



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

Bachelorarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik Vertiefungsrichtung IT- und
Kommunikationsnetze**

**Thema: Untersuchung und Bewertung messtechnischer Rahmenbedin-
gungen für Messungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit
kontaktlos-induktiver Energieübertragungssysteme**

Eingereicht von: Janik Holland

**Angefertigt für: ifak Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
& EMC Test NRW GmbH**

Matrikel: E 2017

Ausgabetermin: 01.03.2022

Abgabetermin: 10.05.2022

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr Dr.-Ing. Sebastian Jeschke

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Janik Holland, versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus versichere ich, dass die Bachelorarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für andere Prüfung angefertigt wurde.

Magdeburg, den

(Janik Holland)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich beim ifak Institut für Automation und Kommunikation e.V. bedanken. Ohne dieses wäre die Bachelorarbeit in dieser Form nicht entstanden. Speziell an Herrn Hollenbach und an Herrn Hoppe richtet sich an dieser Stelle mein Dank.

Desweiteren gilt mein Dank Herrn Sebastian Jeschke, Herrn Michael Kleinen und Herrn Marcel Olbrich von der Firma EMC Test NRW GmbH für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und der hilfreichen Anregungen.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinem Arbeitgeber, der Bundesnetzagentur, bedanken, welche mich sowohl in der Ausbildungszeit als auch während meiner Studienzeit begleitet hat. Besonderer Dank geht bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit an Herrn Richard Rauwolf, der mir stets hilfreich zur Seite stand.

An dieser Stelle sei auch Dank an meinen Professor, Herrn Sebastian Hantscher, an der Hochschule Magdeburg Stendal ausgesprochen.

Zuletzt möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mich auf dem gesamten Studienweg begleitet und in jeglicher Weise unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1.	Induktive Übertragungstechnik.....	3
2.1.1.	Physikalische Grundlagen.....	3
2.1.2.	Spulentechnik.....	5
2.1.3.	Resonanzübertragung.....	6
2.1.4.	Leistungselektronik.....	7
2.1.5.	Existente Fahrzeugsysteme.....	8
2.2.	EMV-Messtechnik.....	9
2.2.1.	Nahfeld und Fernfeld.....	10
2.2.2.	Berechnung der magnetischen Summenfeldstärke	12
2.2.3.	Rahmenantennen.....	13
2.2.4.	Messempfänger.....	15
2.2.5.	Detektoren.....	16
2.2.6.	Messhallen	17
2.3.	Normen	18
2.3.1.	CISPR 11.....	18
2.3.2.	SAE J2954.....	19
2.3.3.	DIN EN IEC 61980	20
3.	Aufbau des Testsetups	21
3.1.	Leistungselektronik.....	21
3.2.	Kompensationsnetzwerk und Spulen.....	23
3.3.	Impedanznachbildung einer Hochvoltfahrzeugbatterie	24
3.4.	Übertragungsverhalten	26
4.	Messaufbau des Testsetups.....	28
4.1.	Messantennen	28
4.2.	Messempfänger	30
4.3.	Messaufbau Dortmund Absorberhalle.....	31
4.4.	Messaufbau Kolberg Absorberhalle	33
4.5.	Messaufbau Kolberg Freifeldmessplatz	34
5.	Messergebnisse	35
5.1.	Messergebnisse Dortmund Absorberhalle	35
5.1.1.	Aufnahmen des magnetisches Feldes.....	35
5.1.2.	Aufnahmen des elektrischen Feldes.....	39

5.1.3.	Strahlendiagramme des magnetischen Feldes	40
5.1.4.	Strahlendiagramme des elektrischen Feldes	46
5.2.	Messergebnisse Kolberg Absorberhalle	49
5.2.1.	Aufnahmen des magnetischen Feldes	49
5.2.2.	Aufnahmen des elektrischen Feldes.....	53
5.2.3.	Strahlendiagramme des magnetischen Feldes	54
5.3.	Messergebnisse Kolberg Freifeldmessplatz	58
6.	Vergleich der Messergebnisse	62
6.1.	Absorberhalle Dortmund Absorberhalle Kolberg	62
6.2.	Vergleich des Freifeldmessplatz Kolberg mit den Absorberhallen	71
6.3.	Wiederholungsmessungen in der Absorberhalle Dortmund.....	73
7.	Fazit.....	75
	Literaturverzeichnis	76
	Anhang	78
	Messdaten Absorberhalle Dortmund magnetisches Feld.....	78
	Messdaten Absorberhalle Kolberg magnetisches Feld	86
	Messdaten Freifeldmessplatz Kolberg magnetisches Feld	94
	Code zur Darstellung des magnetischen Feldes mit MATLAB	96
	Code zur Darstellung des elektrischen Feldes mit MATLAB.....	97
	Code zur Darstellung von Strahlendiagrammen.....	97

1. Einleitung

Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen ist eine Bundesoberbehörde, die dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unterstellt ist. Der Geschäftsbereich der Telekommunikation spielt hierbei eine große Rolle. Neben der Sicherstellung eines chancengleichen und funktionsfähigen Wettbewerbs für Marktteilnehmer wirkt die Bundesnetzagentur auch bei der Sicherstellung einer effizienten und störungsfreien Nutzung von Frequenzbändern mit. Dazu ist es notwendig, dass Fragen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von Geräten und Systemen geklärt werden. [1]

Bei Klärung dieser Fragen wirkt die Bundesnetzagentur aktiv bei der Normungsarbeit von Funk- und leitungsgebundenen Kommunikationsdiensten mit und ist entsprechend §13 Abs.2 Nr.6 vom Gesetzgeber damit beauftragt. Dies geschieht in breitem Rahmen und betrifft vor allem die Industriebranche. Hierbei geht es um die Bereiche Leistungselektronik, Unterhaltungselektronik und Hausgeräte aber auch um elektrische Kraftfahrzeuge und Bahnen.

Die Elektromobilität nimmt einen immer größer werdenden Stellenwert in unserem Straßenverkehr ein. Innerhalb der letzten drei Jahre (2019-2021) hat sich die Zulassungszahl von Elektrofahrzeugen in Deutschland verdreifacht [2]. Die Lademöglichkeiten von Elektrofahrzeugen spielen hierbei eine wichtige Rolle. Zur Steigerung der Attraktivität und der Vereinfachung des Ladevorgangs für den Verbraucher besteht die Möglichkeit des induktiven Ladens gegenüber dem konduktiven Ladens. Ähnlich wie bei Smartphones oder Zahnbürsten wird die Energie hier über ein Magnetfeld übertragen. Die Leistungen sind dabei um ein Vielfaches höher. Erste Testmodelle sind bereits auf den Straßen Deutschlands unterwegs. So hat beispielsweise BMW mit dem Fahrzeugmodell 530e in Zusammenarbeit mit der Brusa Elektronik AG einen ersten Versuch gestartet solche Modelle am Markt anzubieten [3].

In der Normung und Standardisierung müssen jedoch noch wichtige Schritte erfolgen. Daher kam es zu einer Zusammenarbeit des ifak Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg mit dem Unternehmen EMC Test NRW GmbH im Projekt EMPOWERED, welches durch das BMWK gefördert wird. Ein Ziel dieses Projektes soll es sein, ein einheitlich genormtes EMV-Messverfahren auf Basis verschiedener EMV-optimierter, produktrelevanter Ladesysteme zur Unterstützung der internationalen Normungsarbeit beizutragen [4].

Momentan gibt es Vorschläge verschiedener namhafter Organisationen, wie eine solche Norm aussehen soll. Jedoch unterscheiden sich dort die Ansichten sehr drastisch. So hat die ame-

rikanische Society of Automotive Engineers (SAE) bereits einen Vorschlag für eine Norm ausgegeben die sich mit unidirektionalem induktiven Laden beschäftigt (SAE J2954). Die darin angegebenen Grenzwerte fallen moderat aus und machen einen Einsatz von induktiven Ladestationen in den USA möglich. In Europa hingegen gibt es Einwände vom Deutschen Amateur-Radio-Club (DARC) und der European Broadcasting Union (EBU). Diese fordern Grenzwerte die unterhalb des messbaren Rauschens liegen. Dies betrifft insbesondere die Amateurfunkbänder von 2200 m bis 10 m und Radiosendeanlagen, der Lang- und Mittelwelle. Daher muss geklärt werden, inwieweit die Grenzwerte festgelegt werden können. Dies soll innerhalb Deutschlands in der DIN EN IEC 61980-3 erfolgen.

Wichtige Schritte innerhalb der Normung bestehen darin, reproduzierbare Messergebnisse in unterschiedlichen Messumgebungen zu erhalten. Es ist anzunehmen, dass aufgrund von Nahfeldbedingungen und Reflexionen an Wänden von Absorberhallen unterschiedliche Messergebnisse von gestrahlten Feldstärken auftreten können. Daher ist zu klären in welchem Größenumfang und inwieweit diese Effekte auf die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen Einwirkung haben. Dazu soll in dieser Arbeit die Grundlage gelegt werden, wie stark sich unterschiedliche Messumgebungen auf die gemessene magnetische Feldstärke auswirken. Zwei unterschiedliche Teilabsorberhallen und ein Freifeldmessplatz sollen dazu verglichen werden. Die Messungen werden mit einem Testsystem, das nicht auf elektromagnetische Verträglichkeit optimiert ist, betrieben um möglichst genaue Erfahrungen im niederfrequenten Bereich über Störaussendungen zu erhalten. Dazu wird der Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz betrachtet. Grundlage für die Messungen bildet der CDV CIS/B/737, indem bereits erste Schritte für die Messung und Aufstellung der Testobjekte gemacht wurden. So wird in diesem CDV beschrieben in welcher Entfernung und in welcher Höhe die Messantennen aufgestellt werden müssen. Ebenfalls beschrieben ist der Testaufbau des induktiven Ladesystems mit deren Komponenten und dessen Positionierung auf einem Drehteller in einer Absorberhalle.

2. Grundlagen und Stand der Technik

In folgendem Kapitel soll auf die Grundlagen eingegangen werden die für die Vergleichsmessungen notwendig sind. Dazu zählen zum einen der Stand der induktiven Ladetechnik, der Stand der aktuellen Messtechnik und der Stand der Normung zur aktuellen Zeit.

2.1. Induktive Übertragungstechnik

In diesem Abschnitt soll auf die Grundlagen und den Aufbau von induktiven Ladesystemen eingegangen werden. Dazu wird auf die verschiedenen Systembausteine und ihre Eigenschaften eingegangen.

2.1.1. Physikalische Grundlagen

Die induktive Leistungsübertragung beruht auf dem Prinzip eines Transformators. Transformatoren bestehen aus zwei oder mehreren miteinander über das magnetische Feld gekoppelten Spulen. Dies lässt sich durch folgende Matrixgleichung für zwei Spulen ausdrücken [5] :

$$\begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dabei ist M die Gegeninduktivität, welche die magnetische Verkopplung beider Spulen miteinander beschreibt. L_1 und L_2 beschreiben die Selbstinduktivitäten beider Spulen. Ψ_1 und Ψ_2 sind die verketteten Flüsse beider Spulen. Die Wirkung der Ströme auf die Klemmenspannungen laut dem Induktionsgesetz bildet sich aus der zeitlichen Ableitung des verketteten Flusses, welcher aus dem Produkt von Selbstinduktivitäten, Gegeninduktivitäten und der zeitlichen Ableitung des Stromes gebildet wird:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\Psi}_1 \\ \dot{\Psi}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Daraus resultiert das klemmenorientierte Ersatzschaltbild eines Transformators. Die Gegeninduktivitäten M_{21} und M_{12} sind gleich groß und sind zusammengefasst als Gegeninduktivität M .

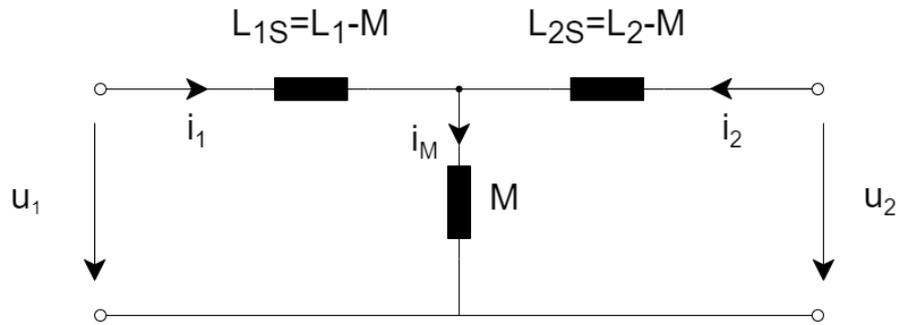


Abbildung 1 - Klemmenorientiertes Ersatzschaltbild eines Transformators

Die drei Werte aus Gegeninduktivität und Koppelinduktivitäten sind über den Koppelfaktor k miteinander verbunden.

$$k = \sqrt{\frac{M^2}{L_1 L_2}} \quad (3)$$

Der Koppelfaktor gilt als Maß für die Qualität eines Transformators. Sehr gute Transformatoren streben einen Koppelfaktor von 1 an, um Übertragungsverluste zu minimieren. Spulen deren Felder sich überhaupt nicht beeinflussen haben hingegen einen Koppelfaktor von 0.

Äquivalent dazu kann Formel (2) auch über die magnetischen Parameter dargestellt werden.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\Phi}_1 \\ \dot{\Phi}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{1S} + G_M & G_M \\ G_M & G_{2S} + G_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\Theta}_1 \\ \dot{\Theta}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Diese Formel kann aufgrund der Proportionalität zwischen dem magnetischen Leitwert G , dem magnetischen Fluss Φ und der magnetischen Durchflutung Θ aufgestellt werden. Diese Formel gilt nur für eine Spule mit der Windungszahl 1. Die Spannung einer einzigen Windung ist hierbei mit v beschrieben.

$$\Phi = G \cdot \Theta \quad (5)$$

Daraus lässt sich nun die Formel für die Leistungsübertragung von induktiven Ladesystemen ableiten:

$$P = \omega \cdot M \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (6)$$

In dieser Formel ist klar erkennbar, dass auf die übertragene Leistung drei Parameter Einfluss haben. Dies sind zum einen die Frequenz mit der Leistung übertragen wird. Je höher die Frequenz ist, desto mehr Leistung kann übertragen werden. Ein anderer Faktor ist die Gegeninduktivität, also die Kopplung beider Spulen. Den dritten Parameter bilden primärer Stromfluss und sekundärer Stromfluss.

2.1.2. Spulentechnik

Für die optimale Energieübertragung ist es notwendig, Spulengeometrien zu nutzen, die möglichst gute Koppelfaktoren aufweisen. Bei kleineren Leistungen haben sich zirkuläre Spulendesigns durchgesetzt. Durch Simulationen bei höheren Luftspalten wurde aber festgestellt, dass zirkuläre Spulenanordnungen nicht sonderlich gut für diese Art der Energieübertragung geeignet sind, da die Kopplung mit dem Abstand überproportional abnimmt. Daher ist es notwendig andere Spulendesigns zu nutzen. Zwei weitere Typen die besser für die Energieübertragung bei erhöhten Luftspalten geeignet sind, sind die Doppelflach-Spulen und die Solenoid-Spulen. Ein Vorteil dieser Spulentypen ist, dass diese Spulentypen untereinander kompatibel sind und somit auch zur Interoperabilität von induktiven Ladesystemen beitragen.

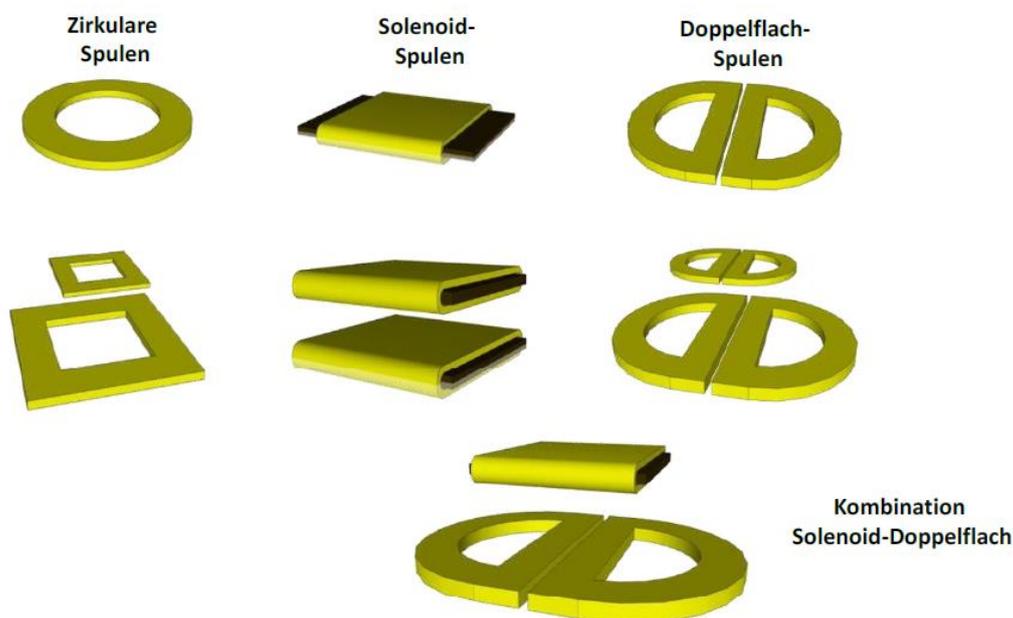


Abbildung 2 – Spulentypen Quelle: [6]

Ein wichtiger Aspekt, der betrachtet werden muss, ist die Größe der Fahrzeugspule. Kleine Feldplatten werden vor allem von Fahrzeugherstellern bevorzugt, da sie weniger Platz und Gewicht einnehmen und die Materialkosten deutlich geringer sind. Auf der anderen Seite ist eine deutlich leistungsfähigere Energieübertragung mit größeren Feldplatten möglich. Größere Feldplatten erzeugen jedoch ebenfalls einen größeren Streufluss innerhalb der Fahrzeugkarosserie. Daher muss ein Kompromiss zwischen diesen Anforderungen gefunden werden.

2.1.3. Resonanzübertragung

Um ein effektives induktives Energieübertragungssystem zu erstellen, ist es notwendig einen resonanten Transformator zu bauen. Ziel einer resonanten Beschaltung ist es, die durch Streuinduktivitäten entstehenden, hohen Blindströme zu kompensieren und möglichst reine Wirkleistung zu übertragen (Abbildung 3). Dafür ist eine kapazitive Kompensation der induktiven Blindströme notwendig. Für die Blindleistungskompensation bestehen unterschiedliche Resonanztopologien.

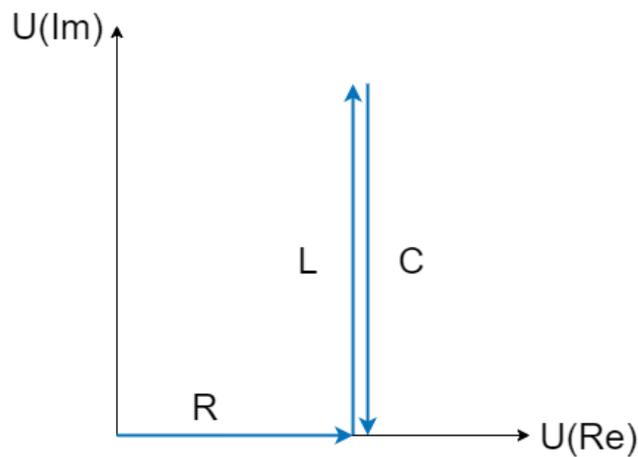


Abbildung 3 - Kompensation der Streuinduktivitäten

Zum einen existiert die Serien-Parallel-Resonanz. Bei dieser Anordnung wird die Blindleistung der Sekundärinduktivität vollständig durch einen parallelgeschalteten Kondensator aufgebracht. Auf der Primärseite wird die Blindleistung aus einem in Reihe geschaltetem Kondensator aufgebracht.

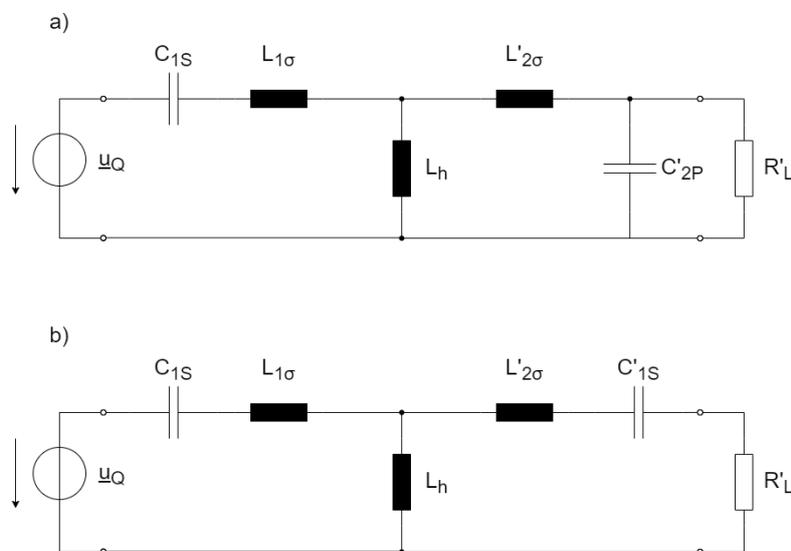


Abbildung 4 - Resonanztopologien a) Serie-Parallel b) Serie-Serie

2.1.4. Leistungselektronik

Im Blockschaltbild aus Abb. 5 ist der prinzipielle Aufbau eines induktiven Ladesystems beschrieben. Versorgt wird das System vom öffentlichen Wechselstromnetz mit einer Wechselspannung mit der Frequenz von 50 Hz. Nachfolgend wird eine Leistungsfaktorkorrektur (engl.: Power Factor Correction, Abk. PFC) für das System genutzt, um möglichst wenig Blindleistung zu übertragen. Die Spannung wird dann mithilfe eines Gleichrichters gleichgerichtet und über einen Zwischenkreiskondensator geglättet, um eine konstante Gleichspannung zu erhalten. Mithilfe einer H-Brücke wird dann die Spannung wieder in eine Rechteckspannung gewandelt, die in einem Frequenzbereich von 79 kHz bis 90 kHz liegt. Dieser Frequenzbereich gilt für hierbei nur für Personenkraftwagen. Dort findet die induktive Leistungsübertragung über die resonanten Spulensysteme statt. Im Fahrzeug wird die Spannung dann wieder gleichgerichtet und an die Last im Fahrzeug, die Batterie, angeschlossen.

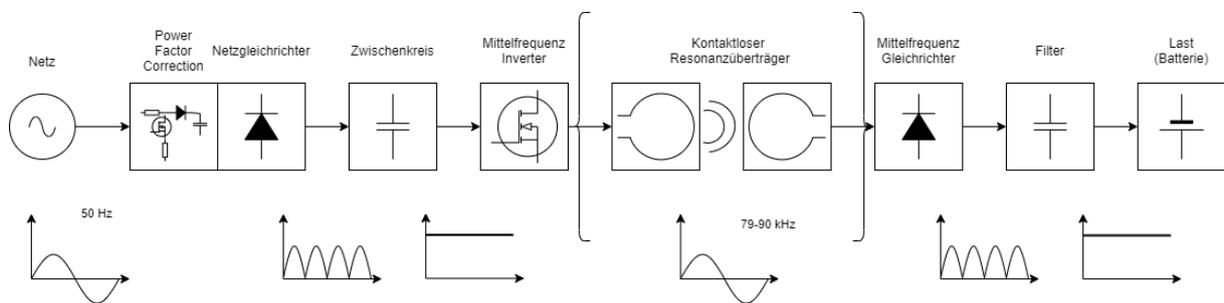


Abbildung 5 - Blockschaltbild eines induktiven Ladesystems

2.1.5. Existente Fahrzeugsysteme

Es existieren zum jetzigen Zeitpunkt schon etliche Modelle, jedoch ist, wie eingangs erwähnt, die Normung noch nicht so weit fortgeschritten, dass diese marktreif sind. Im Projekt INTEROP [7] sind beispielweise einige Testmodelle entstanden. So wurde ein Peugeot iOn von der Firma SEW mit einem solchen Ladesystem ausgestattet. Weitere Modelle, die mit induktiven Ladesystem ausgestattet wurden, sind ein Opel Corsa und ein Streetscooter. Der Opel Corsa ist ein Umbau der Firma German E-Cars. Diese wurden jeweils von den Firmen Vahle, IPT und SEW mit einem Ladesystem ausgestattet. Der Streetscooter wurde in Zusammenarbeit des ifak und der EAI GmbH mit einem Ladesystem versehen. Alle genannten Systeme arbeiten auf einer Frequenz von 140 kHz und besitzen unterschiedliche Spulentypen. Die Übertragungsleistung wurde auf 3,3 kW festgelegt.

Ein weiterer Anbieter induktiver Ladesysteme ist Wiferion. Dieses Unternehmen bietet bereits unterschiedliche Ladesysteme an. Eines mit 3 kW Ladeleistung und ein anderes mit 12 kW Ladeleistung.

Zudem bestehen bereits Fahrzeugsysteme, die bidirektionales Laden ermöglichen. Das bedeutet, dass der Leistungsfluss auch aus der Batterie in das öffentliche Stromnetz stattfinden kann. Die Batterien sollen hierbei als zusätzlicher Speicher für das öffentliche Stromnetz genutzt werden um mögliche Lastspitzen des öffentlichen Stromnetzes abzufangen.

2.2. EMV-Messtechnik

In der Europäischen EMV-Richtlinie 2014/30/EU wird die elektromagnetische Verträglichkeit als „die Fähigkeit eines Apparates, einer Anlage oder eines Systems, in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für alle in dieser Umwelt vorhandenen Apparate, Anlagen oder Systeme unannehmbar wären“ beschrieben. Daraus leiten sich bestimmte Spezifikationen ab. Geräte dürfen keine unzulässigen Störaussendungen produzieren, die andere Geräte in ihrem Betrieb stören könnten. Gleichzeitig müssen diese Geräte so aufgebaut sein, dass sie eine gewisse Störfestigkeit gegenüber äußeren Störungen haben. Gesetzliche Grenzwerte sind für Störfestigkeit und Störaussendungen in europäischen Normen (EN550xx; EN61000) festgelegt. Diese Normen beschreiben unter anderem den Messplatz, die Messutensilien und den Messaufbau.

Geräte werden in unterschiedliche Arten kategorisiert, nach denen entschieden wird, wie das Gerät zu prüfen ist. Bei einer solchen Überprüfung wird mit Hilfe von Antennen festgestellt wie hoch die abgegebene gestrahlte Leistung eines solchen Gerätes ist. In vielen Fällen ist jedoch nicht die Leistung ausschlaggebendes Argument sondern die Feldstärken. Damit sind die elektrische Feldstärke und die magnetische Feldstärke gemeint.

2.2.1. Nahfeld und Fernfeld

Um ein strahlendes System bilden sich Raumgebiete aus in denen unterschiedliche Bedingungen vorherrschen. Der Raum lässt sich in drei unterschiedliche Regionen unterteilen. Im direkten Bereich unmittelbar direkt an der Antenne befindet sich das Nahfeld. Darauf folgt das Übergangsfeld, auch Fresnel-Region genannt und anschließend bildet sich das Fernfeld aus. Die Grenzen der einzelnen Regionen sind nicht einheitlich festgelegt, hängen aber von der Wellenlänge und der abstrahlenden Struktur ab. Die Raumgebiete werden wie folgt angegeben und in Abb. 6 dargestellt. Laut Bundesnetzagentur können die Bereiche jedoch nach folgenden Bereichen eingeteilt werden [8].

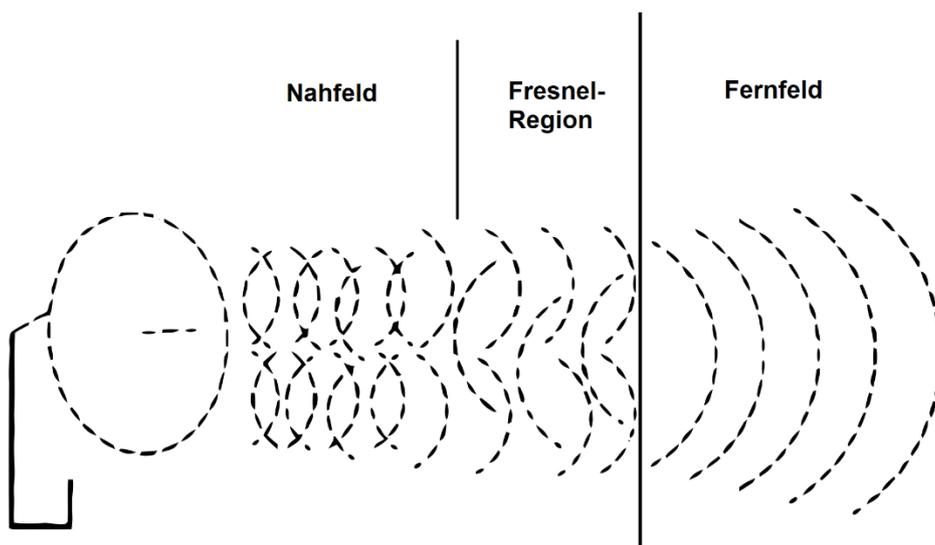


Abbildung 6 – Nahfeld und Fernfeld [9]

Reaktives Nahfeld:

$$r < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (7)$$

Fresnel-Zone:

$$r > \frac{\lambda}{2\pi} \text{ bis } r < 4\lambda \quad (8)$$

Fernfeld:

$$r > 4\lambda \quad (9)$$

Im reaktiven Nahfeld besteht keine Beziehung zwischen der magnetischen und elektrischen Feldstärke. Die Felder besitzen nicht die Eigenschaften einer ebenen Welle und können von Punkt zu Punkt schwanken. Für die Betrachtung müssen daher elektrische Feldstärke und magnetische Feldstärke separat in Betracht gezogen werden. Durch schwankende Feldstärken verändert sich ebenfalls der Feldwellenwiderstand Z_0 und beträgt nicht an jedem Punkt 377Ω .

Die Fresnel-Zone oder strahlendes Nahfeld ist eine Übergangszone zwischen reaktivem Nahfeld und Fernfeld. In diesem Übergangsbereich nähern sich die Verhältnisse dem Fernfeld an. Der Feldwellenwiderstand bleibt aber weiterhin ortsabhängig.

Im Fernfeld sind magnetische und elektrische Feldkomponente in Phase zueinander und stehen senkrecht aufeinander zur Ausbreitungsrichtung. Sie sind durch den Feldwellenwiderstand Z_0 im Vakuum und näherungsweise auch in der Luft miteinander verknüpft.

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (10)$$

Im reaktiven Nahfeld nehmen die reaktiven Komponenten schnell mit dem Abstand zur Quelle ab. Das elektrische Feld nimmt mit $1/r^2$ und das magnetische Feld mit $1/r^3$ ab [10]. Im Fernfeld hingegen nehmen die elektrische und magnetische Feldstärke mit $1/r$ ab und können auch nicht mehr unabhängig voneinander betrachtet werden.

2.2.2. Berechnung der magnetischen Summenfeldstärke

Zur Berechnung der magnetischen Summenfeldstärke ist es notwendig die Feldstärken aller drei Polarisationssebenen aufzunehmen. Die Feldstärken liegen dann in der logarithmischen Form vor. Um diese in das magnetische Summenfeld umzurechnen benötigt man jedoch lineare Werte. Die linearen Werte erhält man nach Umrechnung wie in der Formel 11 gezeigt. Für die anderen Achsen gilt die gleiche Formel.

$$H[\text{lin}] = 10^{\frac{H[\text{dB}]}{20}} \quad (11)$$

Die Summenfeldstärke erschließt sich aus der quadratischen Addition aller drei Feldstärken und anschließender Radizierung in linearer Form wie in Formel 14 gezeigt.

$$|H|[\text{lin}] = \sqrt{(H_X)^2 + (H_Y)^2 + (H_Z)^2} \quad (12)$$

Um diese dann wieder in ein logarithmisches Maß umzuwandeln wird die Formel 15 genutzt. Das resultierende Ergebnis ist folglich die Summenfeldstärke in logarithmischem Maß.

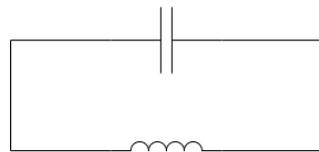
$$|H|[\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10}(H[\text{lin}]) \quad (13)$$

2.2.3. Rahmenantennen



Abbildung 7 - Loopantenne HFH2-Z2E der Firma Rohde & Schwarz

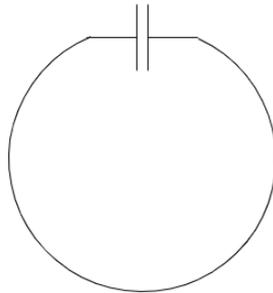
Magnetische Rahmenantennen sind Antennen, bei denen der Umfang klein gegenüber der Wellenlänge ist. Klein bedeutet in diesem Fall, dass der Umfang weniger als $\frac{\lambda}{4}$, einem Viertel der Wellenlänge, beträgt. Magnetische Rahmenantennen sprechen stärker auf die magnetische Feldkomponente an. Dies beruht auf der Bauart der Rahmenantenne. Eine elektrische Rahmenabschirmung (Rohr) ist um die Antenne angebracht. Dieses Rohr ist an einer Stelle unterbrochen, damit dieses nicht als Kurzschlusswindung wirkt. Diese aktiven Sonden messen daher den Kurzschlussstrom des Rahmens. [11] Sie beruhen auf dem Prinzip eines Parallelschwingkreises. Jedoch werden die Kondensatorplatten bei magnetischen Ringantennen in dieser Position belassen. Lediglich die Spule wird in einen Ring geformt. Man nennt diese Ringantennen dann auch Fitzgeraldscher Dipol. Im Gegensatz dazu werden beim Hertzschen Dipol die Kondensatorplatten auseinandergezogen. Dieses Prinzip ist in Abbildung 8 nochmals dargestellt.



a) geschlossener Schwingkreis ohne
nennenswertes Nahfeld



b) offener Schwingkreis mit
vorwiegend elektrischem Nahfeld



c) geschlossener Schwingkreis mit
vorwiegend magnetischem Nahfeld

Abbildung 8 - Schwingkreise mit Hertzschen Dipol und Fitzgeraldschem Dipol nach: [12]

Bei der in Abb. 7 dargestellten Rahmenantenne handelt es sich um eine aktive Rahmenantenne. Der passiven Rahmenantenne wurde ein Verstärker nachgeschaltet, welcher in das Gehäuse integriert ist. Durch den Einbau eines Verstärkers können passive Antennen deutlich verkürzt werden. Dies bedeutet eine deutliche Verringerung des aufgenommenen Rauschens im niederfrequenten Bereich. Das Rauschen wird nur noch durch das Rauschen des Verstärkers bestimmt, nicht durch das äußere Rauschen. [13]

2.2.4. Messempfänger

Die eingesetzten Messempfänger arbeiten nach dem Heterodyn-Prinzip. Dieses Prinzip ist in Abb. 9 dargestellt. Das bedeutet, dass mit Hilfe eines Mixers und eines Lokaloszillators das Eingangssignal auf eine konstante Zwischenfrequenz umgesetzt wird. Dazu muss der Lokaloszillator durchstimmbare sein. Die Auflösung, also die spektrale Breite, wird dann durch ein Zwischenfrequenz-Filter mit fester Mittenfrequenz bestimmt. Dieses Prinzip beruht auf dem nachfolgenden Additionstheorem. In den nachfolgenden Formeln beschreibt das Formelzeichen f_e die Eingangsfrequenz und f_{osz} die Oszillatorfrequenz.

$$x = 2\pi f_e t \quad (14)$$

$$y = 2\pi f_{osz} t \quad (15)$$

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} [\cos(x - y) + \cos(x + y)] \quad (16)$$

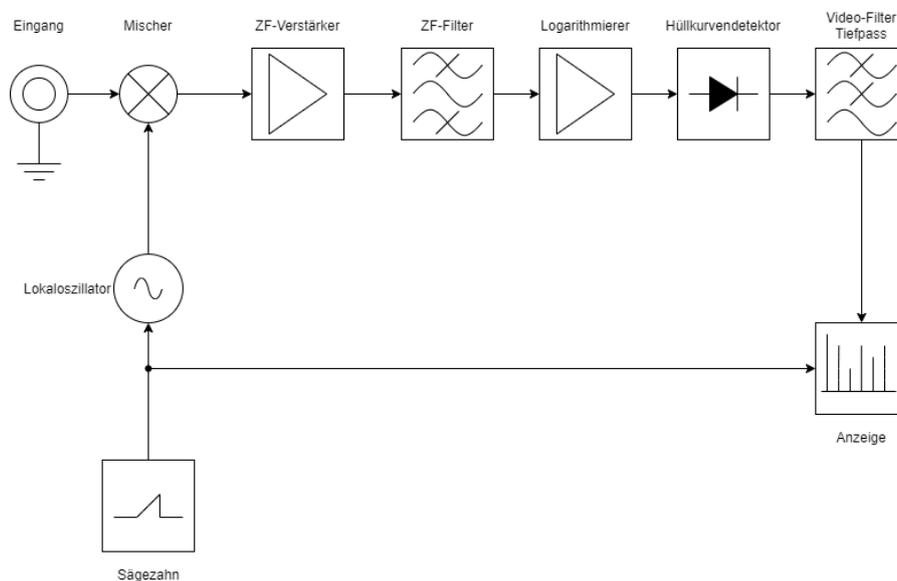


Abbildung 9 - Blockschaltbild eines Spektrumanalysators Quelle: nach [14]

Aus diesen Formeln 14 bis 16 erkennt man, dass aus der Multiplikation zweier Signale sowohl eine Summenfrequenz als auch eine Differenzfrequenz entstehen. Für das Zwischenfrequenzsignal wird die Differenzfrequenz genutzt, die Summenfrequenz wird durch das Zwischenfrequenzfilter herausgefiltert. Danach wird das Signal mit Hilfe eines Logarithmierverstärkers verstärkt und auf einen Hüllkurvendetektor gegeben. Anschließend wird dieses Signal mit einem Videofilter (Tiefpass) geglättet, von Rauschen befreit und angezeigt. Dieses Prinzip ist in Abbildung 9 dargestellt. [14]

2.2.5. Detektoren

Detektoren werden für die Bewertung des Amplitudenverlaufes genutzt. Sie können als analoge Schaltgruppe vor einem Analog-Digitalwandler aufgebaut werden oder als digitale Filter hinter einem Analog-Digitalwandler. Das Problem bei der Darstellung auf Bildschirmen ist, dass nur eine bestimmte Anzahl von Pixeln vorhanden ist, jedoch viel mehr reale Messwerte (Samples) existieren. Daher müssen die einzelnen Samples bewertet und dann dargestellt werden. Das heißt also, dass mehrere Samples einem Pixel zugeordnet sind. Je nachdem welchen Detektor man ausgewählt hat, wird ein anderer Wert dargestellt. So beispielsweise wird bei einem Min-Peak-Detektor der kleinste Wert dargestellt bei einem Max-Peak-Detektor hingegen der Größte. [15]

Für die Störpulsmessung wird ein anderer Detektor benötigt. Es wird der Quasi-Peak-Detektor genutzt. Dieser Detektor bewertet Signale aufgrund ihrer Pulswiederholungsrate. Somit werden kontinuierliche, schmalbandige Signale stärker bewertet als breitbandige gepulste Signale. In Abb. 10 ist dieses Prinzip verdeutlicht. Kontinuierliche Signale wie im oberen Teil der Abb. 10 werden deutlich stärker bewertet als diskontinuierliche Signale.

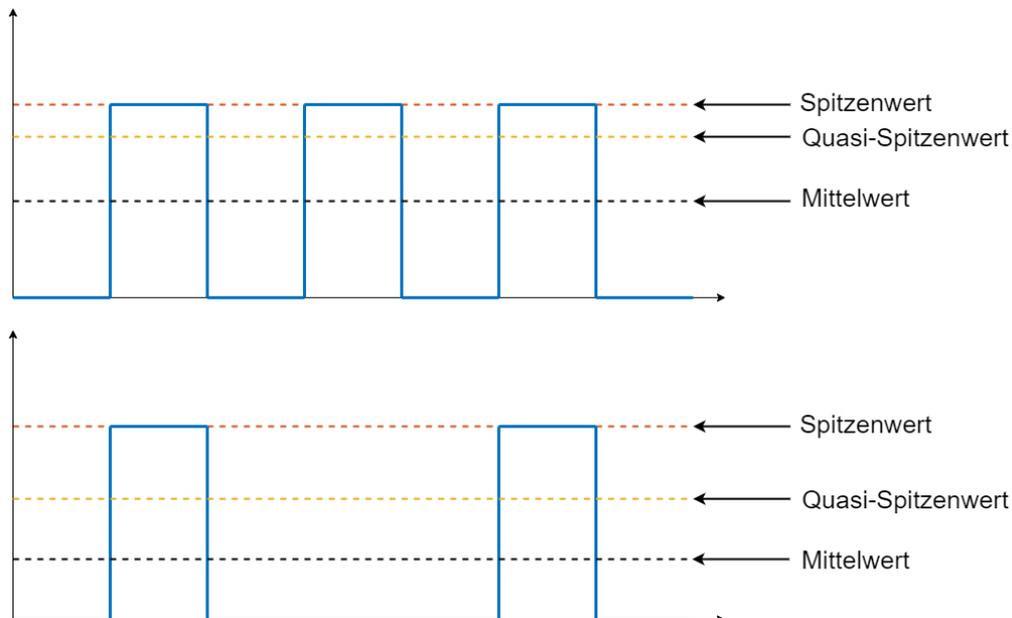


Abbildung 10 - Vergleich QP-Detektor, AVE-Detektor, PEAK-Detektor Quelle: nach [16]

2.2.6. Messhallen

Zur Messung von gestrahlten Störemissionen sind vor allem Absorberhallen im Einsatz. Der große Vorteil dieser Absorberhallen ist, dass diese Hallen komplett gegen äußere einfallende Strahlung geschirmt sind. Daher bieten Sie eine optimale Umgebung zur Messung der elektromagnetischen Strahlung. Die Wände solcher Hallen sind mit pyramidenförmigen Absorberelementen ausgestattet, zusätzlich können hinter diesen Absorbieren noch Ferritkacheln angebracht sein. Sowohl die Absorberelemente als auch die Ferritkacheln erhöhen die Dämpfung der Reflexionen an den Wänden. Ferritkacheln wirken vor allem im niederfrequenten Bereich.

Zu unterscheiden sind dabei zwei unterschiedliche Typen von Absorberhallen. Die Vollabsorberhallen sind vollumfänglich mit Absorbieren ausgestattet. Es treten dort also keine Reflexionen am Boden auf. Um realen Bedingungen jedoch näher zu kommen, ist es sinnvoll den Boden aus reflektierenden, also leitfähigen, Materialien herzustellen. In realen Anwendungsfällen von Geräten treten nämlich ebenfalls Reflexionen an der Erdoberfläche auf. Hallen in denen der Boden aus reflektierenden Materialien besteht werden als Teil-Absorberhallen bezeichnet.

Der größte Nachteil dieser Absorberhallen ist ihre räumliche Begrenzung. Dadurch werden Messungen im niederfrequenten Bereich erschwert, da die Wellenlängen mit sinkender Frequenz zunehmen. Der Nahfeldbereich wird somit immer größer, je geringer die Frequenz ist. Im Nahfeldbereich sind magnetisches Feld und elektrisches Feld nicht miteinander gekoppelt, was zu Fehlern bei den Messergebnissen führt. Diese Fehler bei den Messergebnissen sind auf starke Ortsabhängigkeiten der Feldstärken zurückzuführen. Die meisten Messhallen sind erst ab einer Frequenz von 30 MHz zugelassen. In niedrigeren Frequenzbereichen, kann es daher zu ungewollten Reflexionen an Decken und Wänden kommen.

Eine andere Methode zur Messung elektromagnetischer Feldstärken ist die Freifeldmessung. Dabei können diese Reflexionen an den Wänden nicht mehr auftreten. Jedoch wird auch sämtliche Strahlung von außerhalb wie Zeitzeichensender, Mobilfunk etc. aufgenommen.

2.3. Normen

2.3.1. CISPR 11

Die CISPR ist das Comité international spécial des perturbations radioélectriques. Die CISPR-Standards befassen sich mit normierten Emissionsmessungen für elektromagnetische Störungen. Sie beschreiben beispielsweise Kabellängen, Antennen, Schirmungsmaßnahmen und Aufstellungsorte, damit eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Viele CISPR-Normen sind in europäische Normen eingeflossen. Europäische Normen nach CISPR-Normen werden dabei mit EN 550xx abgekürzt.

Induktive Ladesysteme werden zu der CISPR 11 gezählt. Darin werden Sie in die Gruppe 2 Klasse B kategorisiert. Das bedeutet, dass es sich um Geräte handelt, die im ISM-Band arbeiten. Zu Gruppe 2 zählen beispielsweise ebenfalls Geräte, wie Mikrowellen, elektrische Schweißapparate oder induktive Heizsysteme mit Arbeitsfrequenzen über 9 kHz. Die Klasse gibt an, an welchen Orten diese Gerätschaften aufgestellt wurden. Klasse A Geräte sind definiert für Industriegebiete. Klasse B Geräte können auch in Wohngebieten eingesetzt werden.

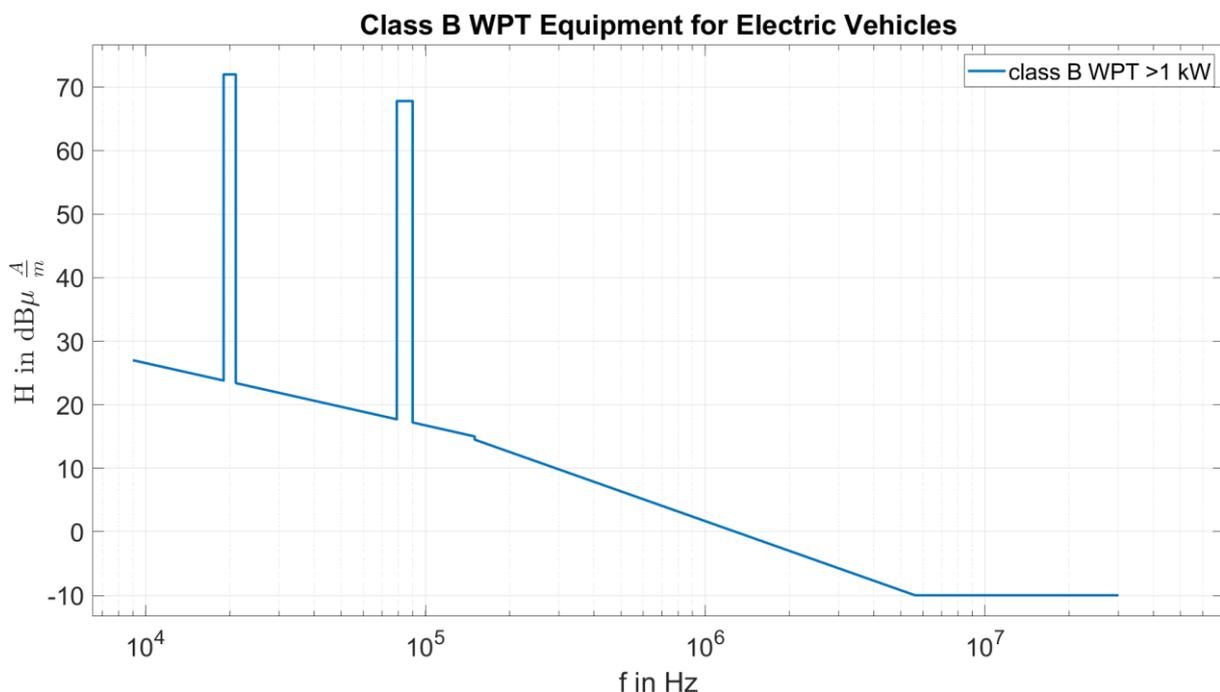


Abbildung 11 - Grenzwertvorschlag für WPT-Equipment

In Abbildung 11 ist der Grenzwertvorschlag dargestellt. Er reicht von 9 kHz bis 30 MHz. Man erkennt deutliche Kamme bei 19 kHz bis 21 kHz und 79 kHz bis 90 kHz. Diese Schächte sind für die Grundwellen der induktiven Ladesysteme vorgesehen. Wichtig ist außerdem, die in diesem Standard vorgeschriebenen Werte zur Entfernung der Messantenne einzuhalten. Diese beträgt für diese Grenzwerte 10 m.

2.3.2. SAE J2954

Die SAE, Society of Automotive Engineers, brachte am 02.12.2020 den Standard SAE J2954 heraus. In diesem Standard werden Spezifikationen zum Wireless Power Transfer festgelegt. WPT-Systeme werden in drei Kategorien eingeteilt, WPT1, WPT2 und WPT3. Diese Kategorien beziehen sich auf die Leistungsklassen der WPT-Systeme. WPT1 hat eine maximale Übertragungsleistung von 3,7 kW, WPT2 eine Übertragungsleistung von 7,7 kW und WPT3 von 11 kW. Auch werden Grenzwerte festgelegt die wesentlich höher sind als in dem Vorschlag der CISPR 11. In der nachfolgenden Abbildung 12 werden diese Grenzwerte dargestellt.

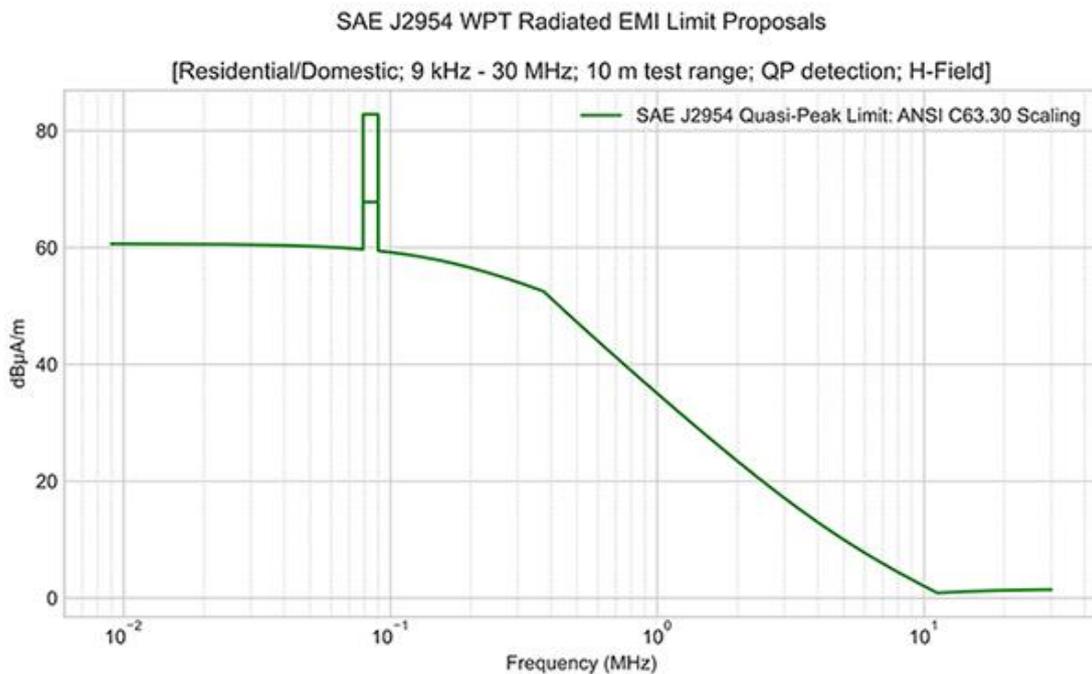


Abbildung 12 - Grenzwerte nach SAE J2954

Die Grenzwerte in der SAE J2954 werden deutlich lockerer gefasst als in der CISPR 11. So beträgt die magnetische Feldstärke in dem Kamin bei 79 kHz bis 90 kHz $82,8 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

2.3.3. DIN EN IEC 61980

Die DIN EN IEC 61980 ist die Deutsche Norm für kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge. Sie trat am 01.09.2021 in Kraft und ist eine angenommene Europäische Norm. Im Abschnitt DIN EN IEC 61980-1 wurden die Werte der CISPR-Norm größtenteils übernommen.

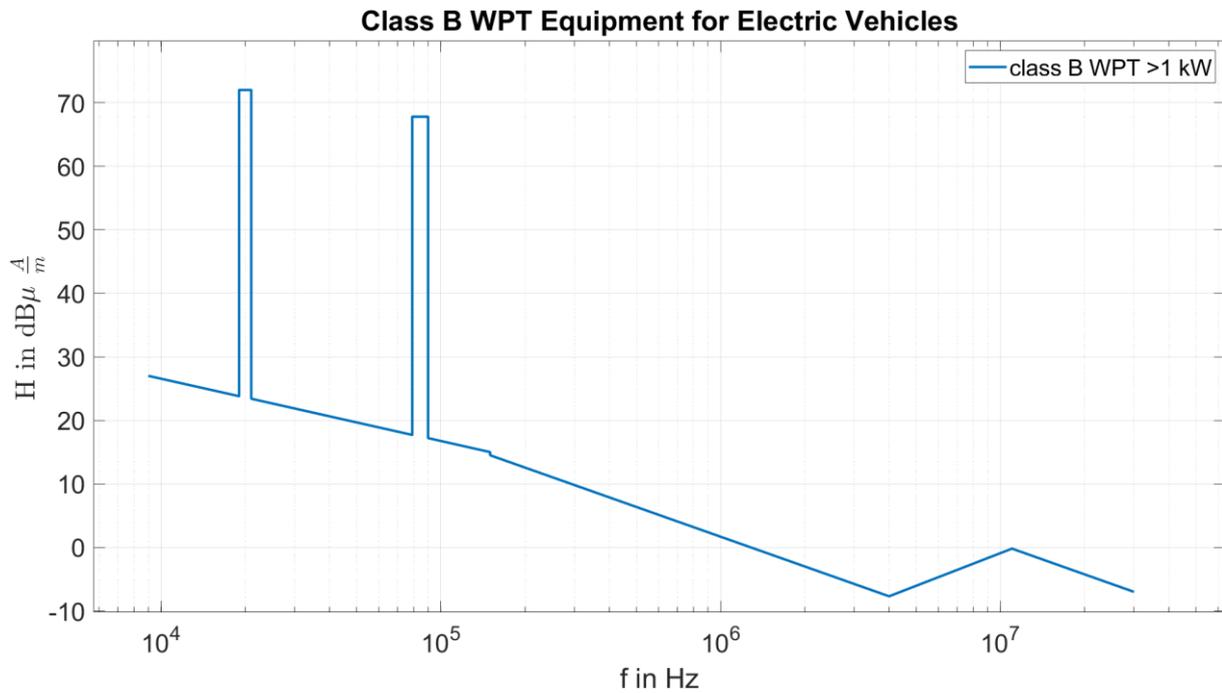


Abbildung 13 - Grenzwerte nach DIN EN IEC 61980-1

Im oberen Spektrum von 4 MHz bis 30 MHz befindet sich eine Anhebung des Grenzwertes.

3. Aufbau des Testsetups

Im folgenden Abschnitt soll auf den Aufbau des Testsetups eingegangen werden. Dies beinhaltet die Leistungselektronik, die Übertragungstechnik und die Batterieersatzlast.

3.1. Leistungselektronik

Für die Ansteuerung der Bodenspule eines WPT-Systems ist es notwendig eine fähige Leistungselektronik zu integrieren. Um einen möglichst realen Aufbau nachzustellen, wurde für eine Umwandlung der Netzwechselfspannung in eine Gleichspannung ein Netzteil des Typs SM1500-CP-30 der Firma Delta Elektronika genutzt. Dieses Netzteil ist in der Lage eine Gleichspannung bis zu 1500 V und einen Gleichstrom bis zu 30 A bereitzustellen. Die Maximalleistung des Netzteils beträgt 15 kW. Gleichzeitig ist es möglich gewisse Spannungs-, Strom- und Leistungswerte über eine Ethernetschnittstelle einzustellen. Für Testzwecke ist es daher bestens geeignet um einen reproduzierbaren Arbeitspunkt für das Testsetup einzustellen. Außerdem ist anzumerken, dass das Netzteil im betrachteten Frequenzbereich sehr geringe Störaussendungen aufweist und dadurch keine aufwendige Filterung nötig ist.

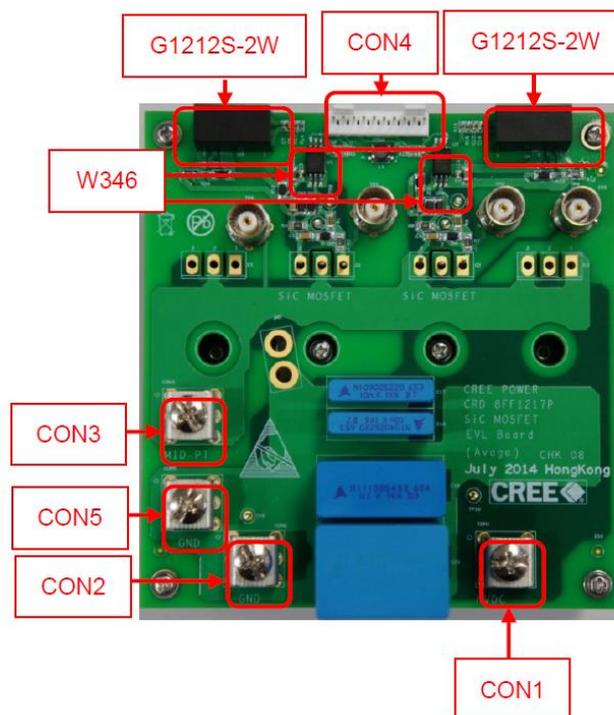


Abbildung 14 - Evaluation-Kit [17]

Die Gleichspannung wird mittels zweier KIT8020CRD8FF1217P-1 Evaluation Kits über eine H-Brücken Schaltung in eine rechteckförmige Spannung mit 85 kHz Frequenz gewandelt. Die auf diesem Evaluation Kit genutzten MOSFETs sind Siliziumkarbid N-Kanal MOSFETs. Durch

diese Siliziumkarbid MOSFETs ist es möglich große Ströme und große Spannungen sehr effizient und sehr schnell zu schalten. So beträgt die Ein- und Ausschaltverzögerung zusammen gerade einmal 34 ns. Der Drain-Source-Widerstand befindet sich laut Datenblatt ebenfalls auf sehr geringen Niveau von 80 mΩ. Diese MOSFETs eignen sich daher bestens für Schaltung größerer Leistungen mit einer hohen Frequenz. Gesteuert werden die MOSFETs über einen Microcontroller, der über eine Batterie extern mit Spannung gespeist wird. Der Microcontroller steuert die MOSFETs über den Port CON 4 an. Nachfolgend ist der Aufbau der H-Brücke mit den Ports der Evaluation Kits schematisch aufgezeichnet.

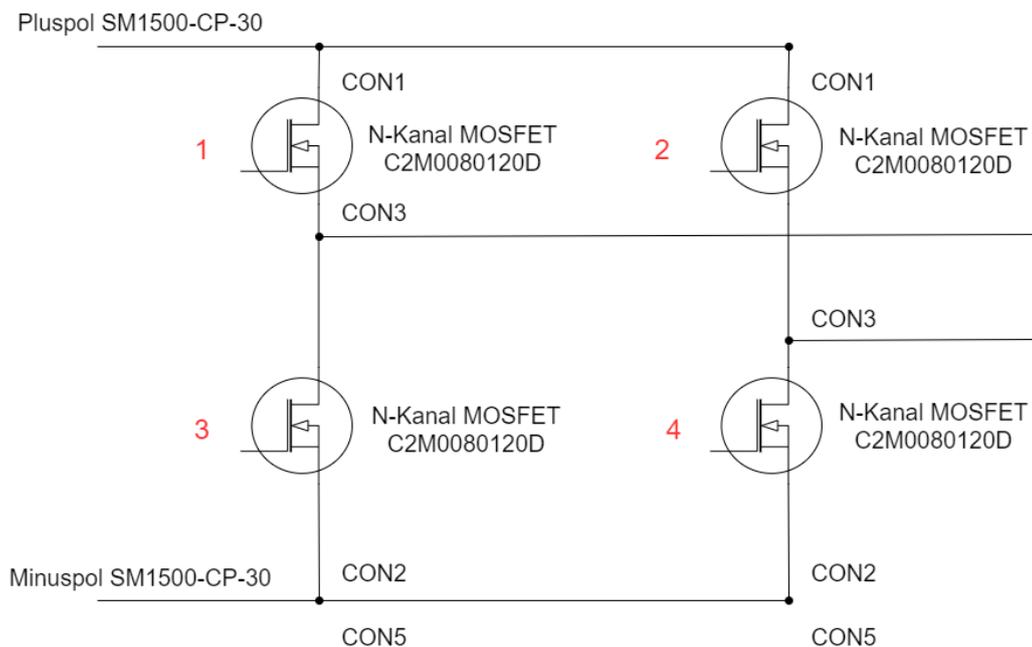


Abbildung 15 - H-Brückenschaltung der Evaluation Kits nach: [17]

In Abbildung 15 ist zu erkennen, dass die CON1 Ports des jeweiligen Evaluation Kits mit dem Pluspol der Spannungsversorgung verbunden sind. Die CON2 Ports der Evaluation Kits sind mit dem Minuspole der Spannungsversorgung verbunden. Beide Evaluation Kits sind direkt mit dem Gehäuse der Leistungselektronik über den CON5 Port verbunden. Um aus der Gleichspannung nun eine Wechselspannung zu generieren, werden MOSFET 1 und MOSFET 4 gleichzeitig angesteuert. Nach der Abschaltung von MOSFET 1 und MOSFET 4 werden MOSFET 2 und MOSFET 3 eingeschaltet. Dadurch entsteht an den eingezeichneten Punkten zwischen den MOSFETs eine rechteckige Wechselspannung mit einer Frequenz von 85 kHz. Diese rechteckförmige Spannung wird nachfolgend auf den Resonanzkreis aus Kondensatoren und Primärspule des WPT-Systems gegeben.

3.2. Kompensationsnetzwerk und Spulen

Die Spulen dieses Testsystems sind in zirkularer Geometrie ausgelegt. Sie bestehen aus einer 650 mm x 510 mm großen Primärspule und aus einer 320 mm x 320 mm Sekundärspule. Die Primärspule besteht aus 2 x 9 Windungen. Die Windungen wurden aus Kabellitzen hergestellt um den Einfluss des Skin-Effekts zu minimieren. Die Sekundärspule besteht aus 9 Windungen. Sowohl die Primärspule als auch die Sekundärspule sind in ausgefräste Acrylplatten eingelassen um eine Formstabilität zu gewährleisten. Auf der Rückseite der Spulen befinden sich Ferrite um eine magnetische Feldführung zu erzielen.

Zur Kompensation der Blindleistung und zur resonanten Übertragung der elektrischen Leistung ist es notwendig Kapazitäten einzufügen. Diese Kapazitäten wurden in serieller Kompensation zu den bestehenden Spulenpaaren eingesetzt. Der Resonanzkreis wird auf die Übertragungsfrequenz abgestimmt.

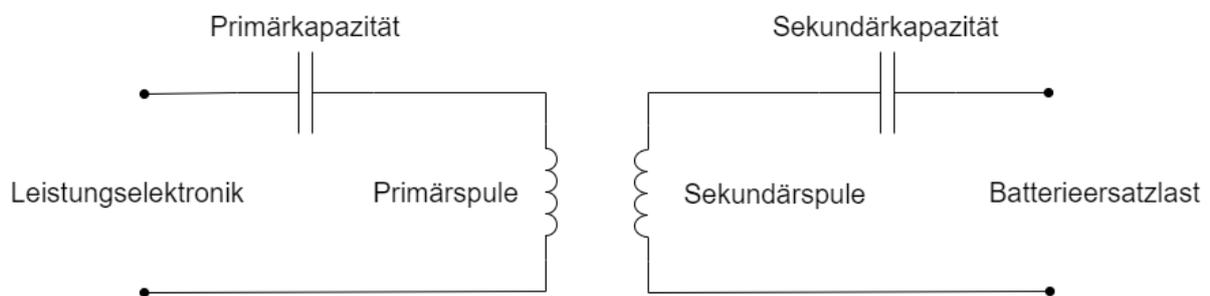


Abbildung 16 - Serielle Kompensation

3.3. Impedanznachbildung einer Hochvoltfahrzeugbatterie

Die Gleichrichtungseinheit besteht ebenfalls aus zwei KIT8020CRD8FF1217P-1 Evaluation Kits. Diese werden wie die H-Brücke geschaltet. Für die Gleichrichtung werden die Freilaufdioden des Evaluation Kits benutzt, die parallel zu den MOSFETs geschaltet sind. Die Anordnung der Dioden entspricht denen eines Brückengleichrichters, wie in Abbildung 17 zu sehen. Bei den Dioden handelt es sich um Schottky Dioden des Typs C4D20120D. Diese Dioden bestehen, wie schon die MOSFETs, aus Siliziumkarbid und können daher mit großen Leistungen umgehen. Laut Datenblatt können diese Dioden mit bis zu 33 A Strom in Flussrichtung beaufschlagt werden und besitzen eine Spitzensperrspannung von 1200 V.

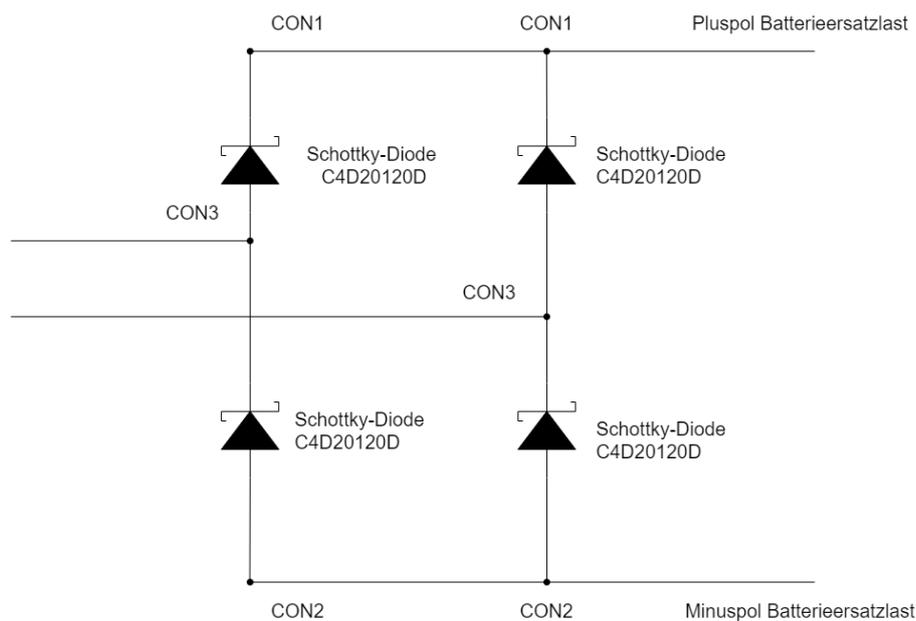


Abbildung 17 - Brückengleichrichter aus Evaluation Kits nach: [17]

Bei der Batterieersatzlast handelt es sich um ein Netzwerk aus passiven Bauelementen, das die Impedanz eines Akkumulators aus einem Hybridfahrzeug nachbildet. Diese Impedanznachbildung stellt mittels Spulen, Kondensatoren und Widerständen, die Gleich- und Gegenaktimpedanz eines Hochvoltakkumulators sehr präzise nach. Die Impedanzverläufe hierfür werden in Abbildung 18 nochmals dargestellt. Dadurch können reale Betriebsbedingungen zum Großteil imitiert werden. Der Batterieersatzlast sind Widerstände nachgeschaltet, die für die eingehende Gleichspannung als ohmsche Last fungieren und somit die Gleichspannung in Wärme umsetzen. Die Batterieersatzlast ist ebenfalls notwendig um einen konstanten Arbeitspunkt des gesamten Systems einzustellen. Ein Akkumulator wäre an dieser Stelle ungeeignet, da sich die Stromaufnahme mit dem Ladezustand zunehmend verändert. Die Folge daraus ist ein unstabiles Magnetfeld, welches sich mit dem Ladezustand ändert. Für die Mes-

sungen wird daher eine Batterieersatzlast genutzt. In Abbildung 19 ist der Unterschied zwischen einer ohmschen Last und einer Impedanznachbildung mit Auswirkungen auf das magnetische Feld dargestellt. Daraus ergibt sich, dass die Störemissionen deutlich geringer ausfallen, wenn Batterieersatzlasten genutzt werden.

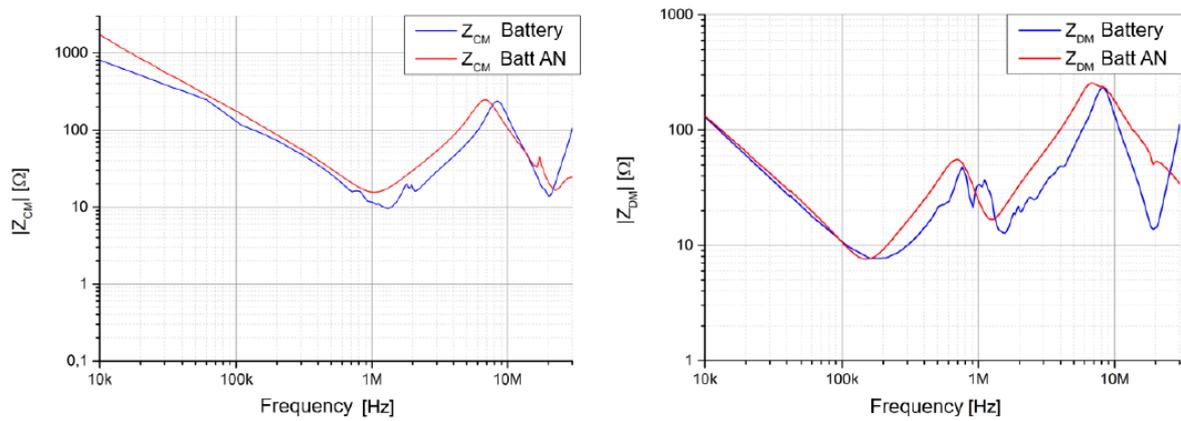


Abbildung 18 - Impedanzverlauf der Batterieersatzlast im Gleichtaktbetrieb(links) und Gegentaktbetrieb(rechts) [18]

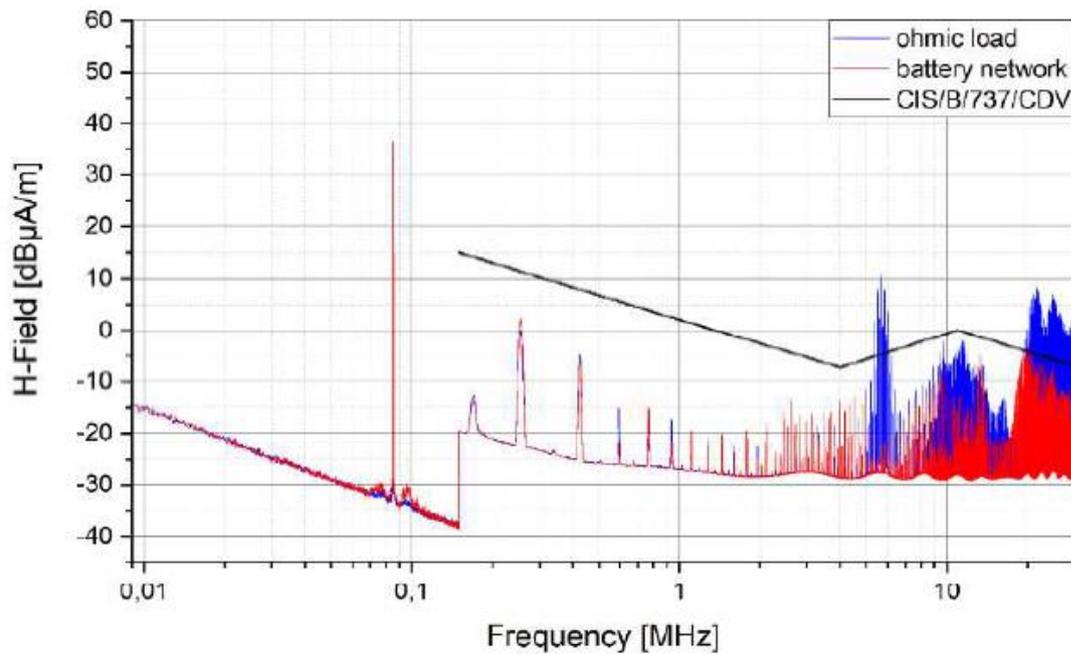


Abbildung 19 - Vergleich der Impedanznachbildung mit einer Ohmschen Last [18]

3.4. Übertragungsverhalten

In diesem Abschnitt soll auf das Übertragungsverhalten des Testsystems eingegangen werden. Um die Übertragungseffizienz des Systems zu bestimmen, wurden eine Messung des Gleichstromes und eine Messung der Gleichspannung vor der Wechselrichtung vorgenommen. Auf der Sekundärseite wurden die gleichen Parameter an der Last aufgenommen. Daraus konnte dann der Wirkungsgrad des WPT-Systems bestimmt werden. Die Graphen in Abb. 20 zeigen die Aufnahmen der Strom- und Spannungsverhältnisse. Die Spannungen wurden auf einem geringen Leistungspegel betrieben um die Kondensatorbänke aus der seriellen Kompensation nicht zu beschädigen.

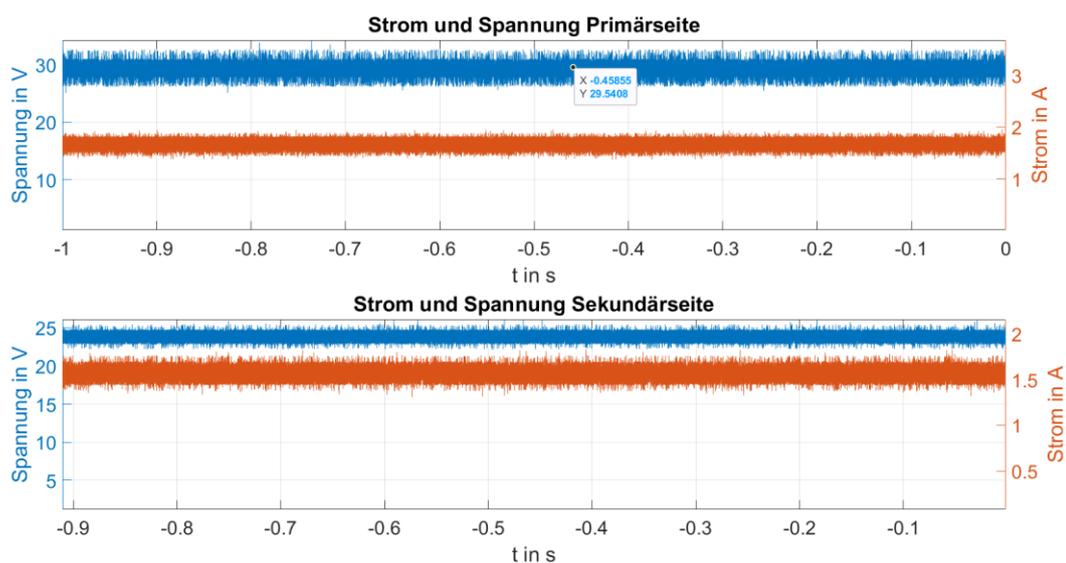


Abbildung 20 - Gleichspannung und Gleichstrom auf der Primärseite und Sekundärseite

Zu erkennen ist, dass sowohl die Spannung als auch der Strom verrauscht sind. In Tabelle 1 sind die Spitzen und Senken für die Ströme und Spannungen aufgeführt.

	Spitzen	Senken
Primärspannung	34,25 V	25,48 V
Primärstrom	1,95 A	1,37 A
Sekundärspannung	26,1 V	22,2 V
Sekundärstrom	1,8 A	1,34 A

Tabelle 1 - Spannungs- und Stromspitzen

Um aus diesen Werten einen Wirkungsgrad zu bestimmen ist es notwendig aus diesen Werten einen Mittelwert zu bilden.

Der Wirkungsgrad wird mit nachfolgender Formel aus den Mittelwerten der Spannungen und der Ströme bestimmt.

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \cdot 100 = \frac{23,8513 \text{ V} \cdot 1,5633 \text{ A}}{28,9151 \text{ V} \cdot 1,674 \text{ A}} \cdot 100 = 77,03\% \quad (17)$$

Wie in Formel 17 beschrieben, ergibt sich daraus ein Wirkungsgrad von 77,03%. Diese Abweichung von einem höheren Wirkungsgrad ist auf eine ungenaue Abstimmung der seriellen Kompensation zurückzuführen. Dies ist auch erkennbar in der Abb. 21. Zwischen Strom und Spannung der Primärseite ist hierbei eine Phasenverschiebung zu erkennen, in der der Strom der Spannung vorausleitet. Dadurch wirkt das System kapazitiv. Außerdem ist in Abb. 21 zu erkennen, dass durch abrupte Schaltflanken auf den Rechtecksignalen sich eine Ripplespannung bildet. Sekundärseitig sind keine Ripplespannung und auch keine Phasendifferenz zu erkennen.

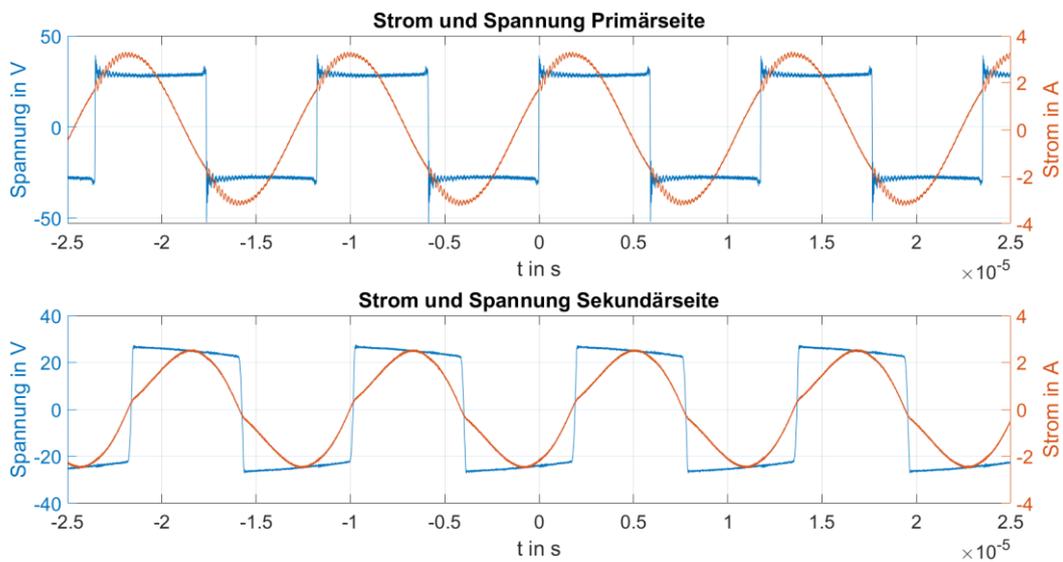


Abbildung 21 - Wechselspannung und Wechselstrom auf der Primärseite und Sekundärseite

4. Messaufbau des Testsetups

Im folgenden Kapitel soll auf den Messaufbau des Systems eingegangen werden. Dazu zählt zum einen der Testaufbau des induktiven Ladesystems als auch der Messaufbau der Antenne innerhalb der Absorberhallen und auf dem Freifeldmessplatz.

4.1. Messantennen

Bei der Messantenne handelt es sich um eine magnetische Rahmenantenne mit integriertem Verstärker. Für die Versorgung des Verstärkers ist es notwendig eine separate Stromversorgung bereitzustellen. Die Stromversorgung wurde über einen Akkumulator bereitgestellt. Bei der Antenne handelt es sich um eine Rahmenantenne der Firma Rohde & Schwarz mit der Typenbezeichnung HFH2-Z2. Diese Antenne besitzt einen Antennendurchmesser von 60 cm und ist daher für die Messungen nach CISPR 11 ausgelegt. Die Antenne wird mittels N-Buchse mit einem Messempfänger verbunden. Die Antenne ist auf 50Ω angepasst, sodass keine Reflexionen auftreten. Das magnetische Feld wurde in drei Polarisationsrichtungen vermessen. In Abb. 22 sind diese Polarisationsrichtungen mit dem Abstand zur Antenne dargestellt. Der Antennenmittelpunkt war in jeder Polarisationsrichtung in einem Abstand von 10 m zum Rand des Ladesystems platziert und befand sich 1,3 m über dem Boden.

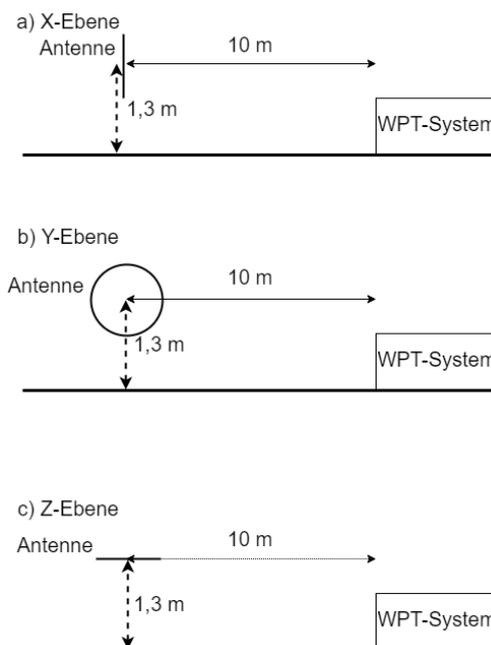


Abbildung 22 - Polarisationen der magnetischen Rahmenantenne

Für die Messung des elektrischen Feldes wurde eine 1 m hohe $\frac{\lambda}{4}$ -Stabantenne genutzt. Diese Antenne wurde ebenfalls in 10 m Entfernung zum Rand des induktiven Ladesystems aufgestellt. Die Erdung der Stabantenne erfolgte über Kupfertape mit dem Hallenboden. Bei der verwendeten Stabantenne handelt es sich um eine VAMP 9243 der Firma Schwarzbeck Mess Elektronik [19]. Diese ist für einen Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz ausgelegt. Für die Erfassung des elektrischen Feldes ist es nur möglich die Monopolantenne in einer Polarisationsebene aufzustellen. Abbildung 23 zeigt die Aufstellung der Monopolantenne in der Absorberhalle Dortmund.

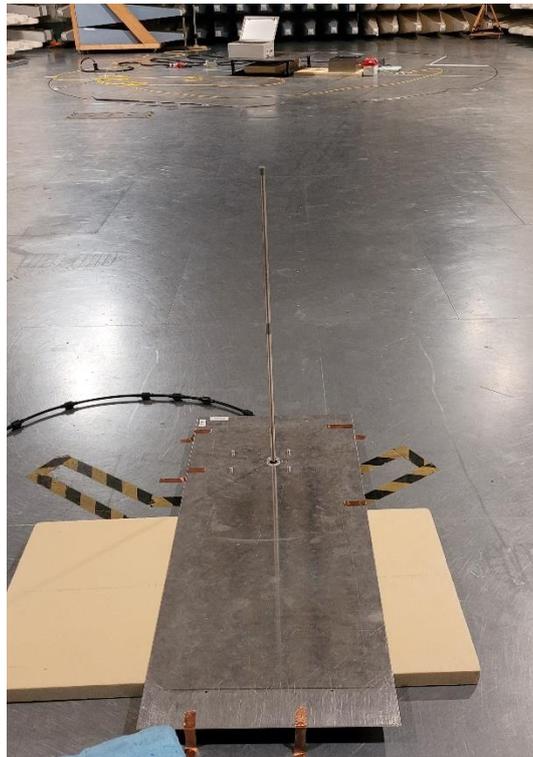


Abbildung 23 - Aufbau der Monopolantenne in der Absorberhalle Dortmund

4.2. Messempfänger

Bei dem genutzten Messempfänger handelt es sich um einen ESR 3, der Firma Rohde & Schwarz. Für die Messung wurde die FFT-Analyse genutzt. Dadurch ist es möglich sehr schnell Messungen über einen gegebenen Frequenzbereich durchzuführen. Der ESR 3 wurde mit der zugehörigen Software der Firma Rohde & Schwarz EMC 32 betrieben. Durch die Software ist es möglich voreingestellte Messkonfigurationen, wie beispielsweise Transducerwerte für das gesamte Frequenzspektrum mit einzubeziehen. Der Messempfänger wurde im Receiver-Mode betrieben.

Für die Messungen wurden die genormten Werte für die Bandbreiten der eingangsseitigen Filter genutzt. So wurde in einem Frequenzbereich von 9 kHz bis 150 kHz eine Bandbreite von 200 Hz genutzt. Die Schrittweite mit der das Filter durchgestimmt wurde betrug 50 Hz. Für den Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz wurde ein Filter von 9 kHz genutzt. Die Schrittweite betrug in diesem Bereich 2,25 kHz. Die Bandbreitenangaben beziehen sich hierbei jedoch auf die 6 dB Bandbreite der Filter. Die Bandbreiten der Filter sind in der CISPR Norm 16-1-1 festgelegt.

Es wurde das Spektrum mit dem Spitzenwertdetektor, dem Mittelwertdetektor und dem Quasipeakdetektor vermessen. Für die Auswertung relevant ist jedoch nur der Quasipeakdetektor, da dieser in den Normen CISPR 11 für diesen Frequenzbereich spezifizierte Detektortyp ist. Die Eigenschaften dieses Detektors wurden in Kapitel 2.2.5. näher erläutert.

4.3. Messaufbau Dortmund Absorberhalle

In Abb. 24 ist der schematische Messaufbau des induktiven Ladesystems gezeigt. Das Ladesystem befindet sich auf dem schwarz eingezeichneten Drehteller der Absorberhalle. In den Drehteller ist eine Wechselspannungsversorgung eingelassen, in der Abbildung mit 1 bezeichnet. Die Wechselspannungsversorgung besitzt einen 32 A Anschluss an den das Kabel für das Netzteil SM1500-CP-30 angeschlossen ist. Das Netzteil wird via Ethernet-Schnittstelle von außerhalb gesteuert. Dazu ist in die Wand der Absorberhalle eine Durchföhrung angebracht. Von dem Netzteil aus führen Kabel zu der Leistungselektronik, die in Kapitel 3.1. beschrieben wird. Zur Versorgung des Microcontrollers ist ein separater Akkumulator an die Leistungselektronik angeschlossen. Die Leistungselektronik ist in der Abbildung mit 3 bezeichnet und die Batterie mit 5. Die Kabel der Leistungselektronik führen unter eine 1,5 m x 1,5 m große Stahlplatte, die als Karosserienachbildung dient, unter der sich sowohl die Kompensation als auch das Spulenpaar befinden. Die Leistungselektronik und die Stahlplatte befinden sich 50 cm entfernt voneinander. Auf der Stahlplatte befindet sich die Impedanznachbildung mit der zugehörigen Gleichrichtungselektronik. Hier mit 2 beschrieben. Sämtliche elektronische Komponenten eingeschlossen der Batterie und des Netzteils sind auf 5 cm Styrodur gelagert. Unter der Bodenspule befindet sich eine 15 cm hohe Styrodurschicht. Der Abstand zwischen der Stahlplatte, unter der die Fahrzeugspule angebracht ist, und der Bodenspule beträgt 10 cm.

Das gesamte Ladesystem wird in dieser Abbildung von einem roten Kreis umfasst. Dies ist ein imaginärer Kreis der um das gesamte Ladesystem gezogen wird. Er hat einen Durchmesser von 1,9 m. Von diesem Kreis aus wird die aktive Rahmenantenne in einer Entfernung von 10 m aufgestellt. Der Vorverstärker der Rahmenantenne wird über einen Akkumulator mit Energie versorgt. Die Antenne ist über eine geschirmte Kabeldurchföhrung mit dem Messraum verbunden. Dort wird der EMI-Receiver mit der Antenne verbunden.

Es wurde der Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz vermessen. Das System wurde dazu in 16 Positionen jeweils um 22,5° gedreht. Für jede Position wurde die magnetische Feldstärke der drei Polarisationsrichtungen der magnetischen Rahmenantenne aufgenommen.

Höhe 8,7 m ohne Absorber

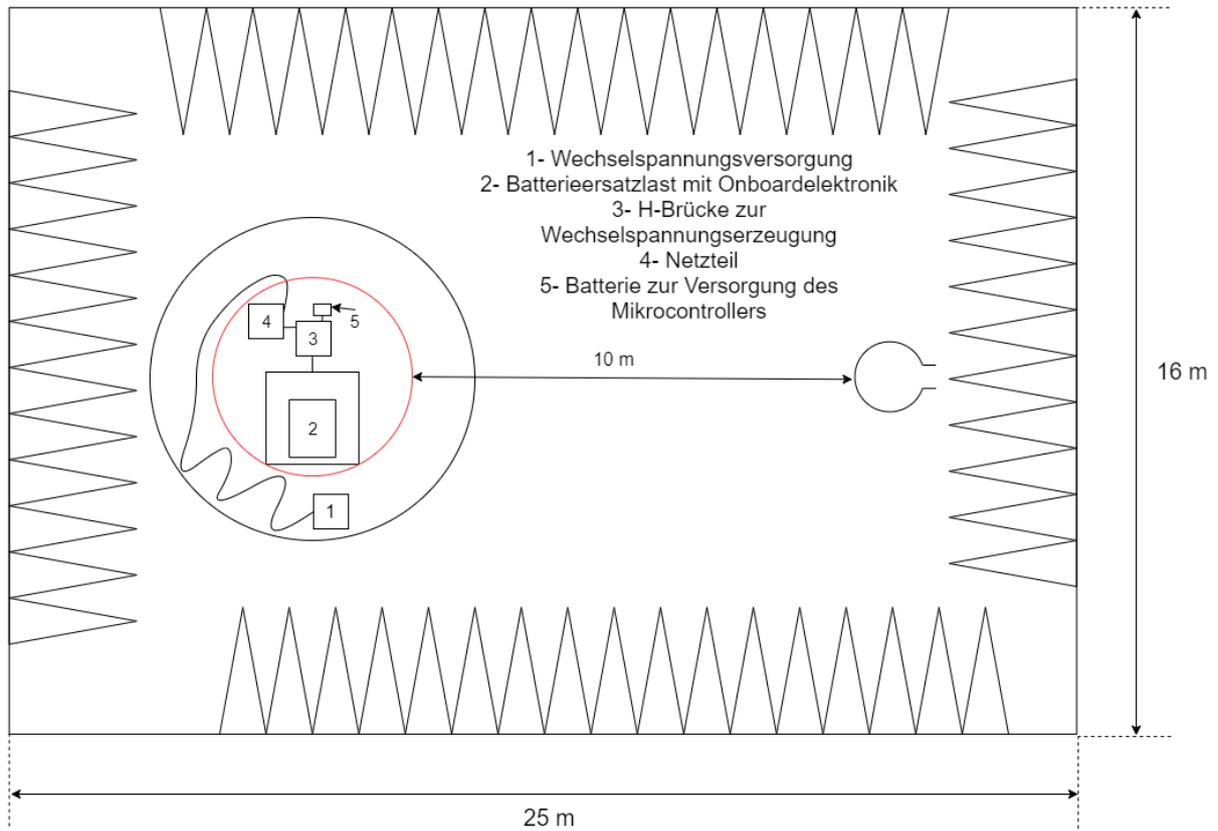


Abbildung 24 - Schematischer Messaufbau in der Absorberhalle Dortmund

4.4. Messaufbau Kolberg Absorberhalle

Der Messaufbau in Kolberg erfolgte nahezu identisch. Die Unterschiede des Messaufbaus bestanden jedoch darin, dass sowohl die Ansteuerung des Netzteils als auch der Messempfänger sich in der Halle befanden. Die Bedienung des Netzteils erfolgte über einen Laptop, der sich in dem Radius des induktiven Ladesystems befand. Dieser wurde nur über den Akku betrieben, sodass Störungen von Netzteilen, dadurch auszuschließen sind. Der Messempfänger wurde über einen Kaltgerätestecker mit Energie versorgt. Der Messempfänger wurde wie bereits in Kapitel 4.2. beschrieben über die Software EMC32 betrieben, dazu ist ebenfalls ein Laptop notwendig gewesen. Auch diese wurde nur mit integrierten Akku genutzt. Da der Messempfänger nach CISPR 16-1-1 ausgelegt ist, ist nicht davon auszugehen, dass mögliche Störemissionen von diesem Geräte ausgehen könnten.

Außerdem wurde die Antenne in einer Ecke der Absorberhalle positioniert, da ansonsten der Messabstand von 10 m vom roten Kreis aus Abb. 24 nicht hätte eingehalten werden können. Der Unterschied zur geraden Achse betrug 20° . Dieser veränderte Messaufbau ist in Abbildung 25 nochmals aufgezeigt.

Höhe 9 m ohne Absorber

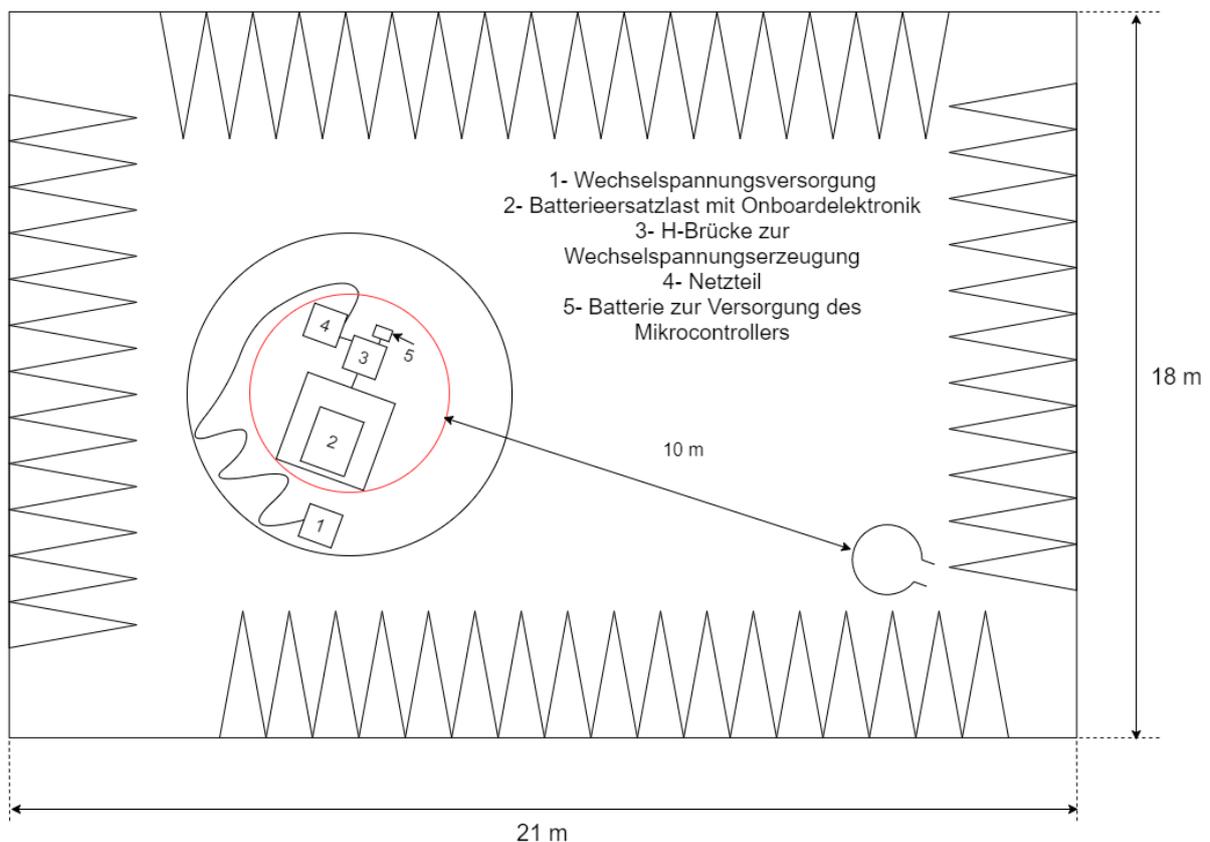


Abbildung 25 - Schematischer Aufbau in der Absorberhalle Kolberg

4.5. Messaufbau Kolberg Freifeldmessplatz

Der Aufbau des Freifeldmessplatzes ist zu den anderen Messungen in den Absorberhallen ebenfalls identisch. Die Spannungsversorgung des induktiven Ladesystems wurde über einen Zugang zum Labor mit Verlängerungskabeln sichergestellt. Der EMI-Receiver wurde in einem Fahrzeug mit Standheizung betrieben um möglichen Effekten durch Temperaturänderungen entgegen zu wirken. Gespeist wurde der EMI-Receiver über eine in den Boden eingelassene Spannungsversorgung. Im Freifeld wurden nur vier Positionen des induktiven Ladesystems vermessen, da kein Drehteller zur Verfügung stand und eine genaue Ausrichtung in 22,5° Schritten per Hand nahezu unmöglich ist.

Eine Messung der elektrischen Feldstärke war ebenfalls nicht möglich, da keine Erdungsmöglichkeiten für die Monopolantenne zur Verfügung standen.

In Abbildung 26 ist der Aufbau des Testsetups mit dem Messsetup in der 0°- Position dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das System auf Styrodur aufgebaut wurde und somit kein Kontakt zum Erdboden besteht.

Unter dem Freifeldmessplatz befindet sich laut Angaben der Mitarbeiter des Messlabor Kolberg ein Geflecht aus Kupferdrähten. Über dieses sind keine genaueren Angaben bekannt. Die Anordnung dieser Kupferdrähte unter dem Erdboden entspricht keiner realen Messsituation wie auf beispielsweise Straßen oder Parkplätzen.



Abbildung 26 - Messaufbau auf dem Freifeldmessplatz

5. Messergebnisse

In folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse aus den verschiedenen Absorberhallen und dem Freifeldmessplatz dargestellt.

5.1. Messergebnisse Dortmund Absorberhalle

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Auswertung und Analyse der Messergebnisse der Absorberhalle Dortmund.

5.1.1. Aufnahmen des magnetisches Feldes

Am Beispiel der 0°-Aufnahme des WPT-System in Abbildung 27 soll eine Analyse der Störaussendungen erfolgen.

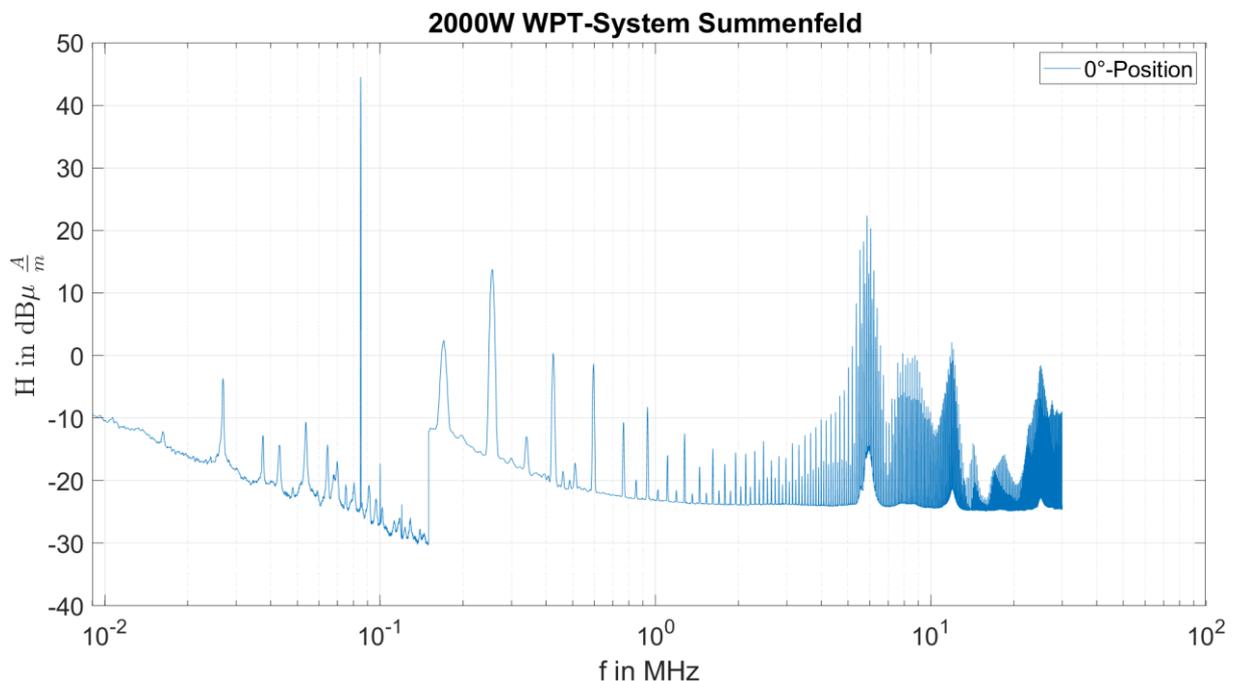


Abbildung 27 - Spektrum des Summenfeldes bei der 0°-Position

In Abbildung 27 erkennt man deutlich die Grundfrequenz des WPT-Systems. Diese liegt bei 85 kHz. Durch die Ansteuerung des WPT-Systems mit einer rechteckförmigen Wechselspannung entstehen Oberwellen. Die Oberwellen sind besonders stark in den ungeraden Oberwellen ausgeprägt. Dies leitet sich aus der Fouriertransformation eines Rechtecksignals her. Die nachfolgende Formel beschreibt die Funktionsgleichung der Fouriertransformation.

$$u = \frac{4 \cdot \hat{u}}{\pi} \cdot (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots) \quad (18)$$

Durch kein ideales Rechtecksignal wie in Abbildung 21 zu erkennen, kann es auch zu geraden Oberwellen kommen. Diese sind ebenfalls in Abbildung 27 zu erkennen.

Bei 150 kHz ist der Messbereichswechsel klar am Grundrauschen zu erkennen. Das Grundrauschen steigt an diesem Punkt rapide an, da ein Filter mit einer 6dB-Bandbreite von 9 kHz, statt vorher mit 200 Hz, verwendet wird und sich die Rauschleistung dadurch erhöht.

Der Grund für leichte Überhöhungen des Grundrauschens im Bereich von 26 kHz bis 150 kHz konnte nicht ausgemacht. Dies ist jedoch für die Messungen von keiner Relevanz und beeinträchtigt auch nicht die Ergebnisse.

In nachfolgender Tabelle sind die Grundwelle und die ersten Oberwellen mit ihrem Pegel in den einzelnen Achsen und dem Summenpegel aufgeführt.

Bezeichnung	Frequenz in kHz	Summenpegel in $dB \frac{\mu A}{m}$	X-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$	Y-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$	Z-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$
Grundwelle	85	44,5052	24,4989	44,4542	16,8088
1. Oberwelle	170	2,45716	-8,50475	2,0334	-16,4601 (Rauschen)
2. Oberwelle	255	13,7915	-1,68282	13,6517	-10,9886
3. Oberwelle	340	-13,0744	-22,0371 (Rauschen)	-14,1922	-22,9804 (Rauschen)
4. Oberwelle	425	0,397429	0,4245	-1,29317	-14,7725
5. Oberwelle	510	-17,5846	-25,7656 (Rauschen)	-18,4509	-26,0531 (Rauschen)
6. Oberwelle	595	-1,34604	-22,2903	-1,40472	-24,0416
7. Oberwelle	680	-22,1092 (Rauschen)	-26,8345 (Rauschen)	-26,9882 (Rauschen)	-27,0517 (Rauschen)
8. Oberwelle	765	-10,6601	-16,93	-12,123	-23,6757

Tabelle 2 - Messwerte der Oberwellen

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass die Messwerte der Y-Achse die größte Bedeutung haben, da sie am höchsten ausfallen. Die Messwerte der Z-Achse sind am geringsten. Diese Erkenntnis ist aus sämtlichen gemessenen Positionen zu ziehen.

Weitere hohe Pegel treten in einem Frequenzbereich von 5 MHz bis 6,5 MHz auf. Dort bewegen sich die Pegel in einem Bereich von $-2 \text{ dB} \frac{\mu A}{m}$ bis $25 \text{ dB} \frac{\mu A}{m}$. Danach folgend fallen die Pegel deutlich geringer aus. Es treten jedoch weiterhin bei bestimmten Frequenzen auffallend hohe Peaks auf. Im Bereich von 7,5 MHz bis 9,5 MHz bewegen diese sich in einem Bereich

von $-5 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bis $0 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Weitere Hochpunkte befinden sich bei 11,5 MHz bis 12,5 MHz und bei 23,5 MHz bis 26,5 MHz. Diese liegen in einem Bereich von $-10 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bis $2 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Spektren, der X-Achse, Y-Achse und Z-Achse aufgeführt, um an diesem Beispiel zu zeigen wie unterschiedlich die Messwerte der verschiedenen Achsen ausfallen.

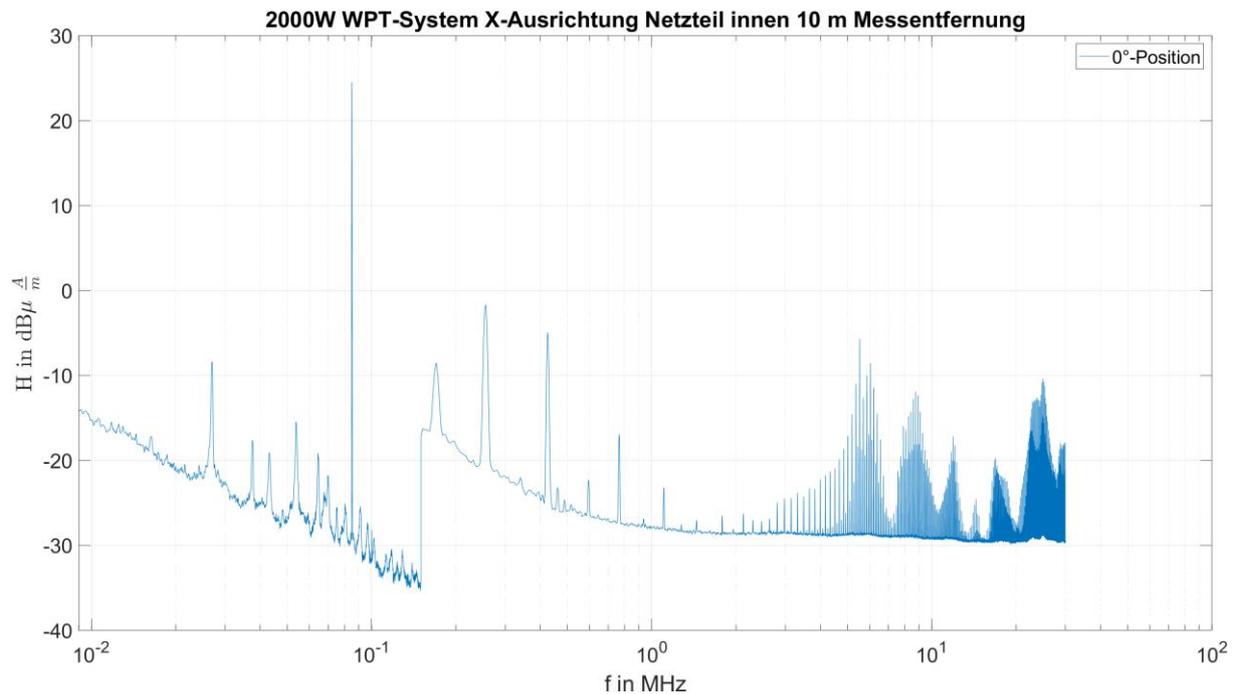


Abbildung 28 - Spektrum X-Achse 0° - Position

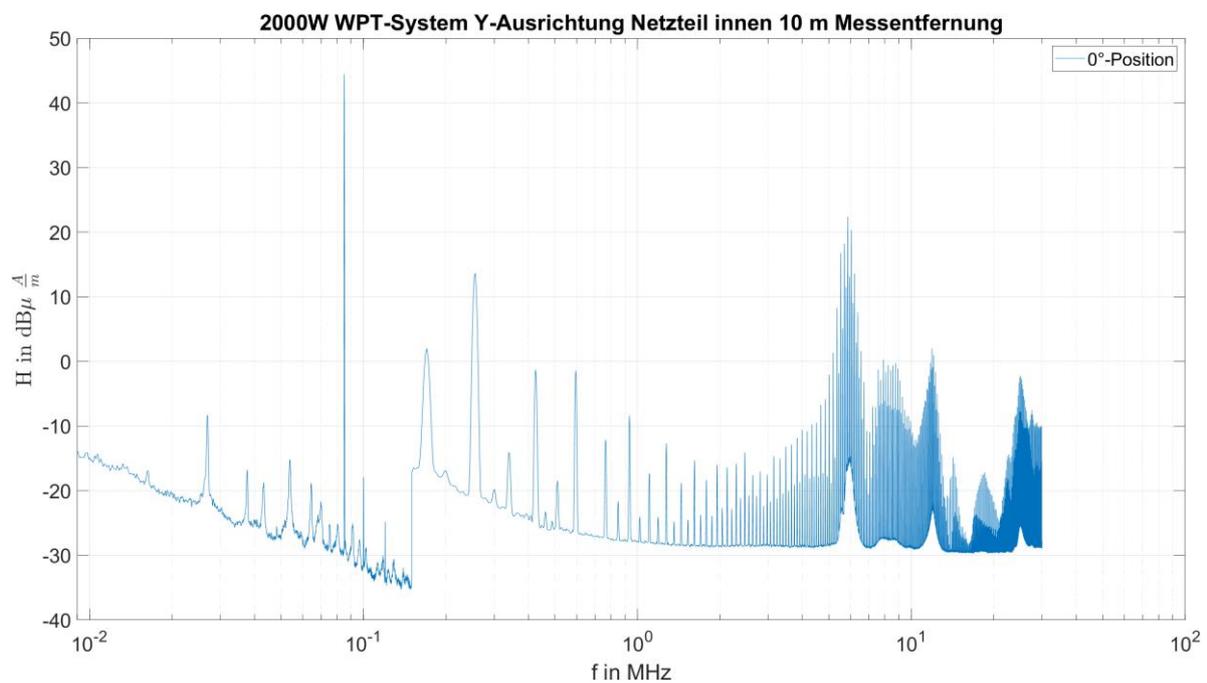


Abbildung 29 - Spektrum Y-Achse 0° - Position

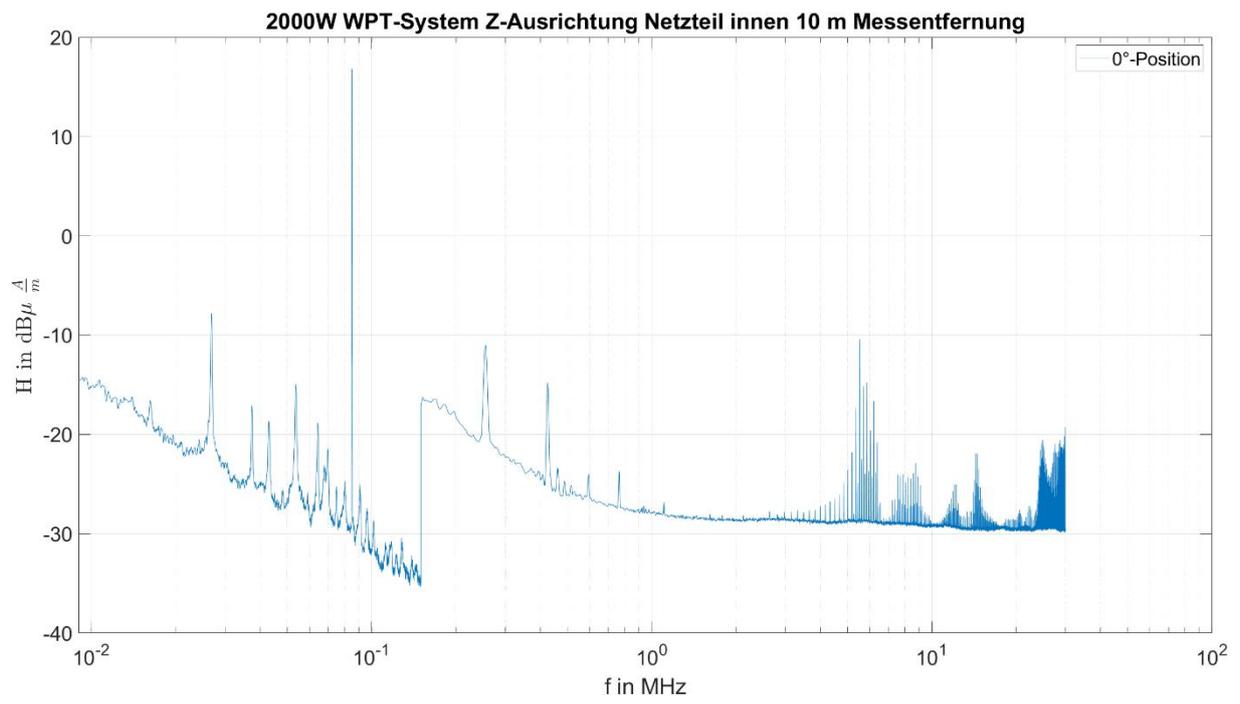


Abbildung 30 - Spektrum Z-Achse 0° - Position

5.1.2. Aufnahmen des elektrischen Feldes

In Abbildung 31 ist die Aufnahme des Spektrums des elektrischen Feldes in der 0°-Position zu erkennen. Die Messungen wurden wie in Kapitel 4.3. beschrieben mit einer 1 m langen Monopolantenne durchgeführt. Diese wurde mittels Kupfertape mit dem Boden der Halle verbunden. Auch im elektrischen Feld sind die Grundwelle und die entstehenden Oberwellen klar zu erkennen. Das mit Störungen behaftete Rauschen im unteren Frequenzbereich von 9 kHz bis 150 kHz ist auch in diesem Fall zu vernachlässigen.

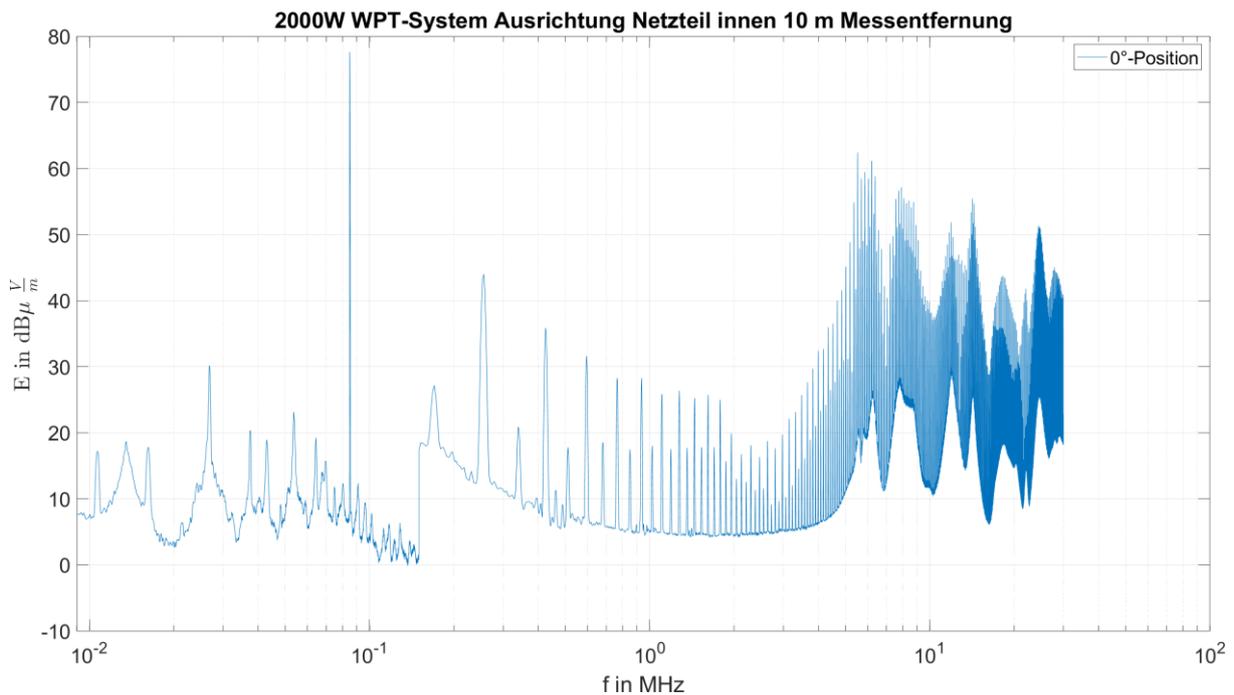


Abbildung 31 - Aufnahme des elektrischen Feldes im Bereich von 9 kHz bis 30 MHz

Hohe Pegel treten in Abbildung 31 vor allem im Frequenzbereich um 6 MHz auf. Diese liegen bei ungefähr $60 \text{ dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$. Auch in den darauffolgenden höheren Frequenzbereichen gibt es Feldstärken die ebenfalls hohe Pegel aufweisen. So liegen bei etwa 8 MHz ebenfalls die Pegel bei $57 \text{ dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$. Bei 14,1968 MHz tritt ein Pegel von $55,444 \text{ dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ auf. Der letzte höhere Pegel über $50 \text{ dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ tritt bei einer Frequenz von 24,3983 MHz auf und liegt bei $51,2879 \text{ dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ auf.

5.1.3. Strahlendiagramme des magnetischen Feldes

Für die genauere Analyse der Messergebnisse ist es notwendig bei gewissen Frequenzen Strahlendiagramme anzufertigen um mögliche Unterschiede in den Winkelabhängigkeiten der Pegel zu erkennen. Dafür wurden für die folgenden Frequenzen Strahlendiagramme des magnetischen Feldes angefertigt.

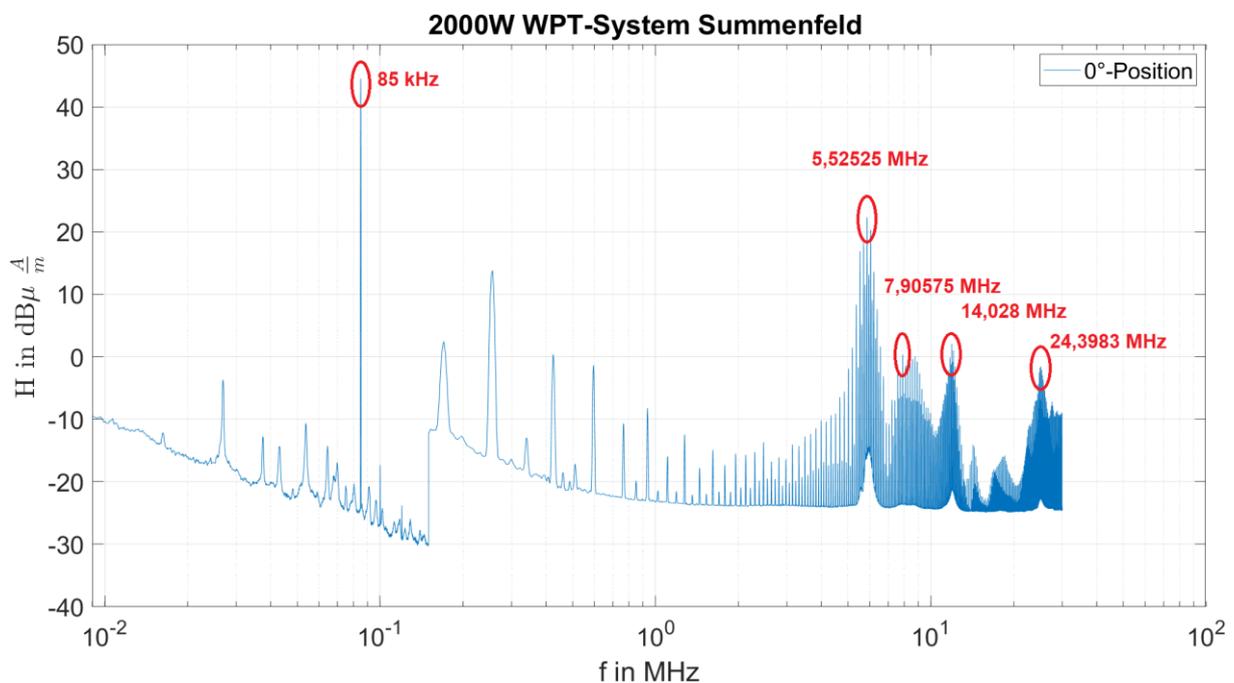


Abbildung 32 - Frequenzen zur Betrachtung im Strahlendiagramm

Für die in Abbildung 32 angegebenen Frequenzen wurden die nachfolgenden Strahlendiagramme angefertigt.

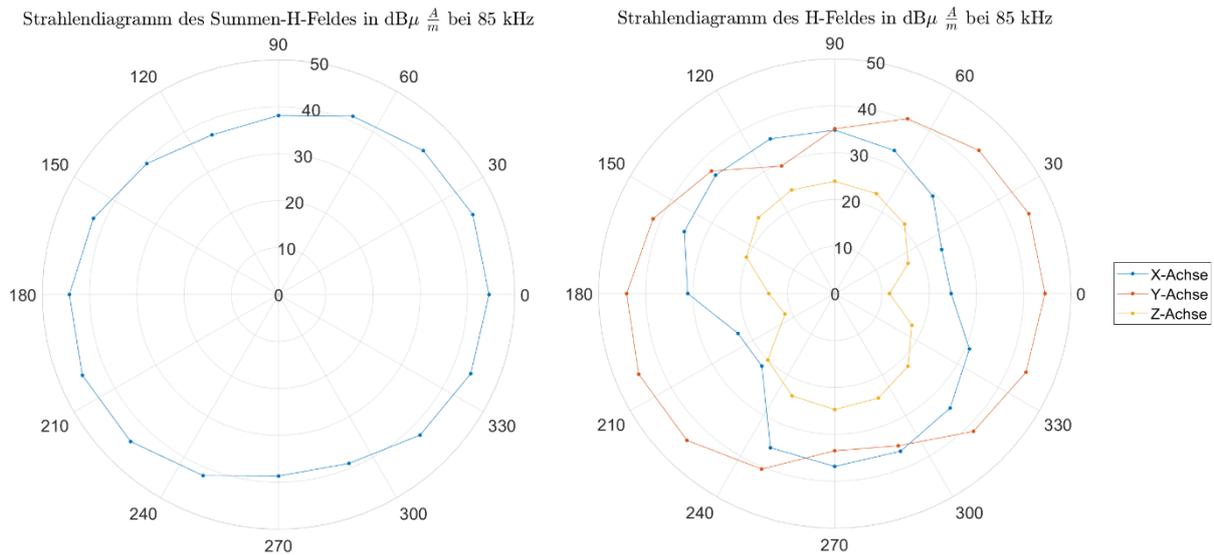


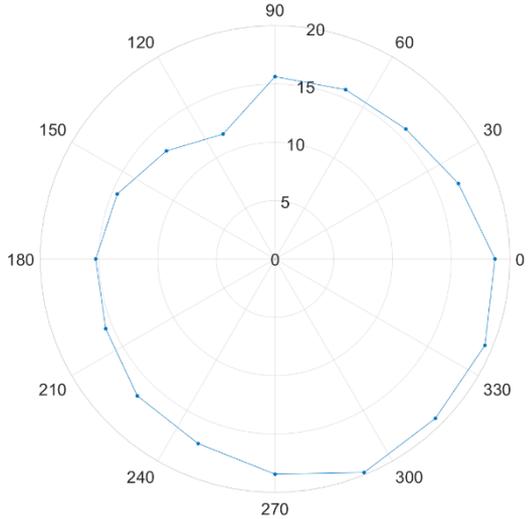
Abbildung 33 - Strahlendiagramm 85 kHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abbildung 33 sind das Summenfeld und die einzelnen Strahlendiagramme für die Ebenen dargestellt. Aus der rechten Abbildung ist ersichtlich, dass die Y-Ebene die prägendste Ebene ist. Die X-Ebene überragt die Y-Ebene in drei Punkten. Dies sind die 112,5° Position, die 270° Position und die 292,5° Position. Die Z-Ebene fällt deutlich geringer aus und ist an sämtlichen Messpositionen, die Ebene mit den kleinsten Werten. Auffällig ist ebenfalls, dass alle Ebenen eine nierenartige Form haben und die X-Ebene senkrecht zur Y-Ebene steht.

Das Summenfeld ist nach der Formel aus Kapitel 2.2.2. berechnet und ergibt als Strahlendiagramm die links dargestellte Grafik in Abbildung 33. Das Summenfeld ist ovalförmig und besitzt die größten Pegel im Bereich von 22,5° und 202,5°. Die niedrigsten Pegel sind im Bereich von 112,5° und 270° zu erkennen.

Mögliche Ursache für die starken Ausprägungen in diesem Winkel könnten die Zuleitungen für die Spulen sein.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 5,52525 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 5,52525 MHz

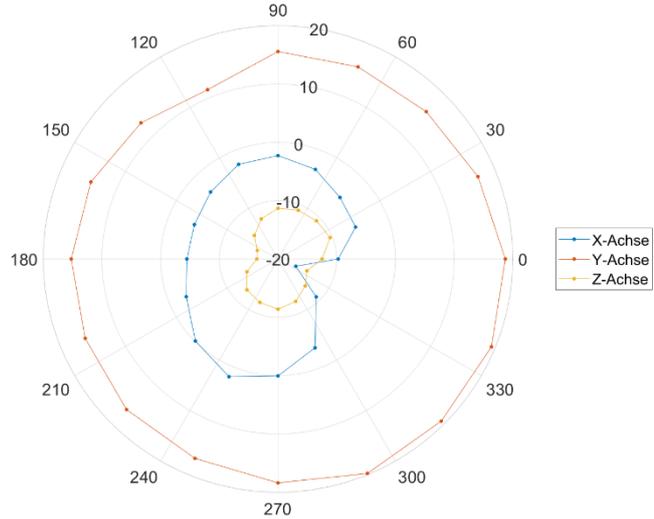
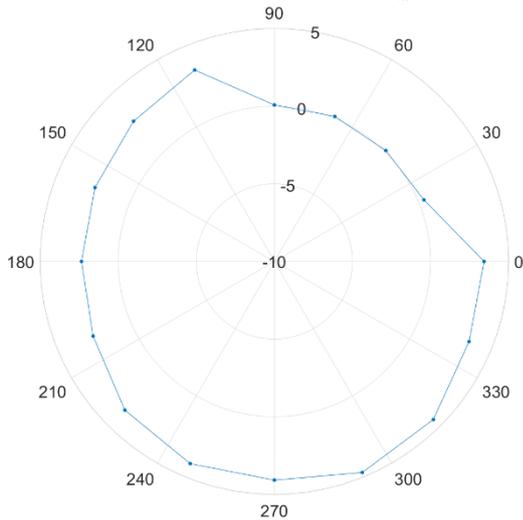


Abbildung 34 - Strahlendiagramm 5,52525 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abb. 34 sind die Strahlendiagramme des Summenfeldes und das der einzelnen Ebenen für eine Frequenz von 5,52525 MHz dargestellt. Die Y-Ebene überragt die anderen Ebenen um bis zu $20 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die Form der Y-Achse entspricht fast einem Kreis, das bedeutet das diese Ebene fast gleichmäßig verteilt in alle Richtungen strahlt. Die Emissionen der X-Ebene fallen deutlich geringer aus. Die maximalen Emissionen liegen bei einem Winkel von $247,5^\circ$ und betragen rund $1 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die Z-Achse fällt am geringsten aus und tritt nur knapp über das Grundrauschen. Die maximalen Aussendungen liegen in einem Winkel von $22,5^\circ$ mit einem Pegel von $-10 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 7,90575 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 7,90575 MHz

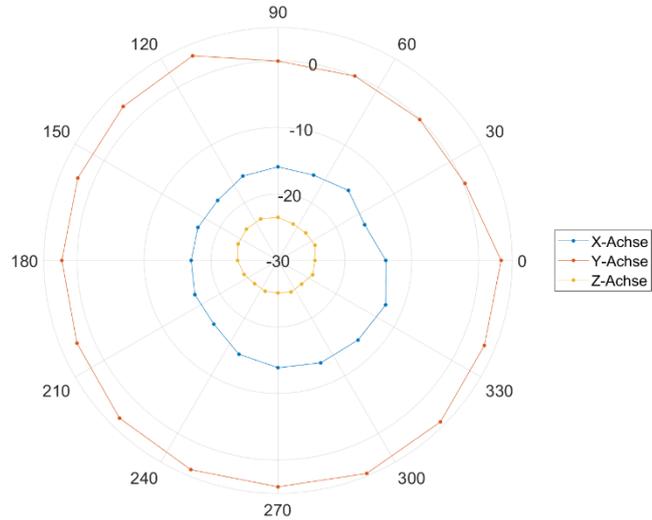
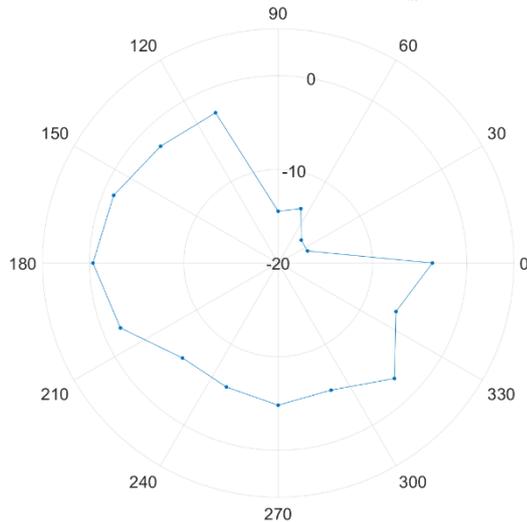


Abbildung 35 - Strahlendiagramm 7,90575 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abb. 35 sind die Strahlendiagramm für eine Frequenz von 7,90575 MHz dargestellt. In der rechten Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass in der Y-Ebene die höchsten Emissionen zu messen waren. Die Pegel sind in sämtlichen gemessenen Winkeln ungefähr gleich. Die Unterschiede belaufen sich auf lediglich $3\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die X-Ebene fällt deutlich geringer aus. Die größten Emissionen sind bei einem Winkel von 315° mit $-13\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ zu erkennen. Die Emissionen liegen in sämtlichen gemessenen Winkeln zwischen $-10\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ und $-20\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die Z-Ebene fällt von den gemessenen Emissionen am geringsten aus, sämtliche Pegel bei den gemessenen Winkeln liegen bei etwa $-25\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

Im Summenfeld liegen die errechneten Pegel zwischen $0\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ und $5\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die größten Emissionen hierbei liegen in einem Winkel von $292,5^\circ$ mit einem Pegel von fast $5\text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Die geringsten Pegel treten bei 90° , $67,5^\circ$ und 45° auf, diese liegen direkt bei 0° .

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 14,028 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 14,028 MHz

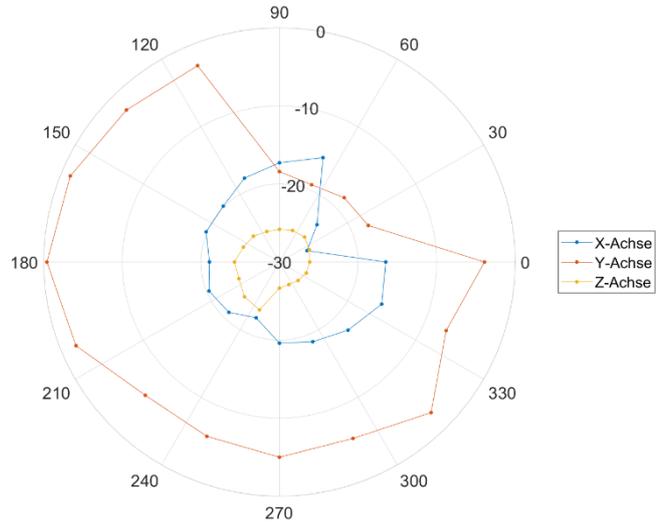
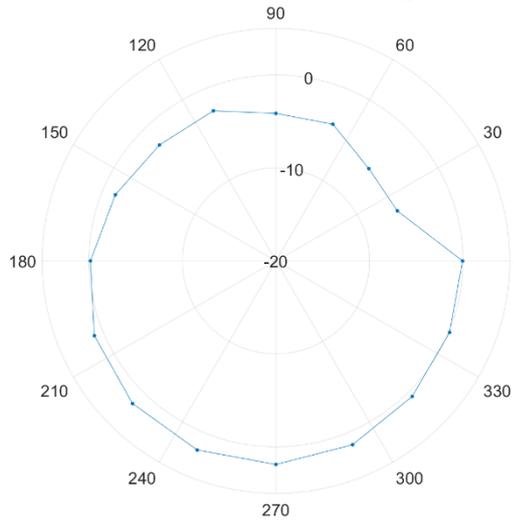


Abbildung 36 - Strahlendiagramm 14,028 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abbildung 36 sind die Strahlendiagramme des Summenfeldes und der einzelnen Ebenen bei einer Frequenz von 14,028 MHz dargestellt. In der Y-Ebene sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Pegeln der Winkel zu erkennen. Bei 90° , $67,5^\circ$ und 45° treten mit $-19 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ die geringsten Pegel auf. In einem Winkel von 180° treten die größten Emissionen in Höhe von $0 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf. In der X-Ebene fallen die Pegel geringer aus. Die größten Pegel treten bei einem Winkel von $67,5^\circ$ mit $-15 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf. Der kleinste Pegel tritt bei $-22,5^\circ$ mit $-28 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf. Die Z-Ebene befindet sich nahezu am Rauschen. Der größte Pegel tritt bei $247,5^\circ$ mit $-25 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf.

Das Summenfeld zeigt, dass auf dieser Frequenz, starke Unregelmäßigkeiten auftreten und im Bereich von $112,5^\circ$ bis 0° die größten Emissionen auftreten.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bei 24,3983 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bei 24,3983 MHz

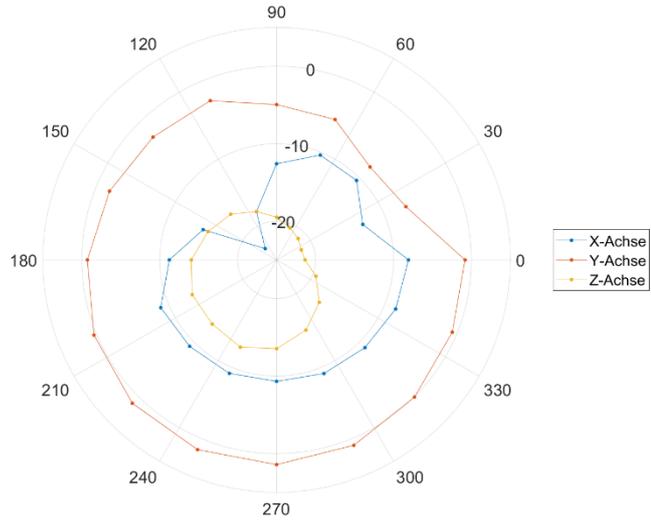


Abbildung 37 - Strahlendiagramm 24,3983 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

Abb. 37 zeigt die Strahlendiagramme für eine Frequenz von 24,3983 MHz. Im Bereich von 0° über 270° bis 180° sind die Pegel kontinuierlich bei $0 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ in der Y-Ebene. Im oberen Bereich der des Strahlendiagramms fallen die Pegel deutlich ab bis auf $-8 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

Die X-Ebene besitzt ihren maximalen Pegel in der 0° Position. Der minimale Pegel wird in der 135° Position mit $-23 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ erreicht.

Die Z-Ebene fällt am geringsten aus. Ihren maximalen Pegel erreicht sie in der $202,5^\circ$ Position mit $-13 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Der minimale Pegel wird in der 0° Position erreicht mit $-25 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

5.1.4. Strahlendiagramme des elektrischen Feldes

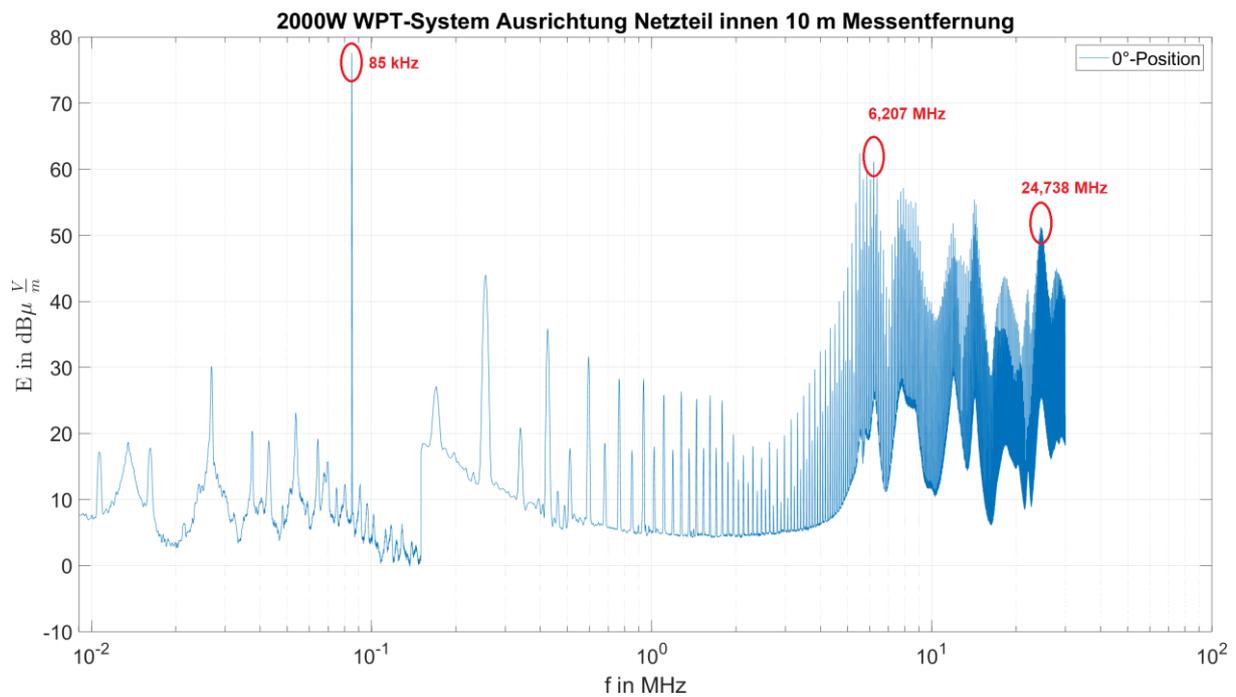


Abbildung 38 - Frequenzen zur Betrachtung im Strahlendiagramm

Für die Abbildung 38 eingezeichneten Frequenzen wurden ebenfalls Strahlendiagramme des elektrischen Feldes angefertigt. Ziel dieser Strahlendiagramme soll sein mögliche Abhängigkeiten von der Ausrichtung des WPT-Systems zu erkennen.

Strahlendiagramm des E-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{V}}{\text{m}}$ bei 85 kHz

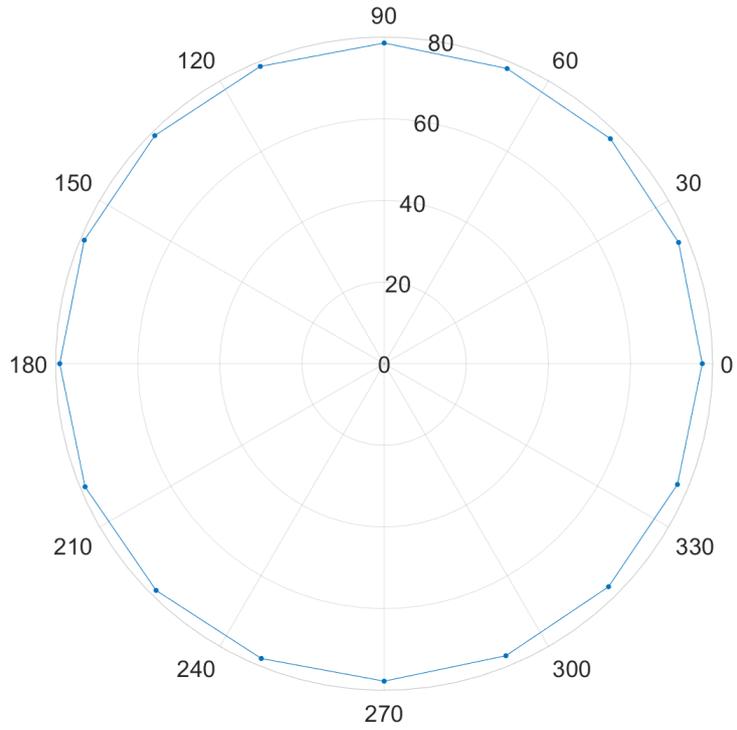


Abbildung 39 - Strahlendiagramm 85 kHz

Strahlendiagramm des E-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{V}}{\text{m}}$ bei 6,207 MHz

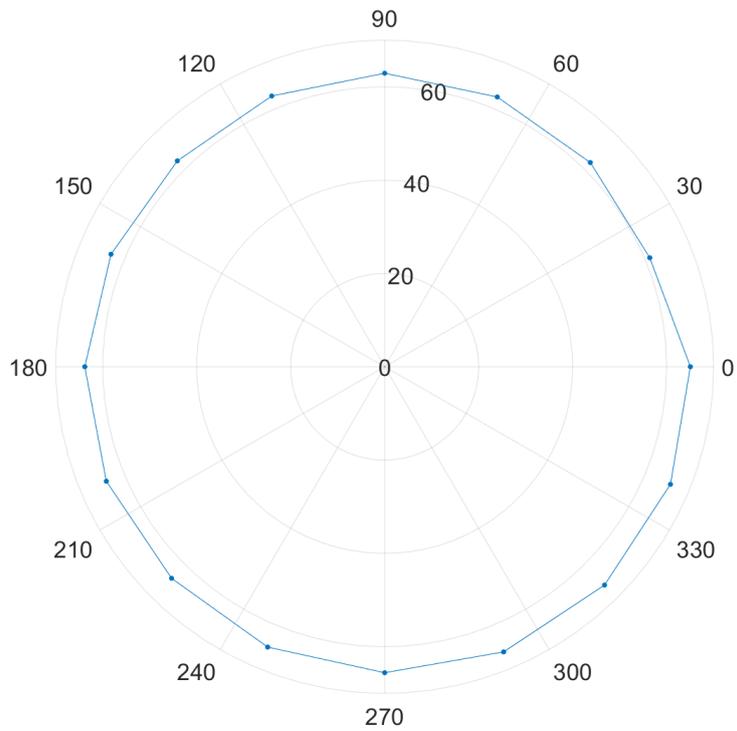


Abbildung 40 - Strahlendiagramm 6,207 MHz

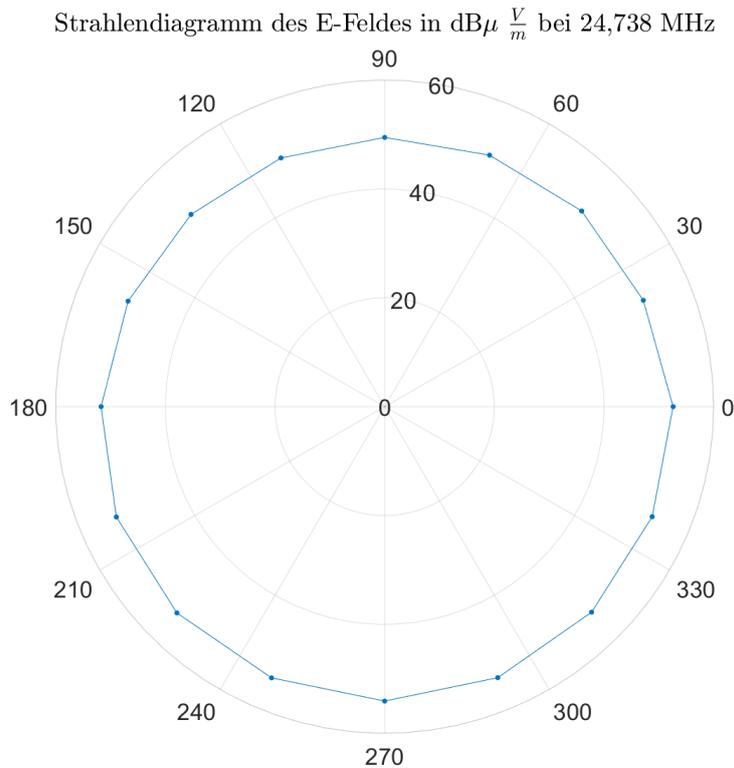


Abbildung 41 - Strahlendiagramm 24,738 MHz

In den Abbildungen 39, 40 und 41 ist zu erkennen, dass im elektrischen Feld keine bzw. nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Positionen auftreten. Anhand der ausgewählten Beispiele bei 85 kHz, 6,207 MHz und 24,738 MHz soll dies gezeigt werden.

Der Pegel bei der Frequenz von 85 kHz liegt bei $77,59 \text{ dB}\frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$. Der Pegel bei 6,207 MHz liegt bei $61,0498 \text{ dB}\frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ und bei der Frequenz 24,738 MHz liegt der Pegel bei $51,0539 \text{ dB}\frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$.

Die annähernd gleichen Feldstärken in sämtlichen Positionen lassen vermuten, dass die Emissionen des elektrischen Feldes auf Potentialsprünge zwischen der isolierten Bodenspule und dem Hallenboden, die einen Kondensator bilden, zurückzuführen sind [20].

5.2. Messergebnisse Kolberg Absorberhalle

In den nachfolgenden Kapiteln soll auf die Messergebnisse aus der Absorberhalle Kolberg eingegangen werden.

5.2.1. Aufnahmen des magnetischen Feldes

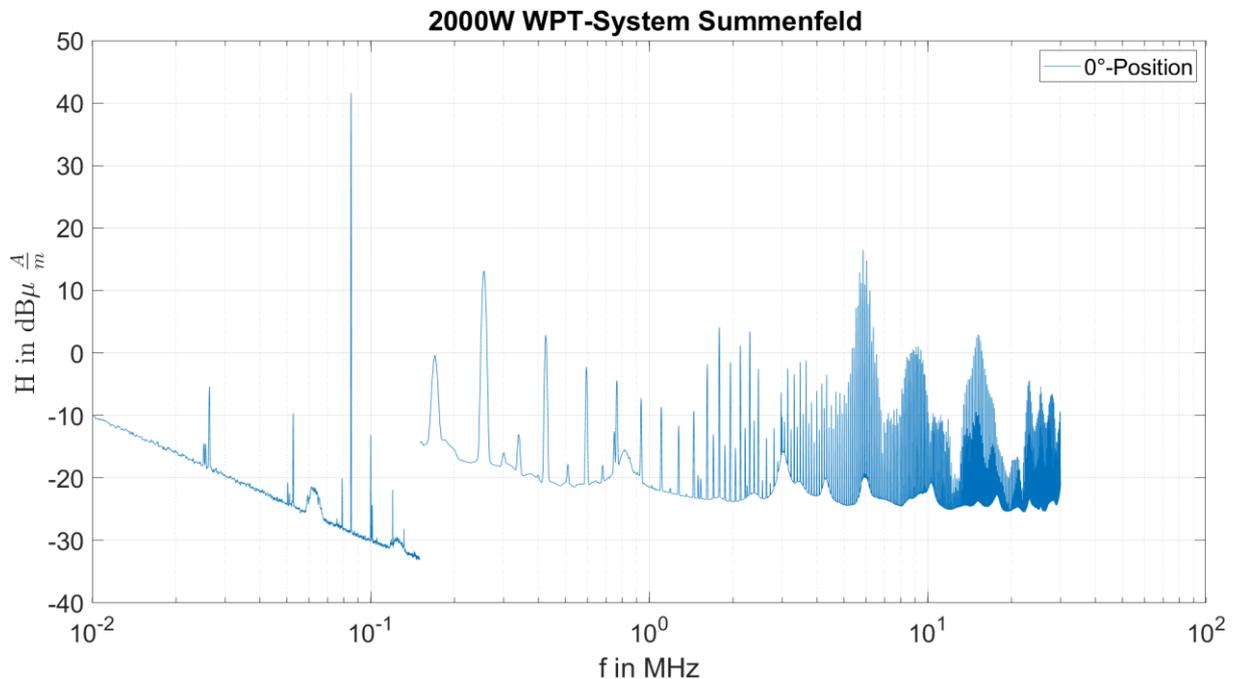


Abbildung 42 - Spektrum des Summenfeldes bei der 0° - Position

In Abbildung 42 ist das Summenfeld der 0°-Position zu erkennen. Wie bereits bei den Messaufnahmen des magnetischen Feldes in Dortmund zu erkennen, bilden sich auch in den Messaufnahmen aus der Absorberhalle Kolberg Oberwellen aus. Die Oberwellen befinden sich auf den gleichen Frequenzen wie in Dortmund. Bis zu einer Frequenz von ungefähr 1,1 MHz nehmen diese stetig ab. Ein besonderer Bereich bildet sich in einem Bereich von 1,5 MHz bis 2,5 MHz aus. In diesem Bereich überragen die Pegel deutlich die vorhergehenden Pegel, der Oberwellen. Weitere hohe Pegel treten in einem Bereich von 6 MHz auf. Darüber hinaus treten ebenfalls noch Oberwellen auf, diese fallen jedoch deutlich geringer aus. Beispielsweise treten in einem Bereich von 9 MHz noch Pegel um $0 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$ auf. Ein weiterer Hochpunkt tritt bei einer Frequenz von ungefähr 15 MHz auf, dort liegt der Pegel bei ungefähr $2 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$.

Bezeichnung	Frequenz in kHz	Summenpegel in $dB \frac{\mu A}{m}$	X-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$	Y-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$	Z-Achse in $dB \frac{\mu A}{m}$
Grundwelle	85	41,591	33,5033	40,8376	17,5344
1. Oberwelle	170	-0,34073	-8,2381	-1,34715	-13,8508
2. Oberwelle	255	13,1556	4,09847	12,557	-10,303
3. Oberwelle	340	-13,0766	-20,0024	-14,7253	-23,4475
4. Oberwelle	425	2,85327	-3,40691	1,5947	-15,3851
5. Oberwelle	510	-17,8047	-24,1241	-19,905	-26,0417 (Rauschen)
6. Oberwelle	595	-2,24823	-8,48337	-3,47532	-23,1151
7. Oberwelle	680	-17,9467	-25,3889	-19,7233	-25,9379
8. Oberwelle	765	-4,42857	-5,55005	-11,8305	-17,8301

Tabelle 3 - Messwerte der Oberwellen

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass im Frequenzbereich von 85 kHz bis 1 MHz, die Y-Ebene die größten Messwerte hat. Die Messwerte der X-Ebene fallen deutlich geringer aus. Der Unterschied in den Pegeln beläuft sich auf etwa 6 dB -8 dB in sämtlichen betrachteten Frequenzen. Auffällig jedoch ist, dass in der 8. Oberwelle bei einer Frequenz von 765 kHz die X-Ebene den größten Anteil mit $-5,55005 \text{ dB} \frac{\mu A}{m}$ ausmacht. In der Z-Ebene fallen die Werte noch deutlich geringer aus. Generell fällt auf, dass in der Absorberhalle Kolberg die Messwerte der X-Ebene deutlich größer ausfallen als in der Absorberhalle Dortmund.

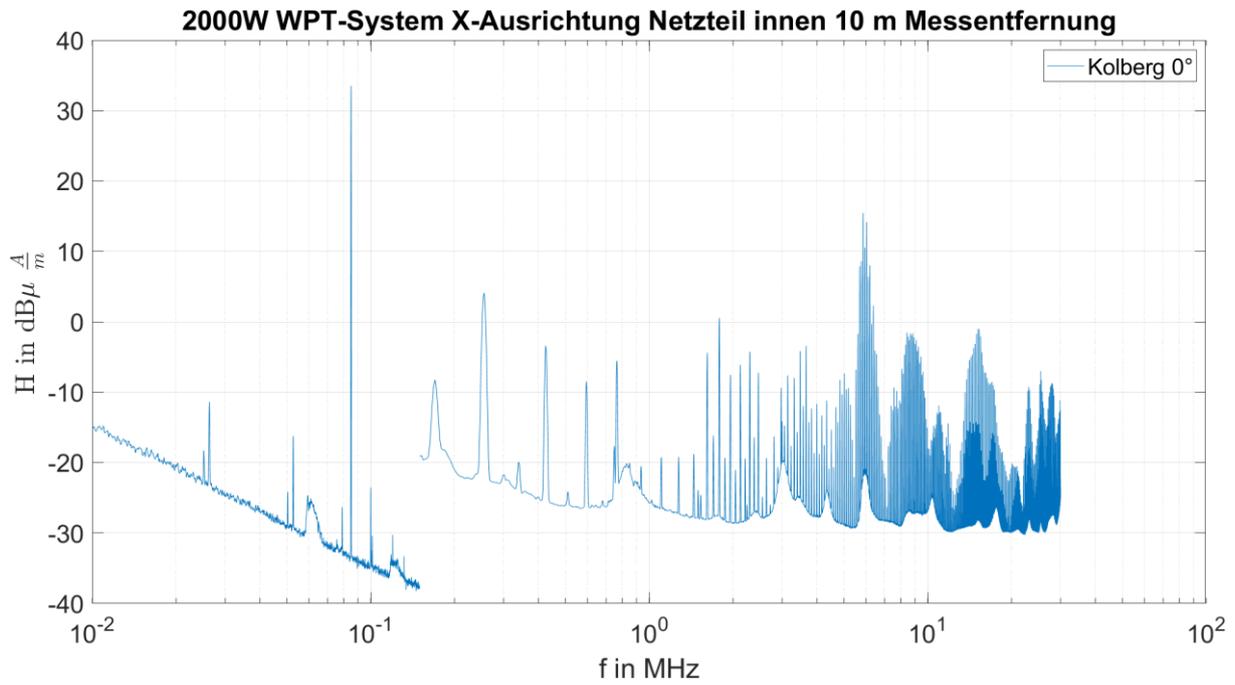


Abbildung 43 - Spektrum X-Achse 0° - Position

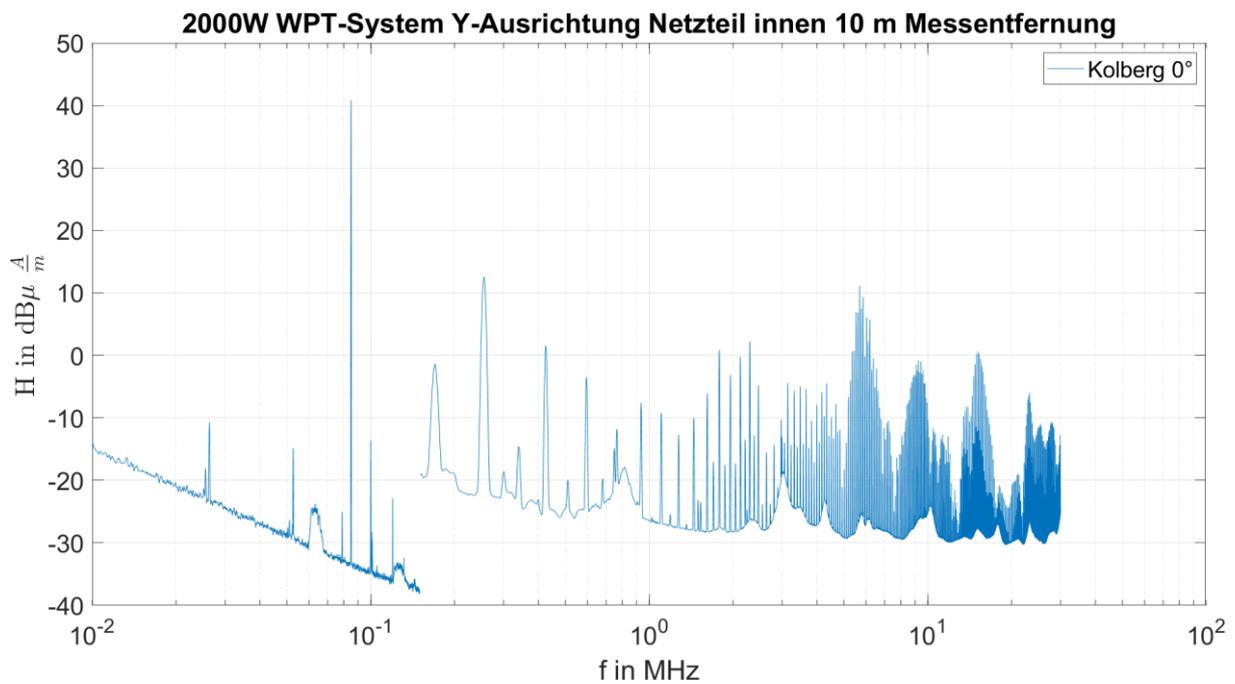


Abbildung 44 - Spektrum Y-Achse 0° - Position

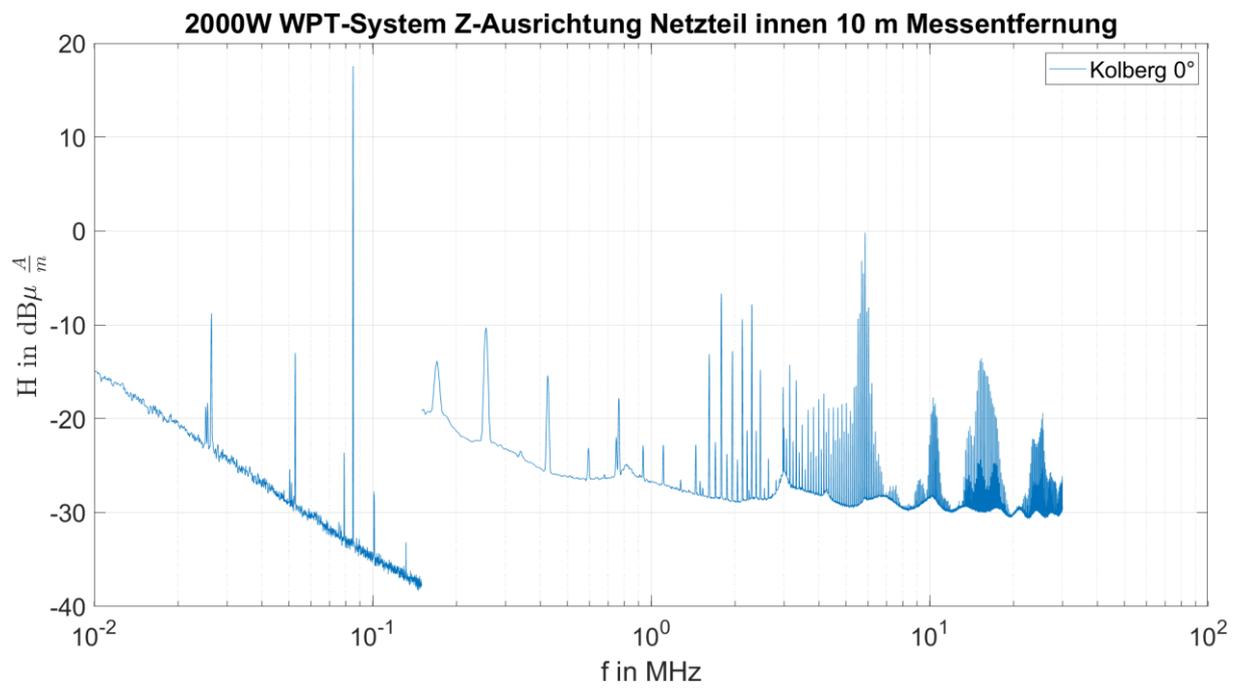


Abbildung 45 - Spektrum Z-Achse 0° - Position

5.2.2. Aufnahmen des elektrischen Feldes

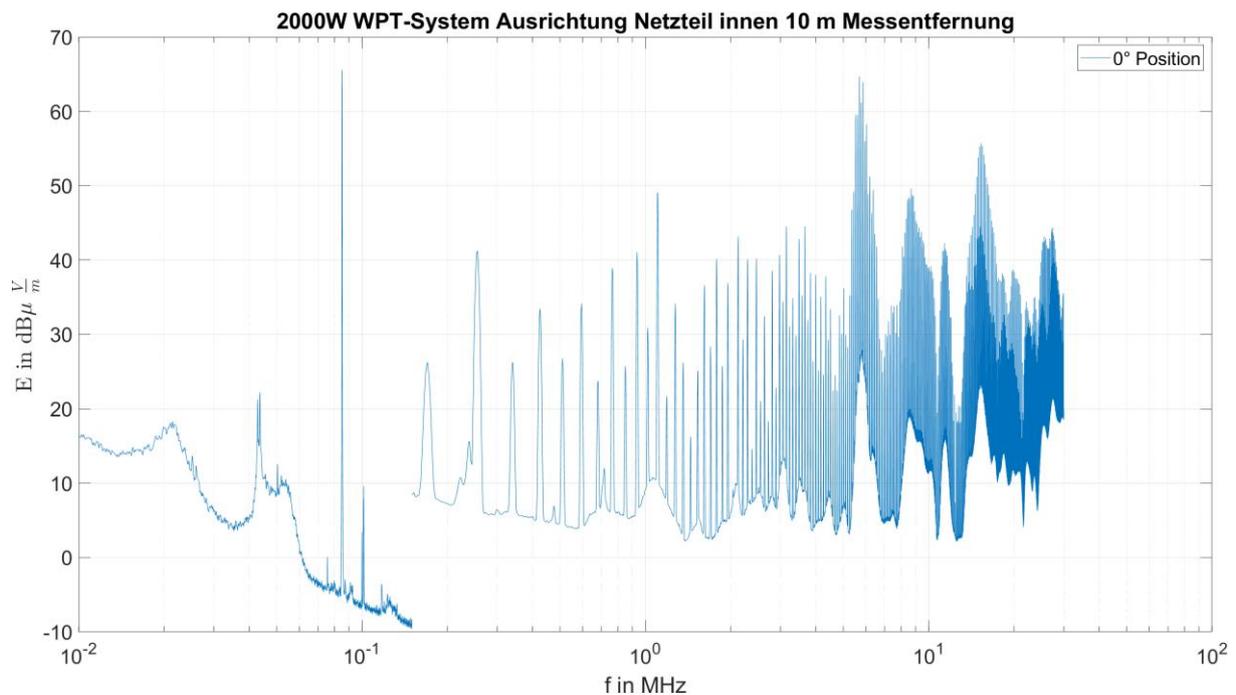


Abbildung 46 - Aufnahme des elektrischen Feldes im Bereich von 9 kHz bis 30 MHz

Das Spektrum des elektrischen Feldes in der Absorberhalle Dortmund ist in Abb. 46 dargestellt. Die Frequenzbereiche mit besonders starken Pegeln entsprechen denen aus dem magnetischen Feld. Unterschiede treten zwischen elektrischem Feld und magnetischem Feld im Bereich von 1 MHz auf.

Für das elektrische Feld von Kolberg wurden keine Strahlendiagramme angefertigt. Die Messwerte zeigten kaum bis gar keine Unterschiede zwischen den einzelnen betrachteten Winkeln.

Daher ist anzunehmen, dass das elektrische Feld keine Unterschiede in den Winkelabhängigkeiten aufweist. Dies stützt die Theorie, dass die Emissionen des elektrischen Feldes auf die Potentialsprünge zwischen der Bodenspule und dem Hallenboden hervorgerufen werden. Die Bodenspule und der Hallenboden bilden dabei einen Kondensator.

5.2.3. Strahlendiagramme des magnetischen Feldes

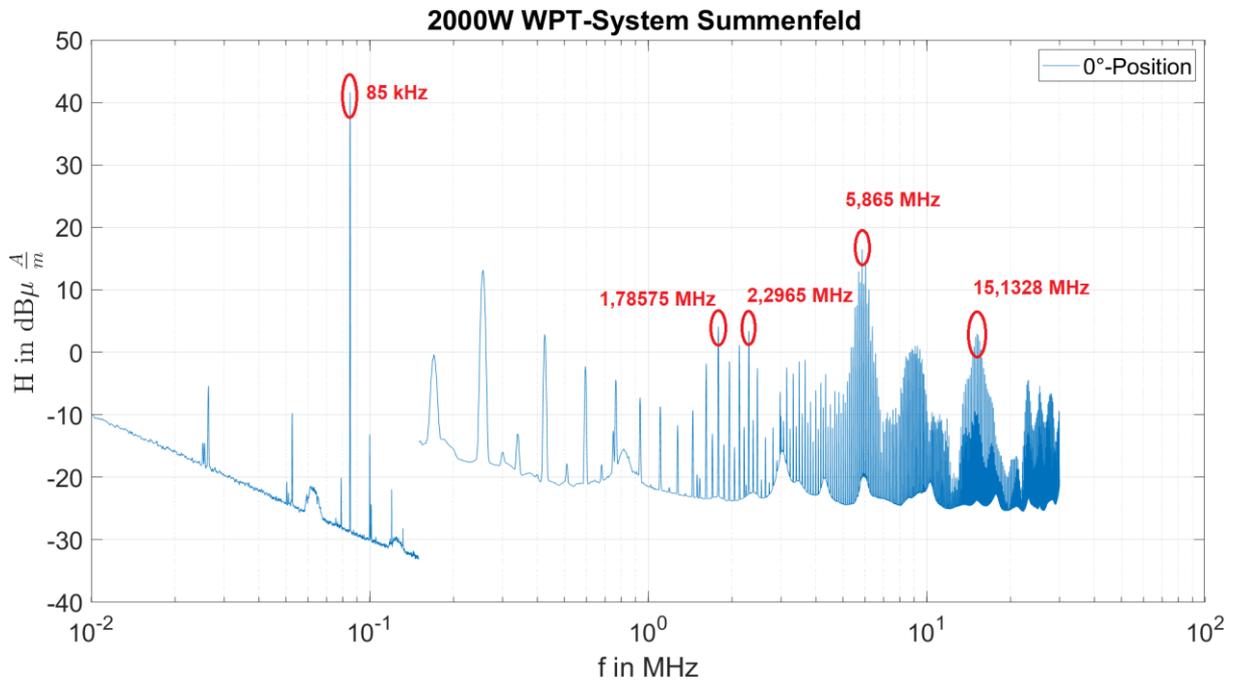


Abbildung 47 - Frequenzen zur Betrachtung im Strahlendiagramm

Für das magnetische Feld wurden für die in den oben dargestellten auffälligen Frequenzen Strahlendiagramme angefertigt um die Winkelabhängigkeit dieser Messwerte zu betrachten.

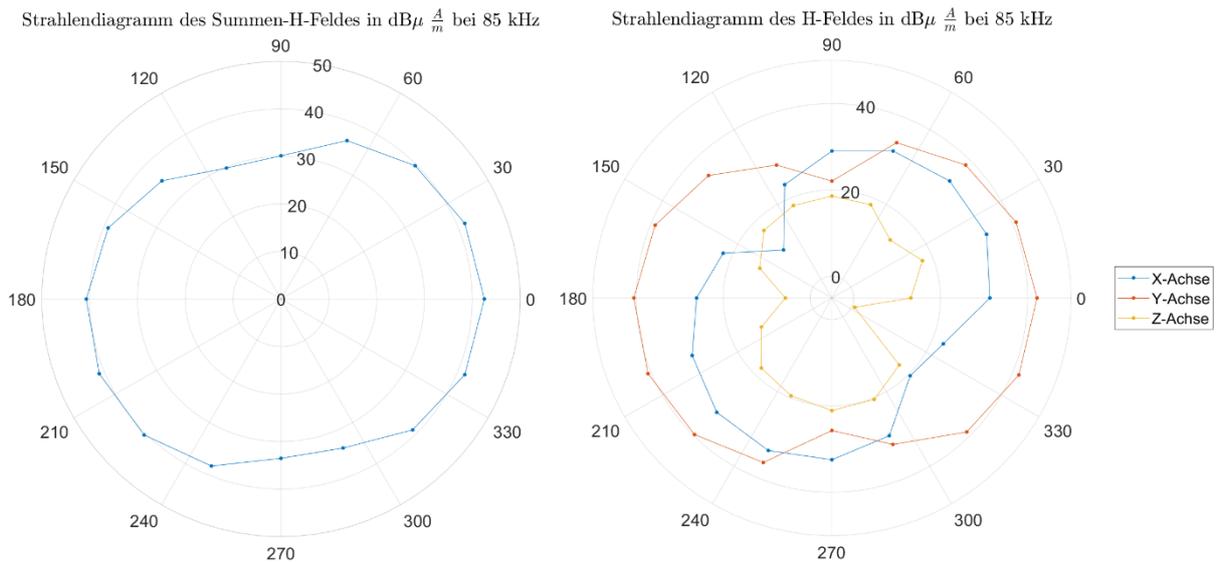
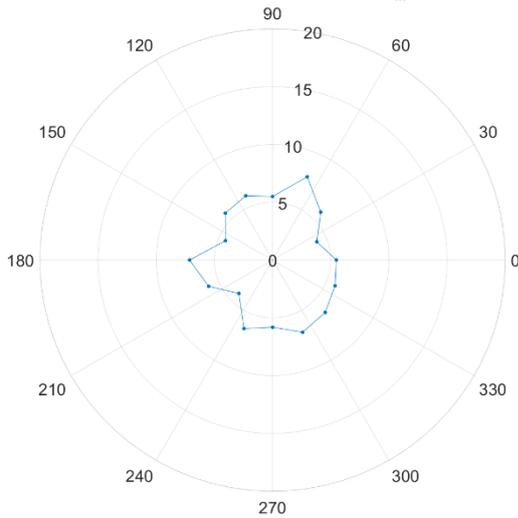


Abbildung 48 - - Strahlendiagramm 85 kHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

Abb. 48 zeigt das Strahlendiagramm für die Grundwelle bei 85 kHz. Die Y-Ebene ist die am stärksten ausgeprägte Ebene. Die maximalen Pegel werden bei den Winkeln $22,5^\circ$ und $202,5^\circ$ erreicht. Die X-Ebene liegt etwas darunter, die maximalen Pegel werden bei Winkeln von 45°

und 225° erreicht. Die Z-Ebene fällt am geringsten aus mit maximalen Pegeln bei 270° und 90° mit ungefähr $20 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB} \mu \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 1,78575 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB} \mu \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 1,78575 MHz

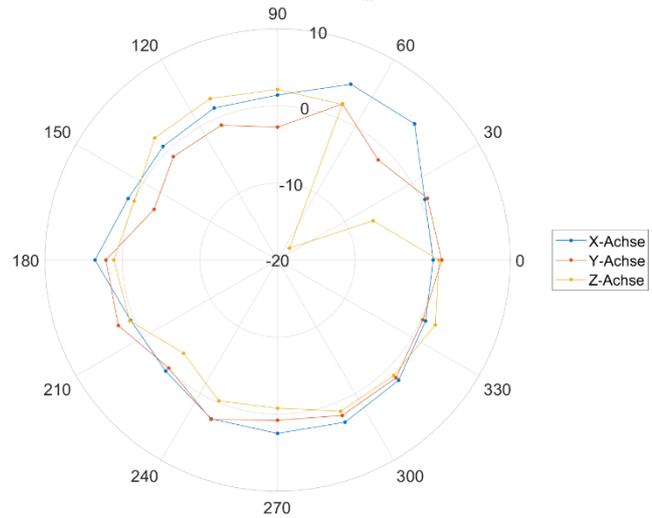
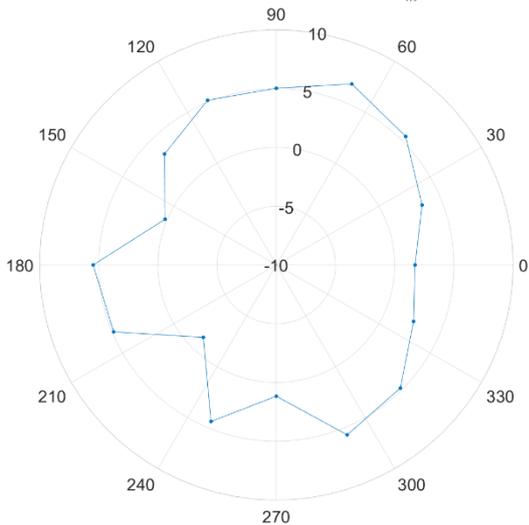


Abbildung 49 - Strahlendiagramm 1,78575 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abb. 49 ist das Strahlendiagramm bei einer Frequenz von 1,78575 MHz gezeigt. Besonders auffällig ist bei dieser Frequenz, dass sämtliche Ebenen auf ähnlich hohem Niveau gemessen wurden und in allen Richtungen nahezu kreisförmig sind.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB} \mu \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 2,2965 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB} \mu \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 2,2965 MHz

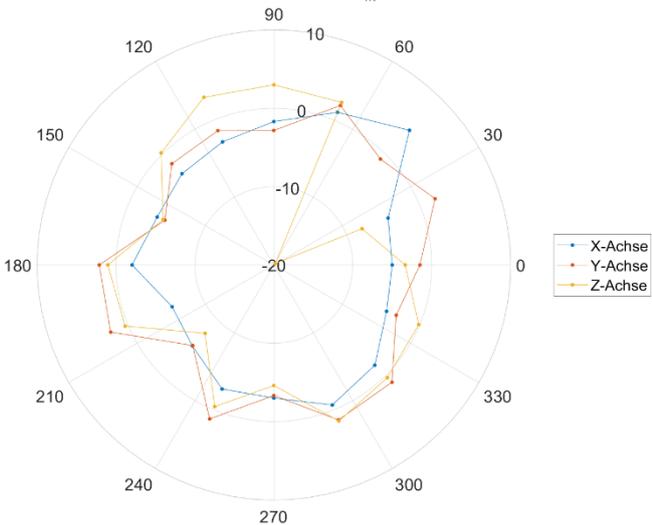
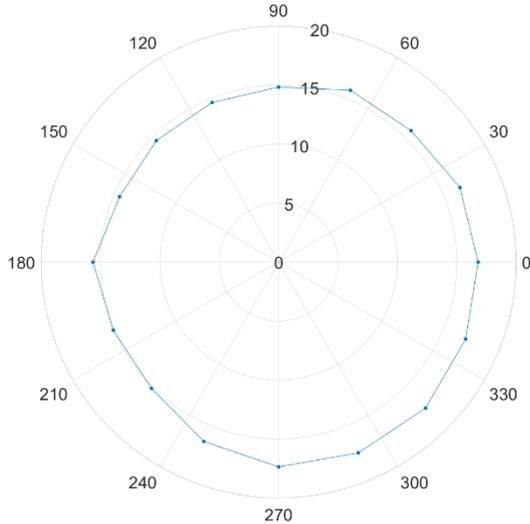


Abbildung 50 - Strahlendiagramm 2,2965 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abb. 50 sind die Strahlendiagramme bei einer Frequenz von 2,2965 MHz dargestellt. Auch hier tritt das Phänomen auf, dass sämtliche Ebenen ungefähr gleich stark ausgeprägt sind. Einzige Ausnahme macht hierbei der Winkel von 45° dort unterscheiden sich die Pegel äußerst stark voneinander. Die X-Ebene hat dort ihren Hochpunkt und die Z-Achse ist dort am geringsten ausgeprägt.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bei 5,865 MHz



Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ bei 5,865 MHz

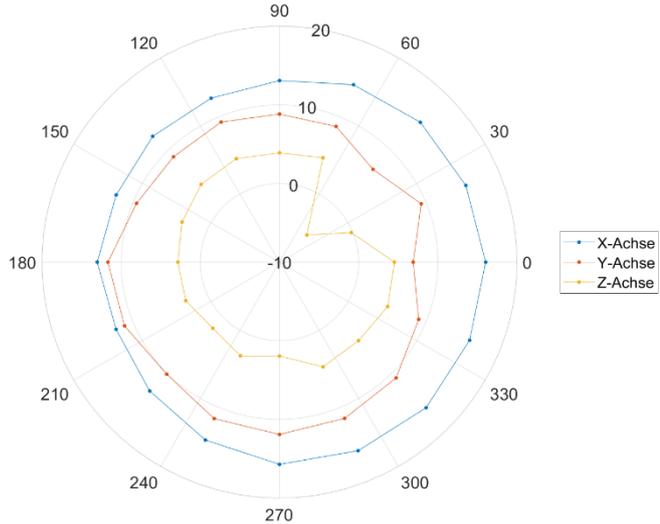


Abbildung 51- Strahlendiagramm 5,865 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

Abbildung 51 zeigt das Strahlendiagramm bei einer Frequenz von 5,865 MHz. Das Summenfeld baut sich kreisförmig um das WPT-System herum auf. Zu beachten ist, dass auf dieser Frequenz die X-Ebene am stärksten ausgeprägt ist und mit $15 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ kreisförmig um das WPT-System gebildet wird. Die Y-Ebene ist auf dieser Frequenz schwächer ausgeprägt, verläuft aber ebenfalls fast kreisförmig um den Mittelpunkt herum. Die Z-Ebene ist am schwächsten ausgeprägt. Auch hier tritt ein Abfall des Pegels bei einem Winkel von 45° auf $-5 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 15,13275 MHz

Strahlendiagramm des H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 15,13275 MHz

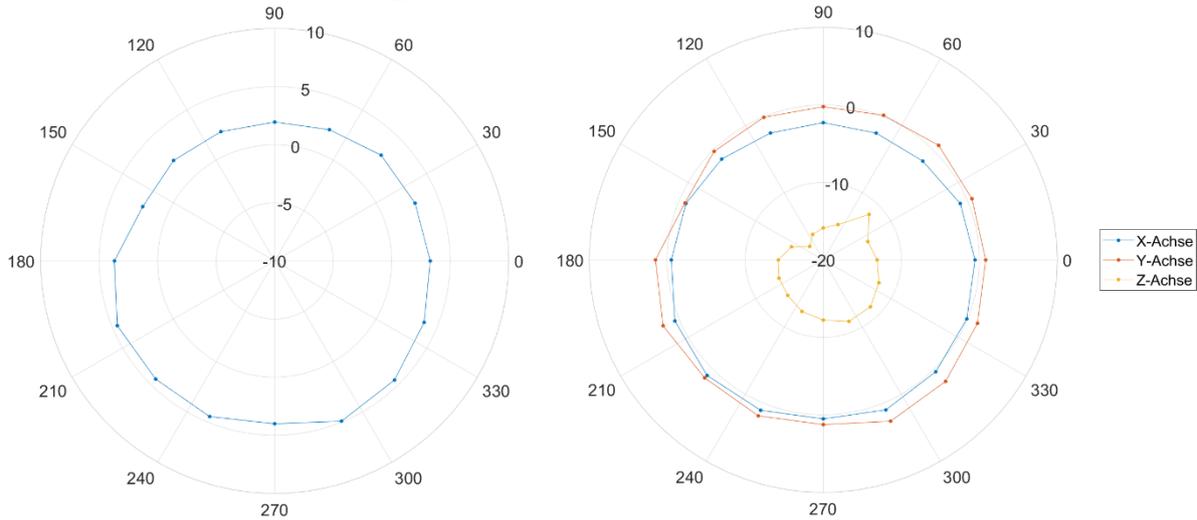


Abbildung 52 - Strahlendiagramm 15,13275 MHz, Summenfeld(links), einzelne Ebenen (rechts)

In Abbildung 52 sind die Strahlendiagramme des Summenfeldes und der verschiedenen Ebenen dargestellt. Auffällig ist das sowohl die Messwerte der X-Ebene als auch die der Y-Ebene auf ähnlich hohem Niveau angesiedelt sind und sich kreisförmig um das WPT-System herum ausbilden. Die Z-Ebene liegt deutlich unter den anderen Messwerten. Sie bewegt sich zwischen $-18 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ und $-12 \text{ dB}\frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Das Summenfeld ist daher größtenteils durch die Messwerte der X-Achse und der Y-Achse geprägt.

5.3. Messergebnisse Kolberg Freifeldmessplatz

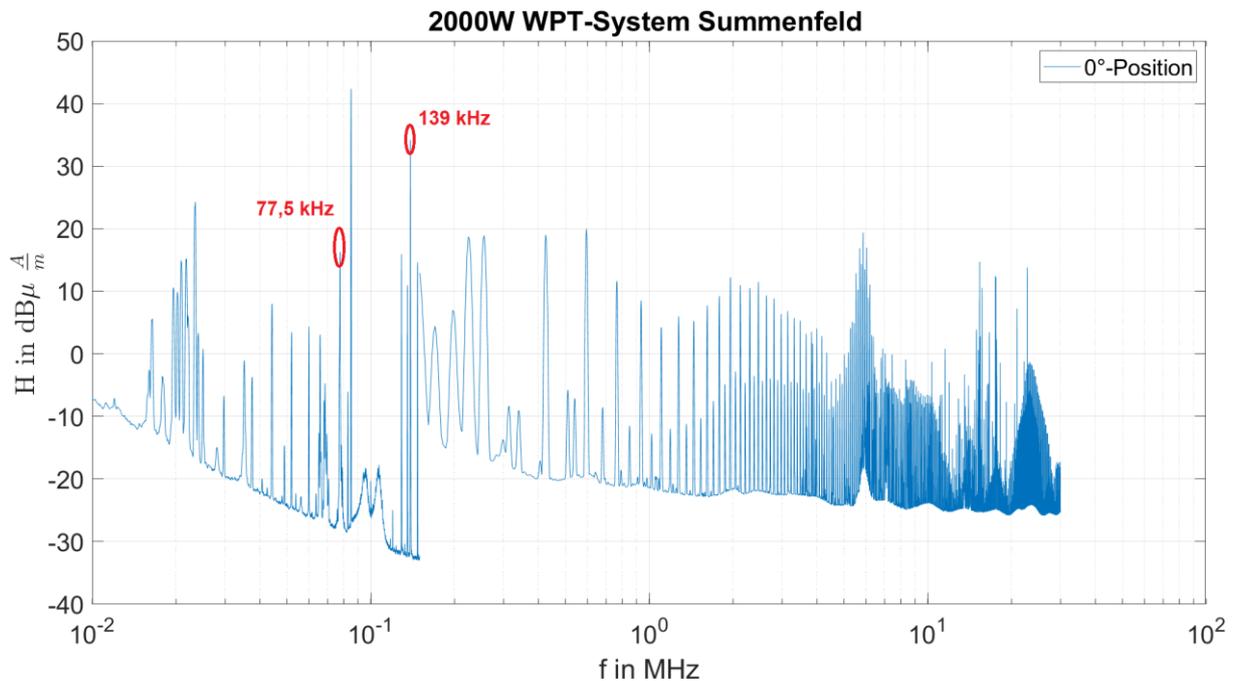


Abbildung 53 - Spektrum des Summenfeldes bei der 0° - Position

In Abb. 53 ist das Summenfeld des WPT-Systems auf dem Freifeldmessplatz in Kolberg dargestellt. Zu den Emissionen des WPT-Systems kommen zusätzlich sporadische Aussendungen und auch Zeitzeichensender. So treten beispielsweise in diesem bei 77,5 kHz und 139 kHz die Zeitzeichensender DCF77 und DCF39 auf. Auch im oberen Frequenzbereich ab 6 MHz bis 24 MHz sind schmalbandige Sender zu erkennen. Diese Aussendungen treten sporadisch auf und sind daher schlecht zuordenbar. Die Aussendungen des WPT-Systems sind jedoch deutlich erkennbar. Die Oberwellen bis 1 MHz nehmen kontinuierlich ab. Im Frequenzbereich von 1 MHz bis 4 MHz steigt der Pegel der Oberwellen auf bis zu $12 \text{ dB} \frac{\mu A}{m}$ an. Eine weitere typische Anhebung der Pegel ist im Frequenzbereich von 6 MHz zu erkennen. Nachfolgend sind in den oberen Frequenzbereichen nur noch schwächere Emissionen zu erkennen. Bei einer Frequenz von 23 MHz tritt nochmals ein größerer Pegel auf. Dieser reicht bis zu $-1 \text{ dB} \frac{\mu A}{m}$.

Für diese Messreihe ist es leider nicht möglich gewesen Strahlendiagramme zu integrieren, da nur 4 Winkelpositionen gemessen wurden. Eine Interpolation, der Messpunkte hätte mögliche Unterschiede in anderen Winkeln nicht aufgezeigt. Daher wurde diese Art der Analyse der Messdaten nicht beachtet.

Die Freifeldmessung ist aufgrund der ungenauen Kenntnisse über die Beschaffenheit des Untergrundes mit Kupfernetz nur bedingt referenzfähig. Mögliche Effekte durch das Kupfernetz

im Boden lassen sich nur schlecht reproduzieren und lassen auch nicht auf reale Betriebsbedingungen auf beispielsweise Parkplätzen zurückschließen.

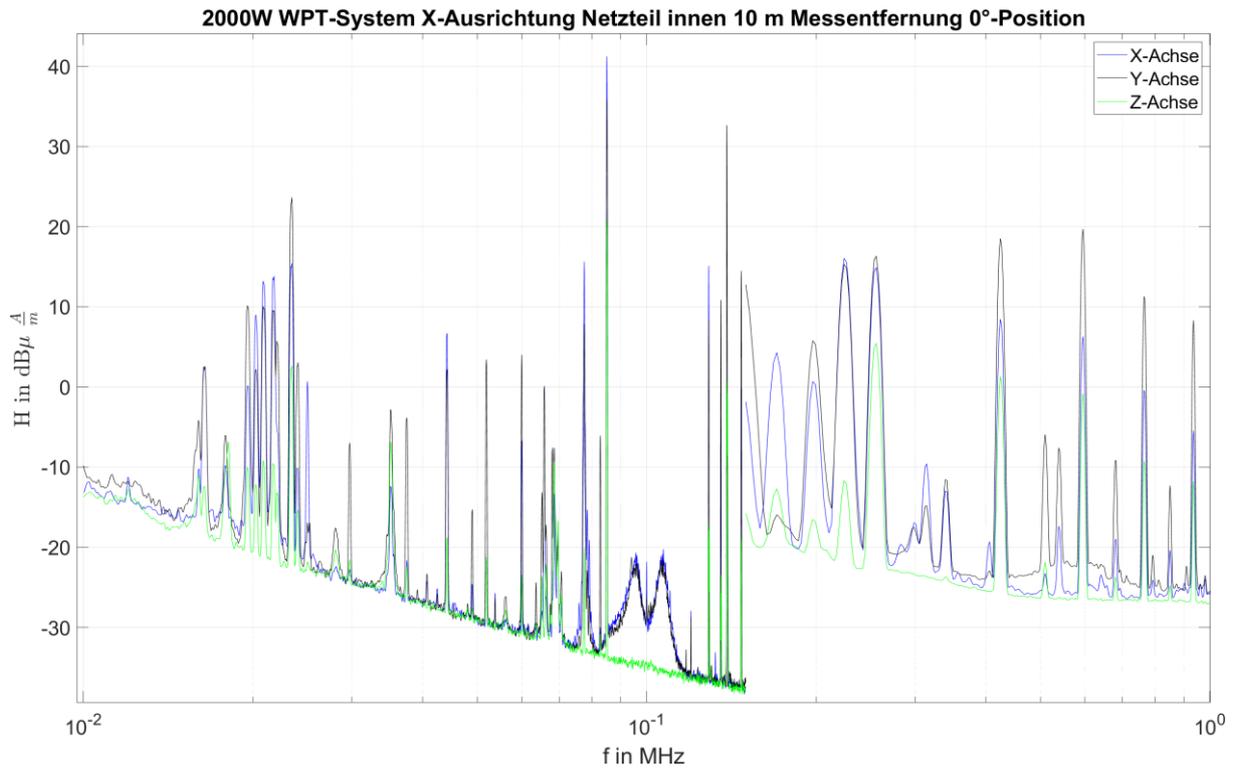


Abbildung 54 - Spektrum von 9 kHz bis 1 MHz

In Abb. 54 sind die einzelnen Ebenen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 1 MHz dargestellt. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass im Freifeld die verschiedenen Ebenen unterschiedlich stark ausgeprägt sind, so überwiegt in der Grundwelle der Anteil der X-Ebene. Die Y-Ebene und Z-Ebene sind schwächer. Bei den nächsthöheren Oberwellen überwiegt jedoch die Y-Ebene. Die Z-Achse ist in diesem Frequenzbereich schwach ausgeprägt.

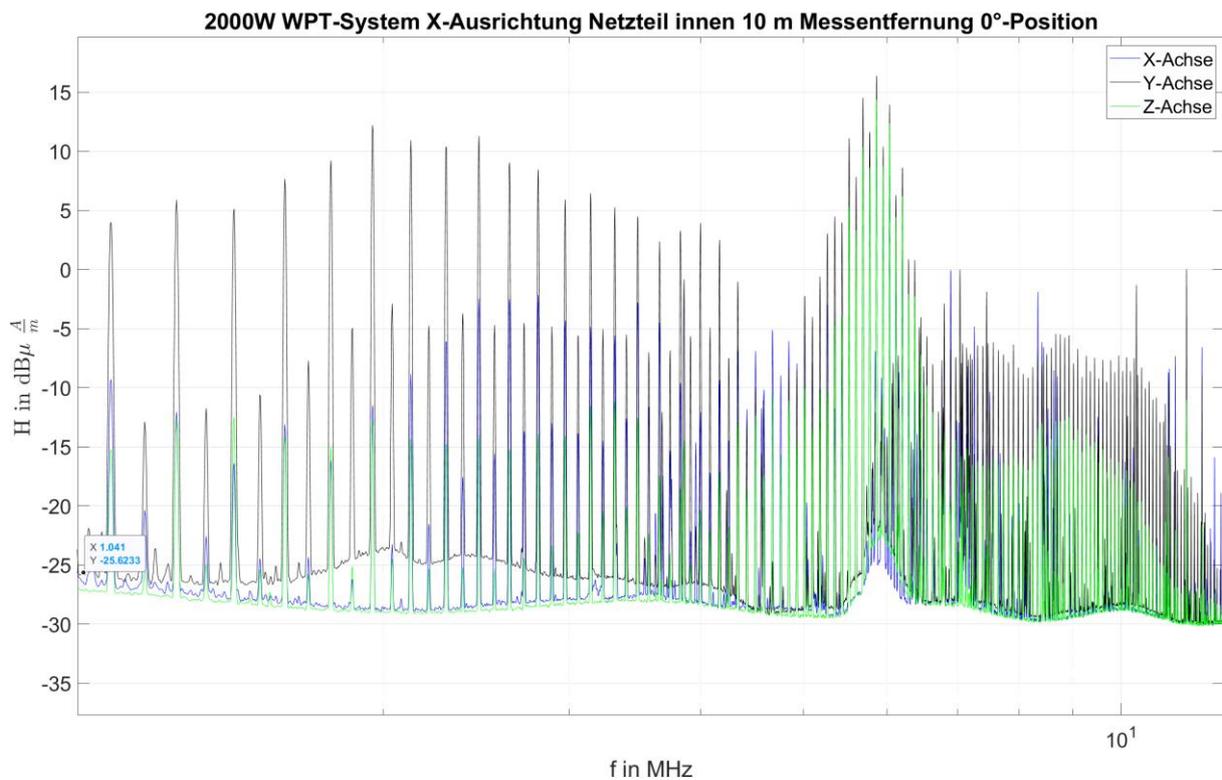


Abbildung 55 - Spektrum von 1 MHz bis 12,5 MHz

In Abbildung 55 ist der Frequenzbereich von 1 MHz bis 12,5 MHz dargestellt. Die gemessene X-Ebene des WPT-Systems fällt in diesem Frequenzbereich deutlich geringer aus. Die Y-Ebene tritt am stärksten auf. Im Bereich um 6 MHz ist ersichtlich, dass die Z-Ebene die X-Ebene auf einigen Frequenzen überragt und fast auf die Pegel der Y-Achse reicht. Im Bereich von 7 MHz bildet sich ebenfalls eine relativ starke Erhebung aus, die durch die Y-Ebene geprägt ist.

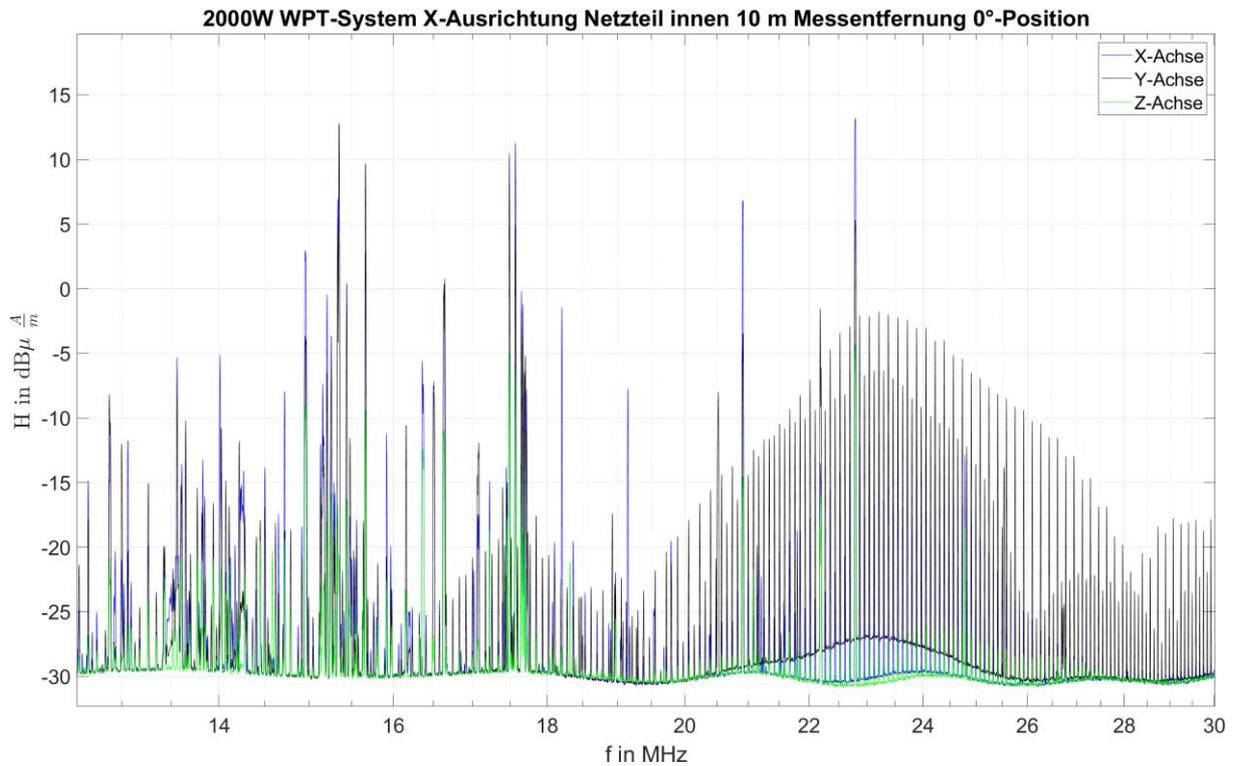


Abbildung 56 - Spektrum von 12,5 MHz bis 30 MHz

In Abbildung 56 sind sämtliche Achsen der Freifeldmessung dargestellt. Im Frequenzbereich von 12,5 MHz bis 19 MHz sind keine Auffälligkeiten bezüglich von Überhöhungen ersichtlich. Ab 19 MHz bis zu einer Frequenz von 29 MHz ist eine deutliche Erhöhung des Pegels auf bis zu $-1,5 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ erkennen. Diese Erhöhung ist vor allem durch die Y-Ebene gekennzeichnet.

6. Vergleich der Messergebnisse

6.1. Absorberhalle Dortmund Absorberhalle Kolberg

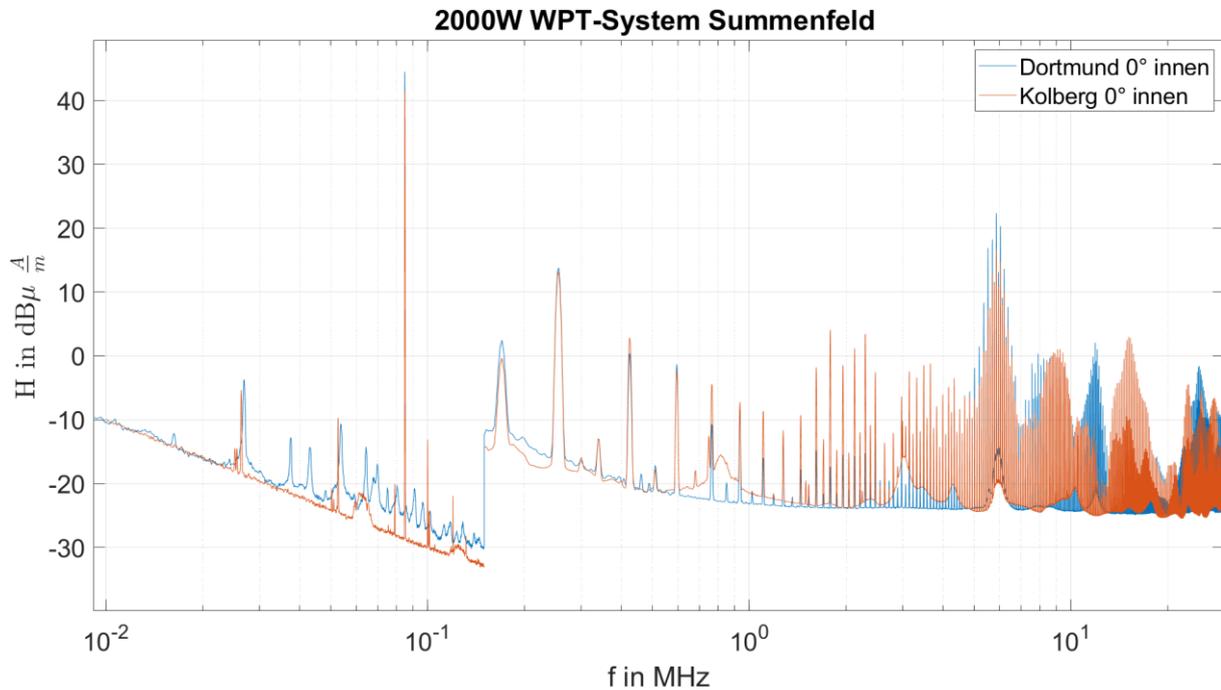


Abbildung 57 - Vergleich der Spektren des Magnetfeldes von 9 kHz bis 30 MHz

In Abb. 57 sind die Spektren aus der Absorberhalle Kolberg und der Absorberhalle Dortmund dargestellt. Besonders im Bereich von 1,5 MHz bis 5 MHz treten deutliche Unterschiede zwischen den Messergebnissen auf. Die dargestellten Spektren beziehen sich hierbei nur auf die 0° -Positionen, sollen aber ebenfalls als Indikator für die anderen Positionen gelten, da die Schwankungen zwischen den einzelnen Positionen nur leicht sind. In den nachfolgenden Abbildungen wird auf die entsprechenden einzelnen Frequenzbereiche eingegangen.

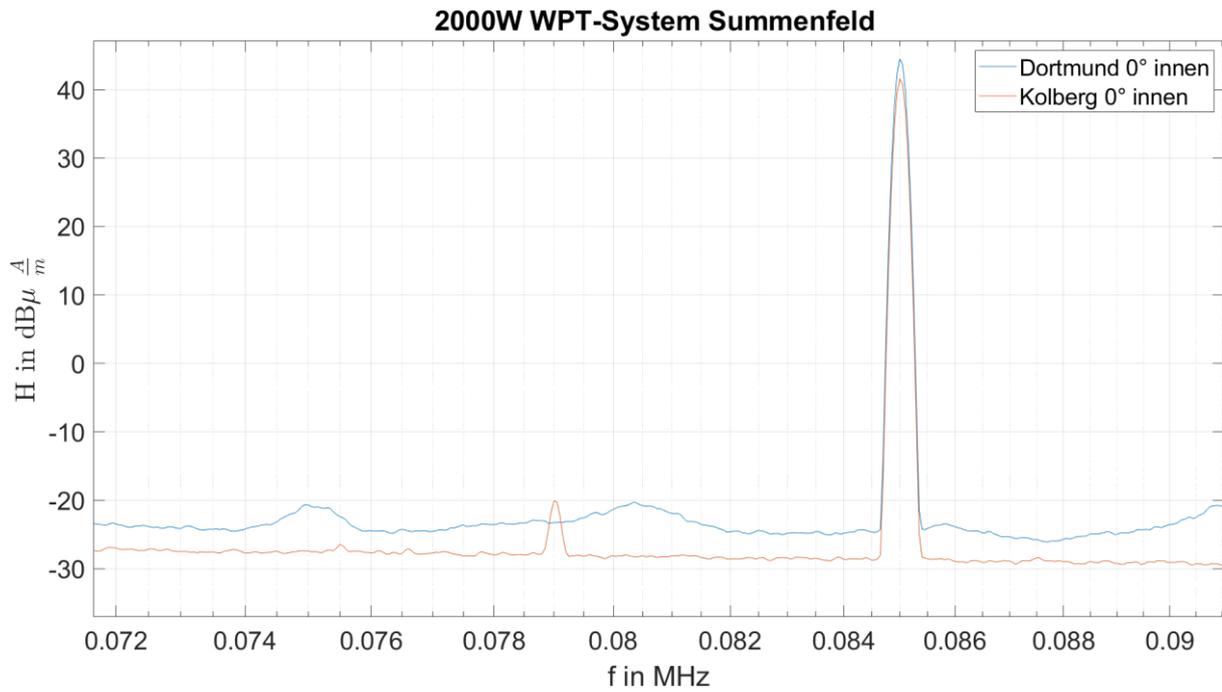


Abbildung 58 - Grundwelle bei 85 kHz

In Abb. 58 ist die Grundwelle des WPT-Systems dargestellt. Der Unterschied zwischen der Absorberhalle in Dortmund und der Absorberhalle in Kolberg beträgt ungefähr 3 dB. In Dortmund hatte die Grundwelle einen Pegel von $44,51 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$ und in Kolberg einen Pegel von $41,59 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$.

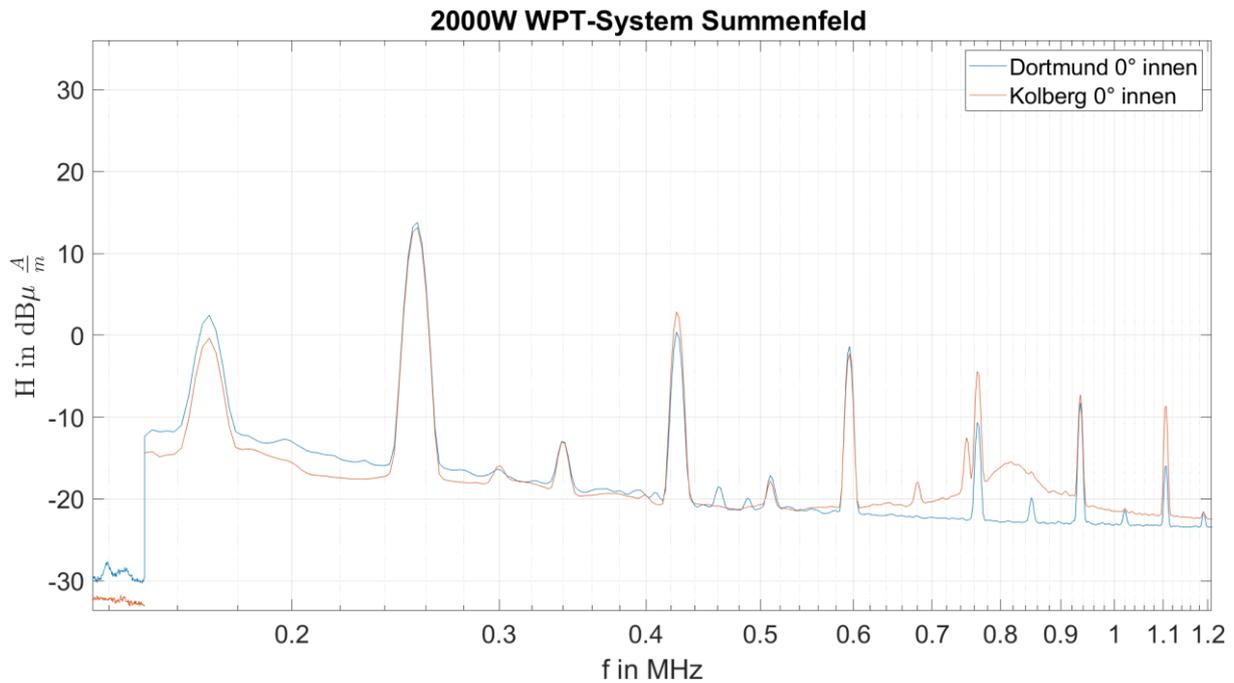


Abbildung 59 - Oberwellen von 150 kHz bis 1,2 MHz

In Abbildung 59 ist der Frequenzbereich von 150 kHz bis 1,2 MHz dargestellt. Auch hier sind leichte Unterschiede zu erkennen. Deutliche Unterschiede in der magnetischen Feldstärke treten zwischen der 8. Oberwelle bei 765 kHz und der 12. Oberwelle bei 1,105 MHz auf. Die Unterschiede belaufen sich bei der 8. Oberwelle auf 6 dB. Bei der 12. Oberwelle beträgt der Unterschied 8 dB.

Wie in Abb. 59 zu erkennen sind die Unterschiede der anderen Oberwellen nicht sonderlich stark ausgeprägt. Der größte Unterschied zwischen den anderen dargestellten Oberwellen liegt 2,9 dB bei der ersten Oberwelle (170 kHz). Die anderen Oberwellen liegen nahezu deckungsgleich übereinander.

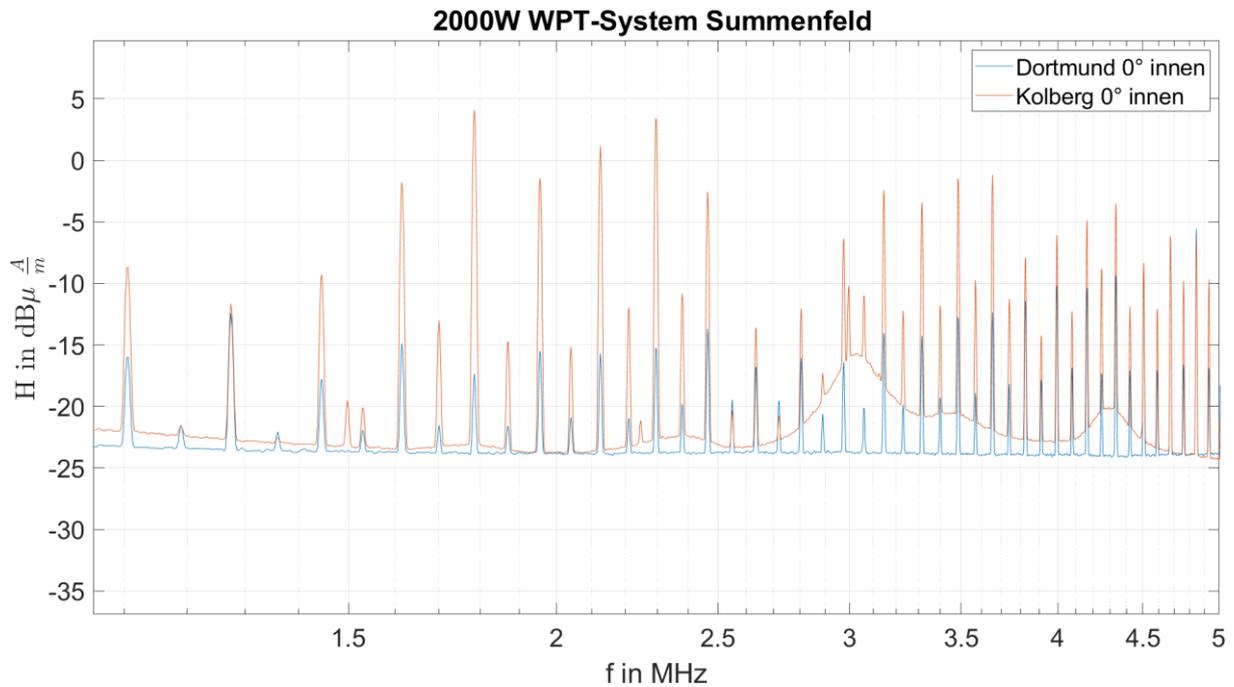


Abbildung 60 - Frequenzbereich von 1,1 MHz bis 5 MHz

Große Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen treten in dem Frequenzbereich von 1,4 MHz bis 5 MHz auf. Der größte Unterschied in der 0°- Position tritt in diesem Frequenzbereich bei einer Frequenz von 1,78575 MHz auf. Dies entspricht der 20. Oberwelle. Die Messung in Kolberg ergab einen Wert von $4,11 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Im Gegensatz dazu wurden in Dortmund $-17,35 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ gemessen. Dies entspricht einem Unterschied von 21,46 dB.

Auch bei den anderen Frequenzen treten Unterschiede in dieser Größenordnung auf. Dabei geht hervor, dass sämtliche Messwerte aus Kolberg deutlich über denen aus Dortmund liegen.

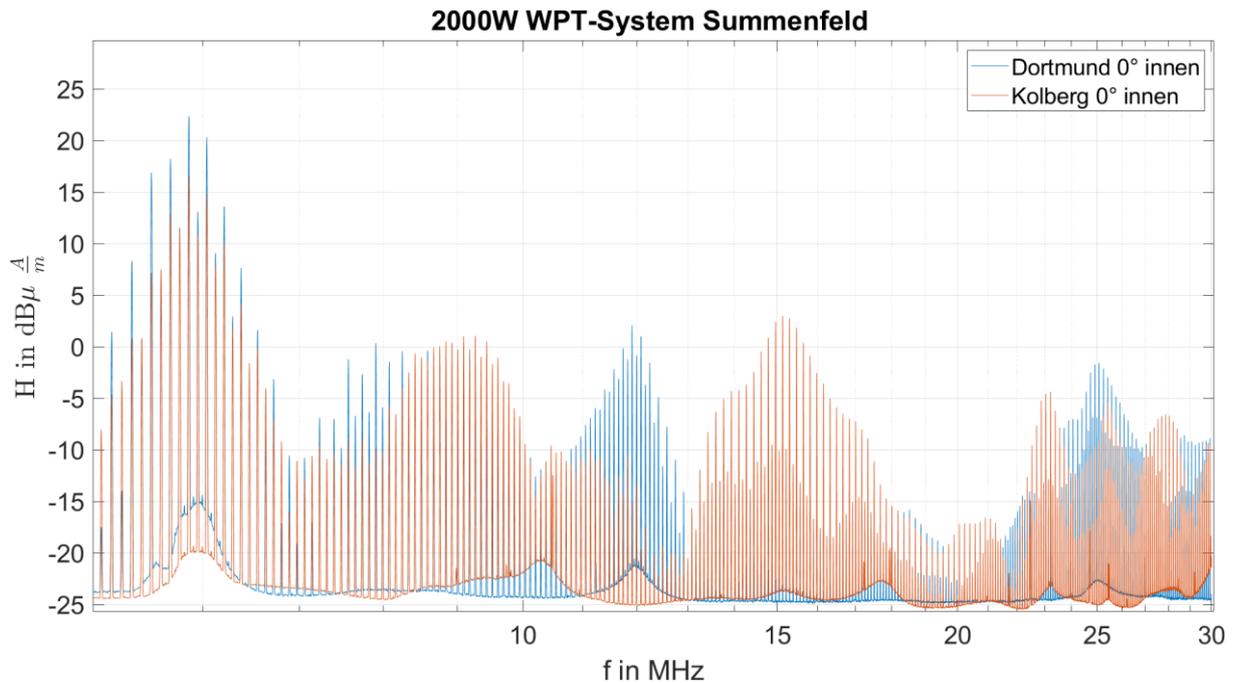


Abbildung 61 - Frequenzbereich von 5 MHz bis 30 MHz

In Abb. 61 ist der Frequenzbereich von 5 MHz bis 30 MHz zu erkennen. In beiden Absorberhallen tritt bei 6 MHz eine Pegelanhebung auf. In diesem Bereich von 5 MHz bis 7 MHz ist zu erkennen, dass die Messwerte aus der Absorberhalle Kolberg geringer ausfallen als die Messwerte der Absorberhalle Dortmund. Die Messwerte weisen Unterschiede von ungefähr 8 dB auf. In höheren Frequenzbereichen ab 7 MHz sind die Unterschiede zwischen den Absorberhallen ebenfalls sehr groß ausgefallen. Im Bereich von 7 MHz bis 10 MHz treten in Kolberg als auch in Dortmund Pegel um etwa $0 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$ auf. In Kolberg befindet sich der Höhepunkt dieser Anhebung bei etwa 9 MHz. In Dortmund hingegen liegt der Höhepunkt bereits bei einer Frequenz von ungefähr 8 MHz.

Auch im Frequenzbereich von 10 MHz bis 20 MHz existieren Unterschiede zwischen beiden Spektren. In Kolberg liegt der Höhepunkt der Aussendungen bei etwa 15 MHz mit einem Pegel von ungefähr $2,5 \text{ dB} \frac{\mu\text{A}}{\text{m}}$. Kolberg weist eine ähnlich hohe Anhebung bereits bei einer Frequenz von 12 MHz auf.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Strahlendiagramme für die Grundwelle, die 2. Oberwelle und der 20. Oberwelle miteinander verglichen.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu\frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 85 kHz

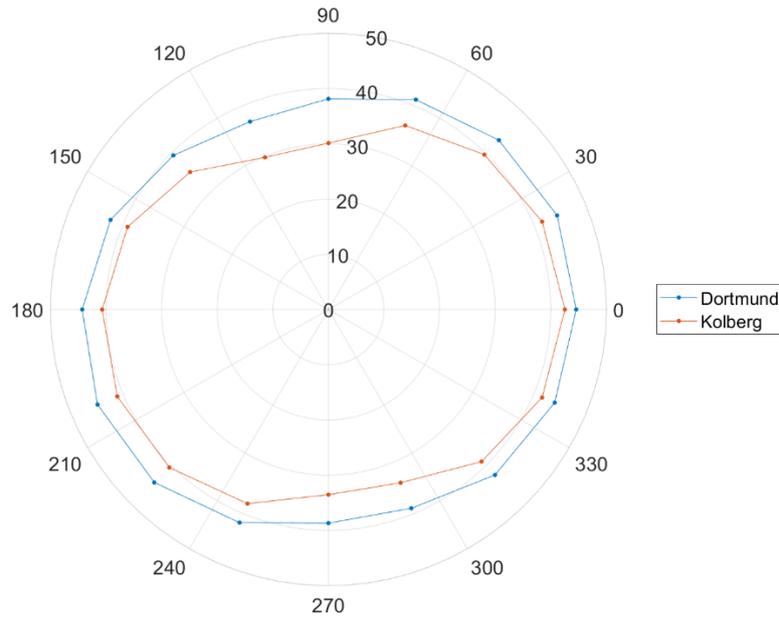


Abbildung 62 - Vergleich Summenfeld Strahlendiagramm 85 kHz

Das Strahlendiagramm in Abb. 62 zeigt, dass leichte Unterschiede in der Grundwelle auftreten. Die Formen der Strahlendiagramme des Summenfeldes sind nahezu gleich. Die größten Unterschiede treten bei 90° und $112,5^\circ$ auf. Dort betragen die Differenzen ungefähr 8 dB.

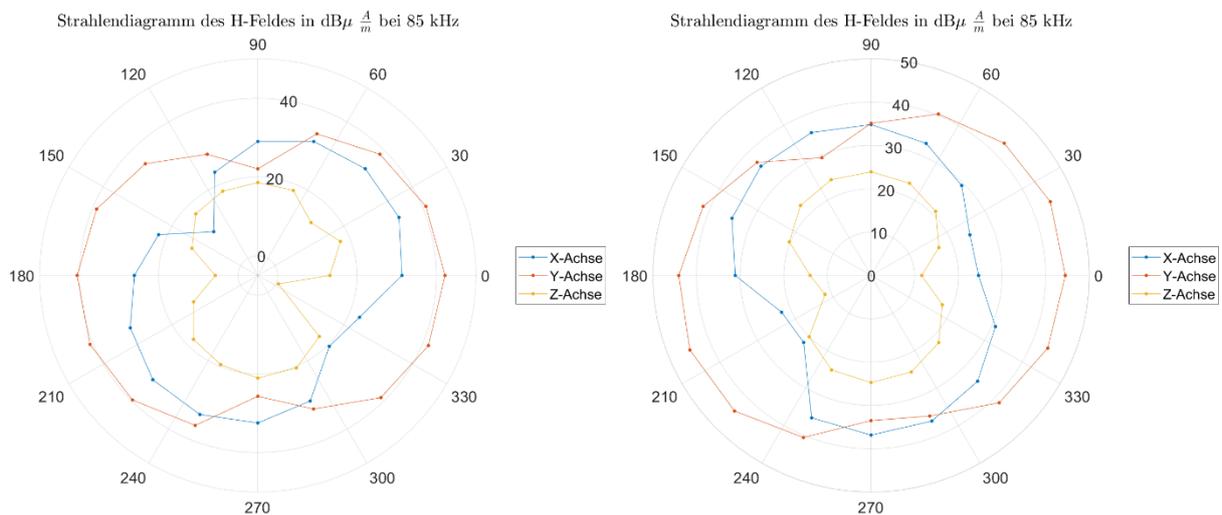


Abbildung 63 - Vergleich Strahlendiagramme der X, Y und Z-Achse; links Kolberg; rechts Dortmund

In Abb. 63 sind die Strahlendiagramme bei 85 kHz zu erkennen. Die Form der Y-Ebene aus Kolberg stimmt mit der Form der Y-Ebene aus Dortmund grundsätzlich überein. Der größte Unterschied zwischen den Ebenen stellt die Höhe der Pegel dar.

Bei der X-Achse zeigen sich stärkere Unterschiede auf. Die X-Ebene ist um fast 90° gedreht zu der Ebene in Dortmund.

Die Z-Achse weist keine bis geringe Unterschiede auf.

Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in $\text{dB}\mu \frac{\text{A}}{\text{m}}$ bei 255,75 kHz

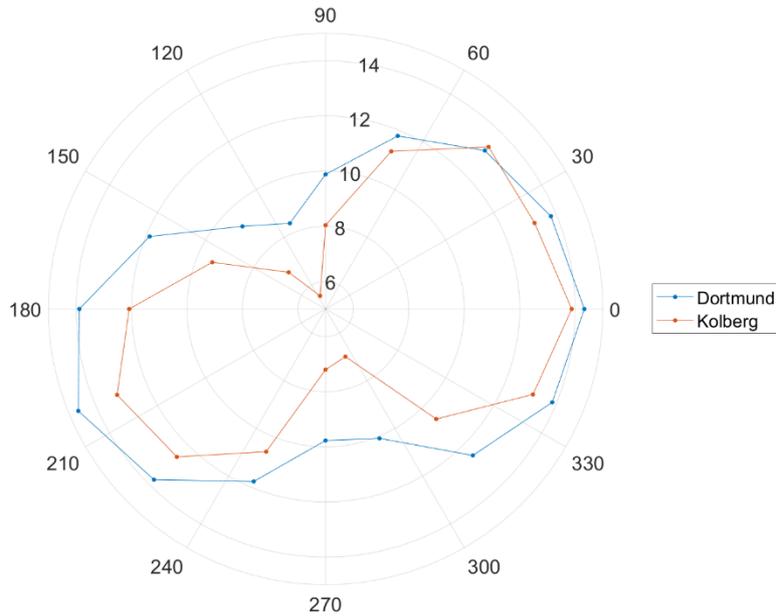


Abbildung 64 - Vergleich Summenfeld Strahlendiagramm 255,75 kHz

In Abb. 64 ist das Summenfeld der 2. Oberwelle dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Formen grundsätzlich übereinstimmen. Die Höhe der Pegel weichen voneinander ab. Vor allem in dem Bereich von 90° über 180° bis 270° . Dort betragen die Unterschiede bis zu 3 dB.

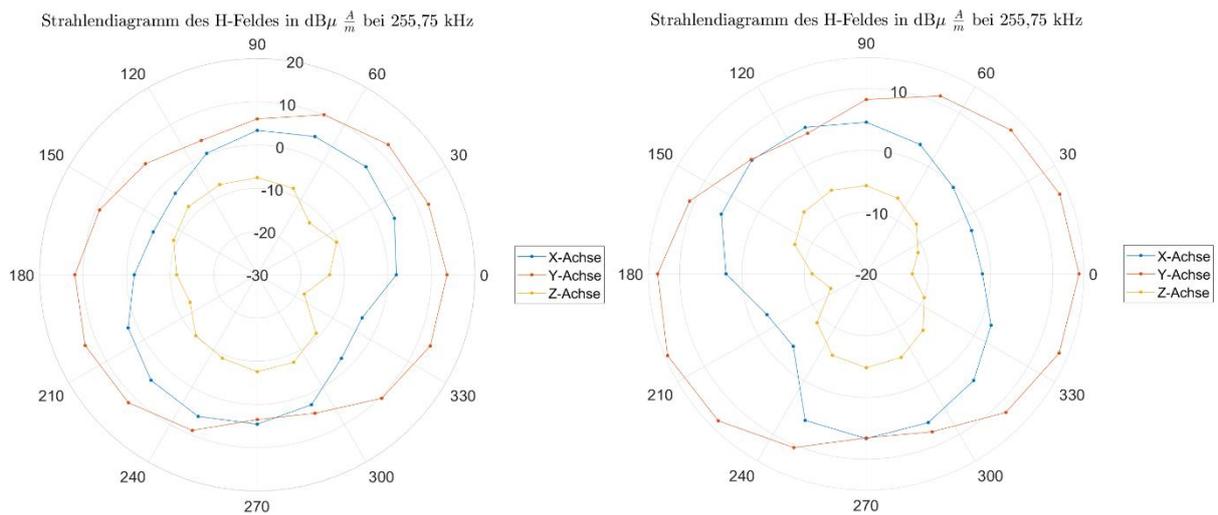


Abbildung 65 - Vergleich Strahlendiagramme der X, Y und Z-Achse; links Kolberg; rechts Dortmund

Bei der Betrachtung der einzelnen Ebenen in Abb. 65 bei einer Frequenz von 255,75 kHz ist auffällig, dass ebenfalls die X-Ebene um 90° gedreht ist. Die Pegel befinden sich jedoch auf annähernd gleichem Niveau. In der Z-Ebene und der Y-Ebene sind keine Auffälligkeiten zu erkennen. Die Pegel und die Ausrichtungen bleiben auf gleichem Niveau.

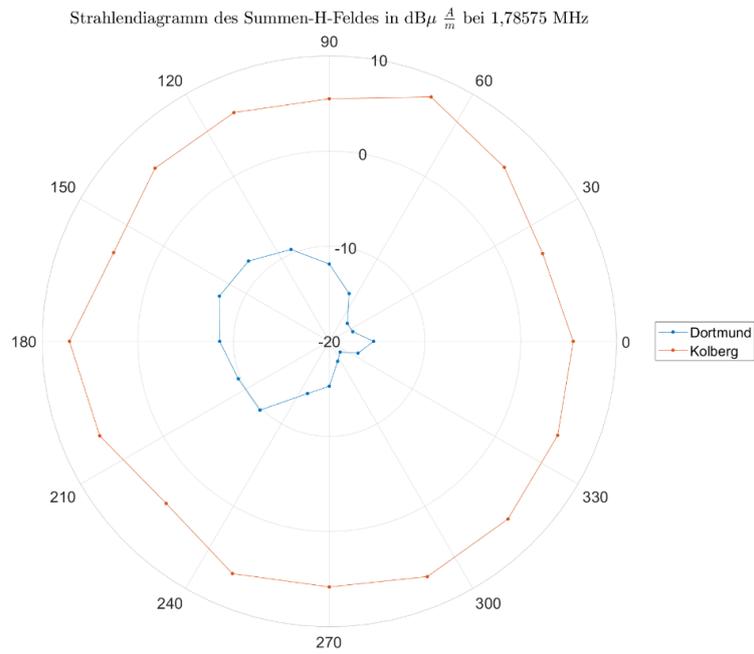


Abbildung 66 - Vergleich Summenfeld Strahlendiagramm 1,78575 MHz

Da die 20.Oberwelle den größten Unterschied im Spektrum aufweist, soll für diese Frequenz separat ein Strahlendiagramm zur näheren Analyse dieser Frequenz angegeben werden. Im Summenfeld ist ersichtlich, dass die Pegel bei dieser Frequenz sich um bis zu 23 dB unterscheiden.

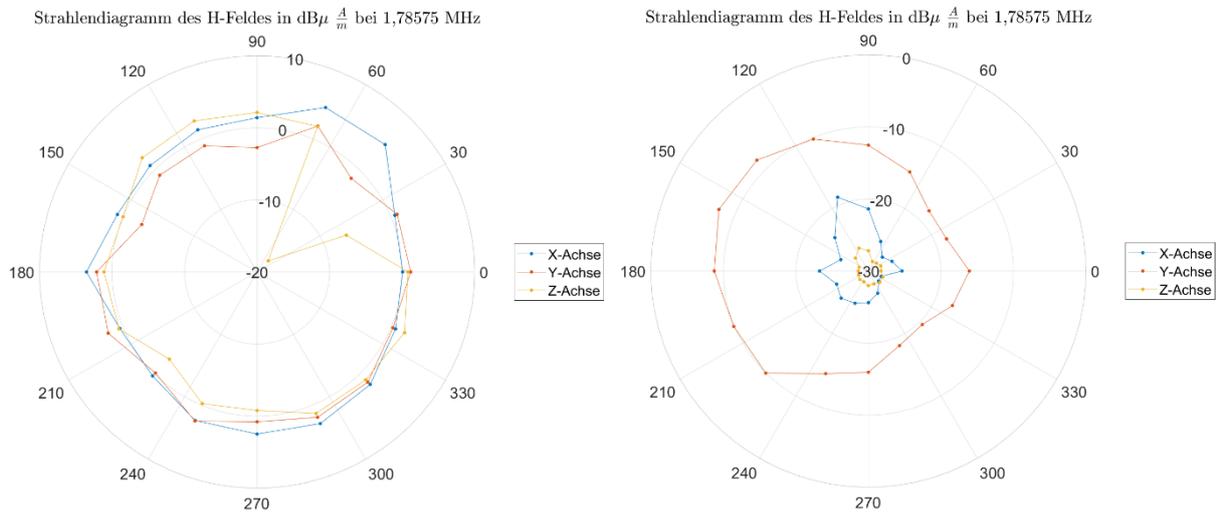


Abbildung 67 - Vergleich Strahlendiagramme der X,Y und Z-Achse; links Kolberg; rechts Dortmund

In Abbildung 67 ist das Strahlendiagramm der einzelnen Ebenen für die Frequenz von 1,78575 MHz dargestellt. Es sind Unterschiede zwischen allen Ebenen zu erkennen. Die einzelnen Ebenen aus den Messergebnissen aus der Absorberhalle Kolberg weisen sowohl einen regelmäßigen als auch einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Ebenen auf. So sind bei dieser Frequenz in der Absorberhalle Dortmund die Pegel auf einem maximalen Niveau von $-8 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$. Die Y-Ebene ist hierbei am stärksten in Richtung $157,5^\circ$ ausgeprägt. Die X-Ebene weist einen sehr geringen Pegel auf und ist im $112,5^\circ$ Winkel am stärksten. Die Z-Ebene befindet sich nahe am Grundrauschen des Systems und ist daher vernachlässigbar klein.

In der Absorberhalle Kolberg hingegen wurden Pegel von bis zu maximal $5 \text{ dB } \frac{\mu A}{m}$ bei dieser Frequenz gemessen. Die Ebenen untereinander weisen außerdem keine großen Unterschiede auf.

6.2. Vergleich des Freifeldmessplatz Kolberg mit den Absorberhallen

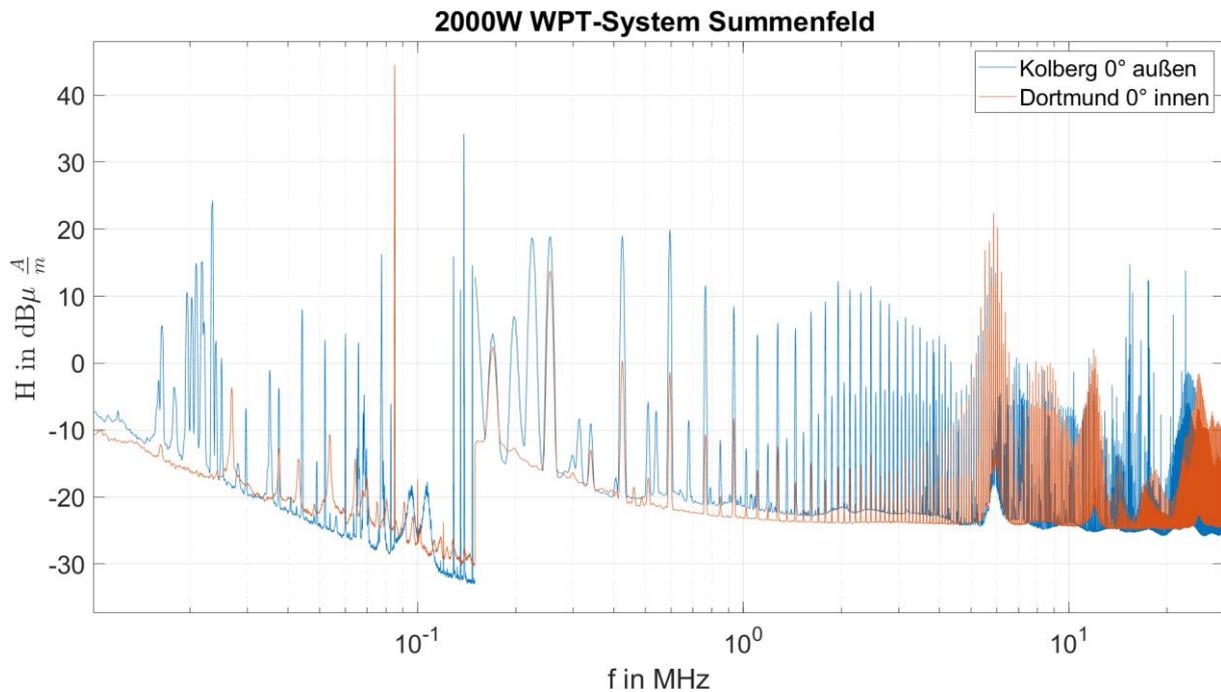


Abbildung 68 - Vergleich der Spektren des Magnetfeldes von 9 kHz bis 30 MHz

In Abbildung 68 sind die Spektren der Frequenzen von der Freifeldmessung und der Messung in der Absorberhalle Dortmund übereinandergelegt. Es zeigen sich ebenfalls deutliche Unterschiede in dem Frequenzbereich von 1,4 MHz bis 5 MHz.

Die Unterschiede zwischen den Messwerten sind jedoch schwer einordbar, da keine Daten über die Anbindung des Kupfernetzes unter dem Freifeldmessplatz vorliegen und somit keine konkreten Aussagen dazu getroffen werden können.

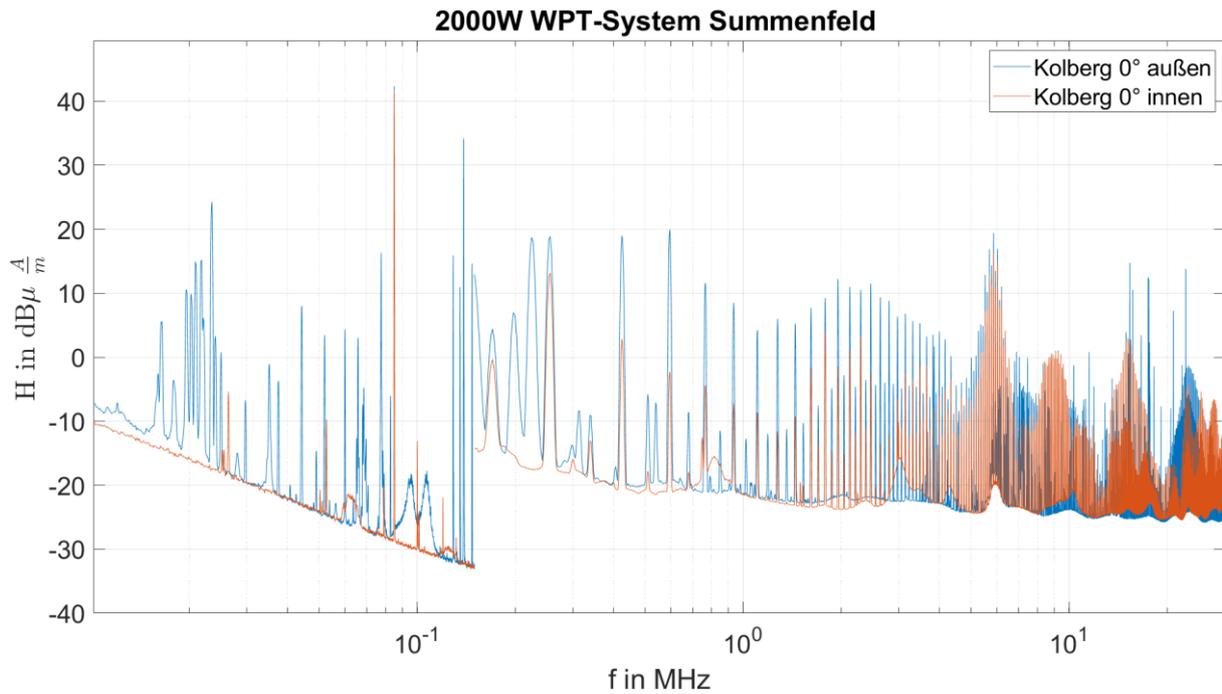


Abbildung 69 - Vergleich der Spektren des Magnetfeldes von 9 kHz bis 30 MHz

Auch zwischen den Messungen der Absorberhalle in Kolberg und dem Freifeldmessplatz in Kolberg treten deutliche Unterschiede auf. Sowohl in den ersten Oberwellen als auch im Frequenzbereich von 1,4 MHz bis 5 MHz. Die Resonanzen im Bereich von 6 MHz befinden sich auf ähnlich hohem Niveau.

6.3. Wiederholungsmessungen in der Absorberhalle Dortmund

Da in den vorherigen Messungen deutliche Unterschiede zwischen den Absorberhallen festgestellt wurden und eine mögliche Fehlerquelle durch die verschiedenen Antennenpositionen in der Absorberhalle ausgeschlossen werden sollte, wurden Nachmessungen mit verschiedenen Antennenpositionen in 10 m Messentfernung durchgeführt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Antennenposition keinen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse ergeben hat. Wie in Abb. 70 zu erkennen, sind die Ergebnisse zwischen einem Aufbau der Antenne in einer Ecke der Absorberhalle und einem direktem Aufbau deckungsgleich.

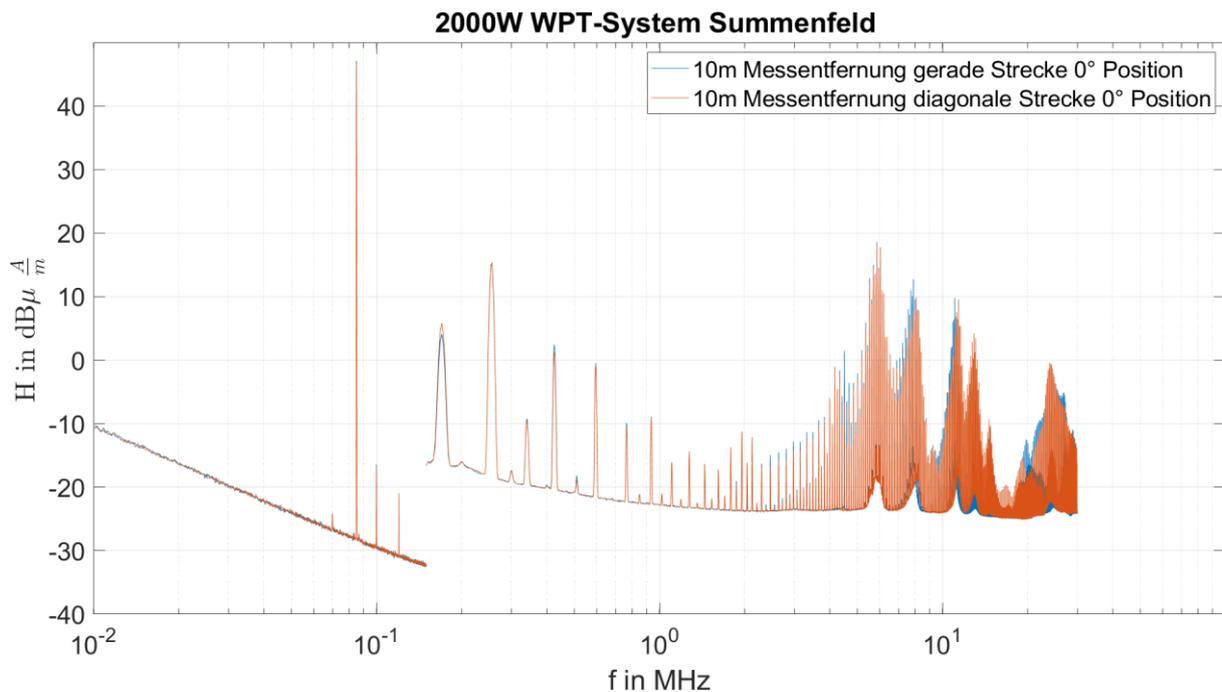


Abbildung 70 - Vergleich der verschiedenen Antennenpositionen in der Absorberhalle Dortmund

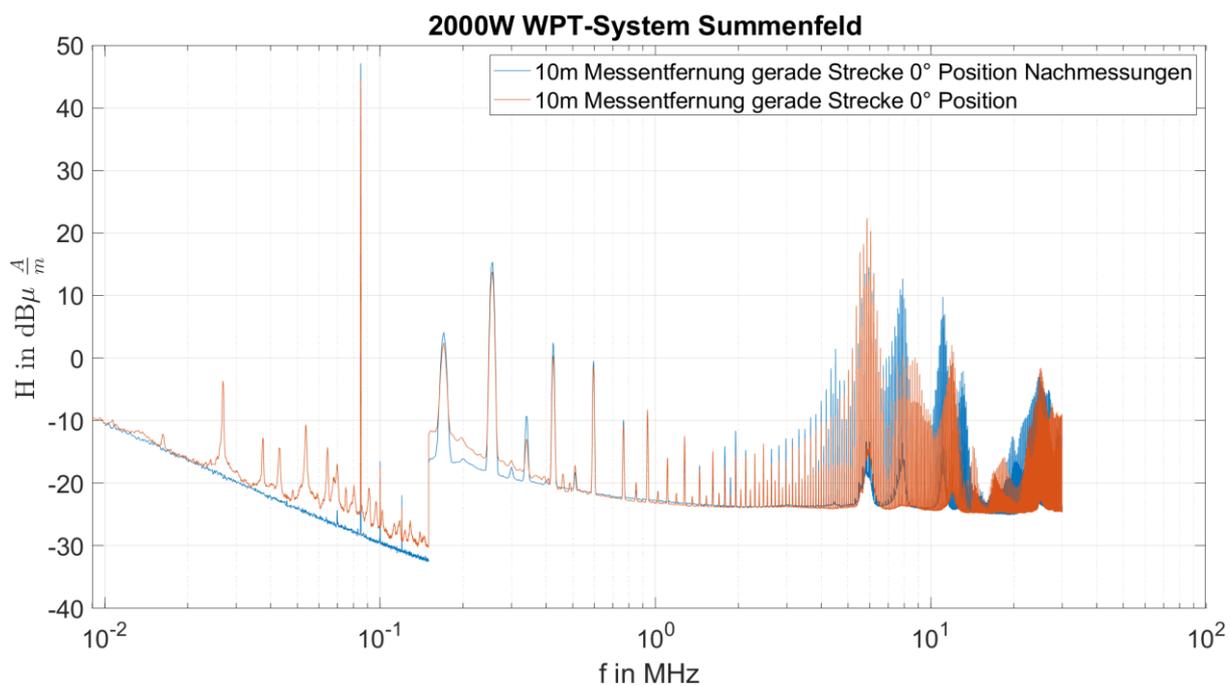


Abbildung 71 - Vergleich der Messergebnisse des Magnetfeldes im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz

Abb. 71 zeigt die Messergebnisse zwischen der Nachmessung und den vorherig aufgenommenen Messungen in der Absorberhalle Dortmund in der 0° Position. Im unteren Frequenzbereich bis 6 MHz stimmen die Pegel größtenteils überein. In den Bereichen bei 8 MHz und 12 MHz sind jedoch auch Unterschiede zu erkennen.

Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist daher in einem Frequenzbereich von 1,4 MHz bis 6 MHz durchaus gegeben. In höheren Frequenzbereichen gilt dies nur teilweise.

7. Fazit

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Messumgebungen auf ein nicht EMV-optimiertes induktives Ladesystem untersucht. Dabei wurden aufgrund von Nahfeld-Effekten elektrisches und magnetisches Feld getrennt voneinander betrachtet bzw. mit unterschiedlichen Antennen gemessen. Das induktive Ladesystem wurde weitergehend auf die Winkelabhängigkeiten und damit verbundene Schwankungen in den Feldstärken betrachtet.

Grundsätzlich geht aus den Messergebnissen hervor, dass die Messumgebung die Messergebnisse des magnetischen Feldes als auch des elektrischen Feldes in diesem Frequenzbereich erheblich beeinflusst. Sowohl zwischen den Absorberhallen als auch zu dem Freifeldmessplatz treten Unterschiede auf.

Eine Verfälschung der Messergebnisse durch das Testsystem können weitestgehend ausgeschlossen werden. Sowohl der Arbeitspunkt als auch der Testaufbau waren in beiden Absorberhallen gleich eingestellt bzw. gleich aufgestellt.

Mögliche Unterschiede, die mit der Positionierung der Messantenne in einer Ecke der Absorberhalle Kolberg zusammenhängen, konnten durch Nachmessungen in der Absorberhalle Dortmund weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Unterschiede in den Messergebnissen zwischen den Absorberhallen fallen deutlich größer aus.

Die mögliche Ursache zwischen den Messergebnissen der beiden Absorberhallen kann daher auf ihre baulichen Strukturen und Größen begrenzt werden. Verifiziert sind die Absorberhallen aktuell erst ab einer Frequenz von 30 MHz. Dies ist auf die Absorberelemente an den Wänden zurückzuführen, die ab dieser Frequenz erst eine ausreichend große Reflektionsdämpfung besitzen. Durch Messungen in Absorberhallen mit Ferritkacheln, die bereits in tieferen Frequenzbereichen dämpfende Wirkung besitzen, wäre es möglich weitere Vergleichswerte zu erhalten, die diese Hypothese stützen können.

Es lässt sich jedoch festhalten, dass gerade im sehr niedrigen Frequenzbereich von 9 kHz bis 1 MHz die Messwerte beider Absorberhallen nahezu übereinstimmen.

Durch Feldsimulationen wäre es möglich den Ursprung der Unterschiede in den Frequenzbereichen von 1,4 MHz bis 5 MHz durch isolierte Simulationsaufbauten genauer zu untersuchen und mögliche Resonanzeffekte zu identifizieren.

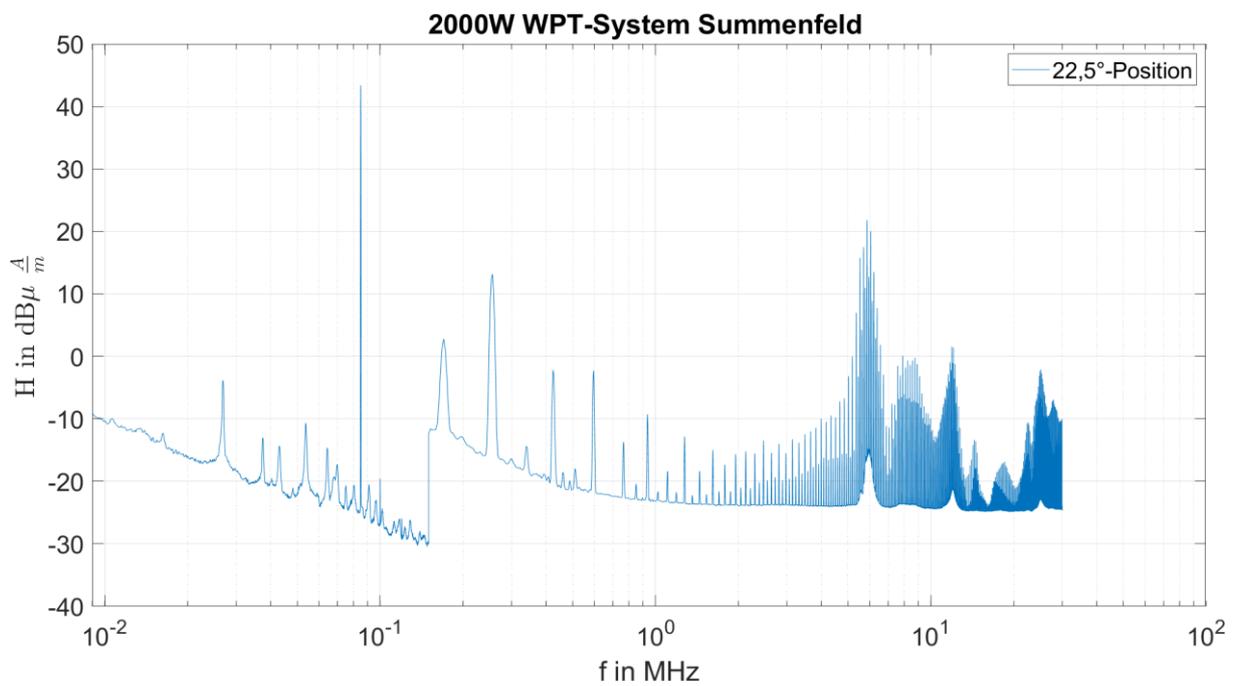
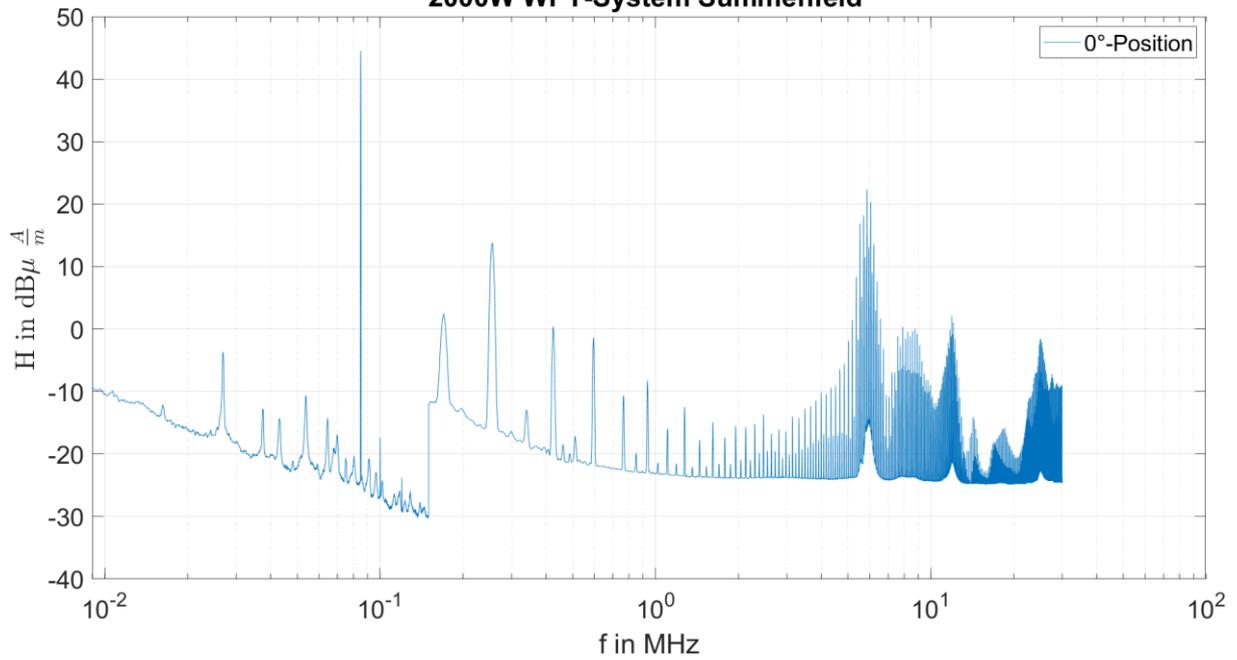
Literaturverzeichnis

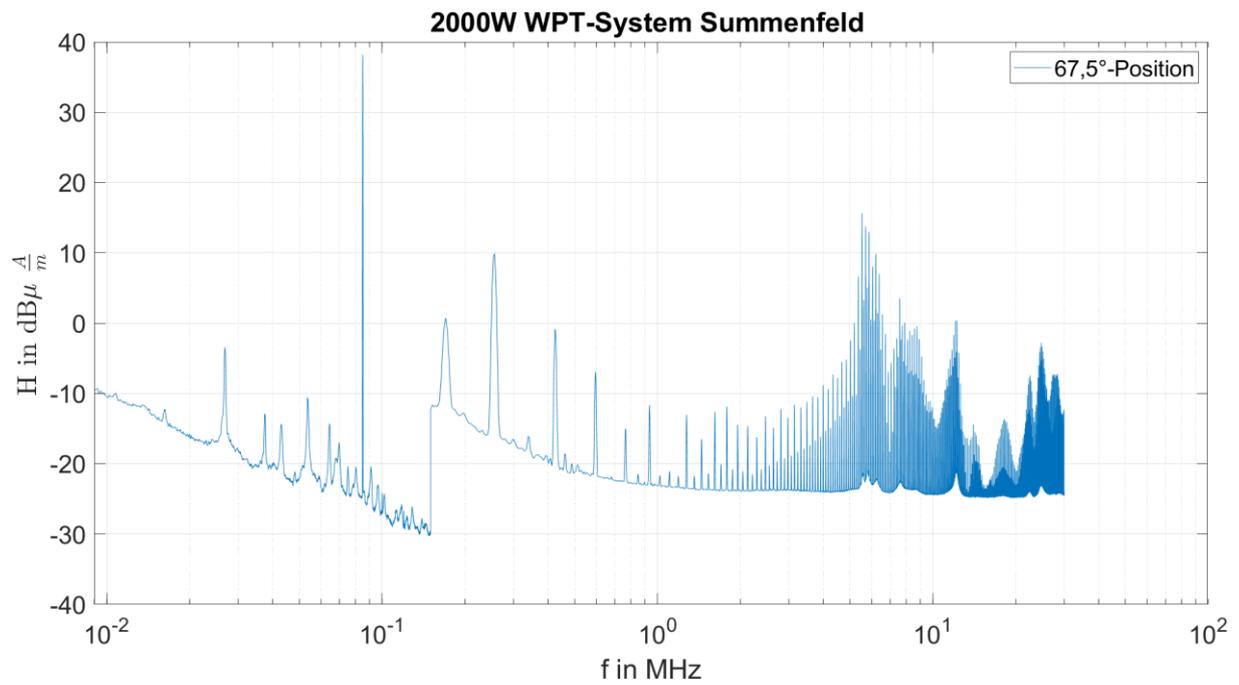
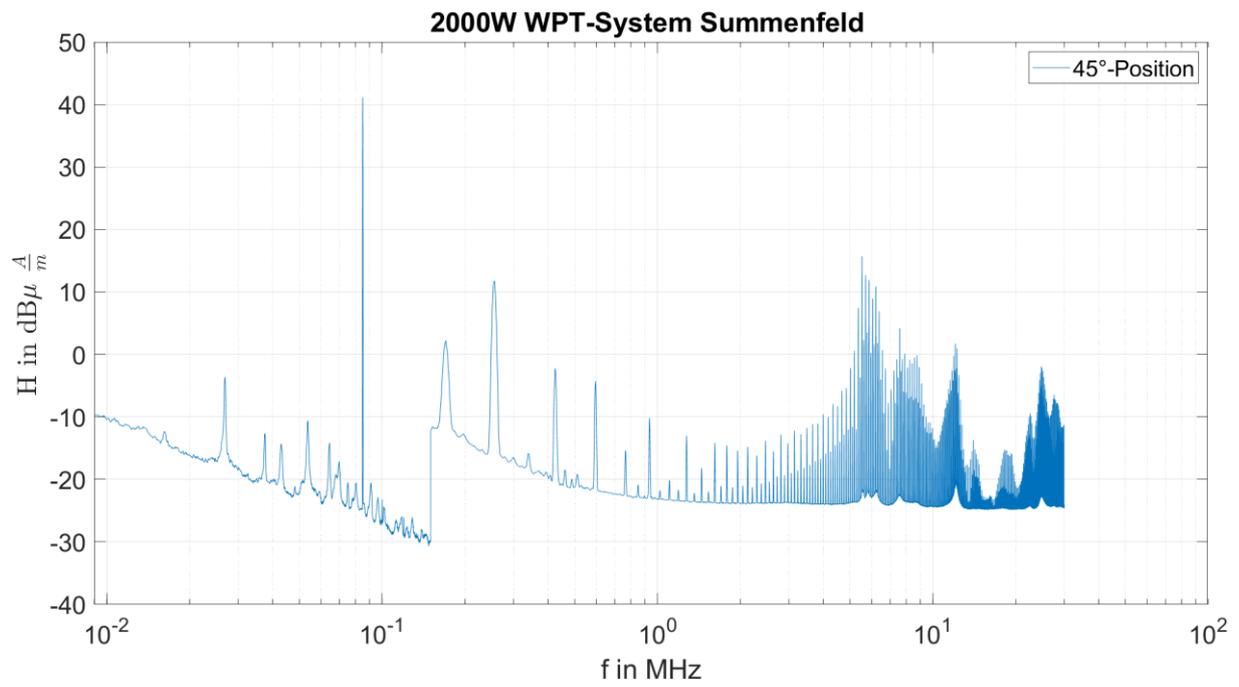
- [1] Bundesnetzagentur, Bundesnetzagentur, 2022. [Online]. Available: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Allgemeines/DieBundesnetzagentur/AufgabenStruktur/start.html>. [Zugriff am 22 04 2022].
- [2] „Statista,“ September 2021. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>.
- [3] Brusa Elektronik AG, Brusa Elektronik AG, [Online]. Available: <https://www.brusa.biz/portfolio/inductive-charging/>. [Zugriff am 31 03 2022].
- [4] ifak, „ifak.eu,“ Mai 2021. [Online]. Available: <https://www.ifak.eu/de/projekte/empowered>.
- [5] O. Simon, J. Mahlein, A. Hoppe, S. Speck und S. Schlömer, „Inductive Norm Test by Exchange in Real Operation (Interop),“ 2017, pp. 36-46.
- [6] O. Simon, J. Mahlein, A. Hoppe, S. Speck und P. Schlömer, „INTEROP Inductive Norm Test by Exchange in Real Operation,“ 2017, p. 54.
- [7] O. Simon, J. Mahlein, A. Hoppe, S. Speck und P. Schlömer. [Online]. Available: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-11/INTEROP_Abschlussbericht%20mit%20Anlagen_klein.pdf.
- [8] [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Verbraucher/ElektromagnetischeFelder/Anzeige_Afu/Erlaeuterung_der_Bewertungsverfahren_nach_BEMFV.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [9] G. M. Djuknic. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field#/media/File:FarNearFields-USP-4998112-1.svg. [Zugriff am 25 10 2021].
- [10] [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03209/BSI-TR-03209-1.pdf;jsessionid=585C58B33AD6F2A12C967B3901496290.1_cid341?__blob=publicationFile&v=1.
- [11] [Online]. Available: <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k1512.pdf>. [Zugriff am 19 04 2022].
- [12] A. Krischke, „Rothammels Antennenbuch,“ Baunatal, 2010, p. 329.
- [13] A. Krischke, „Rothammels Antennenbuch,“ Baunatal, DARC-Verlag, 2010, pp. 332-351.
- [14] C. Rauscher, „Grundlagen der Spektrumanalyse,“ pp. 29-31.

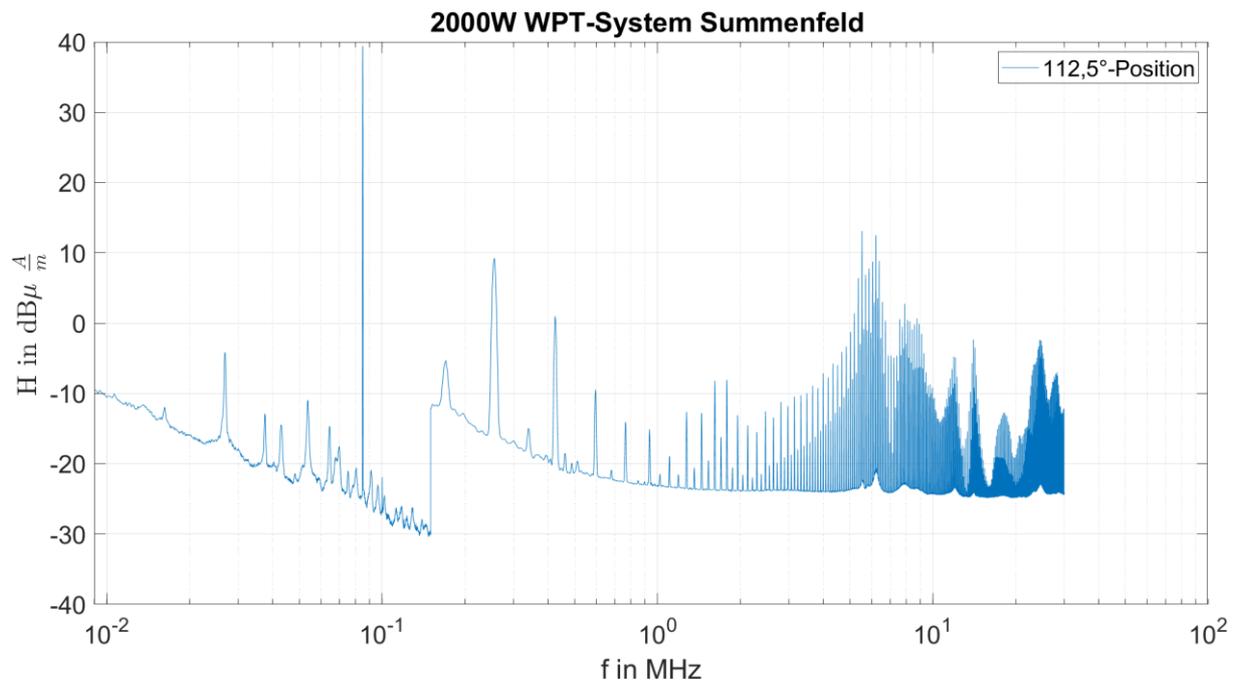
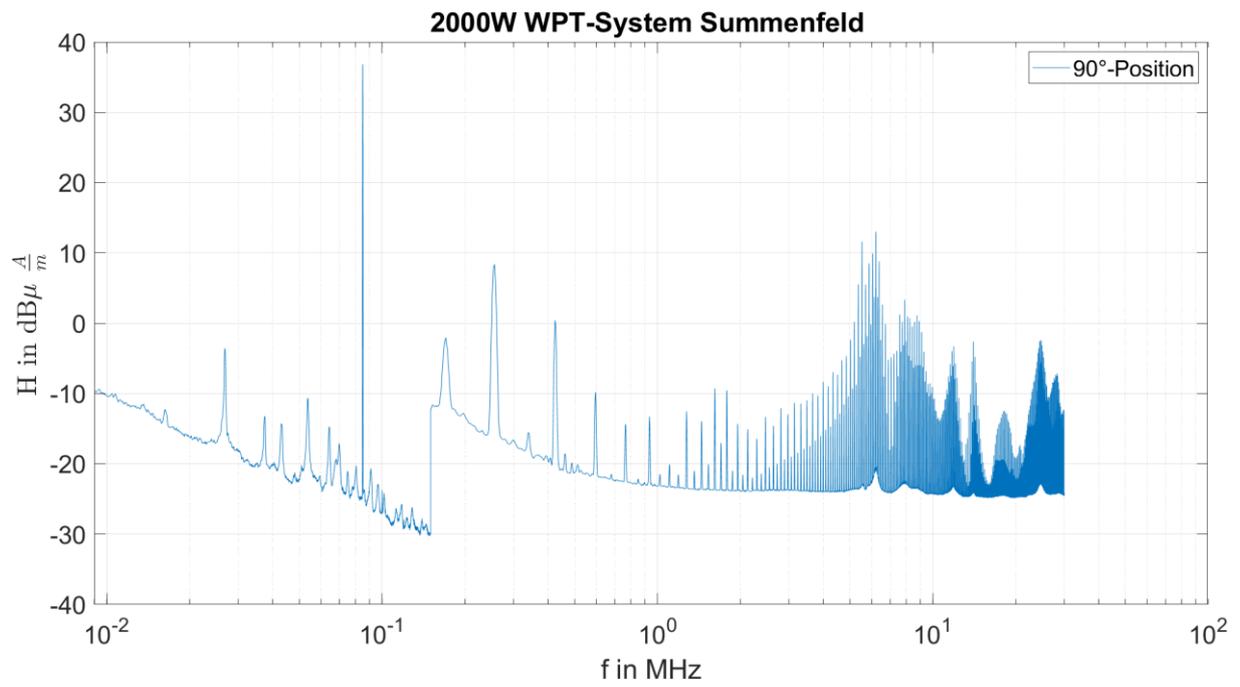
- [15] C. Rauscher, „Grundlagen der Spektrumanalyse,“ pp. 64-69.
- [16] D. Gurney. [Online]. Available: https://www.ednasia.com/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/Tek_Quasi-peak_Fig1_1200x537.png. [Zugriff am 25 10 2021].
- [17] [Online]. Available: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/CREE%20Power/KIT8020CRD8FF1217P-1_UM.pdf. [Zugriff am 29 03 2022].
- [18] S. Jeschke, M. Maarleveld, J. Baerenfaenger und H. Hirsch, „Development of a Passive Impedance network for Modeling Electric Vehicle traction Batteries for EMI Measurements“.
- [19] „Schwarzbeck,“ [Online]. Available: <http://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/m9243.pdf>. [Zugriff am 04 05 2022].
- [20] S. Jeschke, J. Baerenfaenger , M. Kleinen und M. Olbrich, „EMV Absicherung von induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge-normative und messtechnische Herausforderungen“.

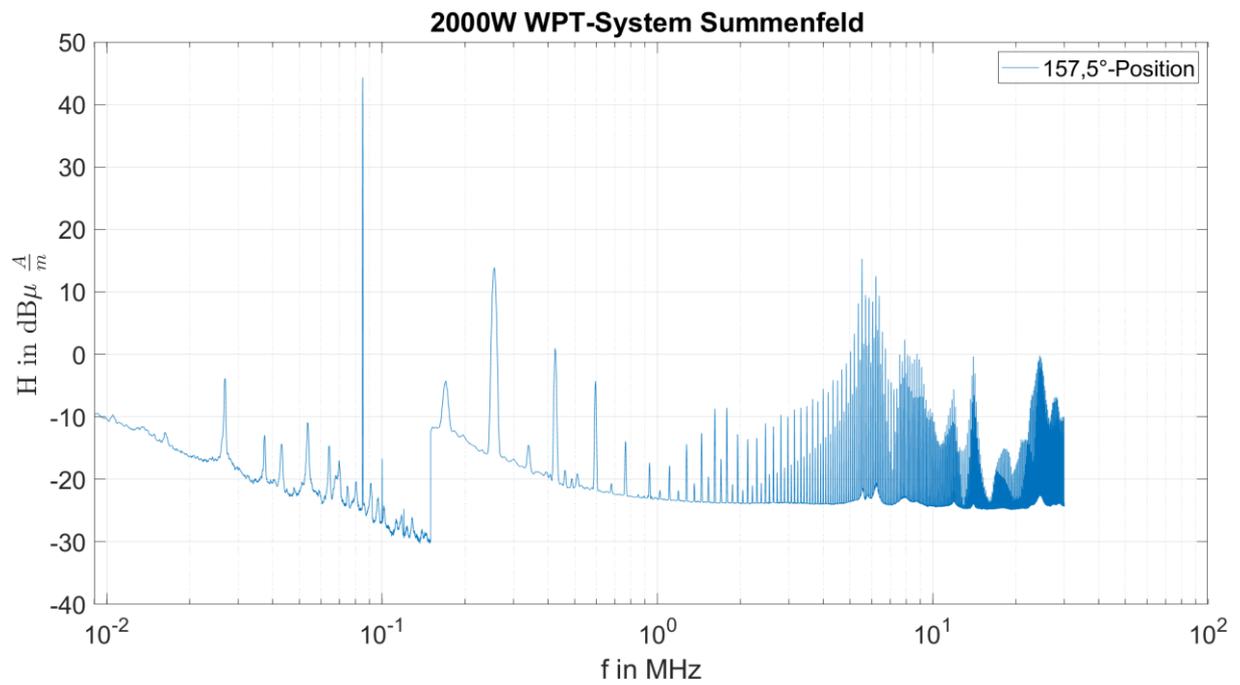
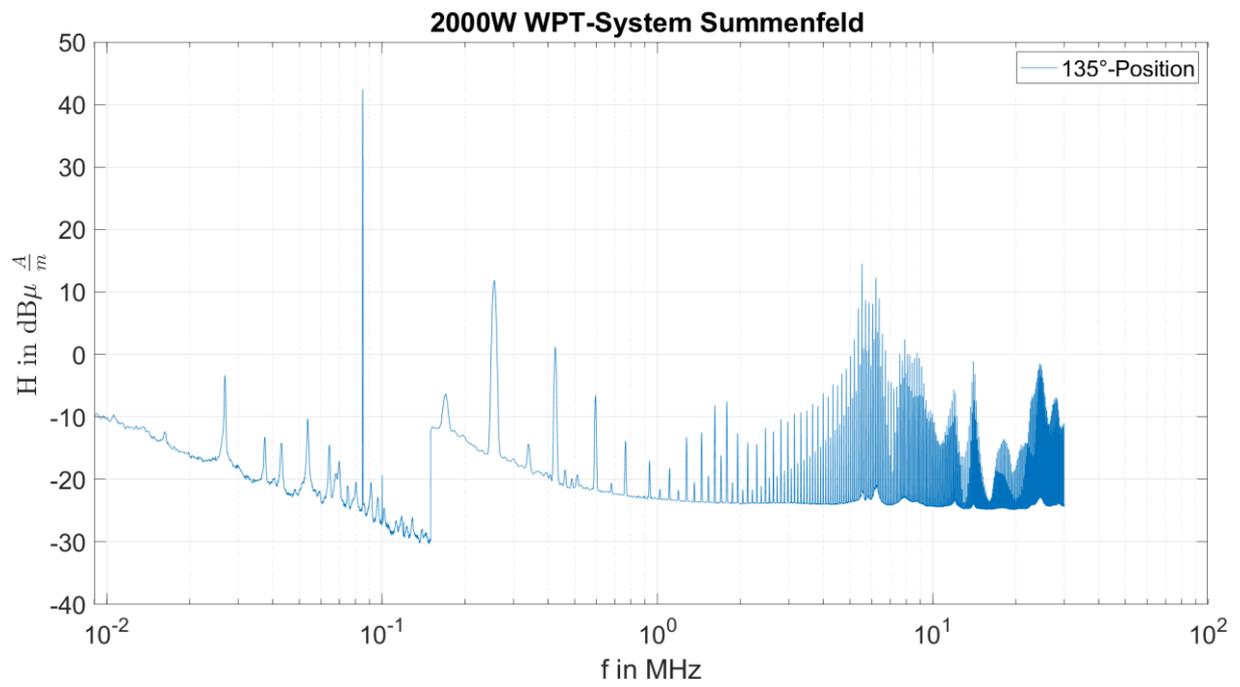
Anhang

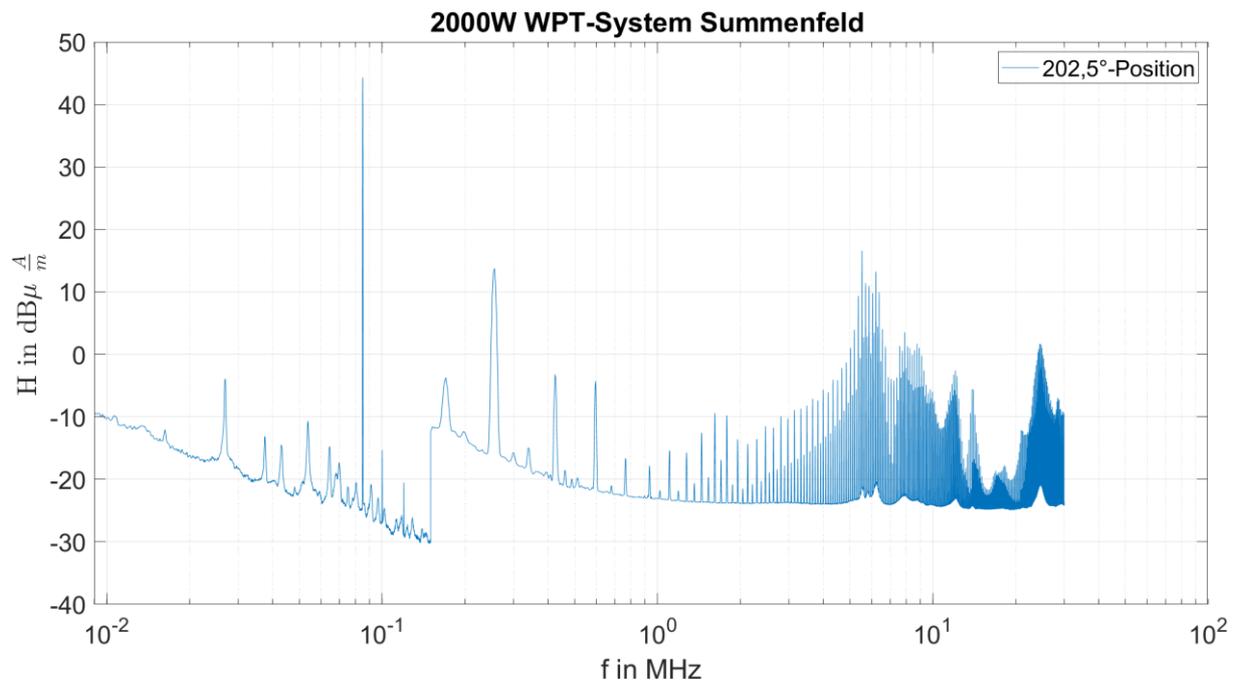
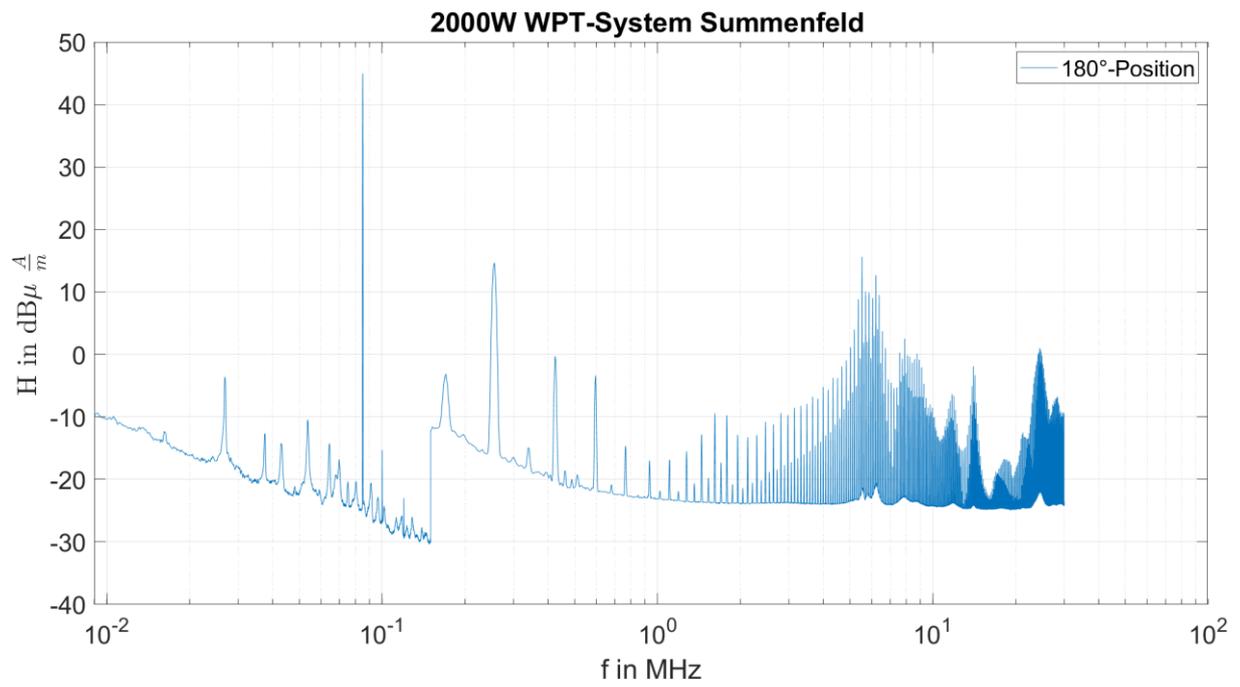
Messdaten Absorberhalle Dortmund magnetisches Feld 2000W WPT-System Summenfeld

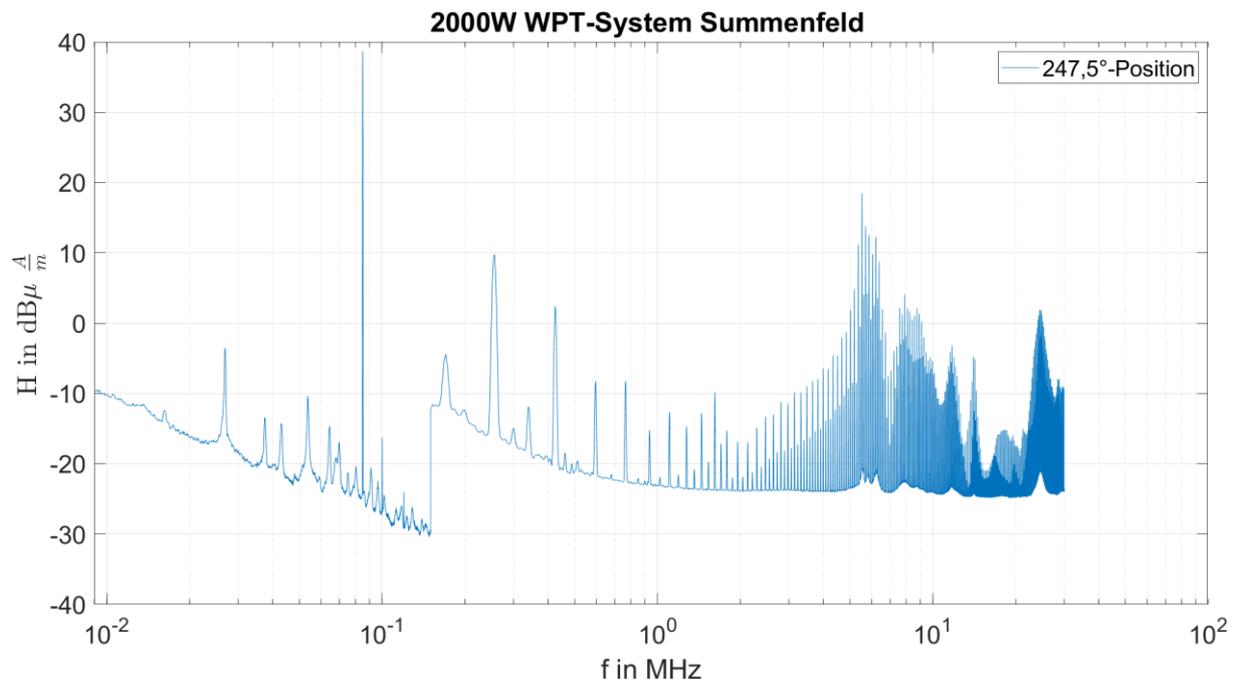
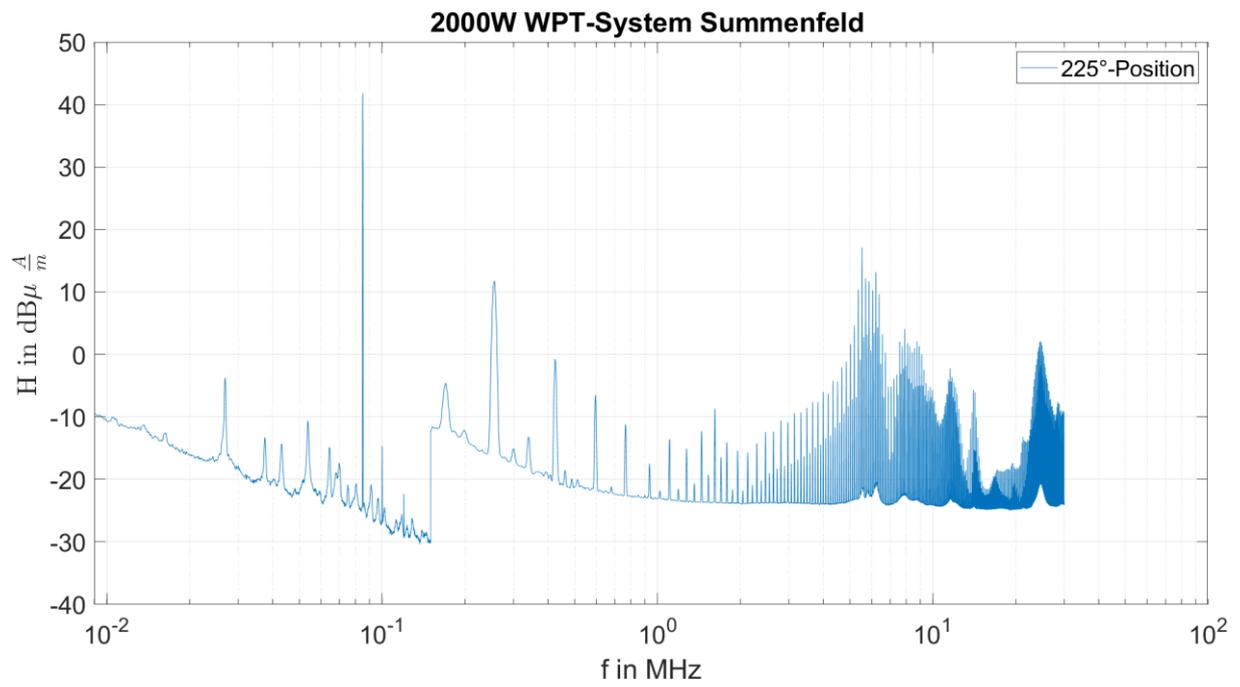


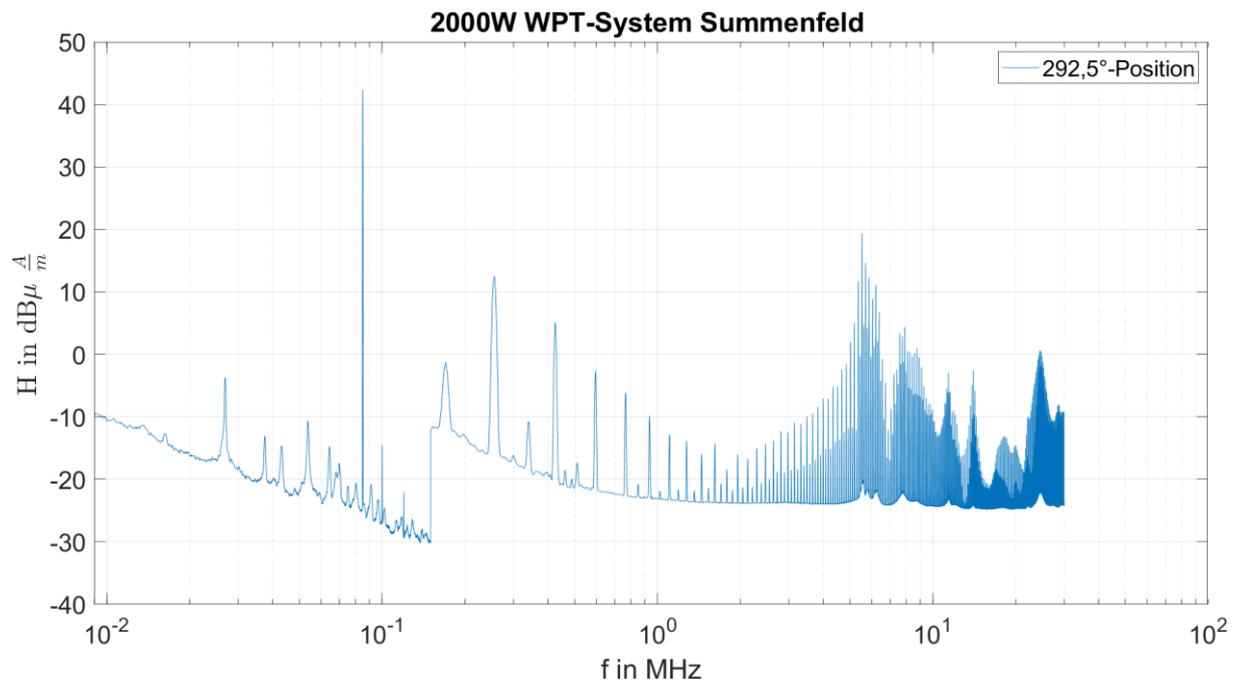
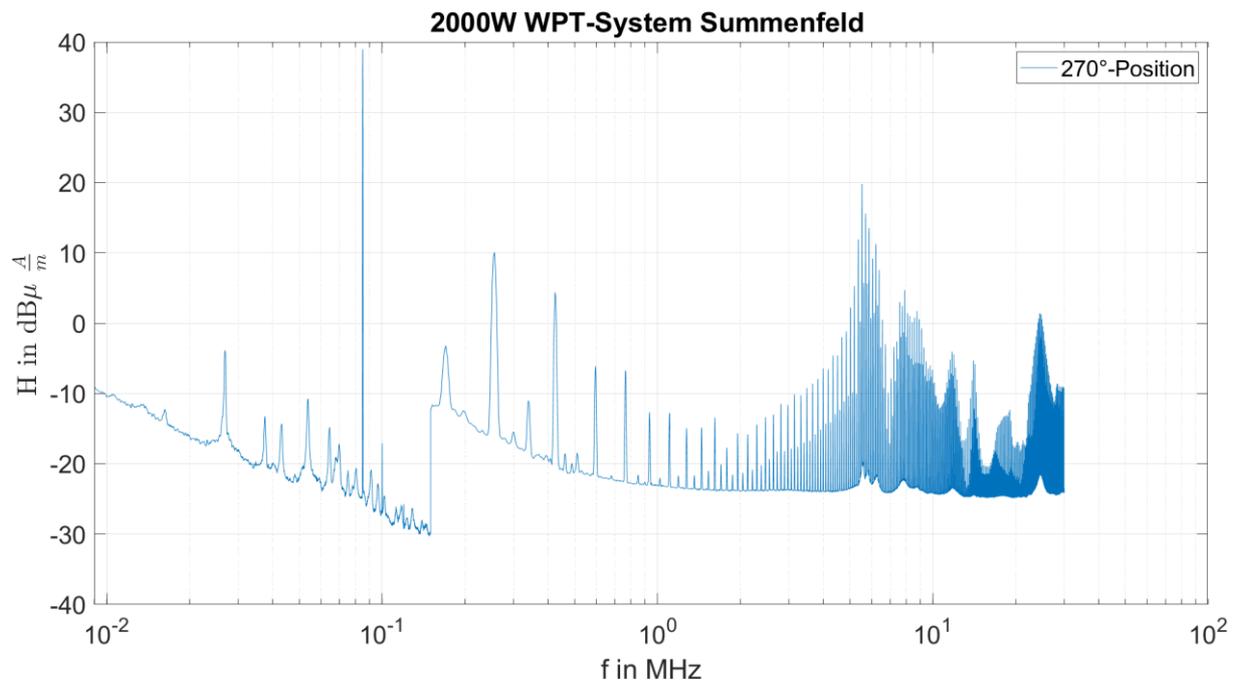


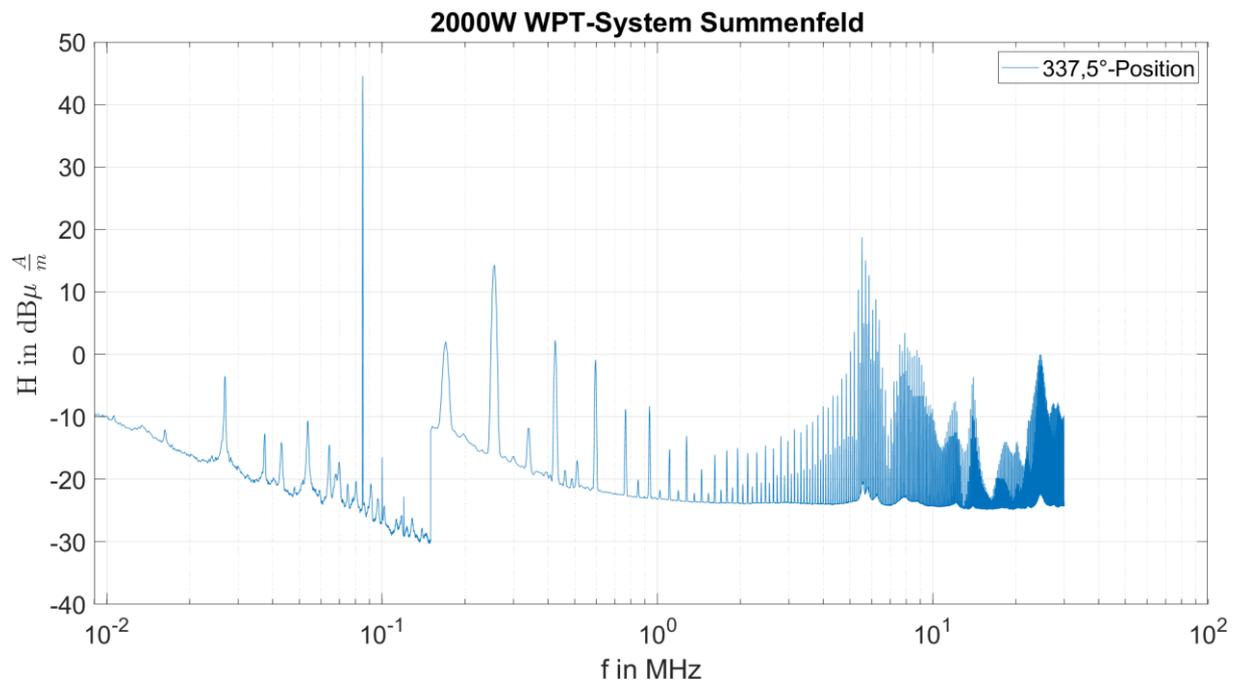
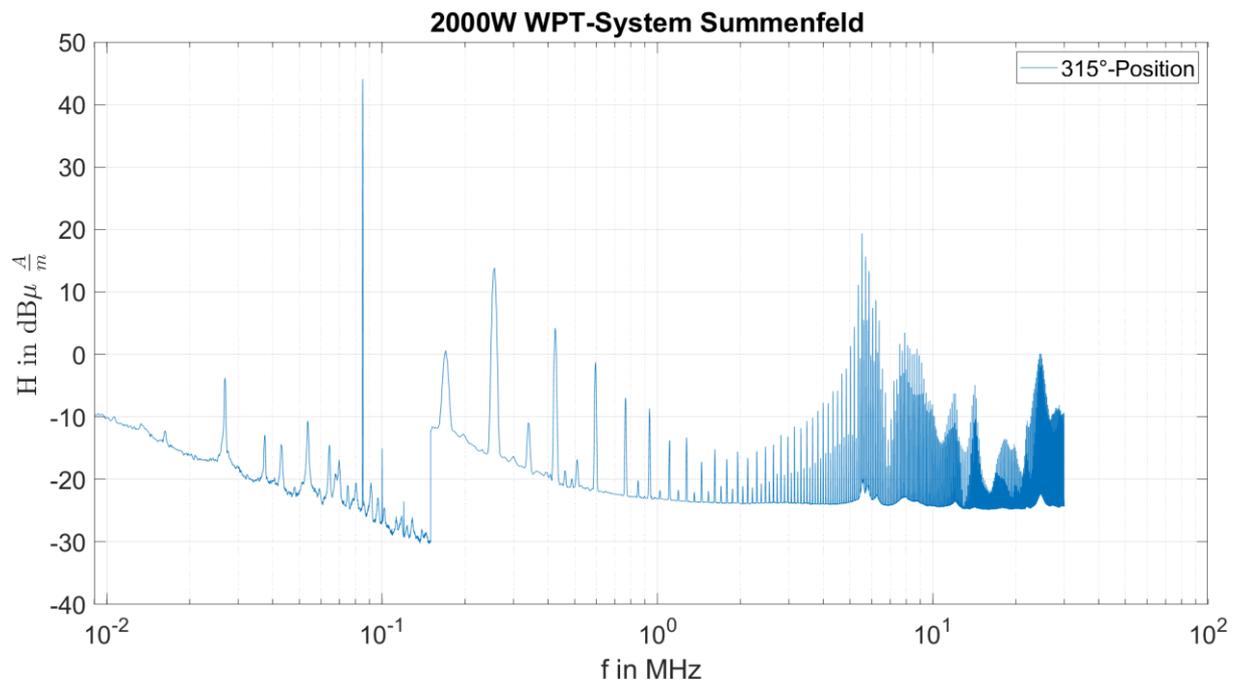




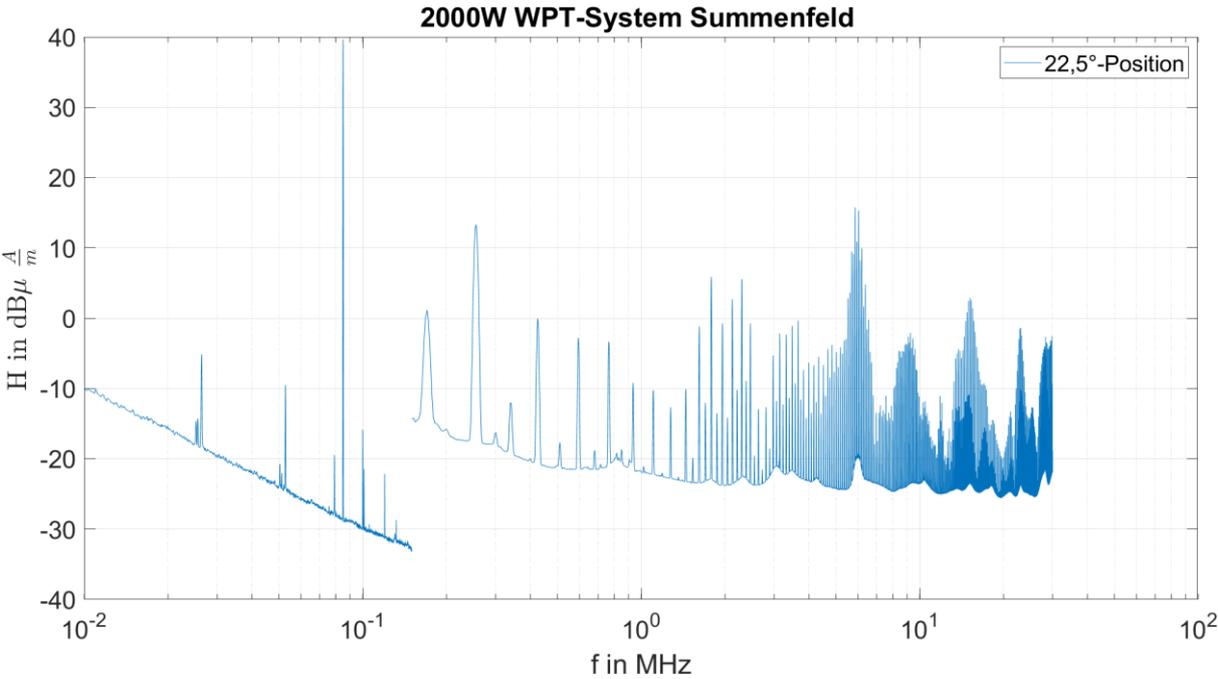
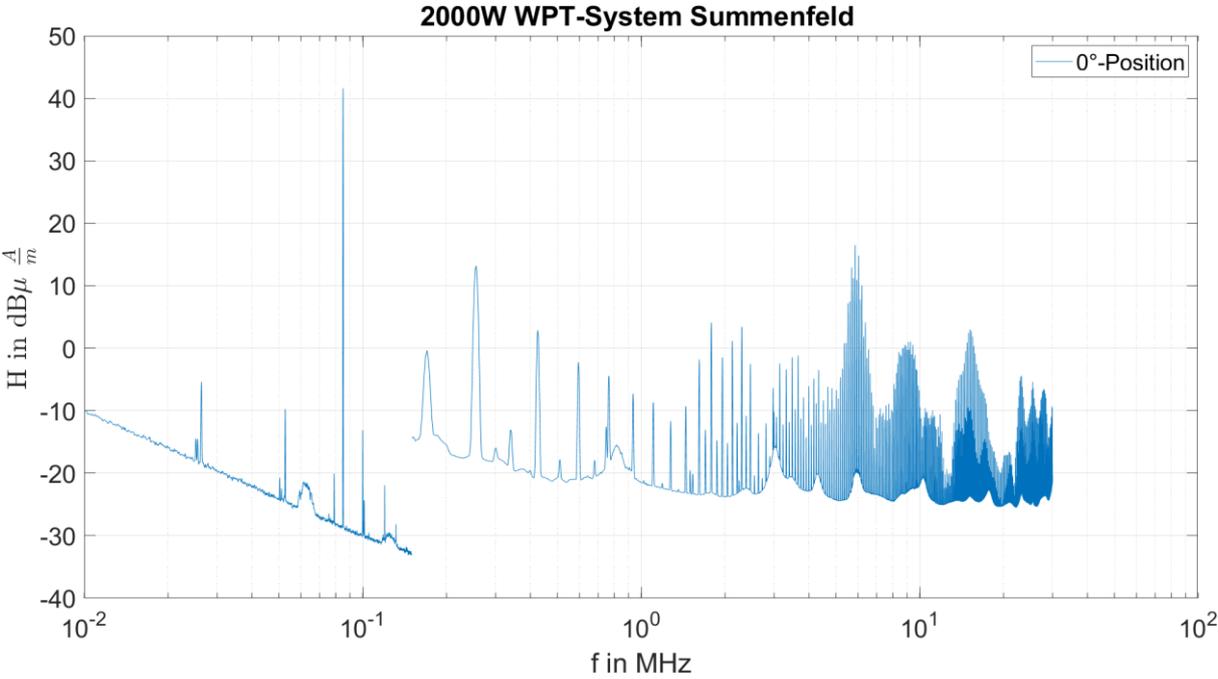


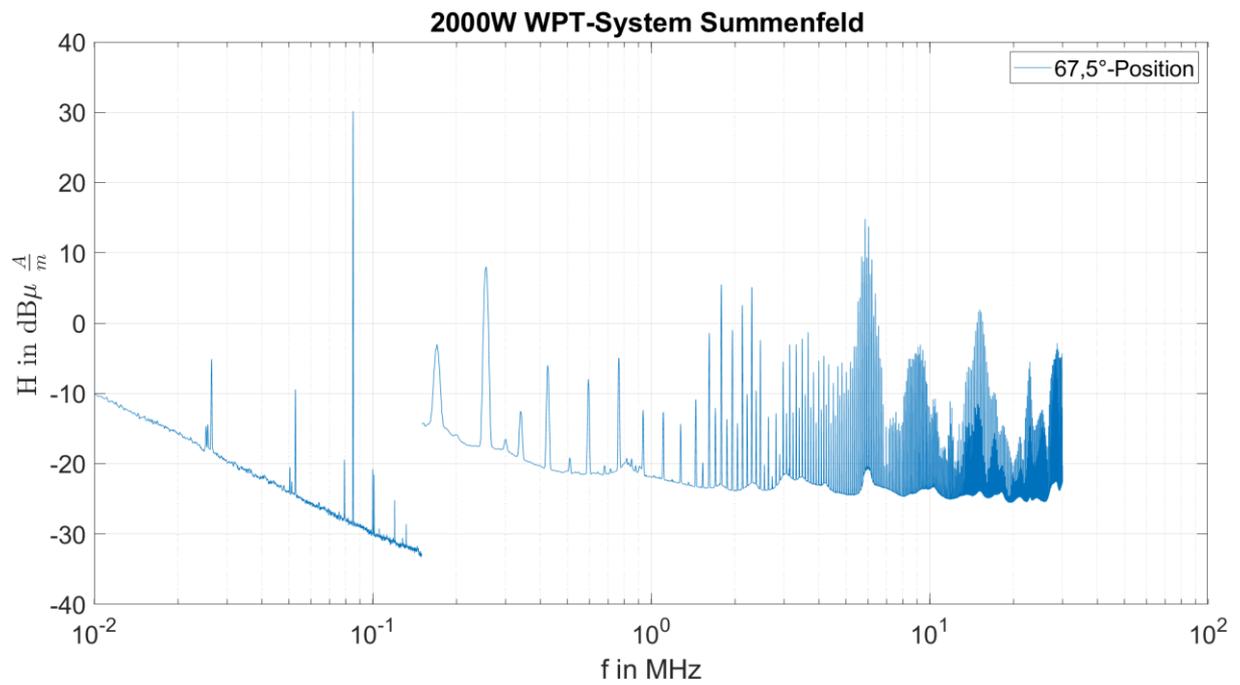
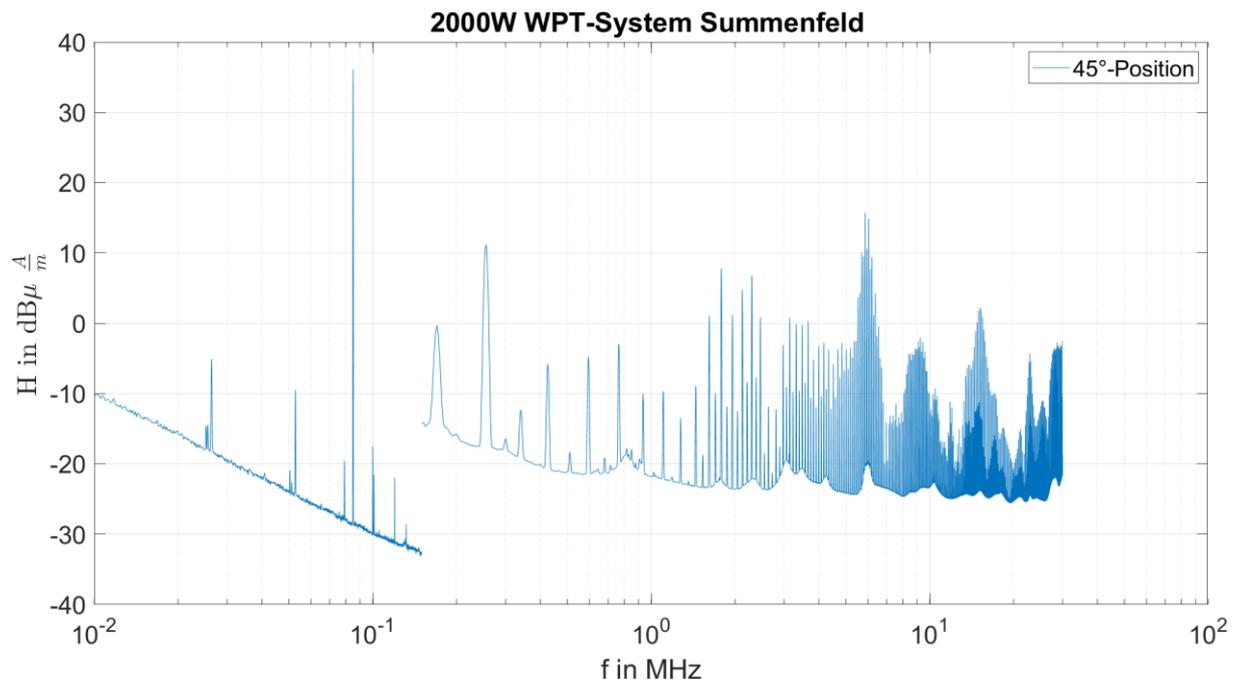


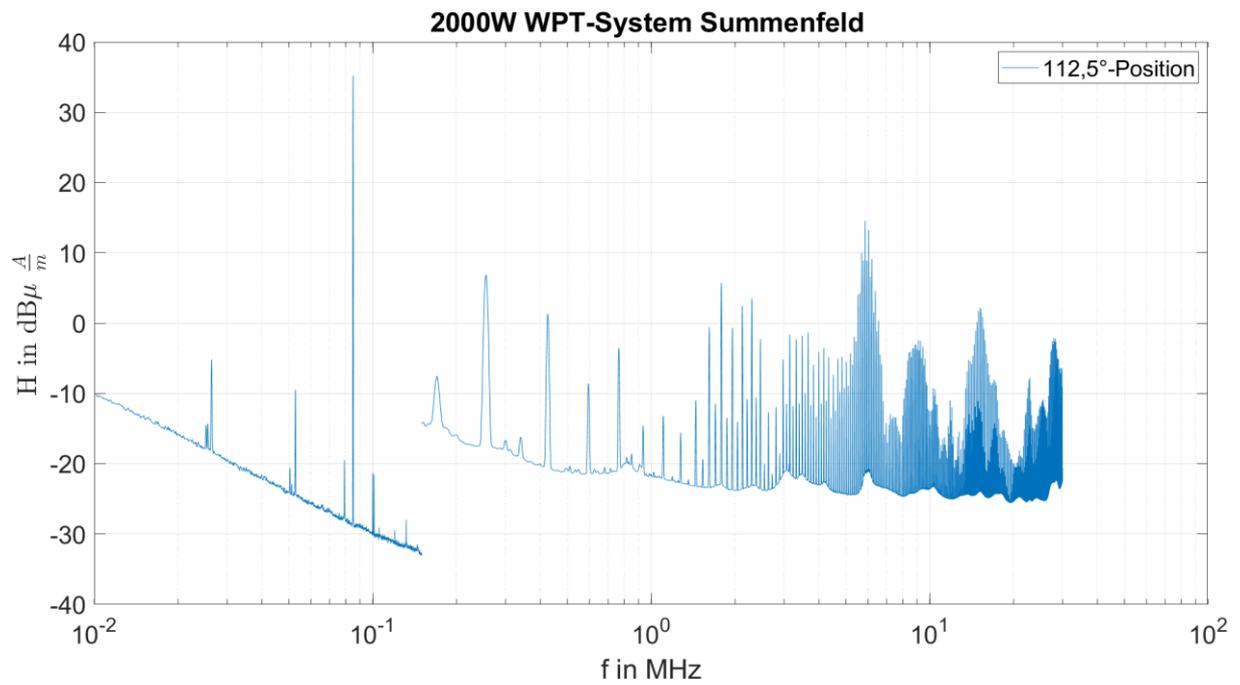
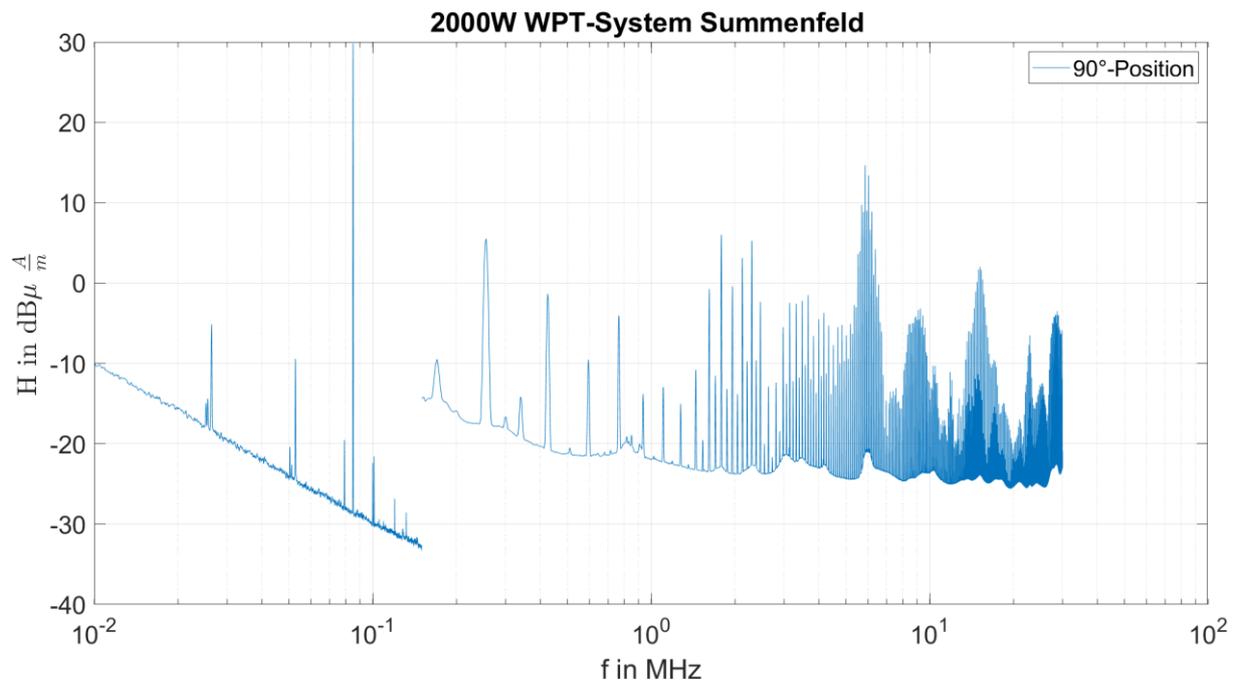


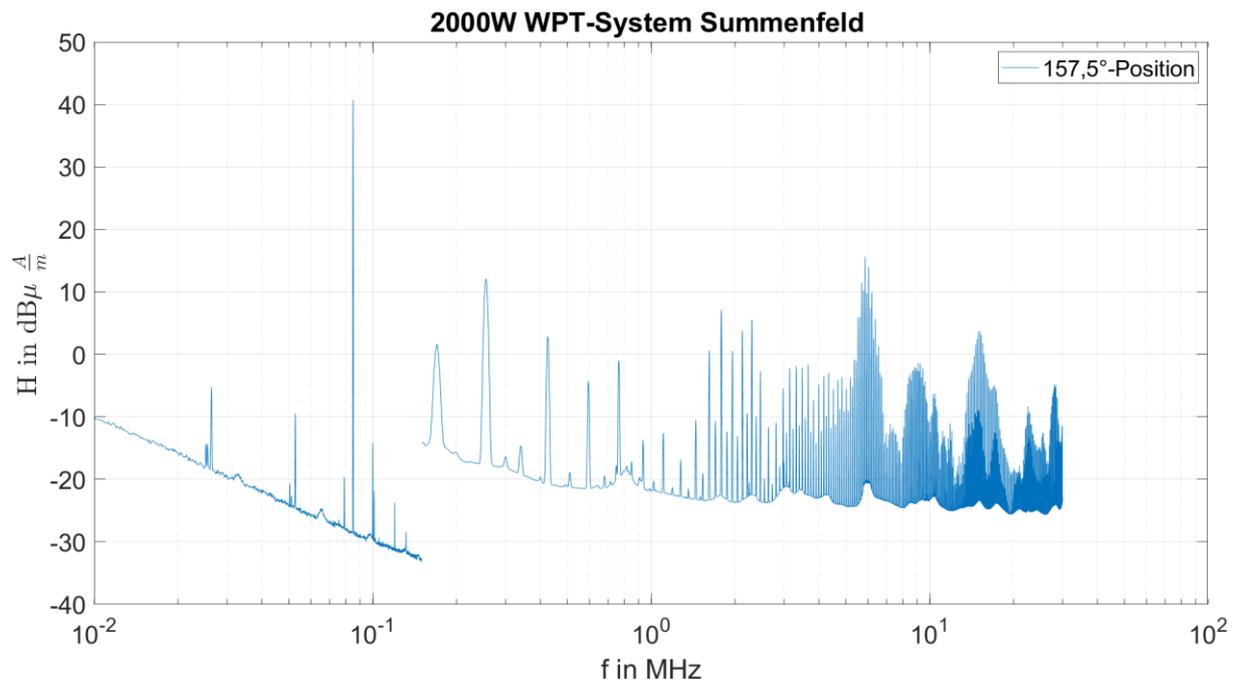
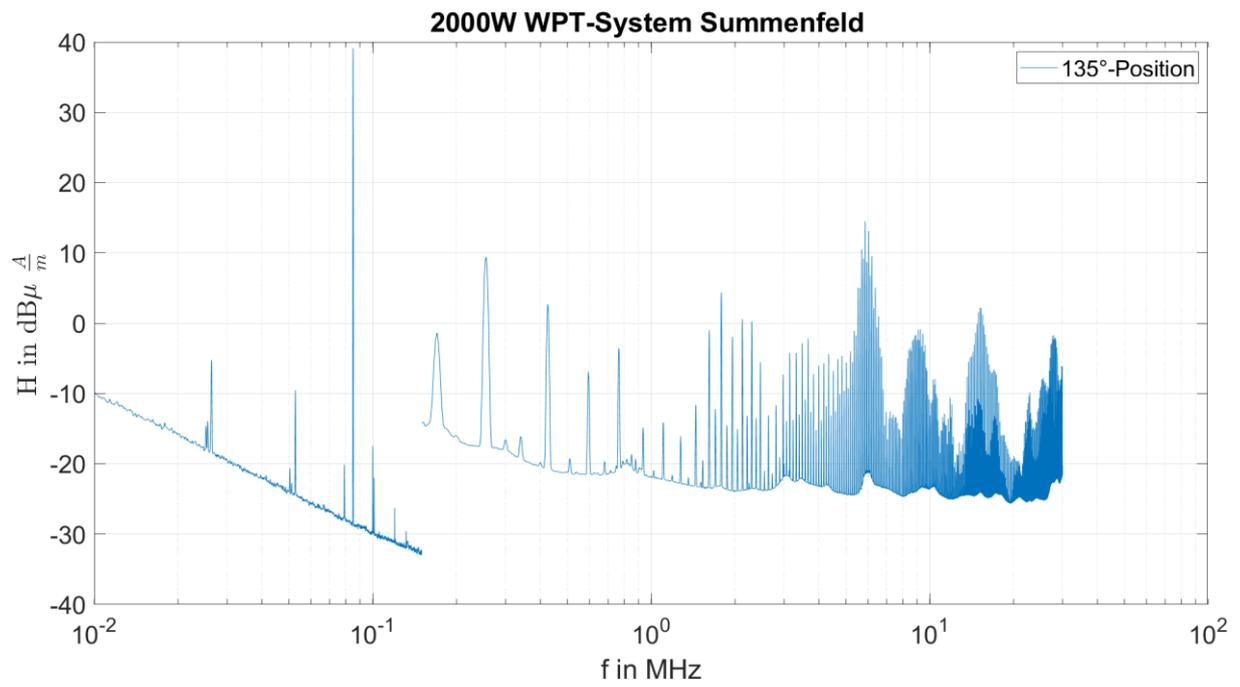


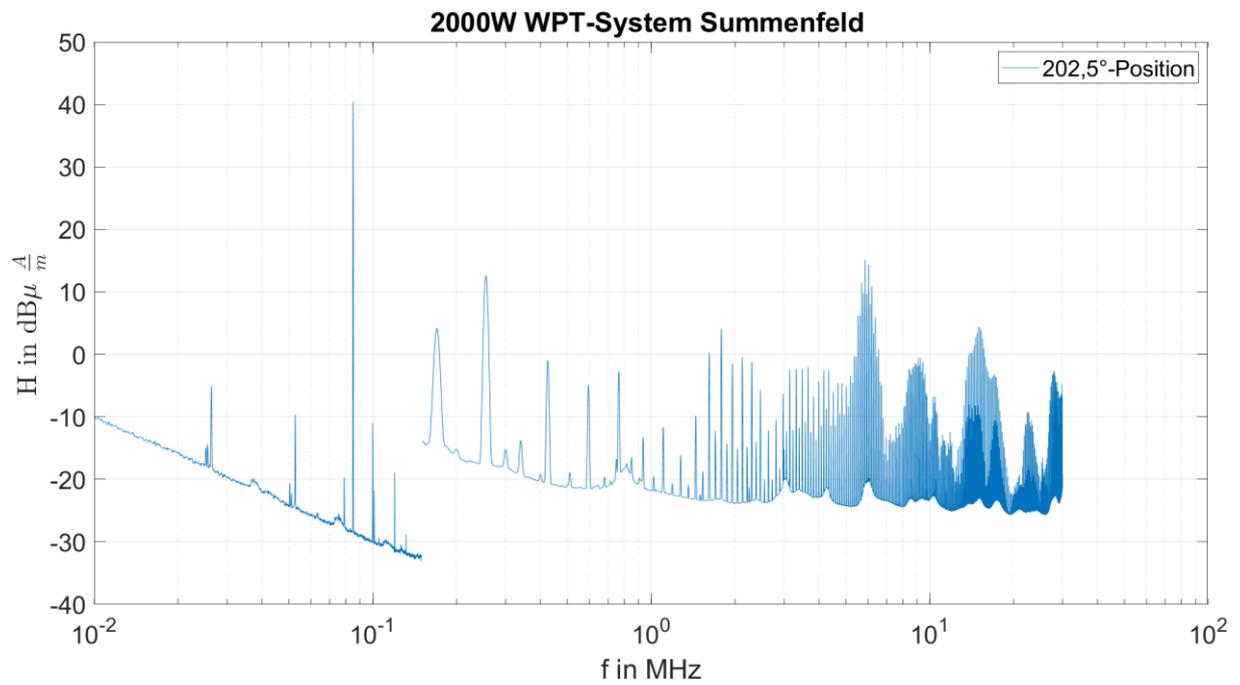
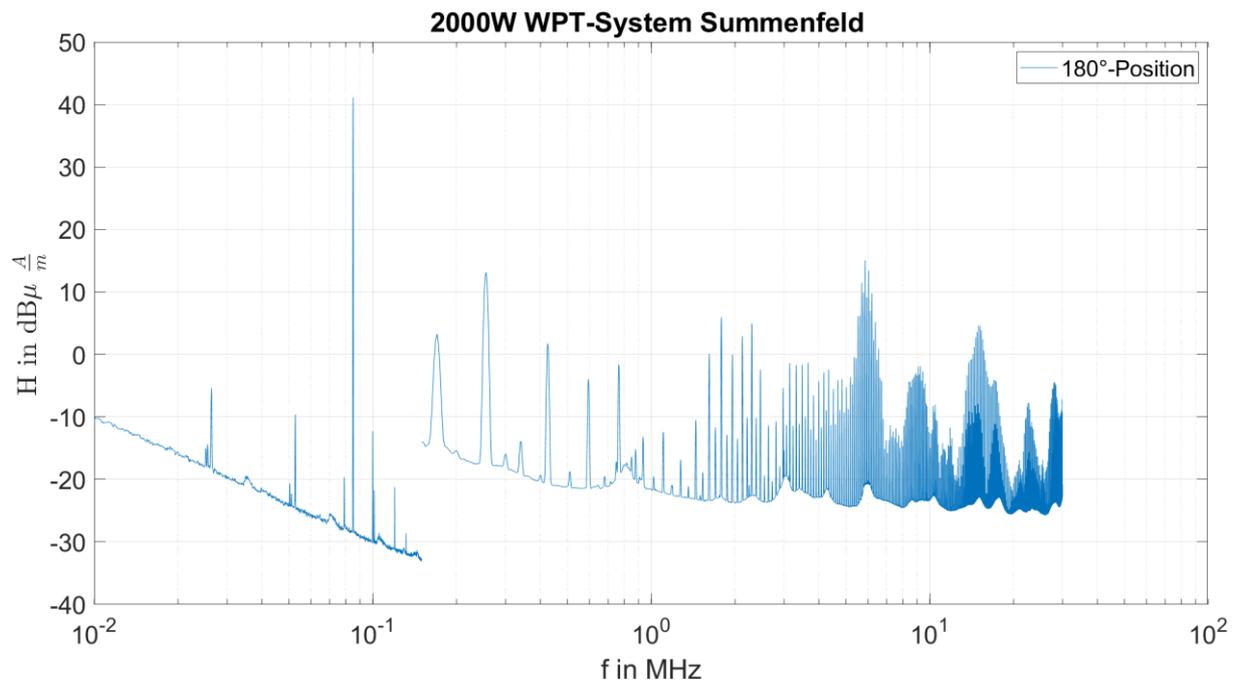
Messdaten Absorberhalle Kolberg magnetisches Feld

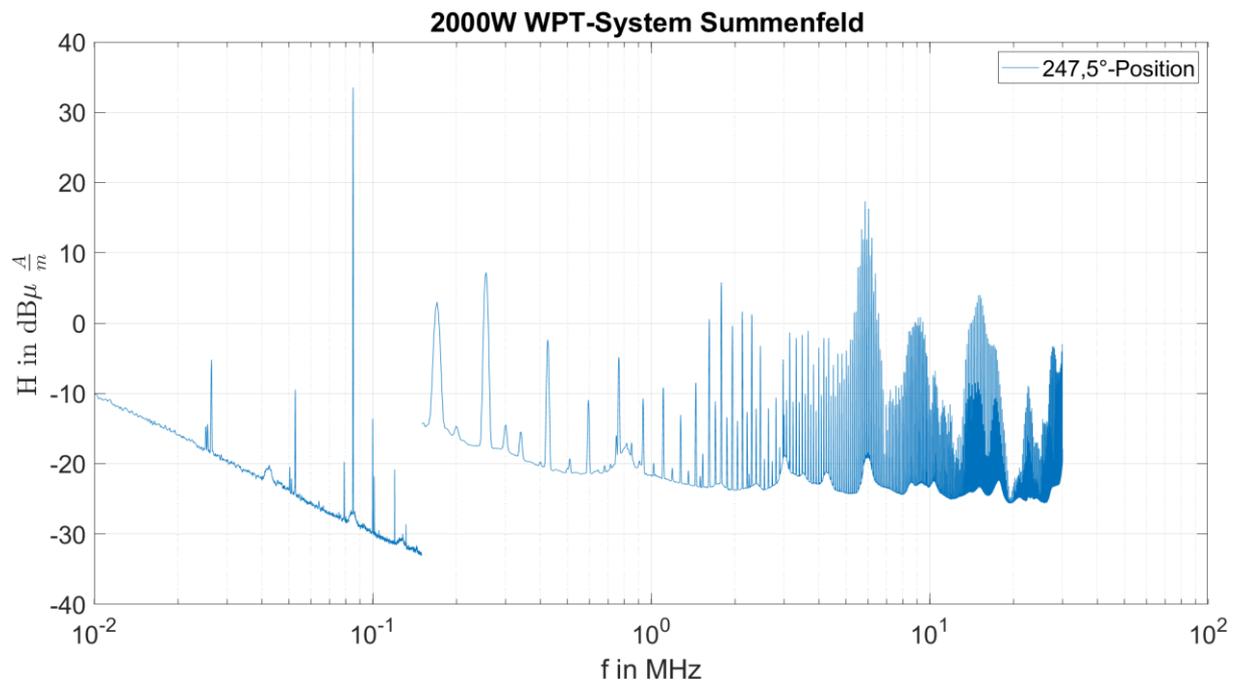
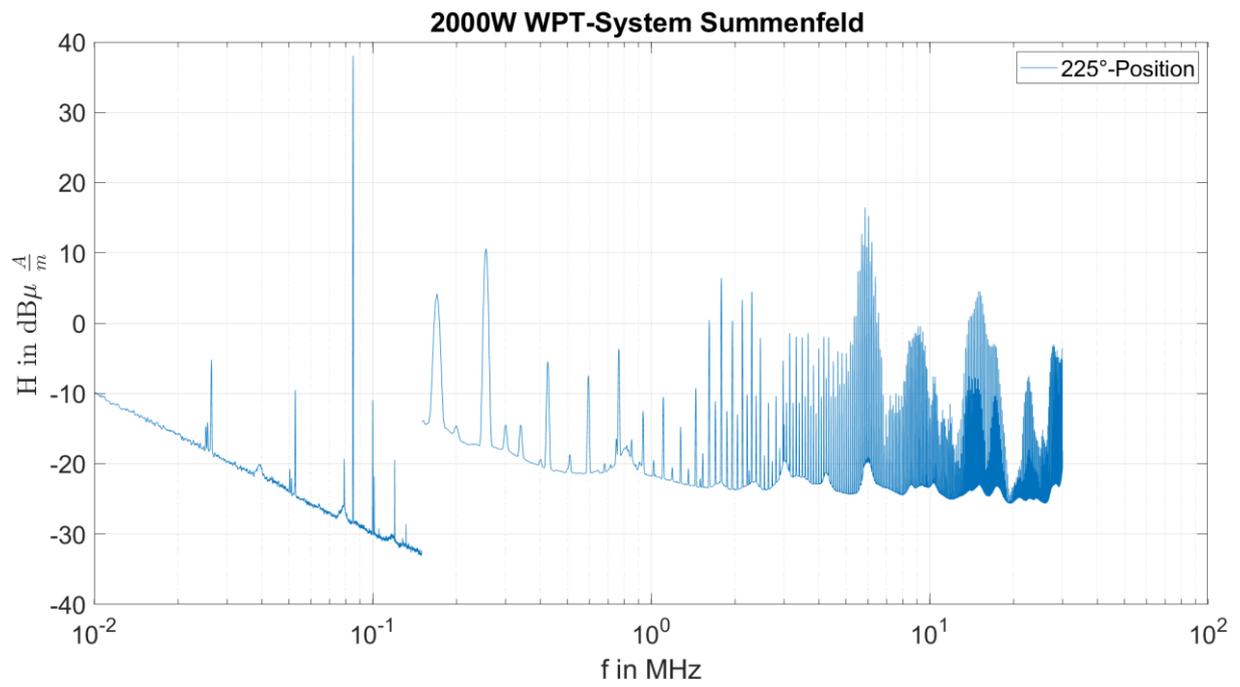


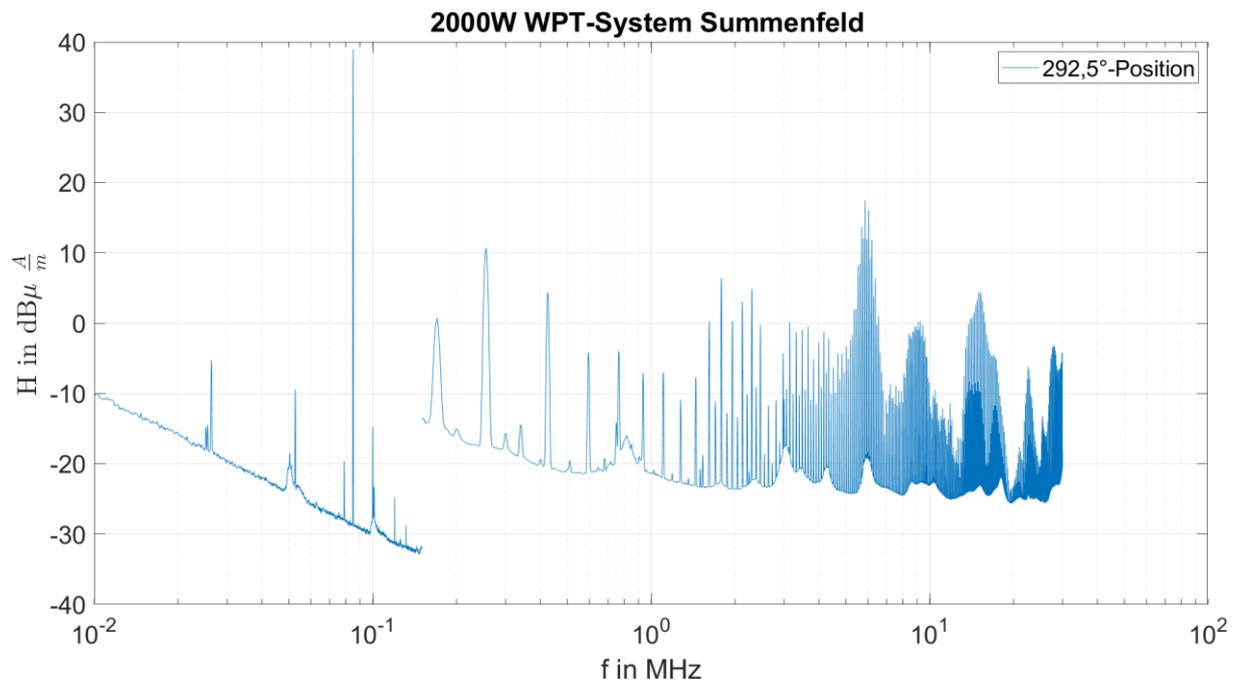
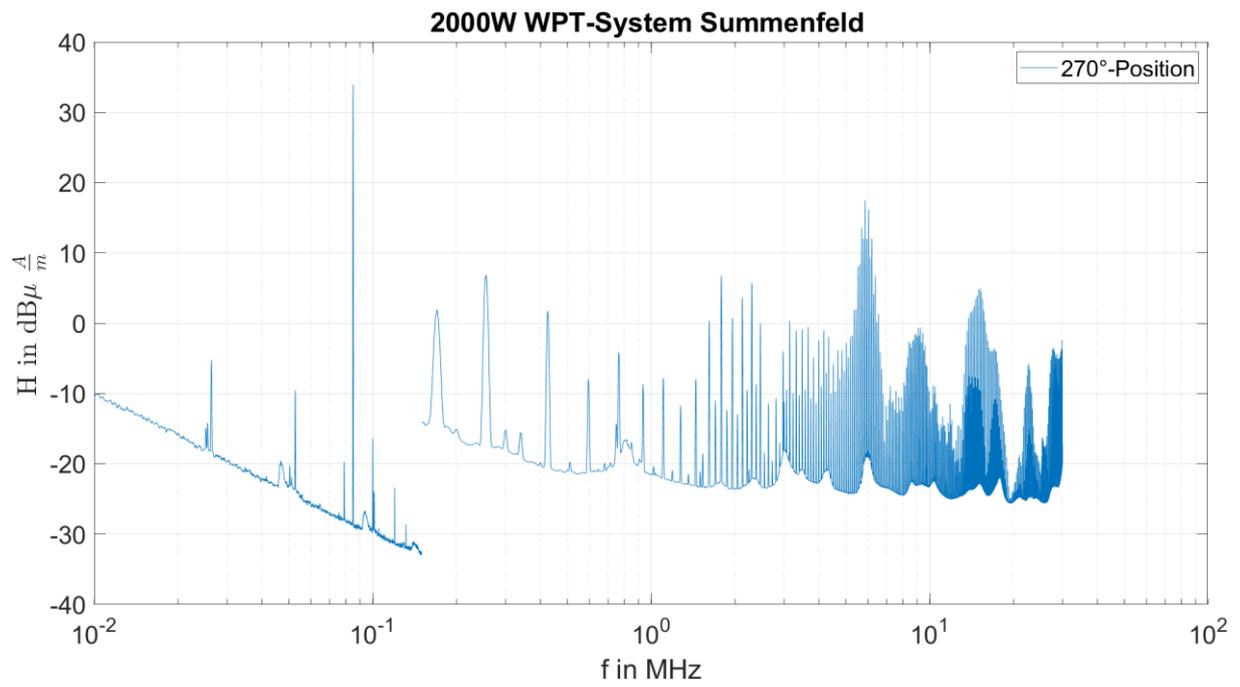


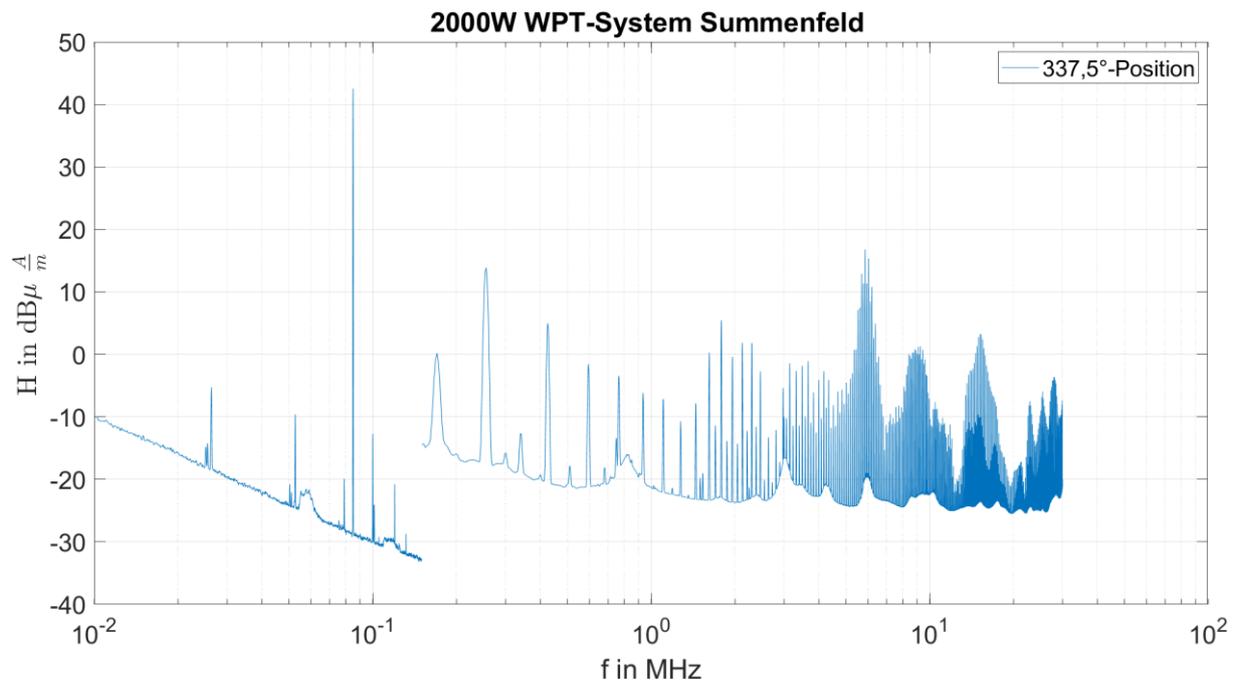
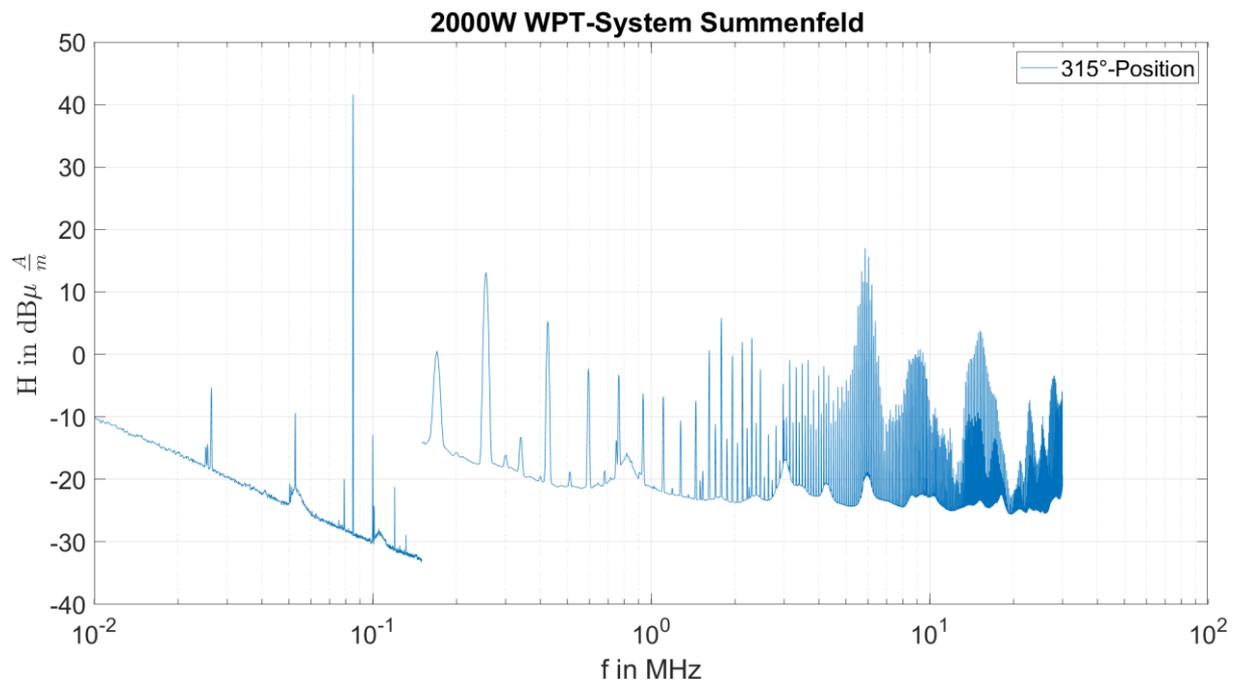




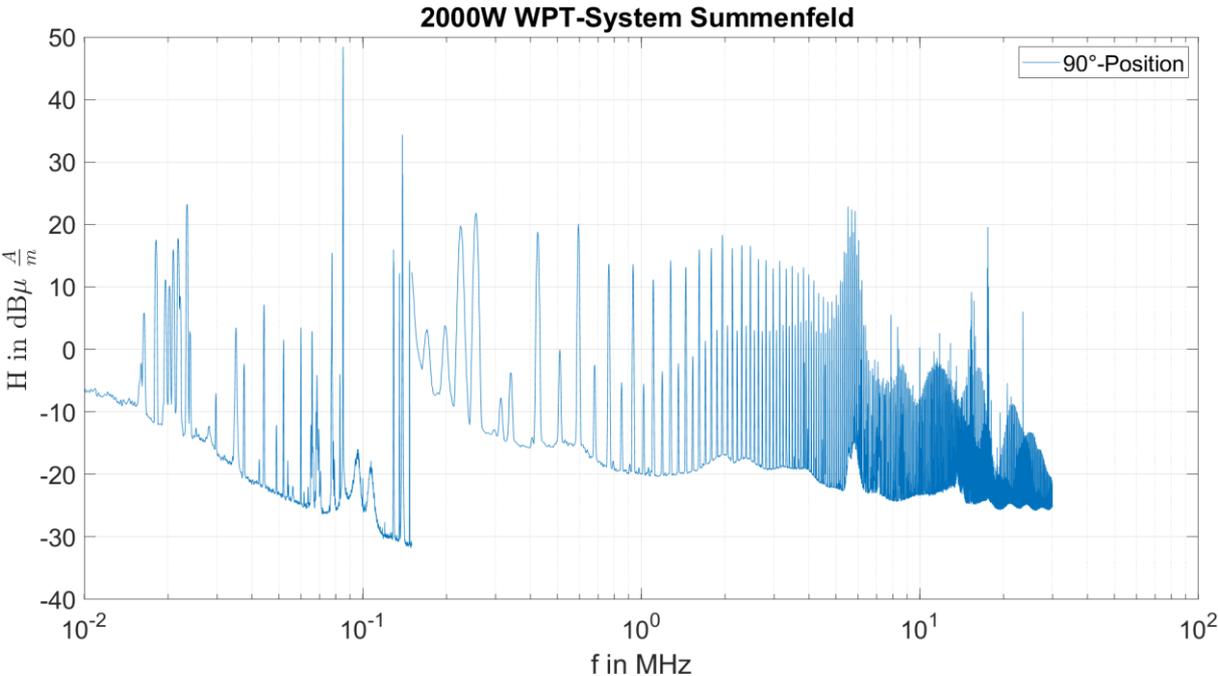
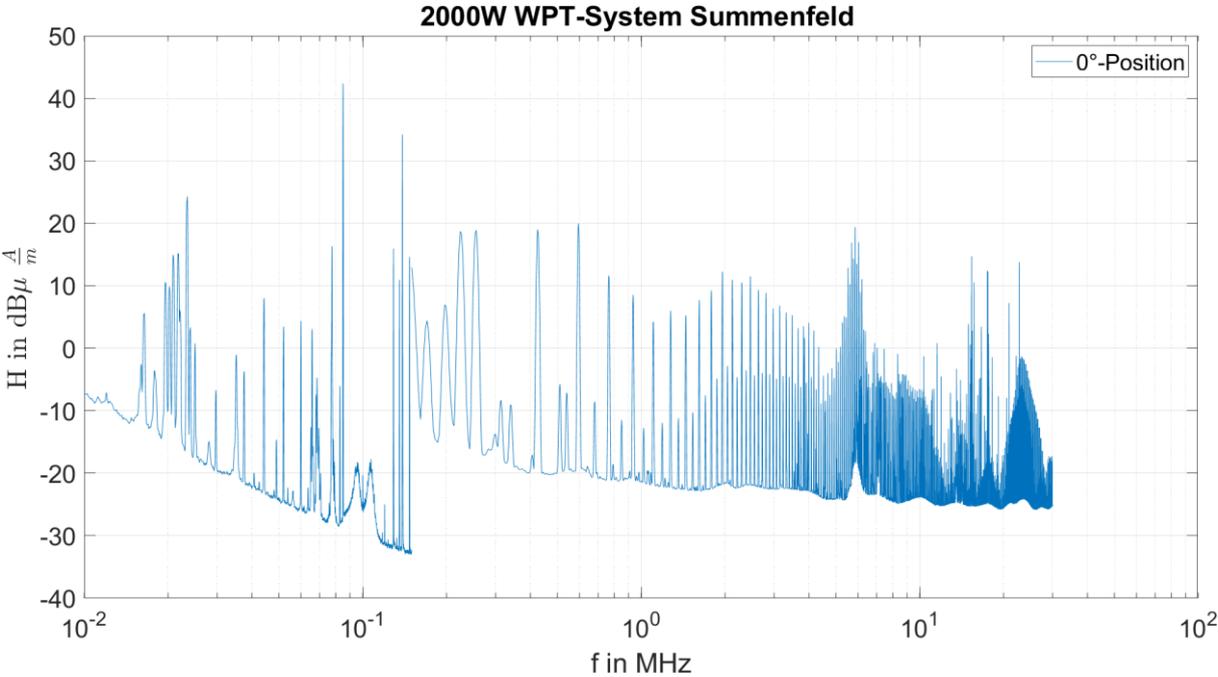


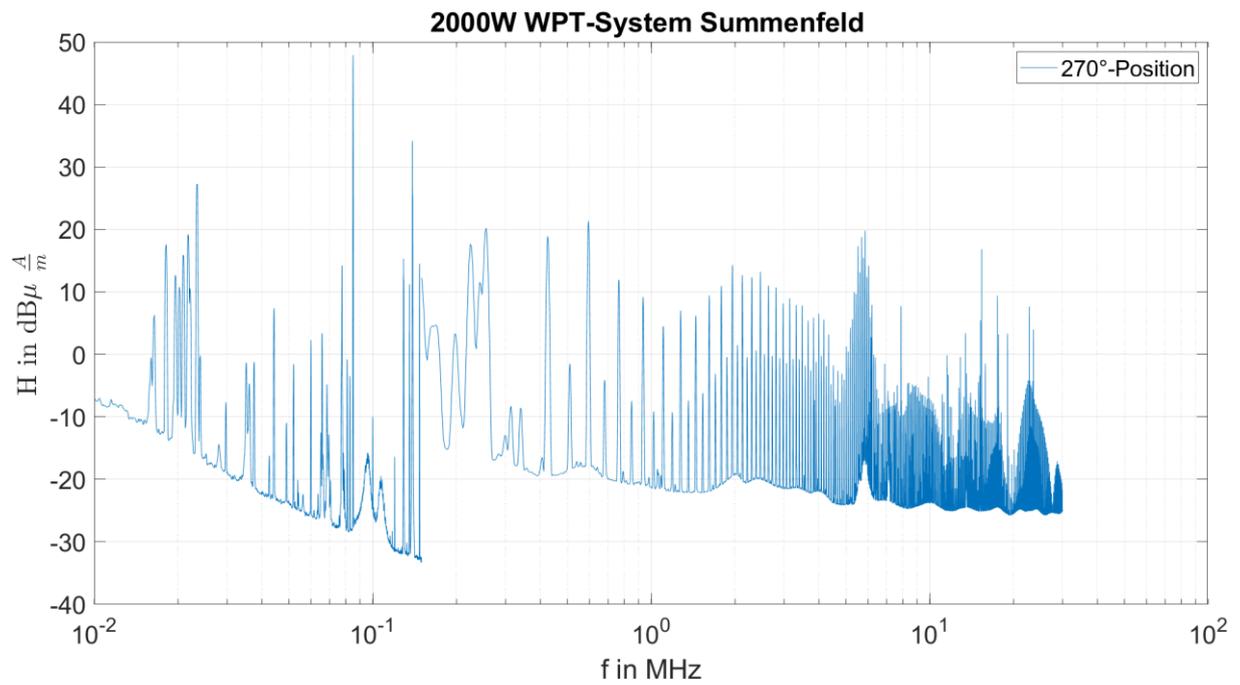
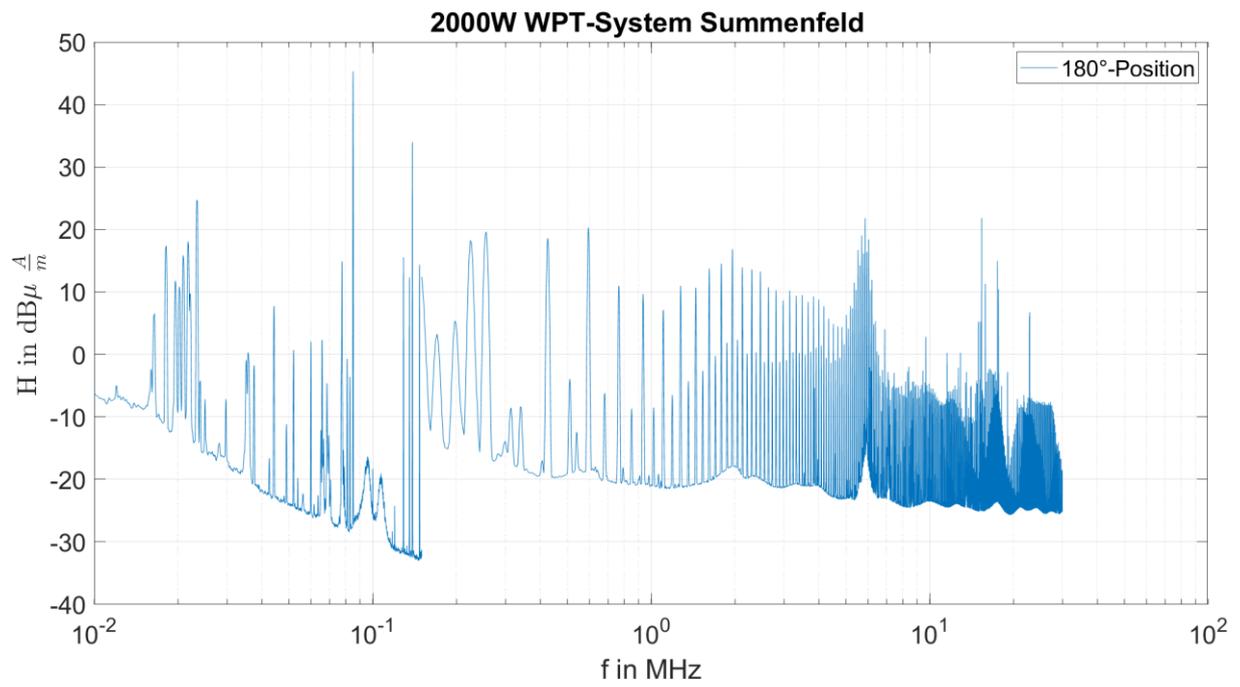






Messdaten Freifeldmessplatz Kolberg magnetisches Feld





Code zur Darstellung des magnetischen Feldes mit MATLAB

```
fX=xlsread("0°.xlsx","016-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "A30:A16118");
fY=xlsread("0°.xlsx","017-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "A30:A16118");
fZ=xlsread("0°.xlsx","048-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "A30:A16118");

dBuAmX=xlsread("0°.xlsx","016-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "D30:D16118");
dBuAmY=xlsread("0°.xlsx","017-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "D30:D16118");
dBuAmZ=xlsread("0°.xlsx","048-250 V, 2000 W, Last Deckel ", "D30:D16118");

dBuAmX1=10.^(dBuAmX./20);%%Umrechnung in lineare Werte
dBuAmY1=10.^(dBuAmY./20);%%Umrechnung in lineare Werte
dBuAmZ1=10.^(dBuAmZ./20);%%Umrechnung in lineare Werte
dBuAmsum=(dBuAmX1.^2+dBuAmY1.^2+dBuAmZ1.^2).^(1/2);%%Addition der linearen
Werte+Wurzel ziehen
dBuAmsum1=20.*log10(dBuAmsum);%%Logarithmierung der linearen Werte

figure(1)
semilogx(fX,dBuAmX)
title('2000W WPT-System X-Ausrichtung Netzteil innen 10 m Messentfernung','FontSi-
ze',14)
xlabel('f in MHz','FontSize',14)
ylabel('H in dB$\{\mu\}$ $\frac{A}{m}$','Interpreter','latex','FontSize',14)
legend('0°-Position')
set(gca,'FontSize',20)
grid

figure(2)
semilogx(fY,dBuAmY)
title('2000W WPT-System Y-Ausrichtung Netzteil innen 10 m Messentfernung','FontSi-
ze',14)
xlabel('f in MHz','FontSize',14)
ylabel('H in dB$\{\mu\}$ $\frac{A}{m}$','Interpreter','latex','FontSize',14)
legend('0°-Position')
set(gca,'FontSize',20)
grid

figure(3)
semilogx(fZ,dBuAmZ)
title('2000W WPT-System Z-Ausrichtung Netzteil innen 10 m Messentfernung','FontSi-
ze',14)
xlabel('f in MHz','FontSize',14)
ylabel('H in dB$\{\mu\}$ $\frac{A}{m}$','Interpreter','latex','FontSize',14)
legend('0°-Position')
set(gca,'FontSize',20)
grid

figure(4)
semilogx(fX,dBuAmsum1)
title('2000W WPT-System Summenfeld ', 'FontSize',14)
xlabel('f in MHz','FontSize',14)
ylabel('H in dB$\{\mu\}$ $\frac{A}{m}$','Interpreter','latex','FontSize',14)
legend('0°-Position')
set(gca,'FontSize',20)
grid
```

Code zur Darstellung des elektrischen Feldes mit MATLAB

```
f1=xlsread("E1.xlsx","007 Innen 10m 2kW 0 Grad","A30:A16099");
dBuVm=xlsread("E1.xlsx","007 Innen 10m 2kW 0 Grad","D30:D16099");

figure(1)
semilogx(f1,dBuVm)
title('2000W WPT-System Ausrichtung Netzteil innen 10 m Messentfernung','FontSize',14)
xlabel('f in MHz','FontSize',14)
ylabel('E in dB{\mu}$ $\frac{V}{m}$','Interpreter','latex','FontSize',14)
legend('0° Position')
set(gca,'FontSize',20)
grid
```

Code zur Darstellung von Strahlendiagrammen

```
clear all;

a="D1550"

%%%%%%%%%%%%%%X-Achse%%%%%%%%%%%%%%

theta=0:2*pi/16:2*pi;

x1=xlsread("337,5°.xlsx","033-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x2=xlsread("315°.xlsx","034-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x3=xlsread("292,5°.xlsx","035-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x4=xlsread("270°.xlsx","036-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x5=xlsread("247,5°.xlsx","037-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x6=xlsread("225°.xlsx","038-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x7=xlsread("202,5°.xlsx","039-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x8=xlsread("180°.xlsx","040-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x9=xlsread("157,5°.xlsx","041-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x10=xlsread("135°.xlsx","042-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x11=xlsread("112,5°.xlsx","043-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x12=xlsread("90°.xlsx","044-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x13=xlsread("67,5°.xlsx","045-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x14=xlsread("45°.xlsx","046-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x15=xlsread("22,5°.xlsx","047-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);
x16=xlsread("0°.xlsx","016-250 V, 2000 W, Last Deckel ",a);

rhox=[x1 x16 x15 x14 x13 x12 x11 x10 x9 x8 x7 x6 x5 x4 x3 x2 x1];

% figure(1)
% polarplot(theta,rhox,'- .','Markersize',12)
% title("Strahlendiagramm des H-Feldes in dB{\mu}$ $\frac{A}{m}$ bei 85 kHz X-
Achse",'Interpreter','latex','FontSize',20)
```



```

polarplot(theta,rhox,'- .',theta,rhoy,'- .',theta,rhoz,'- .','Markersize',12)
title("Strahlendiagramm des H-Feldes in dB $\{\mu\}$   $\frac{A}{m}$  bei 85 kHz",'Interpreter','latex','FontSize',20)
legend('X-Achse','Y-Achse','Z-Achse')
pax=gca;
pax.FontSize=16;
rlim([0 50])

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Summenfeld%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

rhox1=10.^(rhox./20);%%Umrechnung in lineare Werte
rhoy1=10.^(rhoy./20);%%Umrechnung in lineare Werte
rhoz1=10.^(rhoz./20);%%Umrechnung in lineare Werte
rhosum=(rhox1.^2+rhoy1.^2+rhoz1.^2).^(1/2);%%Addition der linearen Werte+Wurzel
ziehen
rhosum1=20.*log10(rhosum);%%Logarithmierung der linearen Werte

```

```

figure(4)
polarplot(theta,rhosum1,'- .','Markersize',12)
title("Strahlendiagramm des Summen-H-Feldes in dB $\{\mu\}$   $\frac{A}{m}$  bei 85 kHz",'Interpreter','latex','FontSize',20)
pax=gca;
pax.FontSize=16;
rlim([0 50])

```