

# Störfestigkeit im Nahbereich – Vergleich der mit Antennen erzeugten Felder der ISO 11452-9 und DIN EN 61000-4-39

Prof. Dr.-Ing. Sven Battermann, Fachhochschule Bielefeld, Campus Minden, Deutschland  
Dipl.-Ing. Dieter Schwarzbeck, Schwarzbeck Mess-Elektronik OHG, Deutschland

## 1 Einleitung

Der Bedarf an Störfestigkeitsprüfungen von Prüflingen im Nahbereich ist vor allem durch aufgetretene Störphänomene entstanden, wenn sich hochfrequente Strahlungsquellen (mobile Sendegeräte wie z. B. Handfunkgeräte oder Mobiltelefone) in einem sehr geringen Abstand zu elektronischen Geräten befinden. Das reale Störphänomen kann beispielsweise ein vom Wartungspersonal genutztes Handfunkgerät sein, das in unmittelbarer Nähe von Feldgeräten (Sensoren, Aktoren) oder Steuerungskomponenten verwendet wird und direkt in diese einkoppelt. Damit sind selbst bei einer Sendeleistung von wenigen Watt von einem Handfunkgerät mit verkürzter Wendelantenne (z. B. 6 W, 430 MHz) elektrische Feldstärken von einigen 100 V/m im Nahbereich der Antenne zu erreichen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Störphänomene steigt durch die wachsende Anzahl an portablen mobilen Sendegeräten mit Funkschnittstelle (z. B. Smartphones, IoT-Devices) deutlich an.

Nach Standardisierungsprojekten sind die Testverfahren und Anforderungen an die Antennen für die Messung im Nahbereich mittlerweile in verschiedene Normen eingeflossen. Im Automobilbereich ist das – neben herstellerspezifischen Prüfanforderungen – die ISO 11452-9 [1] mit einem breitbandigen Dipol mit flachen Elementen. Im Industriebereich ist es die DIN EN 61000-4-39 [2], die die Verwendung eines breitbandiges TEM-Horns beschreibt. Beide Standards decken das gleiche Störzenario ab und es stellt sich die Frage, wie sich die erzeugten Felder der beiden Antennentypen im betrachteten Frequenzbereich von ca. 360 MHz bis 6 GHz verhalten. Dieser Beitrag stellt Messungen und Simulationen der von den beiden Antennentypen erzeugten elektromagnetischen Felder dar und zeigt Unterschiede auf.

## 2 Beschreibung des Vorgehens

### 2.1 Messaufbau

Die Standards erfordern Feldhomogenitätsmessungen an den Antennen [1,2]. Die dafür erforderliche Sondenpositionierung erfolgte mit dem in Bild 1 dargestellten fernsteuerbaren Scanner. Die Anforderungen an die breitbandigen Feldsonden sind in [3] beschrieben. Zur Anregung der Antenne und für die Messung der Spannung an der Feldsonde wurde ein Vektor-Netzwerkanalysator genutzt. Gegenüber den Anforderungen des Standards erfolgte eine deutlich feinere Abtastung bei der Bestimmung des homogenen Feldbereiches. Aufgrund der Messung im Nahfeld der Antenne, in dem erhebliche Gradienten der Felder auftreten, ist die Positionierung und Ausrichtung der Sonde eine große Herausforderung.

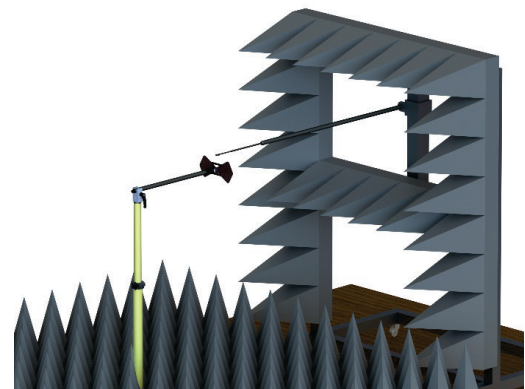


Bild 1: Scanner für die Feldmessung

Das führte bei einzelnen Messungen zu Asymmetrien in den Felddarstellungen. Der Einsatz von Verfahren und Methoden aus der Mikrowellentechnik [4] ist hier nur bedingt möglich, denn im Gegensatz zu den dort typischerweise genutzten relativ schmalbandigen Antennen muss die Messung in diesem Anwendungsfall sehr

breitbandig erfolgen. Die Positionierung der Sonde und die schmalbandige Messung zum Erreichen eines guten Signal-Rausch-Abstandes führt auch bei einer begrenzten Anzahl Frequenzstützstellen zu einer erheblichen Messzeit. Die Feldstärken (in der jeweils definierten Messentfernung) sind auf die gemessene Feldstärke im Mittelpunkt der Antenne normiert. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da der Feldverlauf bzw. die Position der Maxima vor der Messung nicht bekannt waren. Das führt bei einzelnen Diagrammen der gemessenen Feldstärke zu einer Verbreiterung der ermittelten Maxima, falls diese nicht im Zentrum der Antenne liegen.

## 2.2 Elektromagnetische Simulation der Antennen

Weiterhin wurden die Antennen mit dem auf der Momentenmethode basierenden Feldberechnungsprogramm CONCEPT-II der TUHH modelliert [5]. Zur Validierung des Modells wurden die numerischen Berechnungen mit den Messungen verglichen. Aus den berechneten elektrischen und magnetischen Feldern erfolgte u. a. ein Vergleich der Feldimpedanz der Antennen über die Messentfernung. Diese ist von Interesse, da aufgrund des großen betrachteten Frequenzbereiches bei der normativ fest vorgegebenen Messentfernung ein Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld erfolgt [6]. Dieser Effekt wird für beide Antennentypen mit der Theorie verglichen. Neben der elektrischen und magnetischen Feldstärke wird auch die zeitlich gemittelte Leistungsflussdichte berechnet und visualisiert, die in der vorgegebenen Messentfernung auftritt.

## 3 Untersuchung und Vergleich der Antennen

### 3.1 Übersicht der Antenneneigenschaften

Die Tabelle 1 zeigt einige Eigenschaften der betrachteten Antennentypen. Es gibt zwei Antennen mit Flachelementen (typischerweise im Automotive-Bereich eingesetzt) für die zwei getrennten Frequenzbereiche. Das hier beschriebene TEM-Horn deckt den gesamten Frequenzbereich ab. Mit relativ geringen Eingangsleistungen lassen sich hohe elektrische Feldstärken erreichen. Zur Erzeugung der gleichen elektrischen Feldstärke benötigt das TEM-Horn eine höhere Eingangsleistung als die Flachelemente. Diese ist jedoch immer noch erheblich geringer als für eine Messung nach DIN EN 61000-4-3 in 3 m Messentfernung erforderlich. Gegenüber den Antennen mit Flachelementen braucht das TEM-Horn prinzipbedingt keinen weiteren Balun.

Eigenschaft	Flachelemente		TEM-Horn
Typbezeichnung	420 NJ	422 NJ	TEMH 6000
Balun	SBA 9113	SBA 9119	nicht erforderlich (strukturintegriert)
Frequenzbereich	(0,36 bis 2,7) GHz	(2,4 bis 6) GHz	(0,38 bis 6) GHz
Abmessungen	240 mm × 109 mm	108 mm × 49 mm	210 mm × 260 mm × 300 mm
typ. Messentfernung	50 mm		100 mm
typ. elektrische Feldstärke bei 1 W	(55 bis 100) V/m		(40 bis 60) V/m
VSWR	< 4		< 3
Normen	ISO 11452-9		DIN EN 61000-4-39
Zulässige Leistung	20 W		300 W
erreichbare elektrische Feldstärke	ca. 600 V/m		ca. 600 V/m

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten Antennentypen

### 3.2 Untersuchung der Antenne 420 NJ mit Flachelementen

Für die Antenne mit Flachelementen (Frequenzbereich von 360 MHz bis 2,7 GHz - Bild 2) wurden  $E$ - und  $H$ -Feld in verschiedenen Messentfernungen (10 mm, 30 mm und 50 mm) mit CONCEPT-II berechnet und beispielhaft für 2,4 GHz in Bild 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, wie sich mit dem Abstand von der Antenne die Feldverläufe von  $E$ -Feld und  $H$ -Feld verändern. Je nach Entfernung kann es unterschiedliche Einkoppelpfade in den Prüfling geben, da sich die Feldkomponenten von der Amplitude und Ausrichtung ändern. In der Norm ist der Abstand daher auf 50 mm fixiert. Die Skalierung der Farbskala in Bild 3 bezieht sich auf die Ebene in 10 mm Abstand von den Flachelementen.

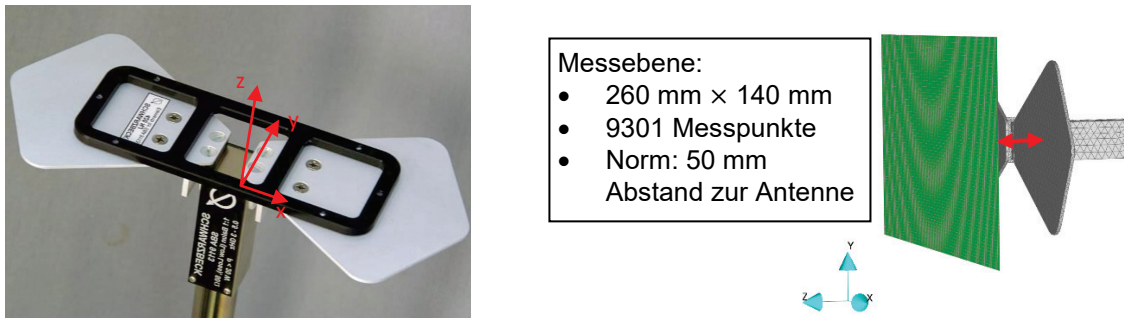


Bild 2: Antenne mit Flachelementen 420 NJ (Antenne und Modell mit grün dargestellter Messebene)

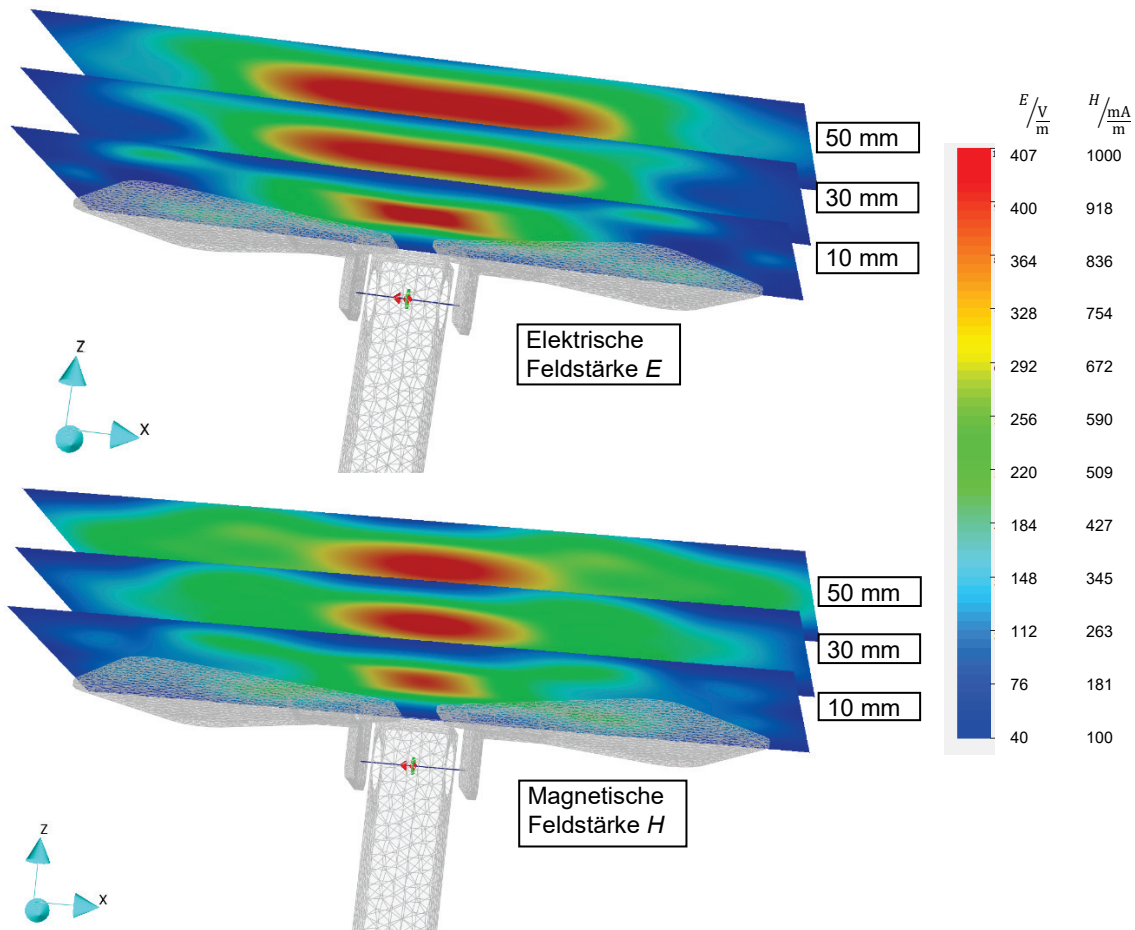


Bild 3: Effektivwert der elektrischen (oben) und magnetischen (unten) Feldstärke bei 2,4 GHz in verschiedenen Messentfernungen (Farbskala für die Ebene in 10 mm Entfernung) der 420 NJ (Simulation)

### 3.3 Untersuchung der Antenne 422 NJ mit Flachelementen

In Bild 4 sind die 422 NJ (Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 6 GHz) und die Messebene dargestellt. Bild 5 zeigt die  $E$ - und  $H$ -Felder sowie die zeitlich gemittelte Leistungsdichte  $S$  für 2,4 GHz und 5 GHz. Auch hier sind Unterschiede im Feldverlauf vorhanden, die jedoch geringer sind als bei der Antenne 420 NJ für den unteren Frequenzbereich. Das liegt daran, dass bei gleichem Messabstand die Frequenz deutlich gesteigert ist und man sich weiter den Fernfeldbedingungen nähert, wie in 3.5 erläutert wird.



Bild 4: Antenne mit Flachelementen 422 NJ (Antenne und Modell mit grün dargestellter Messebene)

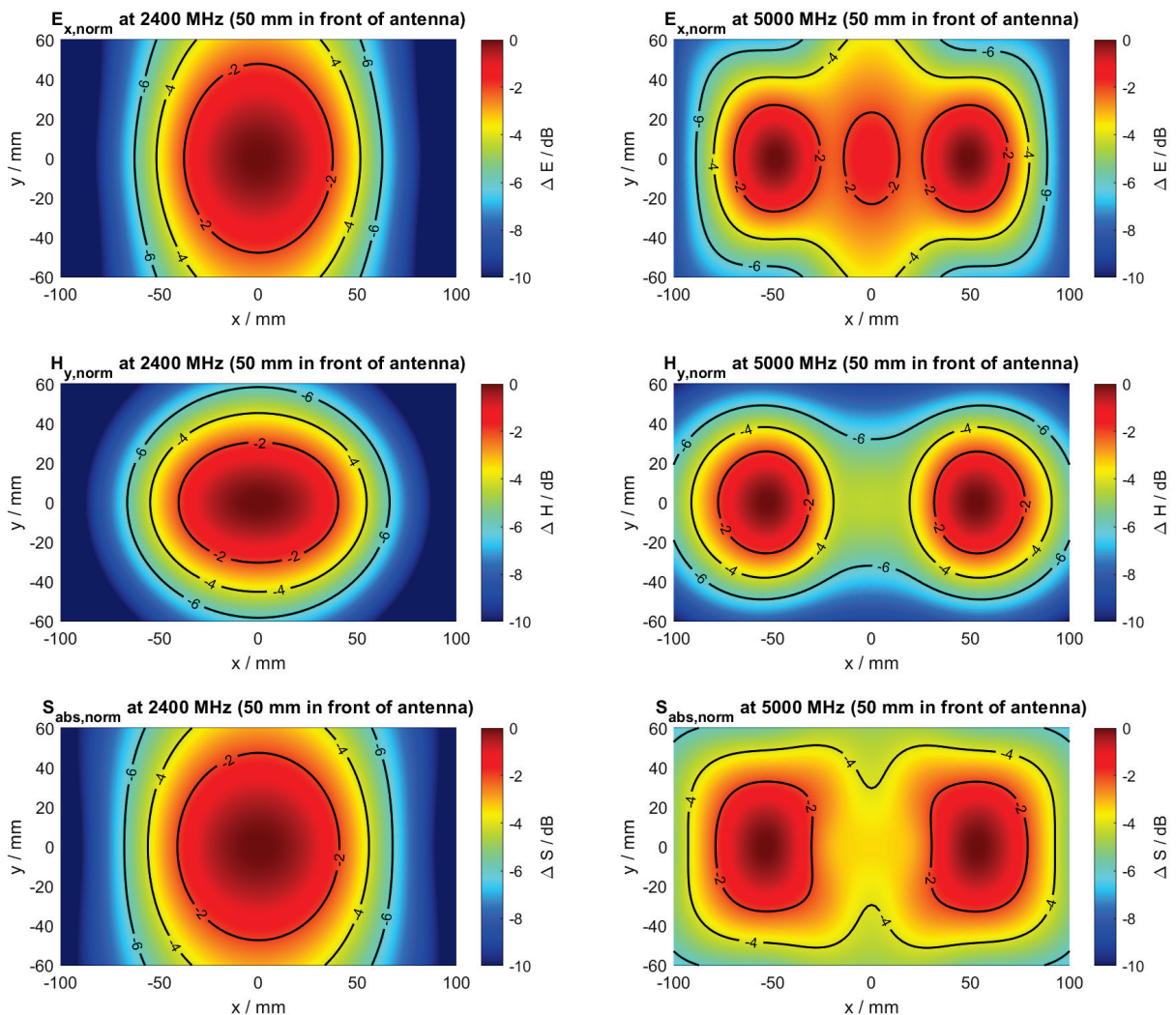


Bild 5: Berechnete elektrische Feldstärke (oben), magnetische Feldstärke (Mitte) und zeitlich gemittelte Leistungsdichte (unten) für 2,4 GHz und 5 GHz der 422 NJ – 50 mm vor der Antenne (Simulation)

### 3.4 Untersuchung der TEM-Horn-Antenne

Auch für das TEM-Horn (Bild 6) wurden die  $E$ - und  $H$ -Felder sowie die zeitlich gemittelte Leistungsdichte  $S$  mit CONCEPT-II berechnet und für 400 MHz und 2,4 GHz in Bild 7 dargestellt.

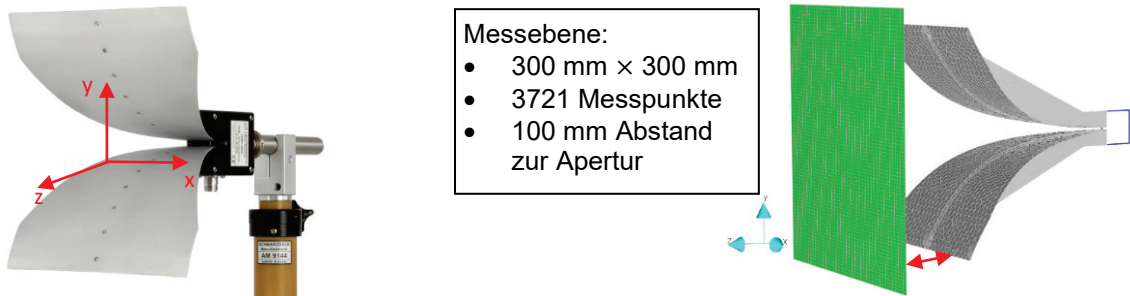


Bild 6: TEM-Hornantenne (Antenne und Modell mit grün dargestellter Messebene)

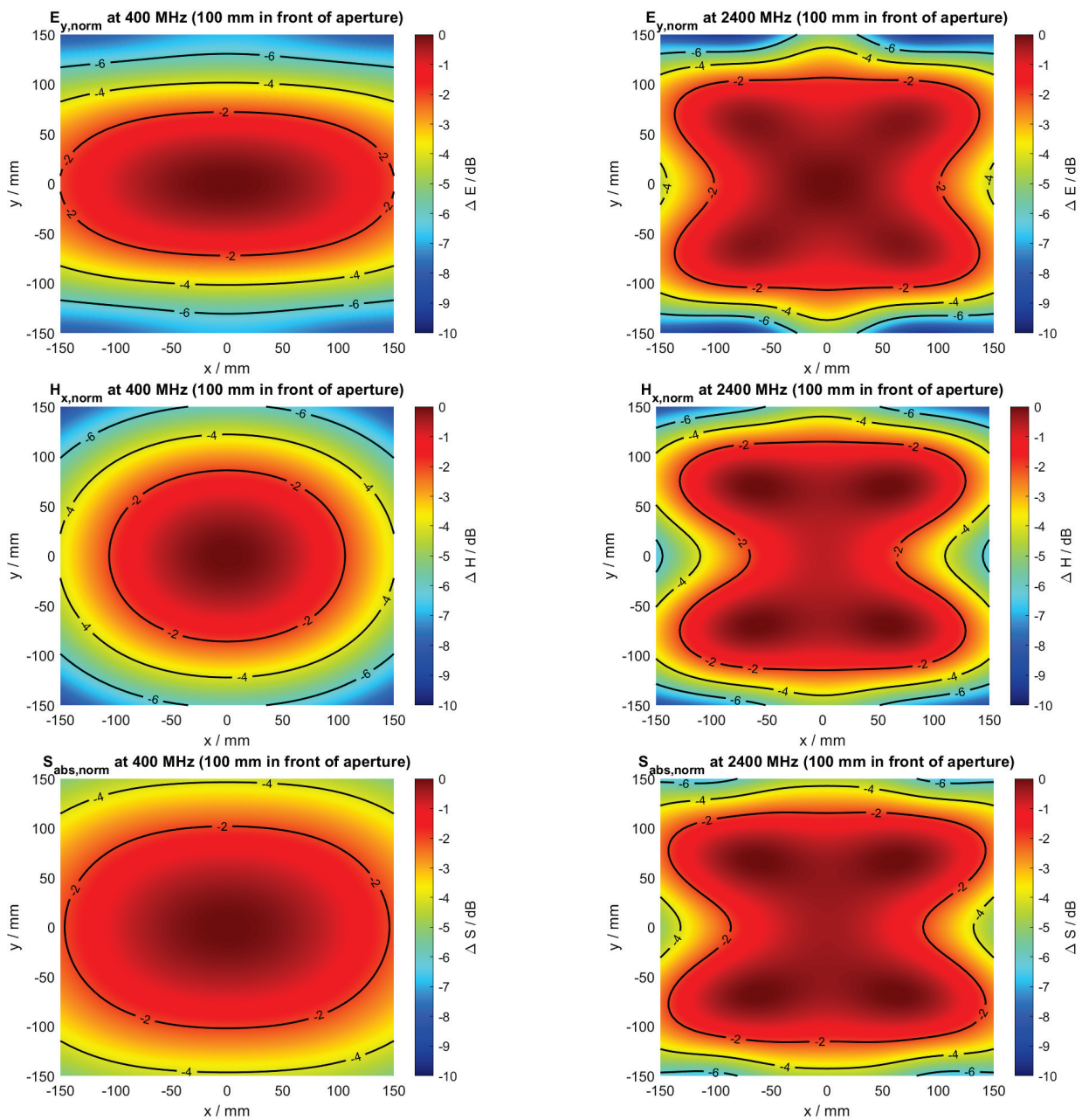


Bild 7: Berechnete elektrische Feldstärke (oben), magnetische Feldstärke (Mitte) und zeitlich gemittelte Leistungsdichte (unten) für 400 MHz und 2400 MHz des TEM-Horns – 100 mm vor der Apertur (Simulation)

Bei 400 MHz sind noch Unterschiede der Feldverteilung zwischen  $E$  und  $H$  erkennbar. Das Maximum liegt im Zentrum der Antenne. Bei 2,4 GHz sind die Unterschiede zwischen  $E$  und  $H$  bereits erheblich geringer und es steht ein relativ großes homogenes Feld zur Verfügung. Diese frequenzabhängigen Effekte der Antennentypen auf  $E$  und  $H$  werden im Folgenden erläutert.

### 3.5 Vergleich des Feldwellenwiderstandes über den Abstand von der Antenne

In Bild 8 ist die Abweichung des aus  $E$  und  $H$  berechneten Feldwellenwiderstandes  $Z_F = E/H$  gegenüber dem Freiraumwellenwiderstand  $Z_{F0} = 120 \pi \Omega$  bis in 300 mm Entfernung von der Frontseite der Flachelemente der 420 NJ und 422 NJ dargestellt. Mit steigender Frequenz und konstanten Abstand vom Antennenelement nähert sich  $Z_F$  dem  $Z_{F0}$ . Das Gleiche gilt mit steigenden Abstand von der Antenne bei konstanter Frequenz. Bei der 420 NJ Antenne mit Flachelementen erfolgt die Messung für die unteren Frequenzen im Nahfeld. Dieser Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der  $Z_F$  nicht konstant ist und noch nicht  $Z_{F0}$  erreicht hat. Weiterhin bestehen Feldkomponenten des elektrischen und magnetischen Feldes in Ausbreitungsrichtung. In Bild 9 (links) ist der Verlauf des Feldwellenwiderstandes für das TEM-Horn für einen Abstand von 0 mm bis 300 mm von der Apertur dargestellt. Prinzipbedingt werden mit der TEM-Hornantenne schneller Fernfeldbedingungen erreicht, da die Antenne bereits ein TEM-Feld erzeugt. Bild 9 (rechts) zeigt den Übergang vom reaktiven zum strahlenden Nahfeld und dann zum Fernfeld in Abhängigkeit von der Frequenz und der Messentfernung [7]. Die normativ vorgegebenen Abstände sind für die Flachelemente und das TEM-Horn als waagerechte Linien eingetragen. Auf den Zusammenhang zwischen der Messung im Nahbereich und der Messung im Nah-/Fernfeld wird in der Zusammenfassung nochmals eingegangen.

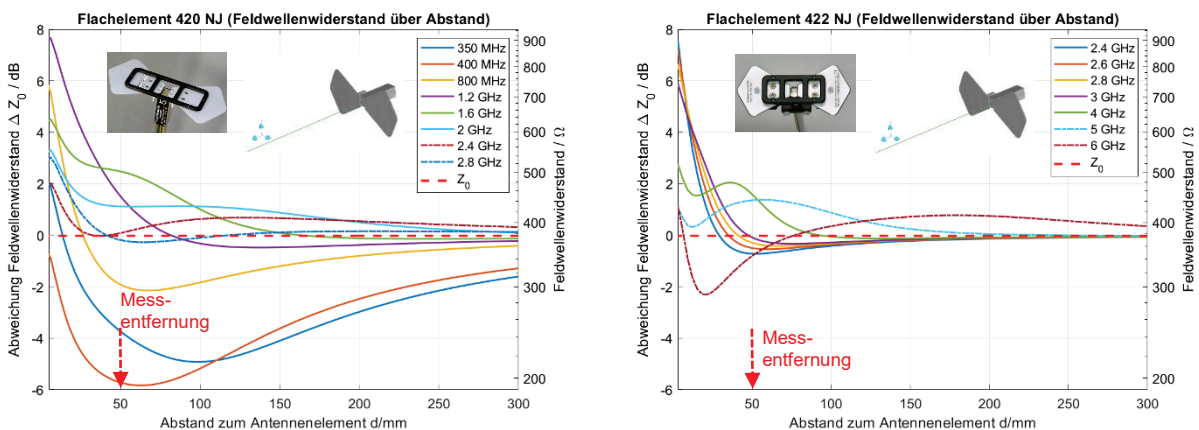


Bild 8: Feldwellenwiderstand der Antennen mit Flachelementen (links – 420 NJ / rechts 422 NJ)

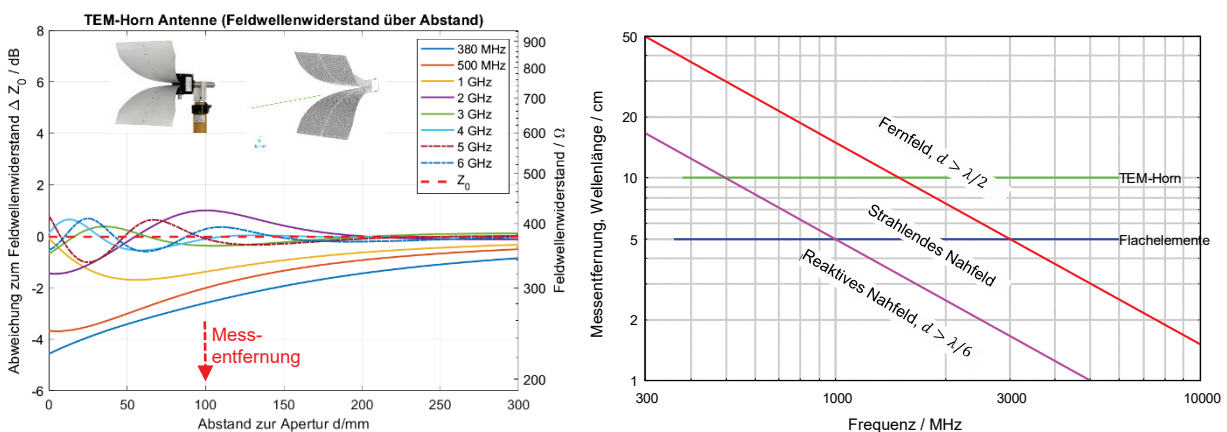


Bild 9: Feldwellenwiderstand der TEM-Hornantenne (links) – Zusammenhang zwischen Messentfernung, Frequenz und dem Übergang vom Nah- zum Fernfeld (rechts)

### 3.6 Vergleich zwischen Simulation und Messung am Beispiel der 422 NJ

Die folgenden Diagramme zeigen exemplarisch für die 422 NJ bei den Frequenzen 2,4 GHz und 5 GHz den Vergleich der jeweils links dargestellten gemessenen mit der jeweils rechts dargestellten berechneten elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke im Abstand von 50 mm von der Stirnseite der Flachelemente. Neben den bereits beschriebenen messtechnisch bedingten Abweichungen wurden auch bei der Simulation Vereinfachungen vorgenommen – beispielsweise wurde der Antennenhalter vernachlässigt. Unter Berücksichtigung der verwendeten Skalierung stellt die gute Übereinstimmung auch eine Validierung der numerischen Berechnung bzw. des Modells dar.

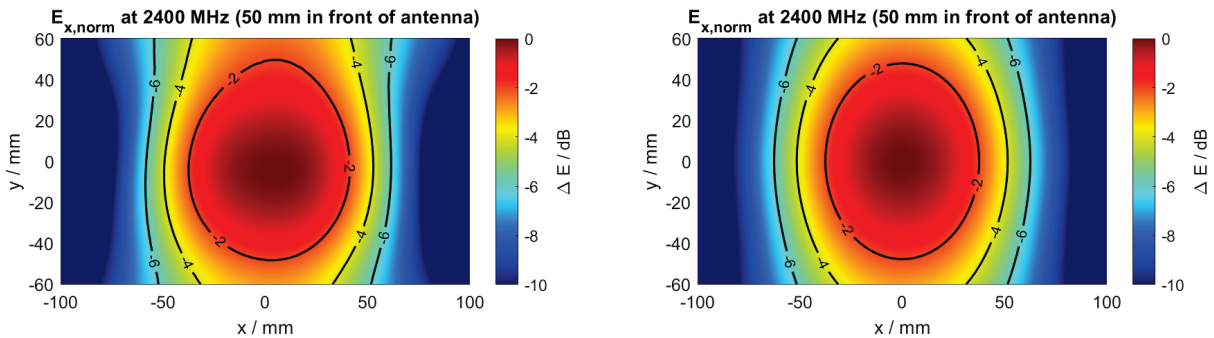


Bild 10: Gemessene (links) und berechnete (rechts) **elektrische Feldstärke** bei 2400 MHz für die 422 NJ

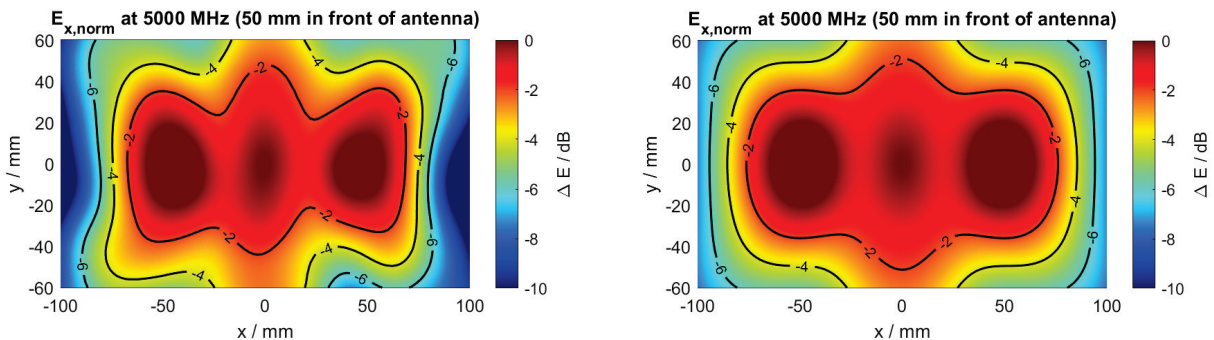


Bild 11: Gemessene (links) und berechnete (rechts) **elektrische Feldstärke** bei 5 GHz für die 422 NJ

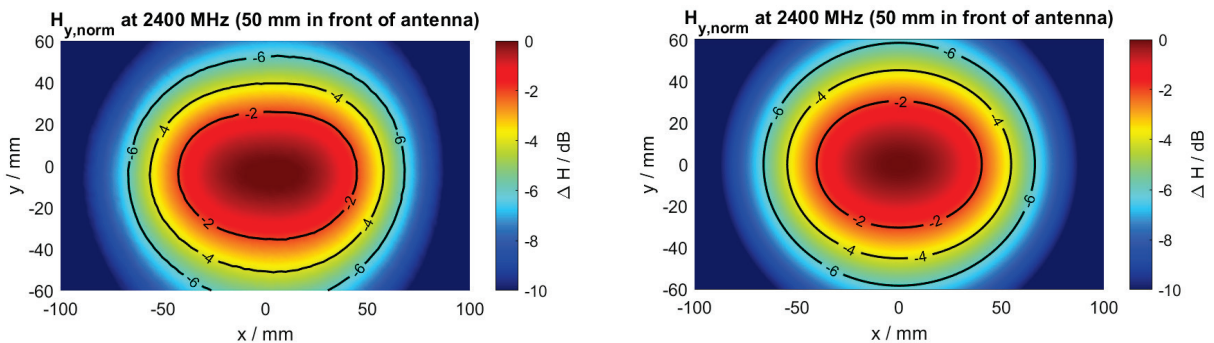


Bild 12: Gemessene (links) und berechnete (rechts) **magnetische Feldstärke** bei 2,4 GHz für die 422 NJ

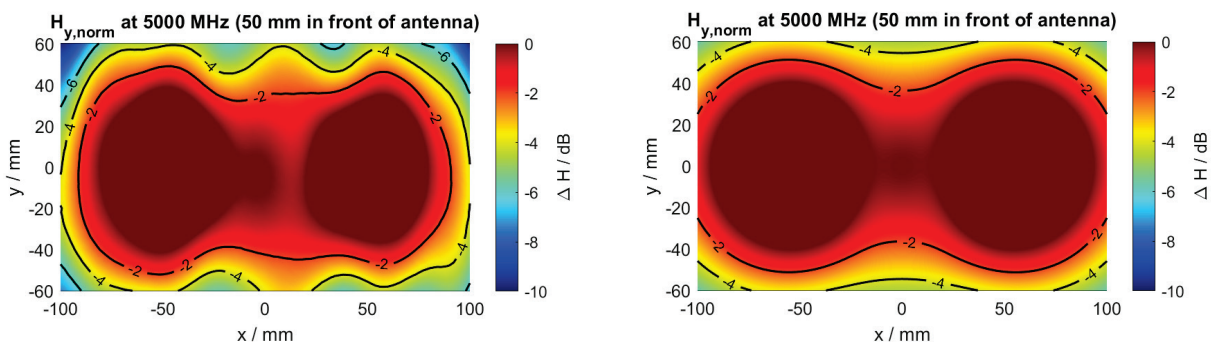


Bild 13: Gemessene (links) und berechnete (rechts) **magnetische Feldstärke** bei 5 GHz für die 422 NJ

## 4 Zusammenfassung

Der Beitrag stellt gemessene und berechnete Feldverläufe und Feldwellenwiderstände unter Berücksichtigung der Messentfernung für Antennen mit Flachelementen und TEM-Hornstrahler dar. Aufgrund des großen betrachteten Frequenzbereiches und der kurzen Messentfernung tritt ein Übergang vom Nah- zum Fernfeld auf. Der Sinn der Prüfung ist die Nachbildung realer Störszenarien durch eine künstliche Störquelle im Nahbereich. Die dabei auftretenden Felder und Leistungsflussdichten sind nachzubilden und es ist ausdrücklich nicht das Ziel, Fernfeldbedingungen zu erreichen. Die Normen schreiben eine Messung der Feldhomogenität in bestimmten Messentfernungen vor.

Sowohl Flachelemente als auch TEM-Hornstrahler können mit geringer Eingangsleistung relativ hohe Feldstärken erzeugen. Damit haben geringe Änderungen der Messentfernung einen erheblichen Einfluss auf das am Prüfling vorhandene elektromagnetische Feld [8]. Für eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen ist daher der Einsatz verlustarmer dielektrischer Abstandhalter (Spacer) sinnvoll.

Flachelemente und TEM-Hornstrahler sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich geeignet. Beispielsweise sind Flachelemente für die Analyse von Einkoppelpfaden bei Störfestigkeitsproblemen praktischer in der Anwendung als das TEM-Horn. Das gilt speziell bei begrenzten Platzverhältnissen. Das TEM-Horn erreicht dafür eine höhere Bandbreite und es entfällt ein potentieller Antennenwechsel.

Aufgrund der geringen Messentfernung haben die "Close-Proximity-Messverfahren" wesentliche Vorteile gegenüber den typischerweise genutzten gestrahlten Störfestigkeitsverfahren:

- Mögliche Umgebungseinflüsse treten in den Hintergrund.
- Wirtschaftlichkeit durch einen hohen Kopplungsgrad – insbesondere im GHz-Bereich.
- Der konkrete Ort der Störeinkopplung lässt sich gezielter lokalisieren und ggf. beheben.
- Die effektive Einkopplung erleichtert Tests mit deutlich erhöhten Pegeln, um potentielle Kopplungswege (z. B. für die Risikobewertung) zu detektieren.

## 5 Literaturangaben

- [1] ISO 11452-9:2021, Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 9: Portable transmitters
- [2] DIN EN 61000-4-39:2019-04, VDE 0847-4-39:2019-04, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-39: Prüf- und Messverfahren - Gestrahlte Felder im Nahbereich - Prüfung der Störfestigkeit (IEC 61000-4-39:2017); Deutsche Fassung EN 61000-4-39:2017
- [3] D. Schwarzbeck, "Field Uniformity Measurements of Flat Broadband Dipoles Used for Near-Field Immunity Testing," in IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, vol. 2, no. 3, pp. 72-75, Sept. 2020, DOI: [10.1109/LEMCPA.2020.3018935](https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2020.3018935)
- [4] IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements, IEEE Std. 1720-2012, pp.1-102, 5 Dec. 2012, DOI: [10.1109/IEEESTD.2012.6375745](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6375745).
- [5] C. Schuster, „CONCEPT-II“ unter: <https://www.tet.tuhh.de/concept/> (abgerufen am 27.04.2022)
- [6] H. Hirsch and R. Heinrich, "Simulation and experimental investigations of a TEM horn antenna for RF radiated immunity testing in close proximity," 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2017, pp. 1-5, DOI: [10.1109/EMCEurope.2017.8094739](https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2017.8094739).
- [7] D. Slater, "Near-Field Antenna Measurements", Artech House, Boston, 1991
- [8] K. Takaya, N. Nakamura, Y. Hiroshima and Y. Okugawa, "Study on test distance between EUT and antenna for radiated immunity test in close proximity to equipment," 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2016, pp. 285-289, DOI: [10.1109/EMCEurope.2016.7739202](https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2016.7739202).