Um dies nachzuweisen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. AC-Aufbau, PLC auf geerdete Tischplatte aufgelegt, Hellblau
2. AC-Aufbau, PLC auf geerdete Tischplatte mit Kupfertape befestigt, Lila
3. AC-Aufbau, PLC auf geerdete Tischplatte mit Schraubzwinde befestigt, Dunkelblau

In Abbildung 7.5 sind die Ergebnisse der Nachmessungen mit den vorher aufgelisteten Konfigurationen inklusive übereinstimmender farblicher Markierung abgebildet. Sie werden mit dem Grenzwert für leitungsgebundene Messungen an Versorgungsleitungen der ED-14G verglichen.

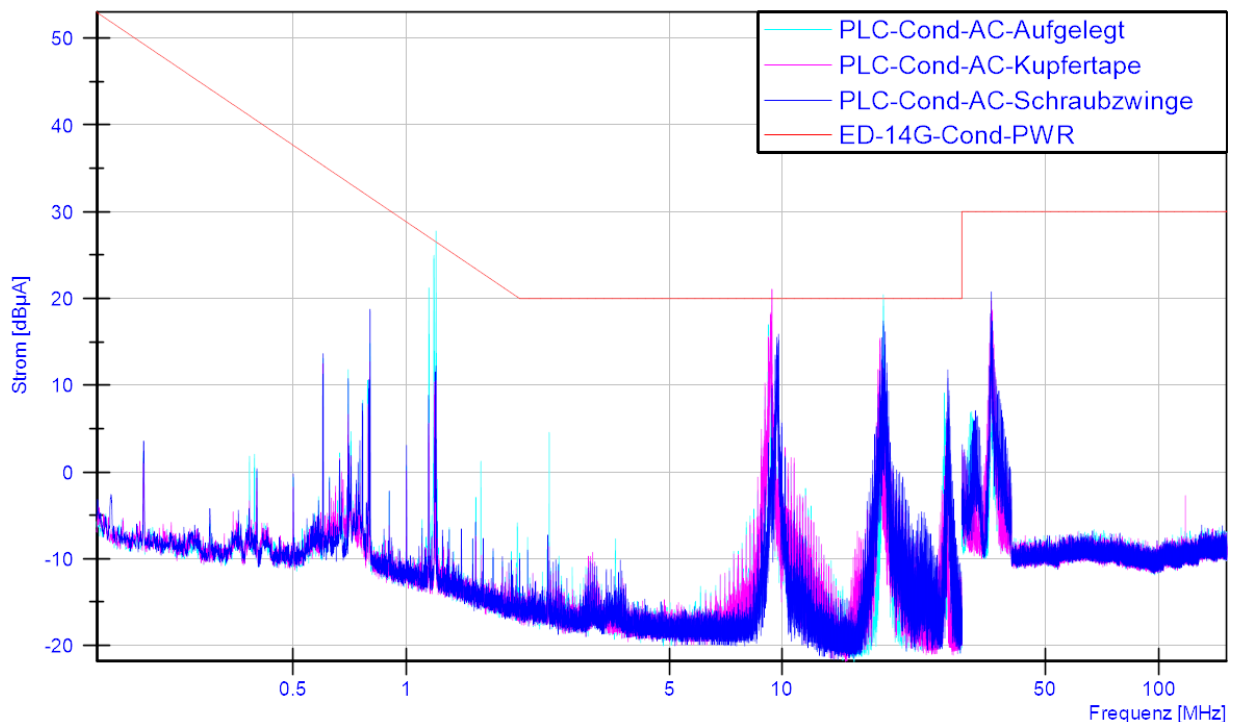


Abbildung 7.5: Ergebnisse der Vergleichsmessung verschiedener Schirmungen

Aus Abbildung 7.5 ist ein eindeutiger Effekt durch die Variation der Erdanbindung des PLC-Modem-Gehäuses zu erkennen. Im Fall, wo die Modems lediglich auf die metallene Tischplatte gelegt werden (Hellblau) sind Grenzwertüberschreitungen bei 1.2 MHz, circa 10 MHz und 18.15 MHz zu erkennen. Die nachgemessene Erdanbindung in dieser Konfiguration betrug am PLC-1 Modem 15.74 m Ω und beim PLC-2 Modem 45.73 m Ω .

Nach Anrauen der metallenen Tischplatte und der Metallgehäuse mittels Stahlwolle wurden die PLC-Modems mit Kupfertape (Pink) auf der Tischplatte befestigt. Die Anbindung konnte auf 9 m Ω am PLC-1 Modem und auf 32.7 m Ω am PLC-2 Modem verbessert werden. Daraus resultierend konnten die Grenzwertüberschreitungen im Bereich von 1.2 MHz und 18.15 MHz eliminiert werden. Die Überschreitung bei circa 10 MHz ist dennoch beständig.

Erst durch das Hinzufügen einer Schraubzwinde (Dunkelblau) zur festen Montage der PLC-Modems mit der metallenen Tischplatte konnte die Grenzwertüberschreitung bei circa 10 MHz eliminiert werden. Die Erdanbindung der PLC-Modem-Gehäuse konnte beim PLC-1 Modem auf 0.9 m Ω und beim PLC-2 Modem auf 0.63 m Ω reduziert werden.

Zusätzlich zur Reduktion der Pegel wurde bei dem 10 MHz Spitzenwert eine Frequenzverschiebung nach oben im Frequenzspektrum festgestellt. Der Aufbau kann mit einer RC-Schaltung verglichen werden und der Effekt durch die Formel für die Berechnung der damit assoziierten Grenzfrequenz nachgewiesen werden.

[57]

$$f = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (7.1)$$

Aus Formel 7.1 ist ersichtlich, dass eine Verkleinerung des Widerstandes R im Nenner eine Vergrößerung der Grenzfrequenz bewirkt. Durch das sukzessive Verringern des Widerstandes vom Gehäuse zur Tischoberfläche konnte dieses Phänomen in Abbildung 7.5 beobachtet werden.

Die PLC-Modems können auch mittels Schrauben auf diversen Oberflächen montiert werden. Dadurch würden ähnliche Werte für die Erdanbindung erzielt, wie sie mit der Schraubzwinde vergleichbar erreicht wurde. Dies konnte in der EMV-Kammer vom DLR Braunschweig nicht umgesetzt werden, da keine Bohrungen zur fachgerechten Montage vorhanden waren. Eine zusätzliche Lochung hätte die Konformität der metallenen Tischplatte mit der ED-14G verletzt.

Die Reduzierung der Amplituden durch die Erdanbindung der PLC-Modem-Gehäuse ist unter anderem auf den Aufbau zurückzuführen. Der Kabelschirm liegt in allen Konfigurationen auf dem Gehäuse der PLC-Modems auf. Durch das niederimpedante Auflegen der beiden PLC-Modems wird den Strömen, welche im Schirm aufgrund von Gegentaktemissionen auf den Leitungen mittels induktiver Kopplung im Kabelschirm erzeugt werden, eine bessere Möglichkeit zum Abfließen geboten.

Neben dem Einfluss der Erdanbindung auf den Spitzenwert bei 18.15 MHz wurde festgestellt, dass die Frequenz auf die Oszillatorfrequenz zurückzuführen ist, welche die Generierung aller Trägerfrequenzen zur Übertragung der PLC-Signale verantwortet. Die

18.15 MHz unterscheidet sich von der korrekten Oszillatorfrequenz aufgrund von parasitären Effekten im Aufbau.

Aus Gründen der Vertraulichkeit ist es nicht möglich, die genaue Oszillatorfrequenz anzugeben.

Nachdem nun die Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionen in der AC-Konfiguration beleuchtet wurden, sollen die Ergebnisse der DC-Konfiguration, wie sie in Abbildung 7.6 zu sehen sind, aufgearbeitet werden.

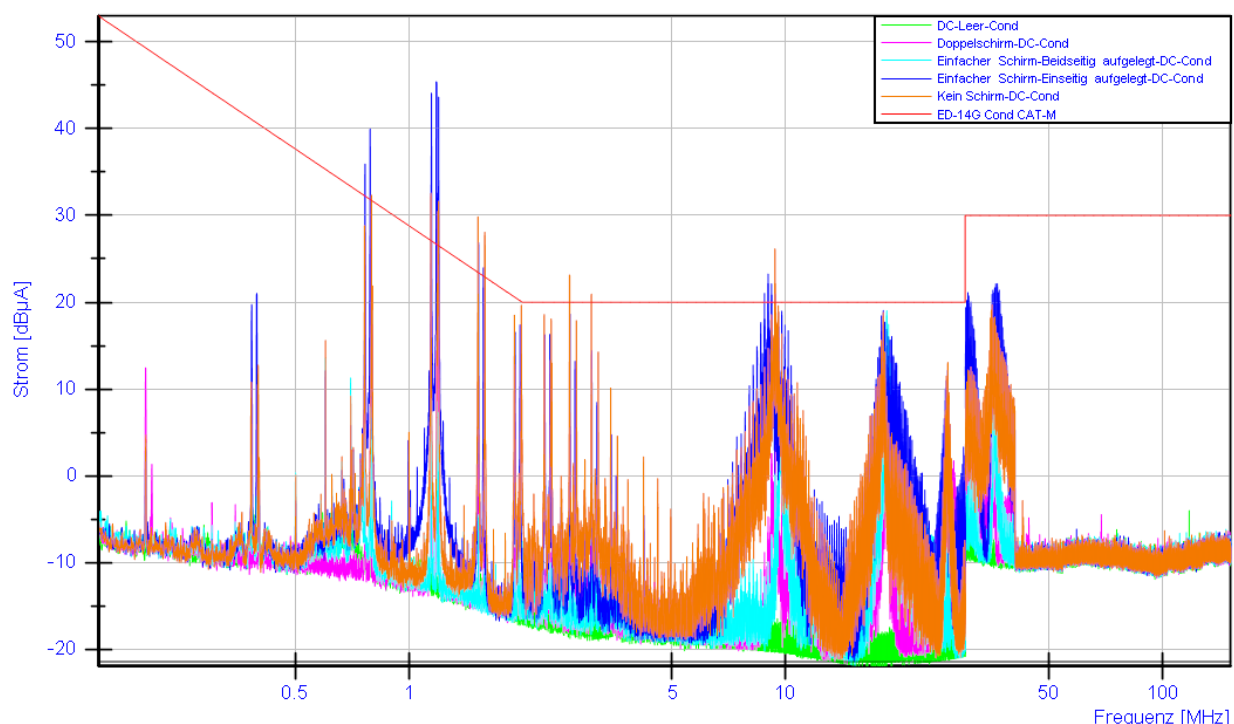


Abbildung 7.6: Ergebnisse der leitungsgebundenen Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen

Neben der bereits bekannten Grenzwertüberschreitung bei circa 10 MHz aus der AC-Konfiguration sind weitere deutliche Überschreitungen hinzugekommen.

Anfangen auf der linken Hälfte von Abbildung 7.6 im Frequenzbereich von 150 kHz bis 5 MHz, sind neun Grenzwertüberschreitungen erkennbar. Es wird ersichtlich, dass es sich bei den Spitzenwerten um Dreifachspitzenwerte handelt, welche sich mit ihren harmonischen Oberschwingungen durch das gesamte Frequenzbild ziehen. Die Überschreitungen sind nur bei den Konfigurationen ohne Kabelschirm (Kein Schirm-

DC-Cond, Orange) und mit einseitig aufgelegtem Schirm (Einfacher Schirm-Einseitig aufgelegt-DC-Cond) ersichtlich.

Aufgrund dessen, dass die Effekte nur bei der Konfiguration ohne Schirm und einseitig aufgelegtem Schirm auftreten, kann gesagt werden, dass es sich hier um reine leitungsgebundene elektromagnetische Störungen handelt, welche über ein magnetisches Wechselfeld am Leiter abgestrahlt werden.

Dies wird weiter durch die Effektivität eines beidseitig aufgelegten Schirm belegt, welcher gegen das Abstrahlen von magnetischen Wechselfeldern, die andernfalls durch induktive Kopplung Störströme in umliegende Systeme einkoppelt oder von der Strommesszange registriert werden, effektiv ist. Da in allen Messungen keine Effektivität des einseitig aufgelegten Schirms festgestellt werden konnte und in den Ergebnissen der gestrahlten Emissionsmessung keine Auffälligkeiten zu sehen sind ist das Abstrahlen von elektromagnetischen Feldern bedingt durch leitungsgebundenen Störungen ausgeschlossen.

Zudem kann aufgrund des Messaufbaus gesagt werden, dass es sich um Gleichtaktstörungen handelt. Die Methoden zum Messen von Gleich- und Gegentaktstörungen wurden in Abschnitt 2.3.3 erläutert.

Eine detaillierte Analyse der Spitzenwerte im Frequenzbereich zwischen 0.7 MHz und 2 MHz ergab das Frequenzbild, wie es in Abbildung 7.7 dargestellt ist.

In Abbildung 7.7 sind in dunkelblau die Ergebnisse der DC-Messung abgebildet und in grün die Ergebnisse der AC-Messung. Trotz derselben Konfiguration sind hier deutliche Unterschiede zu erkennen. Im späteren Verlauf dieses Abschnitts werden diese Unterschiede genauer untersucht.

Zunächst liegt der Fokus auf der Analyse der Spitzenwerte, welche eine Grenzwertüberschreitung bewirken. Aus dem Ausschnitt in Abbildung 7.7 kann entnommen werden, dass alle Grenzwertüberschreitungen harmonische Oberwellen von drei unterschiedlichen Grundfrequenzen abbilden.

Die Abstände der rot umkreisten Spitzenwerte liegt bei jeweils 382 kHz, die der blauen Spitzenwerte bei 395 kHz und die der grünen Spitzenwerte bei 400 kHz. Weitere Analysen der Ergebnisse zeigten, dass die Grundfrequenzen der einzelnen Spitzenwerte bei 191 kHz, 197 kHz und 200 kHz liegen.

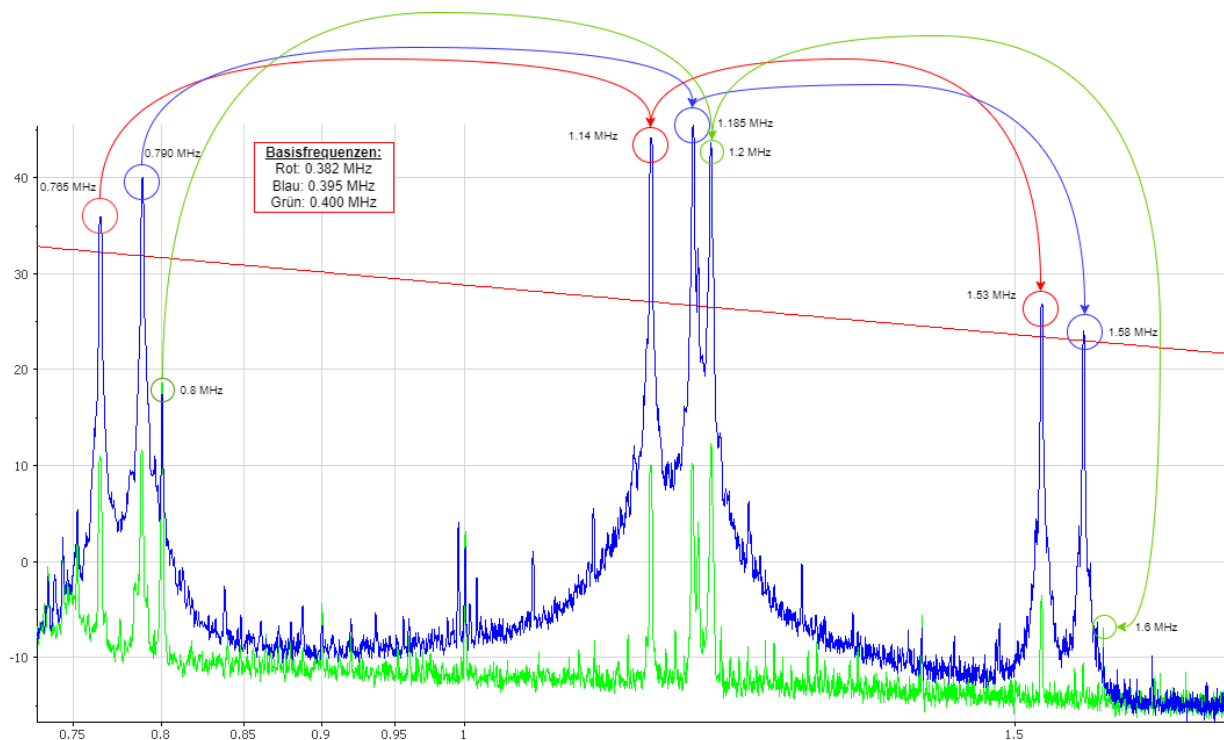


Abbildung 7.7: Ausschnitt von 0.7 bis 2 MHz der leitungsgebundenen Emissionsmessungen beim AC- und DC-Aufbau mit einseitig aufgelegter Schirmung

200 kHz ist die Basis Taktfrequenz für die verbauten DC/DC Wandler. Die wahre Schaltfrequenz ist variabel in Abhängigkeit der Last. Daher können die 197 kHz und 191 kHz ebenfalls auf diesen DC/DC Wandler zurückgeführt werden. Aufgrund von Toleranzen in der Fertigung der PLC-Modems können die resultierenden Lasten variieren. Durch die Verwendung zweier Modems treten zwei unterschiedliche lastabhängige Frequenzvariationen bei den DC/DC-Wandlern auf.

Die Verwendung eines beidseitig aufgelegten Schirms oder eines Doppelschirms genügt, um die Spitzenwerte unter dem Grenzwert zu halten.

Die Grenzwertüberschreitung aus Abbildung 7.6 bei circa 10 MHz sollen genauer analysiert werden. Dazu soll ebenfalls ein Ausschnitt aus der leitungsgebundenen Emissi-

onsmessung des einseitig aufgelegten Schirms in DC- und AC-Konfiguration im Detail betrachtet werden. Der Ausschnitt im Frequenzbereich von circa 7 bis 10 MHz ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

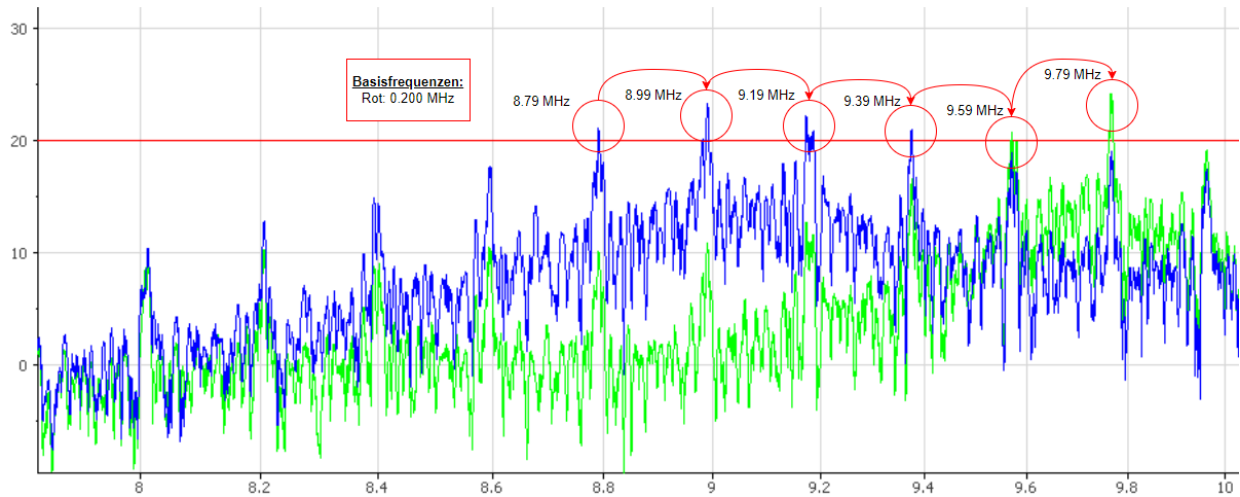


Abbildung 7.8: Ausschnitt bei 7 bis 10 MHz der leitungsgebundenen Emissionsmessungen beim AC und DC Fall mit einseitig aufgelegter Schirmung

Die Ergebnisse aus Abbildung 7.8 zeigen, dass der große Spitzenwert aus einer Vielzahl an kleineren 200 kHz Spitzenwerten besteht. Somit kann als Ursache für das Entstehen der Grenzwertüberschreitung wieder der DC/DC Wandler identifiziert werden.

Die Firma PLC-tec hat in einem zertifizierten EMV-Labor bereits im Voraus EMV-Untersuchungen zu den Emissionen eines ähnlichen Aufbaus beauftragt. Dabei konnte ein eindeutiger Effekt auf die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Testkabellänge festgestellt werden. Allerdings wurden im Aufbau deutlich kürzere Kabel und eine andere Last verwendet. Zudem wurde eine niedrigere Betriebsspannung gewählt. [15]

Die Spitzenwerte bei der Resonanzfrequenz waren identisch aufgebaut zu dem hier gemessenen Spitzenwert bei 10 MHz. Zwar stimmen die Frequenzen nicht mit denen der vorherigen Untersuchung überein, allerdings zeigten bereits kleine Unterschiede im Versuchsaufbau einen starken Effekt auf die Eigenfrequenz [15]. Aus diesem Grund wird bei circa 10 MHz die Eigenfrequenz des hier untersuchten Aufbaus erwartet.

Durch die Eigenfrequenz bei circa 10 MHz können sich die 200 kHz Spitzenwerte in ihrer Amplitude kumulieren und die Grenzwertüberschreitung hervorrufen.

Die Verwendung eines Doppelschirms oder eines beidseitig aufgelegten Schirms sowie eine angemessene Erdanbindung der PLC-Modems genügen, um die Grenzwertüberschreitung zu verhindern.

Im letzten Teil dieses Abschnitts soll nun ein Blick auf den bereits in den Abbildungen 7.7 und 7.8 aufgezeigten Unterschied in den Ergebnissen der leitungsgebundenen Emissionsmessungen im AC- und DC-Aufbau geworfen werden.

Es kann gesagt werden, dass im AC- und DC-Aufbau alle auftretenden Spitzenwerte identisch sind. Der Unterschied liegt lediglich in der Amplitude und sorgt in der DC-Konfiguration für deutliche Grenzwertüberschreitungen.

Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede in den Amplituden könnten unterschiedlich starke Ströme in den Aufbauten sein. Basierend auf den Ergebnissen in Abbildungen 7.6 und 7.6 müssten die fließenden Ströme in der DC-Konfiguration größer sein als in der AC-Konfiguration. Die Berechnungen aus den Abschnitten 3.2 und 5.1.1 widerlegen diese Annahme, da in der AC-Konfiguration ein höherer Strom erwartet wird. Nach genauem Untersuchen der Unterschiede der Aufbauten wurden folgende Faktoren festgestellt: In der DC-Konfiguration werden 28 V DC für die Versorgung der PLC-Modems und das Testkabel geteilt. In der AC-Konfiguration werden ebenfalls 28 V DC für die Versorgung der PLC-Modems verwendet. Allerdings werden über separate LISN's 230 V AC für das Testkabel zur Verfügung gestellt. Somit sind hier die Spannungsversorgungen strikt getrennt.

Bei genauerer Nachforschung wurde an alleinstehenden LISN's für die AC-Konfiguration eine gefilterte DC-Spannungsversorgung angeschlossen. Die Ergebnisse wiesen keine nennenswerten Unterschiede im gemessenen Spektrum auf und können im Anhang unter Abbildung A.3 gefunden werden.

Durch diese Erkenntnis wird stark vermutet, dass die Emissionen mittels galvanischer Kopplung an der geteilten LISN's im DC-Aufbau aufgenommen werden. Hinzu kommt, dass die Bildung diverser Erdschleifen aufgrund einer geteilten Erde, an der die LISN's

und der Versuchsaufbau niederohmig angebunden sind, die Entstehung von Gleich-taktemissionen fördern kann, was zu Grenzwertüberschreitungen, wie in Abbildung 7.6 sichtbar ist, führen kann.

Weitere Untersuchungen zu dieser These konnten aufgrund von Zeitmangel nicht verfolgt werden.

7.3 Ergebnisse der Störfestigkeitsuntersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Störfestigkeitsuntersuchungen beleuchtet. Eine Differenzierung zwischen der gestrahlten und leitungsgebundene Störfestigkeit wird angestellt.

Um die Funktionalität der Modems zu überwachen, wurde die Anzahl an gesendeten und empfangenen Nachrichten überwacht. Wenn sich die Anzahl der bidirektional gesendeten und empfangenen Nachrichten nicht unterscheidet, konnte eine vollständige Funktionalität festgestellt werden.

Zum Gewährleisten der Kontrollierbarkeit der gesendeten und empfangenen Nachrichten wurde eine Zykluszeit von 500 ms gewählt. Somit konnten die Nachrichten parallel zu den Untersuchungen überwacht werden.

7.3.1 Ergebnisse der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchung

Die gestrahlte Störfestigkeitsuntersuchung konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Alle in Abschnitt 5.1.1 genannten Kategorien wurden erfolgreich mit allen Polarisierungen untersucht, ohne dass Ausfälle registriert werden konnten.

7.3.2 Ergebnisse der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung

Im Rahmen der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchungen konnten Aussetzer in der Kommunikation zwischen den PLC-Modems festgestellt werden. Folgende Kategorien waren betroffen:

- Einfacher Schirm einseitig aufgelegt-DC-Konfiguration

- Einfacher Schirm einseitig aufgelegt-AC-Konfiguration
- Kein Schirm-DC-Konfiguration
- Kein Schirm-AC-Konfiguration

Die festgestellten Aussetzer waren bei allen Kategorien identisch. Bei einer Frequenz von 15.7 MHz sind im Schnitt zwei Nachrichten beim Überschreiten verloren gegangen. Im Frequenzbereich zwischen 24.5 bis 25.5 MHz sind durchschnittlich vier Nachrichten in der Übertragung verloren gegangen.

Bei der Durchführung der Messung wurden im Schnitt eine Gesamtzahl von 1600 Nachrichten von jedem Modem gesendet und empfangen. Der gesamte Verlust über alle Frequenzen betrug 0,375 % aller Nachrichten.

Die Vorgaben des Herstellers sehen vor, dass ein Verlust von 1% aller Nachrichten für die sichere Funktionalität des Systems tolerierbar ist. Da die Ergebnisse weit unter diesem Wert liegen, sind auch die leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchungen als unproblematisch und erfolgreich abgeschlossen einzustufen.

8 Empfehlung zur Schirmung für Luftfahrtkabel

Nachdem alle Ergebnisse in Kapitel 7 analysiert wurden, sollen aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen abgeleitet werden, die beim Einbau von PLC in sicherheitskritische Anwendungen von Luftfahrzeugen zu beachten sind.

Da die Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung und Störfestigkeitsuntersuchung zufriedenstellend sind, werden im Hinblick auf diese Aspekte keine Vorkehrungen empfohlen.

Bei den leitungsgebundenen Emissionsmessungen hingegen konnten diverse Grenzwertüberschreitungen festgestellt, Ursachen analysiert und Lösungen vorgeschlagen werden.

Die Nachforschung auf den Einfluss der Erdanbindung des PLC-Modem-Gehäuses auf die leitungsgebundenen Emissionen ergab, dass für den Einbau eine Gehäuseanbindung an die Struktur von weniger als $1\text{ m}\Omega$ gegeben sein muss.

Eine nicht ausreichende Anbindung resultiert in Grenzwertüberschreitungen und ein potenzielles Stören von benachbarten Geräten.

Die Ergebnisse der leitungsgebundenen Messungen in der AC- und DC-Konfiguration zeigten die Effektivität bei der Verwendung eines Doppelschirms oder eines beidseitig angebundenen Schirms.

Beim Betrachten des Kabelgewichts mit unterschiedlichen Schirmungen auf einer Länge von 15 m, war das ungeschirmte Kabel mit 0.6 kg am leichtesten. Die beiden Einfachschirmungen wogen beide jeweils 0.9 kg und der Doppelschirm wog 1.2 kg.

Daraus ergibt sich die Empfehlung, einen beidseitig angebundenen Schirm zu verwenden, da dieser die beste Effektivität gegen ungewollte Emissionen bei einem akzeptablen Gewicht bietet.

Die letzte Empfehlung betrifft die getrennte Spannungsversorgung der PLC-Modems und der Übertragungsleitung. Im Rahmen der Untersuchung der Unterschiede zwischen der AC- und DC-Konfiguration wurde festgestellt, dass durch galvanische Kopplung und Erdschleifenbildung ungewollte Gleichtaktemissionen entstehen können. Dieses Phänomen tritt in der DC-Konfiguration auf, da die Spannungsversorgung der PLC-Modems und des Versuchskabels zusammengesteckt sind und eine gemeinsame 28-V-DC-Spannungsversorgung verwendet wird. Eine weitere mögliche Maßnahme wäre die Filterung der Eingänge der PLC-Modems.

9 Fazit

9.1 Zusammenfassung

Die hier präsentierte Arbeit bietet einen weitreichenden Überblick über Kabelcharakteristiken und den Einsatz einer Powerline Communication für die Verwendung in sicherheitskritischen Luftfahrtanwendungen.

In einem Kapitel zur Einführung in die Theorie wurden die wichtigen Aspekte einer Powerline Communication erläutert. Alternative Datenübertragungssysteme, welche heute in Luftfahrzeugen eingesetzt werden, präsentiert und mit der Powerline Communication verglichen. Eine ausführliche Darlegung der Theorie der elektromagnetischen Verträglichkeit behandelt verschiedene Emissionsmessungen und Untersuchungen zur Störfestigkeit, wobei wichtige Aspekte wie Kopplungsmechanismen beleuchtet werden. Anschließend werden wichtige Kabelcharakteristiken und die Funktionsweise von Kabelschirmen erläutert.

Zum Erstellen eines geeigneten Versuchsaufbaus werden wichtige Anforderungen erläutert. Anhand dieser Anforderungen können die Kabel für den Versuchsaufbau ausgelegt werden.

Es folgt eine detaillierte Darstellung der Testumgebung sowie der erforderlichen Messtechnik. Anschließend wird der Versuchsaufbau vorgestellt, wobei verschiedene Aspekte wie die unterschiedlichen Spannungsversorgungskonfigurationen, die Schirmungen und die angewandten Messmethoden erläutert werden.

Nach der Beschreibung des Versuchsaufbaus erfolgt die Durchführung der Messungen sowie die Auswertung der Ergebnisse. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen für die Integration von PLC-Modems in sicherheitskritische Anwendungen in der Luftfahrt ableiten.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird im Anhang unter Abschnitt A.3 ein Konzept zu Integration der Powerline Communication in einen Demonstrator für innovative Flugsteuerungstechnologien erarbeitet.

9.2 Kritische Reflexion

Während der Durchführung der Messungen gab es an verschiedenen Stellen Verbesserungspotenzial. Anfangs wurden die Modems nur auf die Tischplatte gelegt, was teilweise zu Grenzwertüberschreitungen geführt hat, da das Gehäuse und die Schirmung nicht gut genug angebunden waren. Dies war früh in der Messreihe aufgefallen und konnte daher auch schnell untersucht werden, hätte allerdings von Anfang an beachtet werden können.

Daher sollen künftig alle Messaufbauten anfangs direkt mittels eines $m\Omega$ Meter auf ihre Anbindung geprüft werden.

Ein zweiter Effekt, welcher ungünstig war, aber schwer vermeidbar ist, sind die Unterschiede in der AC- und DC-Konfiguration. Zusätzlich wurde in der Konzeption des Aufbaus vorgesehen, dass wie beim AC-Aufbau in der DC-Konfiguration vier LISN's verwendet werden sollten, was aufgrund von parallelen Projekten nicht durchgängig möglich war.

Zukünftig sollten daher Vergleichsmessungen mit der DC-Konfiguration durchgeführt werden, um die Effekte der Unterschiede in den gemessenen Spektren weiterzuerforschen.

9.3 Ausblick

Zukünftig sind noch verschiedene Untersuchungen und Entwicklungen im Rahmen dieses Projekts vorgesehen.

Zunächst soll die Integration der Modems in den WISDOM Prüfstand geschehen. Hierfür müssen notwendige Kabel ausgelegt werden.

Ein weiterer bedeutender Gesichtspunkt besteht in der Notwendigkeit weiterer Untersuchungen des Verhaltens der leitungsgebundenen Emissionen, die beim Zusammenlegen der PLC-Spannungsversorgung mit der des Versuchskabels auftreten. Ein Versuchsaufbau mit drei strikt getrennten Spannungsversorgungen könnte hier Aufschluss bringen. Zusätzlich sollen die Unterschiede in den AC- und DC-Konfigurationen und die Auswirkungen auf die untersuchten Spektren erforscht werden.

Neben den Messungen für die Kategorie M der ED-14G sollen auch strengere Kategorien untersucht werden, um weitere Integrationsmöglichkeiten zu prüfen.

Auch bei der leitungsgebundenen Störfestigkeit können alle weiteren Kategorien der ED-14G Sektion 20 untersucht werden. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Arbeit war dies aufgrund von Softwarelimitierungen nicht möglich.

Eine Variation der Kabellänge im Zusammenhang mit den Effekten auf die Eigenfrequenz im Versuchsaufbau soll ebenfalls zukünftig untersucht werden.

Der letzte Aspekt dieses Projektes wäre eine Untersuchung der Störfestigkeit mittels einem „Arbitrary Wafeform Generators“, welcher es ermöglicht, mit einem Oszilloskop aufgenommene Signale mittels Verstärken auf ein EUT einzuprägen. Die Signale sollen vom Elektromotorprüfstand für Flugmotoren aufgenommen werden, um den Effekt der hohen Störpotentiale dieser Motorrichterkombinationen zu untersuchen.

9.4 Hilfsmittel

Nutzung von KI-Tools

Werkzeug	Beschreibung der Nutzung
ChatGPT	Erstellen von BibTex Schlüsseln zum Zitieren von Quellen, Rechtschreibkorrektur und Formulierungshilfe
Consensus	Unterstützung bei der Literaturrecherche
LanguageTool	Rechtschreibkorrektur und Formulierungshilfe
DeepL	Rechtschreibkorrektur und Formulierungshilfe

10 Literaturverzeichnis

- [1] Lee, Joosung and Mo, Jeonghoon, “Analysis of Technological Innovation and Environmental Performance Improvement in Aviation Sector”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Jg. 8, Nr. 9, S. 3777–3795, 2011, ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph8093777. Adresse: <https://www.mdpi.com/1660-4601/8/9/3777>.
- [2] Frederico Afonso and José Vale and Éder Oliveira and Fernando Lau and Afzal Suleman, “A review on non-linear aeroelasticity of high aspect-ratio wings”, *Progress in Aerospace Sciences*, Jg. 89, S. 40–57, 2017, ISSN: 0376-0421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.12.004>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037604211630077X>.
- [3] NASA Glenn Research Center, *Geometry of Airplane Parts*, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/geom.html>. (besucht am 16.07.2024).
- [4] Tang, Deman and Dowell, Earl H., “Experimental and Theoretical Study on Aeroelastic Response of High-Aspect-Ratio Wings”, *AIAA Journal*, Jg. 39, Nr. 8, S. 1430–1441, 2001. DOI: 10.2514/2.1484. eprint: <https://doi.org/10.2514/2.1484>. Adresse: <https://doi.org/10.2514/2.1484>.
- [5] DLR, *Willkommen zum Verbundprojekt WISDOM!*, <https://teamsites-extranet.dlr.de/ft/WISDOM/SitePages/Homepage.aspx>, Intern¹. (besucht am 19.07.2024).
- [6] Diehl Aviation, *Power Line Communication*. Adresse: <https://www.diehl.com/aviation/de/innovation/innovative-loesungen/power-line-communication/> (besucht am 11.08.2024).
- [7] Dominiak, Stephen and Vos, Guus and Meer, Theo and Widmer, Hanspeter, “Achieving EMC emissions compliance for an aeronautics power line communi-

¹Alle verwendeten Quellen, welche mit „Intern“ gekennzeichnet sind, sind DLR-interne Dokumente welche nicht öffentlich zugänglich sind. Auf Anfrage können Teile oder ganze Dokumente freigelegt werden.

- cations system”, *Proceedings of the 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC 2012*, Mai 2012.
- [8] plc-tec AG, *PLUS Product Platform*, https://www.plc-tec.ch/plus_product_platform/, Accessed: 2024-09-20, 2024. Adresse: https://www.plc-tec.ch/plus_product_platform/ (besucht am 09.09.2024).
 - [9] The European Organisation for Civil Aviation Equipment L’Organisation Européenne pour l’Equiptement de l’Aviation Civile, *EUROCAE ED-14G, Enviromental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, 2011.
 - [10] Majumder, A. and Caffery J, Jr., “Power line communications”, *IEEE Potentials*, Jg. 23, Nr. 4, S. 4–8, 2004. DOI: 10.1109/MP.2004.1343222.
 - [11] Gouret, W. and Nouvel, F. and El-Zein, G., “Powerline Communication on Automotive Network”, in *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring*, 2007, S. 2545–2549. DOI: 10.1109/VETECS.2007.524.
 - [12] Rönnerberg, Sarah and Lundmark, Martin and Andersson, Marcus and Larsson, Anders and Bollen, Math and Wahlberg, Mats, “Attenuation and noise level : potential problems with communication via the power grid”, in *Conference proceedings : 19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution : Vienna, 21 - 24 May 2007*, Godkänd; 2007; Bibliografisk uppgift: 2 CD-ROMs.; 20071005 (ronsar), AIM, 2007, 0186.
 - [13] Pavlidou, N. and Han Vinck, A.J. and Yazdani, J. and Honary, B., “Power line communications: state of the art and future trends”, *IEEE Communications Magazine*, Jg. 41, Nr. 4, S. 34–40, 2003. DOI: 10.1109/MCOM.2003.1193972.
 - [14] Cano, Cristina and Pittolo, Alberto and Malone, David and Lampe, Lutz and Tonello, Andrea M. and Dabak, Anand G., “State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Jg. 34, Nr. 7, S. 1935–1952, 2016. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2566018.

- [15] Rotgerink, Jesper Lansink and Dominiak, Stephen and Dietrich, Gerd and Řezníček, Zdeněk, “Power Line Communications for Avionics Systems: Robustness Against Electromagnetic Compatibility”, in *2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, 2023, S. 1–7. DOI: 10.1109/EMCEurope\ "57790.2023.10274385.
- [16] Elektronik-Kompendium, *OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplex*. Adresse: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1509011.htm> (besucht am 29.08.2024).
- [17] Ferreira, Hendrik and Grove, H.M. and Hooijen, O. and Vinck, Jan, “Power line communications: an overview”, Okt. 1996, 558–563 vol.2, ISBN: 0-7803-3019-6. DOI: 10.1109/AFRCON.1996.562949.
- [18] Sunpower UK, *What is Capacitive Coupling?*, Accessed: 2024-08-30, 2024. Adresse: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-capacitive-coupling/>.
- [19] H. Dinis and P.M. Mendes, “A comprehensive review of powering methods used in state-of-the-art miniaturized implantable electronic devices”, *Biosensors and Bioelectronics*, Jg. 172, S. 112 781, 2021, ISSN: 0956-5663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112781>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566320307685>.
- [20] Prof. Dr.-Ing. Albrecht Linkohr, *AVlation ElektrONIK Avionik Systeme Skript*, 2024.
- [21] Dipl. Ing. (BA) Michael Strobel, *Grundlagen der Kommunikationstechnik Skript Modul 1*, 2024.
- [22] ME-Meßsysteme GmbH, *CAN-Bus Grundlagen*, 2024. Adresse: <https://www.me-systeme.de/de/grundlagen/canbus> (besucht am 01.09.2024).
- [23] The ARINC 825 Working Group, *The ARINC 825 Standard*, 2024. Adresse: <https://www.arinc-825.com/the-arinc825-standard/> (besucht am 01.09.2024).
- [24] Wikipedia contributors, *CAN bus*, https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus, 2024. (besucht am 02.09.2024).

- [25] KFZ-Aufgaben.de, *Bit-Stuffing im CAN-Bus*, 2024. Adresse: <https://kfz-%5C%22aufgaben.de/can/Bit-Stuffing.458.0.html> (besucht am 02. 09. 2024).
- [26] M. Sadiku, "Electromagnetic compatibility", *IEEE Potentials*, 1992.
- [27] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley-IEEE Press, 2009, ISBN: 978-0-470-18930-6.
- [28] Dr. Klaus Kempkens, *Elektromagnetische Verträglichkeit Skripts*, 2020.
- [29] C. R. Paul, *Electromagnetic Compatibility*, 3. Aufl. Wiley-IEEE Press, 2021, ISBN: 978-1-119-69237-0.
- [30] Phoenix Contact, *Grundlagen zur Schirmung*, <https://www.phoenixcontact.com/de-de/technologien/schirmung/grundlagen-schirmung>. (besucht am 06. 09. 2024).
- [31] AerumTec, *AWG – American Wire Gauge – Tabellen und Erläuterungen*, 2024. Adresse: <https://aerumtec.com/de/kundenservice/awg-american-wire-gauge/> (besucht am 09. 07. 2024).
- [32] M. Corporation, *Current Carrying Capacity of Copper Conductors*, 2024. Adresse: <https://www.multicable.com/resources/reference-data/current-carrying-capacity-of-copper-conductors/> (besucht am 09. 07. 2024).
- [33] S. B. G. bibinitperiod C. KG, *Calculate Wire Cross Section – Current Carrying Capacity Table*, 2024. Adresse: <https://www.sab-cable.com/cables-wires-harnessing-temperature-measurement/technical-data/cables-and-wires/instructions-for-the-safe-application-of-cables/boundary-conditions/calculate-wire-cross-section-current-carrying-capacity-table.html> (besucht am 09. 07. 2024).
- [34] H.-E. I. GmbH, *Kabelschirme – Know-How zur Schirmungstechnik*, 2024. Adresse: <http://www.hl-emv.com/Know-How/Schirmungen/Kabelschirme.html> (besucht am 09. 07. 2024).
- [35] Jürgen Späh, *AP 4.6 PLC-EMV-Test*, Intern¹, 2024.

- [36] DLR, Liebherr Aerospace, Diehl Aerospace, FFT Produktionssysteme und TU-Berlin, *Verbundbeschreibung Im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms Lu-Fo VI-2 WISDOM, Hybride Testumgebung für Flugsteuerungssysteme schlanker Flügel (Wing Integrated Systems Demonstration On Mechatronic Rig)*, Intern¹. Adresse: <https://teamsites-extranet.dlr.de/ft/WISDOM> (besucht am 09.08.2024).
- [37] TE Connectivity, *Aluminium Enclosed Resistor Type CJH Series*, 2022.
- [38] A. Store, *Luftfahrtkabel TEFZEL AWG22 dreiadrig geschirmt weiß*, 2024. Adresse: <https://www.air-store.eu/Luftfahrtkabel-TEFZEL-AWG22-dreiadrig-geschirmt-weiss> (besucht am 08.09.2024).
- [39] Nexans, *Screened Sheathed - Single core: MNA, MNB, 25984*, 2024. Adresse: <https://www.nexans.fr/en/products/Transportation/Aerospace/Hook-up-wires-for-civil,-military-aircraft-and-helicopters/EN-Standards/Screened-Sheathed---Single-core/MNA,-MNB,-25984.html> (besucht am 08.09.2024).
- [40] F. I. S. AG, *VA5088 EN2266 - Litzen und Kabel Spezifikation*, 2024. Adresse: <https://www.ferratec-industrial-solutions.ch/de/online-katalog/litzen-kabel/spezifikation-en/web-va5088-en2266/> (besucht am 08.09.2024).
- [41] A. Corporation, *97 Series - Connectors Datasheet*, 2024.
- [42] Md. Farooque Azam and Brijendra Mishra, "A Review on the Characteristics of Line Impedance Stabilization Network", *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2023. DOI: 10.48175/ijarsct-11983.
- [43] Holloway, C.L. and DeLyser, R.R. and German, R.F. and McKenna, P. and Kanda, M., "Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Jg. 39, Nr. 1, S. 33–47, 1997. DOI: 10.1109/15.554693.

- [44] Kefeng Liu, “Analysis of the effect of ferrite tile gap on EMC chamber having ferrite absorber walls”, in *Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1996, S. 156–161. DOI: 10.1109/ISEMC.1996.561220.
- [45] Schwarzbeck Mess-Elektronik, *VHBB 9124 4:1 Balun mit Bikonus-Elementen BBA 9106*, 2014.
- [46] Schwarzbeck Mess-Elektronik, *VUSLP 9111 Log.-Periodische Antenne Handbuch*.
- [47] Schwarzbeck Mess-Elektronik, *BBHA 9120 D Kalibrierte Doppelsteg Breitband Hornantenne Handbuch*.
- [48] Fischer Custom Communications, *Current Probe F-57*.
- [49] Schwarzbeck Mess-Elektronik, *VHBA 9123 4:1 100 W-Balun mit Bikonus-elementen BBA 9106*.
- [50] Narda Safety Test Solutions, *E-Feld-Sonde, Messung elektrischer Felder von 3 MHz bis 18 GHz*.
- [51] Fischer Custom Communications, *Bulk Current Injection F-120-8F*.
- [52] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, *R&S ESR EMI Test Receiver*. Adresse: https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/funkstoerm%5C%22essemmpfaenger/rs-esr-funkstoermessemmpfaenger_63493-17877.html (besucht am 26. 08. 2024).
- [53] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, *R&S FSH Handheld-Spektrumanalysator*, 2024. Adresse: https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/handheld/rs-fsh-handheld-spektrumanalysator_63493-8180.html (besucht am 26. 08. 2024).
- [54] C. Paebst, *EMS System V3*, 2023.
- [55] Rohde und Schwarz, *R&S BBA1xx Broadband amplifier Manual*. 2022.

- [56] Rohde & Schwarz, *R&S SMB100B RF Signal Generator - Specifications*, Version 1.10, Aug. 2023. Adresse: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/specifications/3607_8182_22/SMB100B_specs_en_3607-8182-22_v1100.pdf.
- [57] E. Fachwissen, *RC-Glied Grenzfrequenz - Berechnung und Bedeutung*, 2024. Adresse: <https://www.elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/rc-grenzfrequenz.php> (besucht am 09.09.2024).
- [58] PLC-tec AG, *PLUS V2 Datasheet*, 2022. Adresse: <https://www.plc-tec.ch/wp-content/uploads/2022/01/PLUS-V2-Datasheet.pdf> (besucht am 23.07.2024).
- [59] Phillip Nöldeke, *FCC Wiring Harness*, <https://teamsites-extranet.dlr.de/ft/WISDOM/layouts/>, Intern¹. (besucht am 12.08.2024).

A Anhang

A.1 Abbildungen

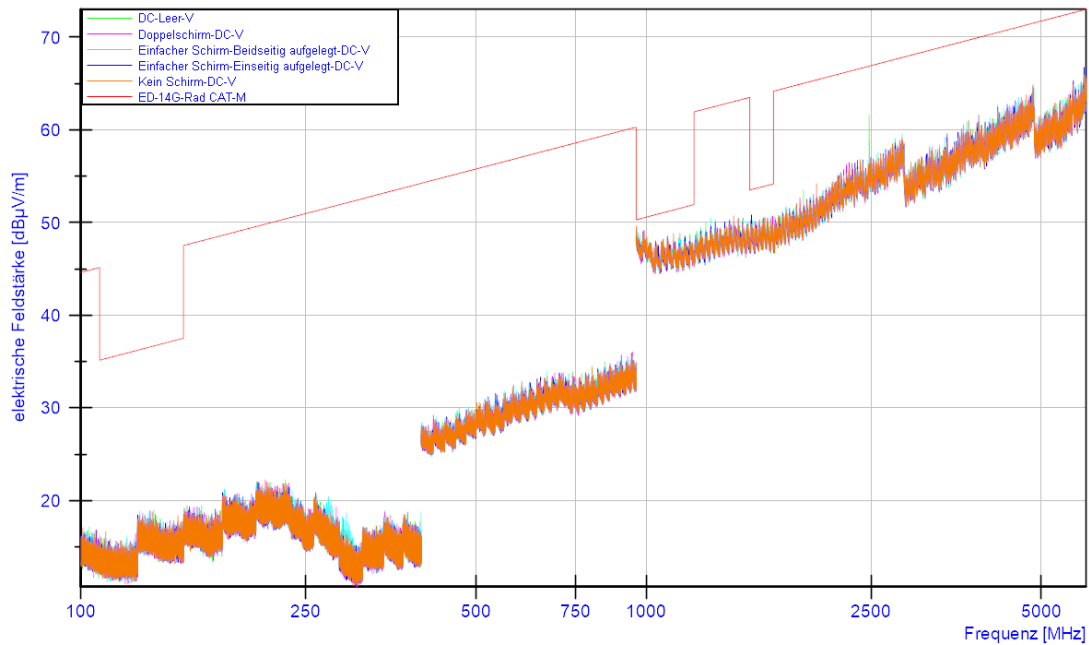


Abbildung A.1: Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des DC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei vertikaler Antennenausrichtung

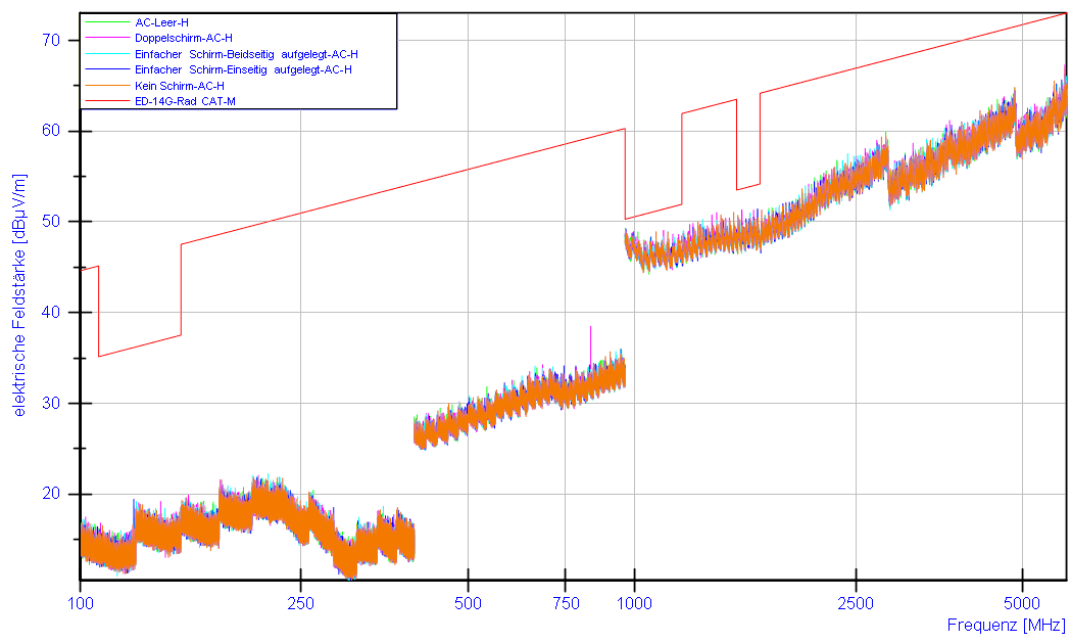


Abbildung A.2: Ergebnisse der gestrahlten Emissionsmessung des AC-Aufbaus mit allen Schirmungen bei horizontaler Antennenausrichtung

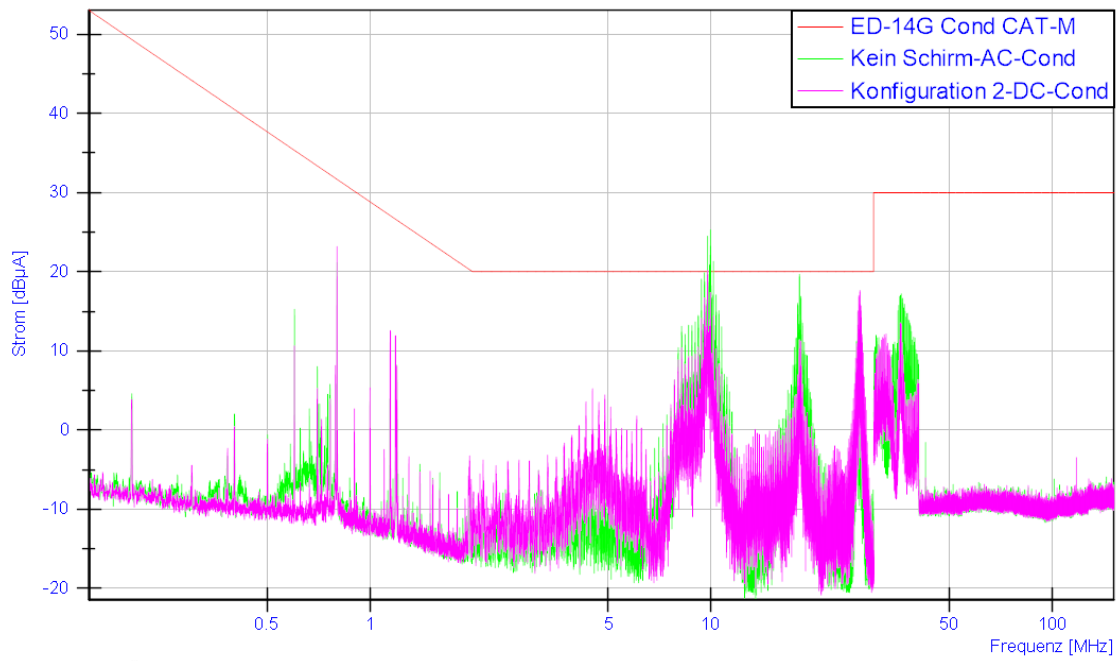


Abbildung A.3: Ergebnisse der Nachforschung für Unterschiede zwischen dem AC- und DC-Aufbau

A.2 Tabellen

Tabelle A.1: Frequenzen und Feldstärken der gestrahlten Störfestigkeitsuntersuchung [9]

Environment	Cat B (V/m)		Cat D (V/m)		Cat F (V/m)		Cat G (V/m)		Cat L (V/m)		Cat R (V/m)		Cat S (V/m)	Cat T (V/m)	Cat W (V/m)	Cat Y (V/m)
Frequency		PM		PM	SW/ CW	PM	SW/ CW	PM		PM	SW/ CW	PM	SW/ CW	SW/ CW	SW/ CW	SW/ CW
100-200 MHz	20		25		50		100		200		20		1	5	100	200
200-400 MHz	20		25		50		100		200		20		1	5	100	200
400-700 MHz	20	150	20	175	25	350	50	700	200	730		150	1	5	100	200
700 MHz-1 GHz	20	150	25	175	50	350	100	700	240	1400		150	1	5	100	200
1-2 GHz	25	250	50	500	100	1000	200	2000	250	5000		150	1	5	100	200
2-4 GHz	25	375	50	750	100	1500	200	3000	490	6000		150		5	100	200
4-6 GHz	25	375	50	750	100	1500	200	3000	400	7200		150		5	100	200
6-8 GHz	25	150	50	250	100	500	200	1000	200	1100		150		5	100	200
8-12 GHz	38	375	75	750	150	1500	300	3000	330	5000					100	200
12-18 GHz	25	250	50	500	100	1000	200	2000	330	2000					100	200

Tabelle A.2: Frequenzen und Feldstärken der leitungsgebundenen Störfestigkeitsuntersuchung [9]

Frequency (MHz)	Category Levels (mA)						
	M	O	R	S	T	W	Y
0.01	0.6	3	0.6	0.03	0.15	3	6
0.5	30	150	30	1.5	7.5	150	300
1	70	250	30	1.5	7.5	150	300
30	70	250	30	1.5	7.5	150	300
40	*	*	30	1.5	7.5	150	300
100	*	*	*	*	*	*	300
400	32	50	3	0.15	0.75	32	100

Tabelle A.3: Fertigungstabelle aller Kabel

Kennung:	Beziehung:	Eingang:		Bezeichnung Stecker (und Socket):	Stecker Gender:	Belegung Eingang:	Abschlusswiderstand:
		Stecker Eingang:	D-SUB (Metalgehäuse)				
CAN-PLC1-IN	CAN: Schütze-PLC1	D-SUB (Metalgehäuse)			Male	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H	
CAN-PLC1-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:1)-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)			Male	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H	121 Ohm
CAN-PLC2-IN	CAN: Schütze-PLC2	D-SUB (Metalgehäuse)			Male	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H	
CAN-PLC2-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:2)-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)			Male	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H	121 Ohm
ETH-PLC1-IN	Ethernet: Schütze-PLC1	Ethernet			Male	1:ETH_TX+; 2:ETH_TX-; 3:ETH_RX+; 7:ETH_RX-	
ETH-PLC1-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	Ethernet			Male	1:ETH_TX+; 2:ETH_TX-; 3:ETH_RX+; 7:ETH_RX-	
ETH-PLC2-IN	Ethernet: Schütze-PLC2	Ethernet			Male	1:ETH_TX+; 3:ETH_TX-; 5:ETH_RX+; 7:ETH_RX-	
ETH-PLC2-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	Ethernet			Male	1:ETH_TX+; 2:ETH_TX-; 3:ETH_RX+; 7:ETH_RX-	
PWR-PLC1-28V	PWR:LISN2-PLC1	Banane mit Kupplung			Male	Banane1: +; Banane2: -	
PWR-PLC2-28V	PWR:LISN2-PLC2	Banane mit Kupplung			Male	Banane1: +; Banane2: -	
RST-GND-PLC1	RSTGND: LISN-PLC1	Kabelschuh (rund)			Male	Banane:RST;GND	
RST-GND-PLC2	RSTGND: LISN-PLC2	Kabelschuh (rund)			Male	Banane:RST;GND	
PLC-1	PLC: LISN1-MIL14(1)	Banane, Kabelschuh (für GND)			Male	Banane1: PLC+; Banane2: PLC-; Kabelschuh (rund); Neutral	
PLC-2	PLC: MIL14(1)-PLC1,MIL16	MIL-14S-7P			Female	C:PLC+; B:Neutral; A:PLC- \N\Zwei Mall!!!!!!!	
PLC-3 (Testkabel)	PLC: MIL16-MIL14(2)	MIL-16-10P			Female	C:PLC+; B:Neutral; A:PLC-	
PLC-4	PLC: MIL14(2)-PLC2, LAST	MIL-14S-7P			Female	C:PLC+; B:Neutral; A:PLC- \N\+; A:-	
Kabel:							
Kennung:	Beziehung:	Schirmung:	Verwendetes Kabel:	AWG:	Adern:		Länge [m]:
CAN-PLC1-IN	CAN: Schütze-PLC1	Integrierter Schirm	MIL-C-27500-22TG	22	3		3,6
CAN-PLC1-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:1)-Schütze	Integrierter Schirm	MIL-C-27500-22TG	22	3		1,5
CAN-PLC2-IN	CAN: Schütze-PLC2	Integrierter Schirm	MIL-C-27500-22TG	22	3		5,2
CAN-PLC2-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:2)-Schütze	Integrierter Schirm	MIL-C-27500-22TG	22	3		1,5
ETH-PLC1-IN	Ethernet: Schütze-PLC1	Integrierter Schirm		22	4		3,6
ETH-PLC1-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	Integrierter Schirm		22	4		1,8
ETH-PLC2-IN	Ethernet: Schütze-PLC2	Integrierter Schirm		22	4		5,2
ETH-PLC2-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	Integrierter Schirm		22	4		1,8
PWR-PLC1-28V	PWR:LISN2-PLC1	Integrierter Schirm	10255132	22	2		0,9
PWR-PLC2-28V	PWR:LISN2-PLC2	Integrierter Schirm	10255132	22	2		4,4
RST-GND-PLC1	RSTGND: LISN-PLC1	Integrierter Schirm	10255132	22	2		0,9
RST-GND-PLC2	RSTGND: LISN-PLC2	Integrierter Schirm	10255132	22	2		4,4
PLC-1	PLC: LISN1-MIL14(1)	Doppelschirmung, Permanent	XQF16-001	16	3		1
PLC-2	PLC: MIL14(1)-PLC1,MIL16	Doppelschirmung, Permanent	XQF16-001	16	3		Nach Ermessen
PLC-3 (Testkabel)	PLC: MIL16-MIL14(2)	Variabel, RAY-101-3/4	XQF16-001	16	3		15
PLC-4	PLC: MIL14(2)-PLC2, LAST	Doppelschirmung, Permanent	XQF16-001	16	2,3		Zu Last: 1,65; Zu PLC1
Ausgang:							
Kennung:	Beziehung:	Stecker Ausgang:	Bezeichnung Stecker (und Socket):	Stecker Gender:	Belegung Ausgang:	Abschlusswiderstand:	
CAN-PLC1-IN	CAN: Schütze-PLC1	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	30:CAN_H; 29:CAN_L; 16:CAN_GND		
CAN-PLC1-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:1)-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)		Female	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H		
CAN-PLC2-IN	CAN: Schütze-PLC2	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	30:CAN_H; 29:CAN_L; 16:CAN_GND		
CAN-PLC2-OUT	CAN: CANanalyzer (Port:2)-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)		Female	2:CAN_L; 3:CAN_GND; 7:CAN_H		
ETH-PLC1-IN	Ethernet: Schütze-PLC1	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	18:ETH_TX+; 17:ETH_TX-; 24:ETH_RX+; 23:ETH_RX-		
ETH-PLC1-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)		Female	1:ETH_TX+; 3:ETH_TX-; 5:ETH_RX+; 7:ETH_RX-		
ETH-PLC2-IN	Ethernet: Schütze-PLC2	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	18:ETH_TX+; 17:ETH_TX-; 24:ETH_RX+; 23:ETH_RX-		
ETH-PLC2-OUT	Ethernet: Switch-Schütze	D-SUB (Metalgehäuse)		Female	1:ETH_TX+; 3:ETH_TX-; 5:ETH_RX+; 7:ETH_RX-		
PWR-PLC1-28V	PWR:LISN2-PLC1	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	6+; 5:-		
PWR-PLC2-28V	PWR:LISN2-PLC2	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	6+; 5:-		
RST-GND-PLC1	RSTGND: LISN-PLC1	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	10:GND; 22:DSL_RESET		
RST-GND-PLC2	RSTGND: LISN-PLC2	Amphenol	SIM2D40K; X1	Male	10:GND; 22:DSL_RESET		
PLC-1	PLC: LISN1-MIL14(1)	MIL-14S-7S	MS3101A14S-7S	Male	C:PLC+; B:Neutral; A:PLC-		
PLC-2	PLC: MIL14(1)-PLC1,MIL16	Amphenol \MIL-16-10S	SIM2D40K; X2 \MS3101A16-10S	Female \Male	1:PLC-; 2:PLC+; 7:Neutral \C:PLC+; B:Neutral; A:PLC-		
PLC-3 (Testkabel)	PLC: MIL16-MIL14(2)	MIL-14S-7S	MS3101A14S-7S	Male	C:PLC+; B:Neutral; A:PLC-		
PLC-4	PLC: MIL14(2)-PLC2, LAST	Amphenol \	SIM2D40K; X2 \	Female \	1:PLC-; 2:PLC+; 7:Neutral \		

Tabelle A.4: Testplan für den DC Aufbau mit Doppelschirm

Testplan:

Doppelter Schirm DC:

Leermessung:

	Probe:	Ausrichtung:	Check:
Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal	
	Hornantenne	Vertikal	
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal	
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal	
	Bikonische Antenne	Horizontal	
	Bikonische Antenne	Vertikal	
Leitungsgebunden:	F-57	Power (an PLC-3)	

EMV:

	Probe:	Ausrichtung:	Check:
Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal	
	Hornantenne	Vertikal	
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal	
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal	
	Bikonische Antenne	Horizontal	
	Bikonische Antenne	Vertikal	
Leitungsgebunden:	F-57	Power (an PLC-3)	

EMS Gestrahlt:

CAT-T (5-V/m):

	Probe:	Ausrichtung:	Check:	Effekt:
Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal		
	Hornantenne	Vertikal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Horizontal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Vertikal		

10-V/m:

	Probe:	Ausrichtung:	Check:	Effekt:
Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal		
	Hornantenne	Vertikal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Horizontal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Vertikal		

CAT-B:

	Probe:	Ausrichtung:	Check:	Effekt:
--	--------	--------------	--------	---------

Testplan:

Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal		
	Hornantenne	Vertikal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Horizontal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Vertikal		

CAT-D:

	Probe:	Ausrichtung:	Check:	Effekt:
Gestrahlt:	Hornantenne	Horizontal		
	Hornantenne	Vertikal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Horizontal		
	Logarithmisch-Periodische Antenne	Vertikal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Horizontal		
	Bikonische Antenne (auf Tripod)	Vertikal		

EMS Leitungsgebunden:

CAT-S

	Probe:	Check:	Effekt:
Leitungsgebunden	F-120-8F; F-57		

CAT-T

	Probe:	Check:	Effekt:
Leitungsgebunden	F-120-8F; F-57		

CAT-R

	Probe:	Check:	Effekt:
Leitungsgebunden	F-120-8F; F-57		

A.3 Integration in den WISDOM Demonstrator

Das Projekt WISDOM sieht in seiner Projektbeschreibung eine Demonstration von innovativen Technologien für die Luftfahrt vor [36]. Aufgrund der erwarteten Vorteile, welche durch die Verwendung von PLC-Modems erhofft wird, sowie der erfolgreichen Umsetzung dieser Technologie für die Verwendung in sicherheitskritischen Systemen, soll die PLC im Demonstrator des Projekts möglichst realitätsnah zum Einbau in Luftfahrzeuge integriert werden. Folgendes Kapitel befasst sich mit den hierfür notwendigen Vorbereitungsschritten und zeigt zugleich wichtige Aspekte, welche bei der Integration berücksichtigt werden sollen, auf.

A.3.1 Aufbau des Demonstrators

Zur Sicherstellung einer angemessenen Integration der PLC-Modems ist der Aufbau des WISDOM Demonstrators zu betrachten, der zum aktuellen Stand des Projekts vorgesehen ist. Um die Komplexität gering zu halten, wurden in Abbildung A.4 die wesentlichen Elemente mit für die PLC geeigneten Schnittstellen dargestellt.

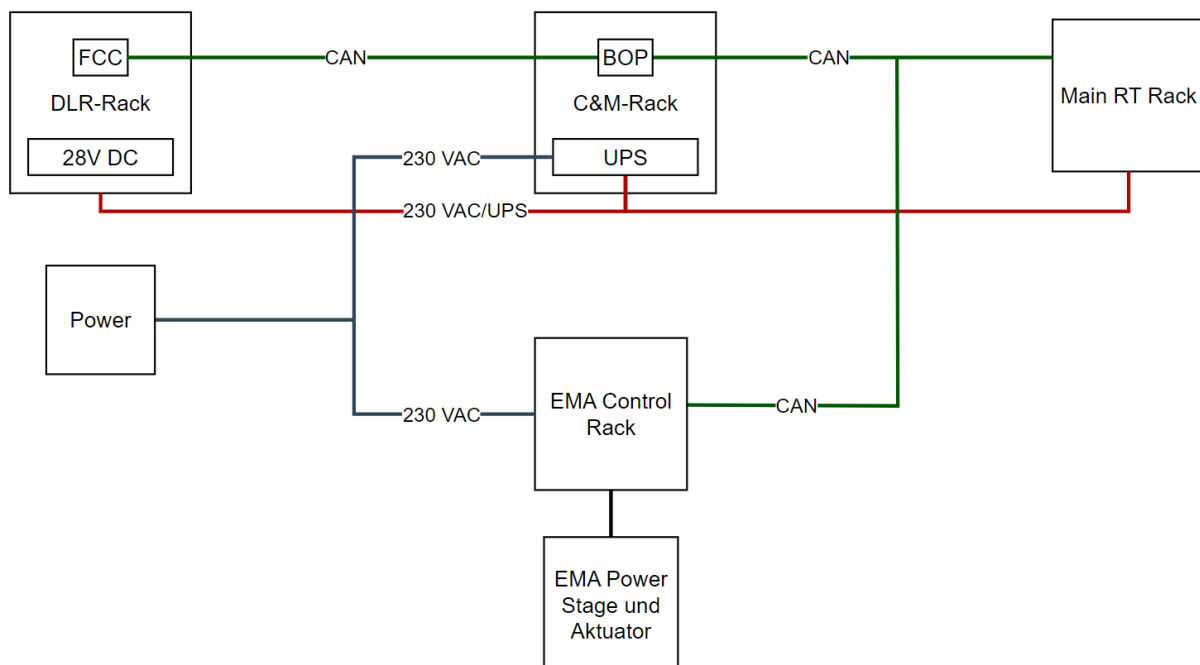


Abbildung A.4: Aufbau des Wing Integrated Systems Demonstration On Mechatronic Rig Demonstrators

Aus Abbildung A.4 ist zu entnehmen, dass der Demonstrator aus fünf zentralen für diesen Anwendungsfall relevanten Komponenten besteht.

Eine Komponente ist das DLR-Avionik Rack, in Abbildung A.4 als DLR-Rack gekennzeichnet, welches unter anderem den Flight Control Computer (FCC) und eine DC Spannungsversorgung umfasst. Der FCC ist mittels einer CAN Leitung mit einem Break-Out-Panel (BOP) im Control und Monitor (C und M) Rack verbunden. Über das BOP läuft eine weitere CAN-Leitung zum Main Real Time (RT) Simulations Rack.

Zwischen den drei Racks aus Abbildung A.4 läuft eine 230 V AC Leitung, welche von einer Uninterruptible Power Supply (UPS) im C und M Rack gespeist wird. Die UPS wird mit 230 V AC von dem Power Rack betrieben.

Im unteren Teil von Abbildung A.4 ist das EMA Control Rack. Dieses wird mit 230 V AC vom Power Rack gespeist und besitzt eine CAN-Leitung zum BOP des C und M Rack. Das EMA Rack ist für den Betrieb der Aktuatoren zuständig.

A.3.2 Randbedingungen der PLC-Modems

Nach der Darlegung der grundlegenden Struktur des Demonstrators sollen im Folgenden die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Integration der PLC-Modems in den Demonstrator festgehalten werden.

Eingehende Signale in die PLC-Modems werden über eine CAN-Leitung empfangen. Innerhalb der Modems werden die Signale galvanisch auf eine Powerleitung eingekoppelt. Das Modem auf Empfängerseite kann das Signal demodulieren und wieder als CAN-Nachricht ausgeben.

Die Übertragungsgeschwindigkeit der CAN-Nachrichten kann bis zu 1 Mbit/s betragen und ist mittels eines Mini-PC konfigurierbar [58].

Die Modems können Spannungen von 0 bis 230 V AC und 0 bis 540 V DC nutzen, um Signale mit der Powerleitung zu übertragen. Strom ist bei den PLC-Modems keine dimensionierende Größe, muss allerdings trotzdem für die Auslegung der Leitungen berücksichtigt werden. [58]

Zusätzlich benötigen die PLC-Modems eine DC Spannungsversorgung mit einer Spannung in einem Bereich von 9 bis 38 V [58].

Die Modems besitzen ein gefrästes Aluminiumgehäuse. Die EMV-Messungen dieser Arbeit haben einen Zusammenhang zwischen den gemessenen leitungsgebundenen Emissionen und der Anbindung der Aluminiumgehäuse ergeben. Daher ist eine feste Anbindung des Gehäuses an ein geerdetes Strukturelement des Demonstrators stark empfohlen. Das Gehäuse ist 10.9 cm lang, 7.8 cm breit und 4.3 cm m hoch [58].

A.3.3 Konzepte zur Integration der PLC-Modems

Aufgrund des vorgesehenen Demonstrationsfalls, wo die PLC als innovative Technologie für sicherheitskritische Flugsteuerungsanwendungen vorgesehen wird, übernehmen die Modems die CAN-Kommunikation zwischen dem FCC und einer funktionsrelevanten Komponente.

Wie bereits in Abbildung A.4 zu erkennen ist, gibt es zwei CAN-Leitungen ausgehend vom FCC, welche für diesen Demonstrationsfall sinnvoll sind.

Es handelt sich um die Leitungen vom FCC über das BOP im C und M Rack zum EMA Control Rack und die anfangs gleich verlaufende Verbindung von FCC zum Main RT Rack. Für beide Integrationsmöglichkeiten wurden Konzepte erstellt, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Abbildung A.5 zeigt das erste Konzept für die Integration der Modems zwischen dem FCC und dem EMA Control Rack.

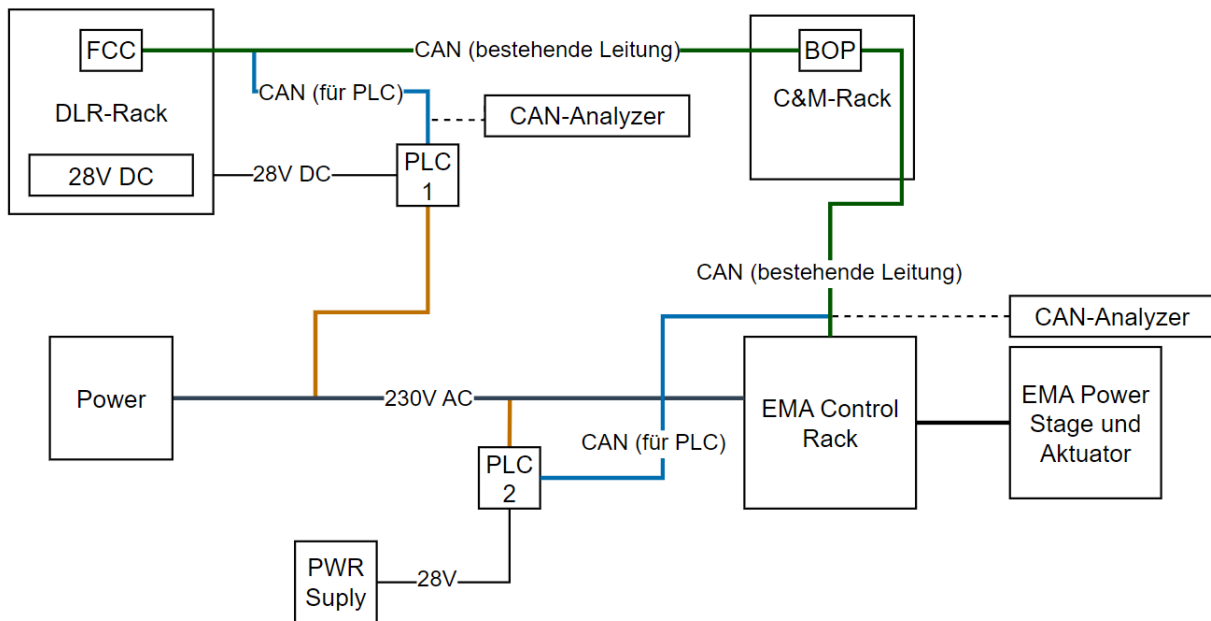


Abbildung A.5: Integrationskonzept der PLC-Modems zwischen Flight Control Computer und Electro-Mechanical Actuator Control Rack

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass die PLC-Modems ihre CAN-Nachrichten an derselben Quelle wie die bestehende CAN-Leitung entnehmen. Hierfür wird die bestehende CAN-Leitung für den Demonstrationsfall ausgesteckt und die PLC-Modems angesteckt.

Es ist notwendig, eine parallel existierende CAN-Leitung zu integrieren, da die Modems flexibel entnehmbar sein müssen, ohne dass damit die Funktionsweise des Demonstrators eingeschränkt wird.

Das PLC-Modem 1, wie es in Abbildung A.5 erkennbar ist, wird von einer 28 V DC-Spannungsquelle, welche für die Versorgung der FCC's notwendig ist, mit betrieben.

Als Powerleitung wird in diesem Aufbau die 230 V AC Versorgung des EMA Control Racks verwendet. Das PLC-Modem 1 koppelt die Signale auf Seiten des Power Racks ein und sendet diese über die Powerleitung an PLC-Modem 2. Das zweite Modem befindet sich in unmittelbarer Nähe des EMA Control Racks.

Auf Seite des EMA Control Racks wird ebenfalls die bestehende CAN-Leitung ausgesteckt und dafür das PLC-Modem 2 an die entsprechende Schnittstelle gehängt.

Die Spannungsversorgung vom PLC-Modem 2 wird mittels eines externen Geräts realisiert.

Auf beiden Seiten der PLC-Modems sind in Abbildung A.5 CAN-Analyzer zu erkennen. Eine Überlegung zur Überwachung der CAN-Signale wäre die Verwendung von Break out Boards auf beiden Seiten der Signalstrecke und CAN-Analysern. Dies ist allerdings optional und soll primär bei der Problemlösung unterstützen. Das bestehende Break Out Panel im C und M Rack kann hierfür nicht genutzt werden, aufgrund der gegebenen Positionierung der Modems.

Bei diesem Aufbau besteht die Problematik, dass eine Signalführung vom FCC zum EMA Control Rack mittels CAN nicht final beschlossen wurde und eine alternative Verbindung über eine RS485 Schnittstelle überlegt wird. Da die PLC-Modems dieses Protokoll nicht unterstützen, muss eine alternative Konfiguration in Erwägung gezogen werden.

Eine zweite Möglichkeit zur Integration der PLC-Modems in den Demonstrator wäre zur Bereitstellung der Kommunikation zwischen dem FCC und RT Rack. Abbildung A.6 zeigt ein Konzept für diese Integrationsmöglichkeit.

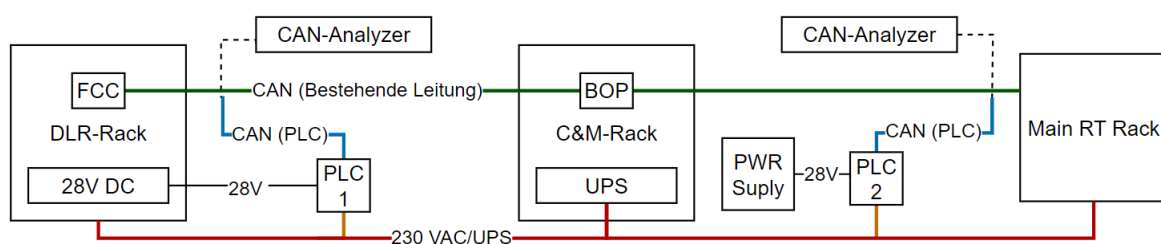


Abbildung A.6: Integrationskonzept der PLC-Modems zwischen Flight Control Computer und Real Time Rack

Aus Abbildung A.6 ist zu entnehmen, dass die PLC die CAN-Kommunikation zwischen FCC und Main RT Rack übernimmt. Hierbei werden die PLC-Modems ebenfalls an die

bestehenden CAN-Schnittstellen angeschlossen. Wie im vorherigen Aufbau besteht die Überlegung CAN-Analyzer an beiden Enden der PLC über ein Break Out Board anzuschließen.

Das PLC-Modem 1 aufseiten des DLR-Racks wird wie beim ersten Aufbau von der 28 V DC Spannungsversorgung des FCC mitgespeist. Beim PLC-Modem 2 am Main RT Rack wird die Spannungsversorgung mittels einer externen Spannungsquelle hergestellt.

Die Kommunikation findet über eine 230 V AC Powerleitung statt, welche von einer UPS im C und M Rack gespeist wird. Die Abbildung A.7 zeigt beispielhaft die eingezeichnete Verlaufsrichtung des Signals zum besseren Verständnis auf. Eine Bidirektionale Datenübertragung ist auch möglich, wurde allerdings aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

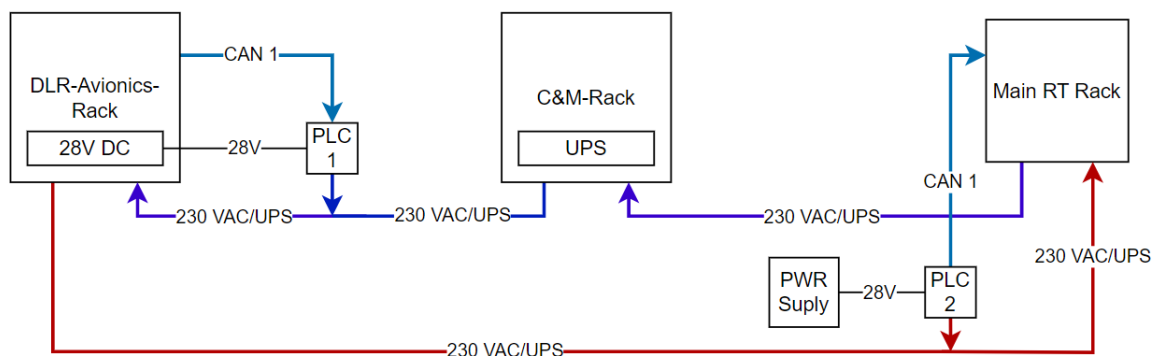


Abbildung A.7: Beispielhafter Signalverlauf des Aufbaus mit PLC-Modems zwischen FCC und RT Rack

Es wird sichtbar, dass zur Integration des PLC-Modems auf der Seite des DLR-Racks eine Anschlussmöglichkeit in der 230 V AC Leitung, ausgehend von der UPS, benötigt wird. Ein Vorschlag zum flexiblen Anhängen der Modems an die Powerleitung wäre die Verwendung von WAGO-Klemmen. Sie könnte in Reihe zur Leitung eingebaut werden und im Fall, wo die PLC-Modems nicht verwendet werden an der entsprechenden Steckverbindung frei bleiben. Ansonsten kann über ein Kabel, welches vom PLC-Modem ausgeht, eine Verbindung hergestellt werden. Die Signale würden über die Ver-

bindung vom DLR-Rack zum Main RT Rack gesendet werden. Auf der Seite des RT Rack kann das Modem nach demselben Prinzip angehängt werden.

Das zuletzt vorgestellte Konzept ist die präferierte Variante, da die CAN-Verbindung im Entwurf bereits final festgehalten wurde.

Eine genaue Platzierung der Modems und Dimensionierung der Kabellängen ist zum momentanen Projektstand bisher nicht möglich, da die strukturellen Elemente des Demonstrators nicht finalisiert sind. Somit fehlen noch notwendige Maße.

A.3.4 Schnittstellen

Für die Kommunikation des FCC über CAN sind am FCC zwei female Sub-D Steckverbindungen vorgesehen. Für die Kommunikation über CAN werden drei Leitungen mit CAN-High, CAN-Low und CAN-GND benötigt. Die Sub-D Stecker werden folgendermaßen belegt: Auf Pin 7 liegt CAN-High, auf Pin 2 CAN-Low und auf Pin 3 CAN-GND. [59] Bei den bisher genutzten Kabeln für die EMV Untersuchungen ist die Belegung identisch.