

Aktive Bikonusantennen als Transfernormale zwischen Zellen- und Freiraumkalibrierung



Dieter Schwarzbeck
Schwarzbeck Mess Elektronik OHG
Ziegelhäuser Straße 25
D-69250 Schönau / Germany
e-mail: support@schwarzbeck.de
www.schwarzbeck.com

Antennenfaktor Definition

Der Antennenfaktor beschreibt den Zusammenhang zwischen existierender Feldstärke am Ort einer Antenne und deren Ausgangsspannung an 50 Ω .

Häufig wird der Antennenfaktor in logarithmierter Form verwendet, dann spricht man vom Antennen-Wandlungsmaß.

$$E = U_{\text{ant}} + AF$$

E: E-Feldstärke in dB μ V/m

U_{ant} : Ausgangsspannung der Antenne an 50 Ω in dB μ V

AF: Antennenfaktor in dB/m

Methoden zur Bestimmung des Antennenfaktors

Aufgrund von stark ausgeprägten Wellenausbreitungsphänomenen (konstruktive und destruktive Interferenz) hat sich in den letzten 30 Jahren die Verwendung des Freiraum-Antennenfaktors allgemein durchgesetzt.

Es gibt zahlreiche Methoden zur Bestimmung des Antennenfaktors, die Mehrzahl ist in CISPR 16-1-6 beschrieben:

- SAM (Standard-Antennen-Methode)
- SSM (Standard-Messplatz-Methode)
- TAM (Drei-Antennen-Methode)
- Standard-Felderzeugung mit Crawford-TEM-Zelle

Kalibrierverfahren Crawford-TEM-Zelle

- Standard-Felderzeugung in Crawford-TEM-Zellen
- DC - 840 MHz
- Aufgeweitete Koaxialleitung mit Rechteckquerschnitt
- $E = U_z/d$
- Aus dem Kehrwert der Septumhöhe d ergibt sich das Wandlungsmaß einer Crawford-TEM-Zelle



Kalibrierverfahren Crawford-TEM-Zelle

- Leitungsimpedanz: $Z_L = 50 \, \Omega$
- Fernfeldbedingungen, da E und H senkrecht zueinander stehen: $Z_0 = 377 \, \Omega$
- sehr gute Anpassung
- sehr glatter Frequenzgang im TEM-Betrieb
- Erzeugung hoher Feldstärken möglich
- sehr gute Feldhomogenität
- Verbesserung der Genauigkeit durch Einführung eines Korrekturfaktors möglich (abhängig von der Prüflingsgröße)



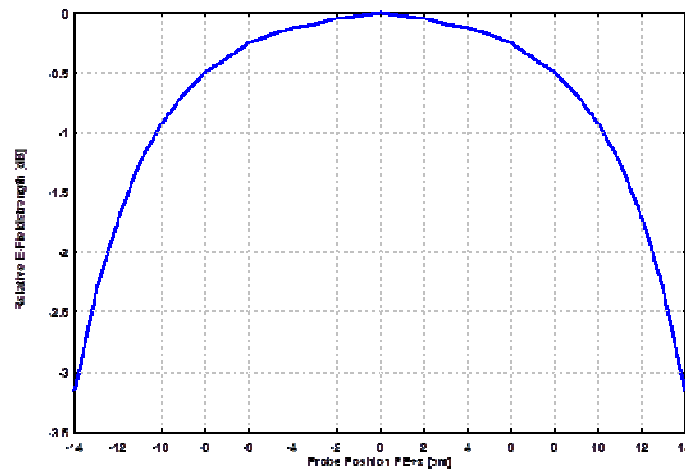
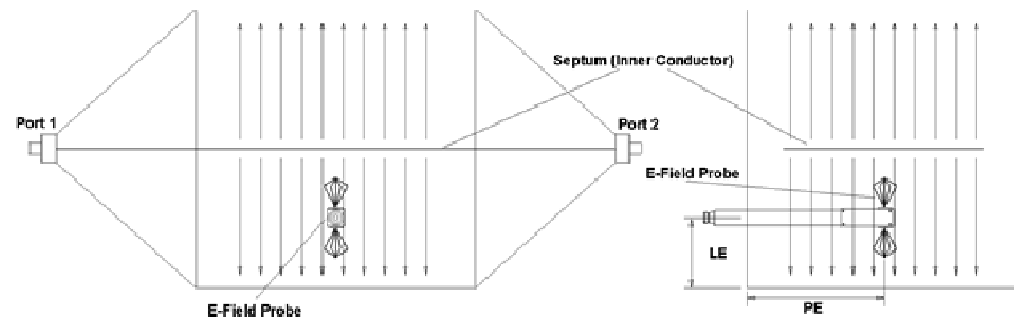
Kalibrierverfahren Crawford-TEM-Zelle

Limitierung: Obere Frequenzgrenze
(Eigenmoden, höhere Wellentypen)

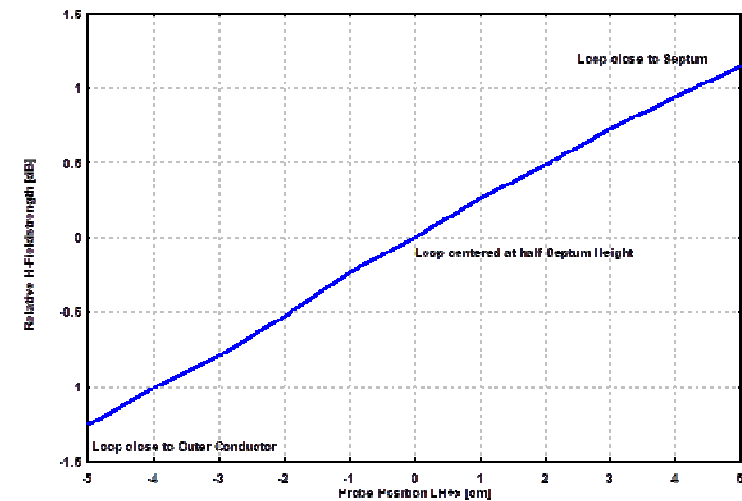
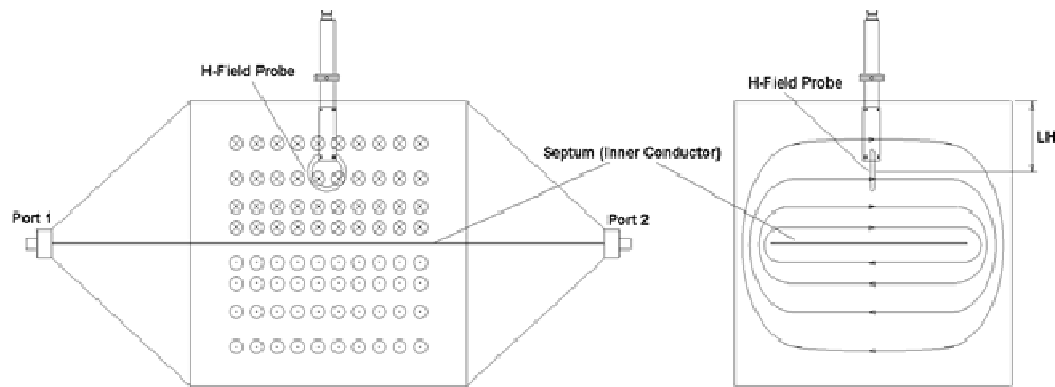
Limitierung: Prüflingsgröße /
Koppelkapazität zum Septum



Crawford-TEM-Zelle, E-Feldlinienverlauf



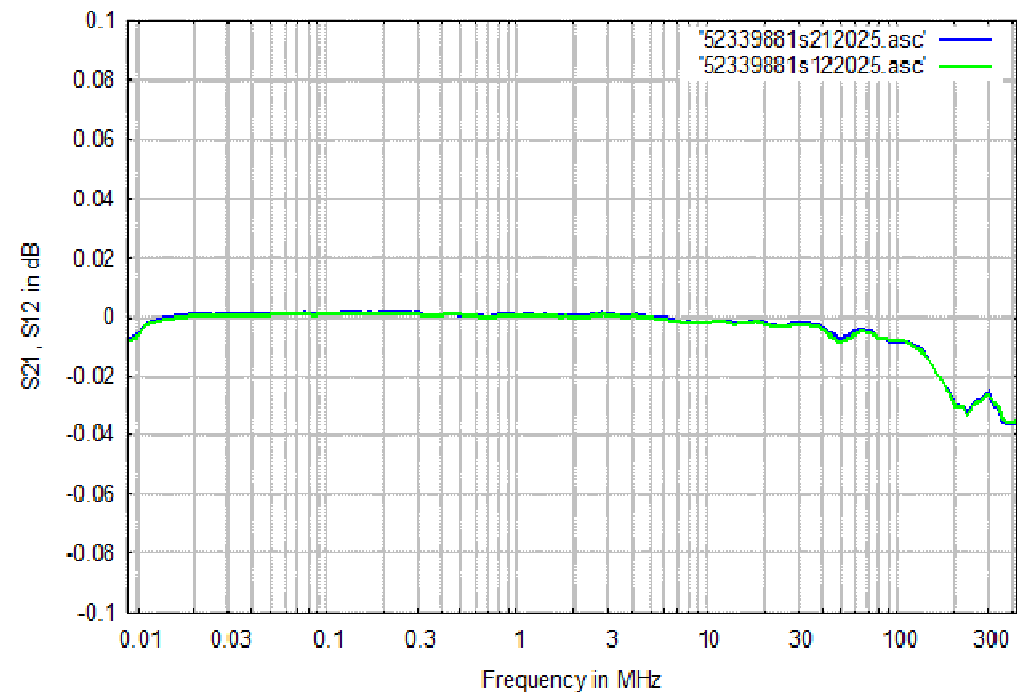
Crawford-TEM-Zelle, H-Feldlinienverlauf



Crawford-TEM-Zelle, Transmission

Gemessener Transmissionsverlauf zwischen den Ports einer TEM-Zelle mit 0.2 m Septumhöhe (TEMZ 5233).

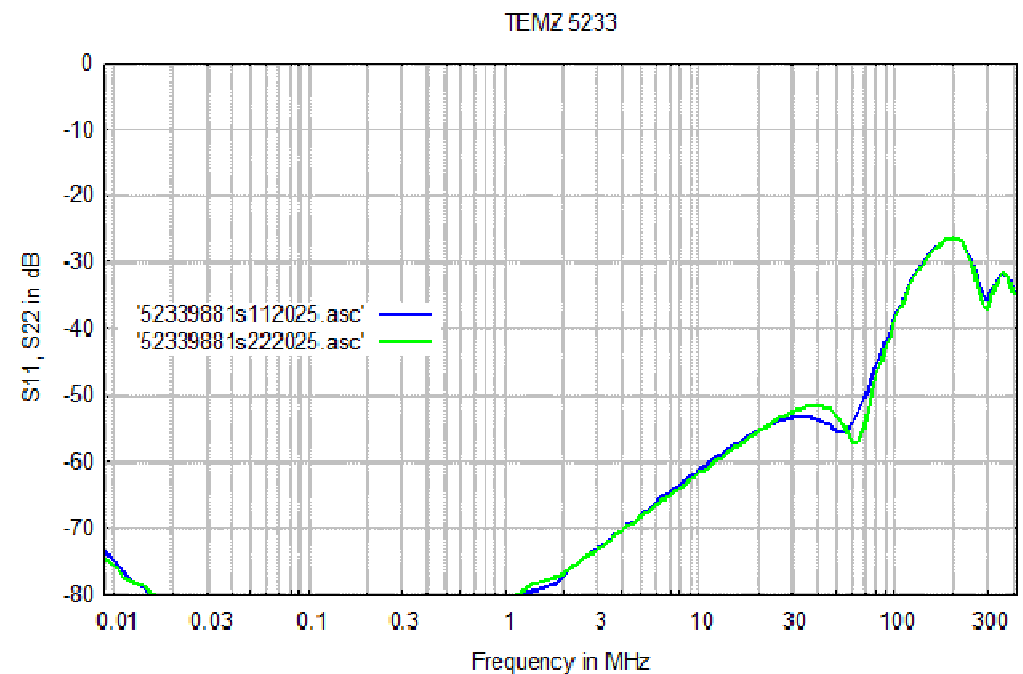
Die Verluste längs des Wellenleiters sind extrem gering.



Crawford-TEM-Zelle, Reflexion

Gemessener Reflexionsverlauf an den Ports einer TEM-Zelle mit 0.2 m Septumhöhe (TEMZ 5233).

Durch die sehr gute Anpassung ergibt sich eine geringe Welligkeit der Feldstärke längs der Leitung.



Crawford-TEM-Zelle:

Nutzbarer Frequenzbereich und Septumhöhe

Septumhöhe	Wandlungsmaß für elektrische Feldstärke <i>KZelle</i>	Wandlungsmaß für magnetische Feldstärke	Maximale Prüflingsgröße	Obere Grenzfrequenz für TEM-Wellen	Gesamthöhe der Zelle
m	$\text{dB} \cdot 1/\text{m}$	$\text{dB} \cdot 1/\Omega\text{m}$	mm	MHz	m
0.1	20.00	-31.53	≈ 50	≈ 840	0.2
0.2	13.98	-37.55	≈ 100	≈ 420	0.4
0.3	10.46	-41.07	≈ 150	≈ 280	0.6
0.5	6.02	-45.51	≈ 250	≈ 168	1.0
1.0	0.00	-51.53	≈ 500	≈ 84	2.0
1.5	-3.52	-55.05	≈ 750	≈ 56	3.0

Crawford-TEM-Zelle mit aktiver Bikonusantenne



Messung:

$S_{21}(f)$ von Port 1 nach Port 2

Port 3: Abschluß 50 Ω

Drei-Antennen-Methode

- Kalibrierung des Freiraum-Antennenfaktors auf dem Freifeld
- Frequenzbereich: 20 MHz – 40 GHz
- Drei paarweise Transmissionsmessungen ergeben ein Gleichungssystem aus drei Gleichungen mit drei Unbekannten.
- Quasi-Fernfeldbedingungen bei angemessener Berücksichtigung des Phasenzentrums
- keine Referenzantennen notwendig (SAM)
- kein „goldener“ Messplatz notwendig (SSM)
- geringe Einschränkungen bzgl. Prüflingsgröße

Drei-Antennen-Methode

Drei paarweise
Transmissionsmessungen ergeben
ein Gleichungssystem aus drei
Gleichungen mit drei Unbekannten.

- $S_{21}(f, d, C+B)$
- $S_{21}(f, d, C+A)$
- $S_{21}(f, d, B+A)$

Das entstehende Gleichungssystem
kann für jede Einzelantenne
aufgelöst werden.

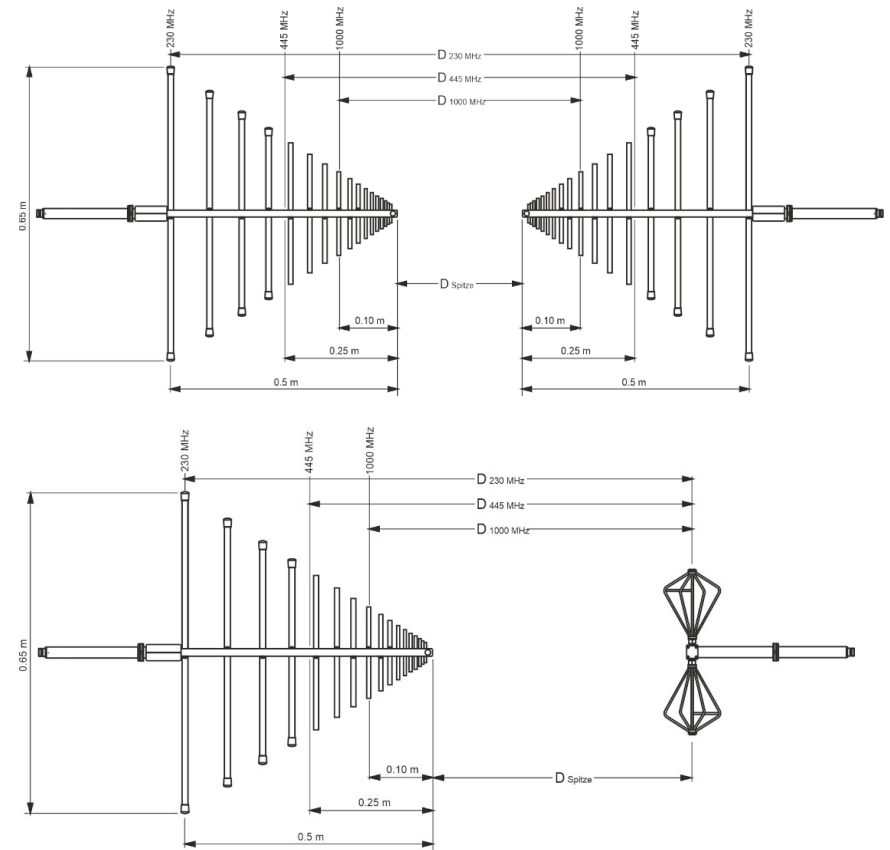


Drei-Antennen-Methode, Phasenzentrum

- Die Berücksichtigung des jeweils wirksamen Phasenzentrums in Abhängigkeit von der Frequenz führt zu Fernfeld-Daten.
- Die Lage des Phasenzentrums muss für alle drei mögliche Paarungen separat berücksichtigt werden.
- Bei LPDA und Hybridantennen gilt für die Strahlungszone: $L_E = \lambda/2$

Zusatzvoraussetzungen:

- zwei passive Antennen erforderlich
- Die aktive Antenne muss an den Empfänger-Port



Drei-Antennen-Methode

Limitierung: untere Frequenzgrenze (Nahfeld, $\lambda_{30 \text{ MHz}} = 10 \text{ m}$)

Limitierung: geringe Feldstärken

Kalibrierverfahren im Vergleich: Grenzen der Verfahren

- Crawford-TEM: Prüflingsgröße
- Crawford-TEM: obere Frequenzgrenze der TEM-Wellenausbreitung
- TAM: untere Frequenzgrenze (Nahfeld, $\lambda_{30 \text{ MHz}} = 10 \text{ m}$)
- TAM: geringe Feldstärken (eher unkritisch)

Um eine Vergleichbarkeit der vorgestellten Kalibrierverfahren zu erreichen, müssen die verfahrensbedingten Einschränkungen im Frequenzbereich und in der Prüflingsgröße überwunden werden.

Dies kann durch **kleine, aktive Bikonusantennen** erreicht werden.

Technische Herausforderungen bei aktiven Bikonusantennen

- Bandbreite (mehr als 5 Frequenzdekaden möglich)
- Empfindlichkeit / Antennenfaktor / Frequenzgang
- Symmetrie
- Gleichtaktunterdrückung
- Kleine Antennenwirkfläche
- Rauschen und Aussteuerbarkeit (kompressionsfreier Dynamikbereich)
- Anpassung im 50 Ω System
- Baugröße
- Temperaturgang
- Betriebsdauer / Akkukapazität
- Aufnahme verschiedener Strahlerelemente
- Robustheit gegen ESD-Schäden
- Robustheit gegen mechanische Schäden

Aktive Bikonusantenne EFS 9221 mit verschiedenen Elementtypen



Größenvergleich

Neu:

EFS 9221 mit Konuselementen:

$L_E = 7.6 \text{ cm}$

9 kHz – 1 GHz

Aktiv

Differenzverstärker mit

Akkubetrieb

Koaxialbuchse



Der Klassiker:

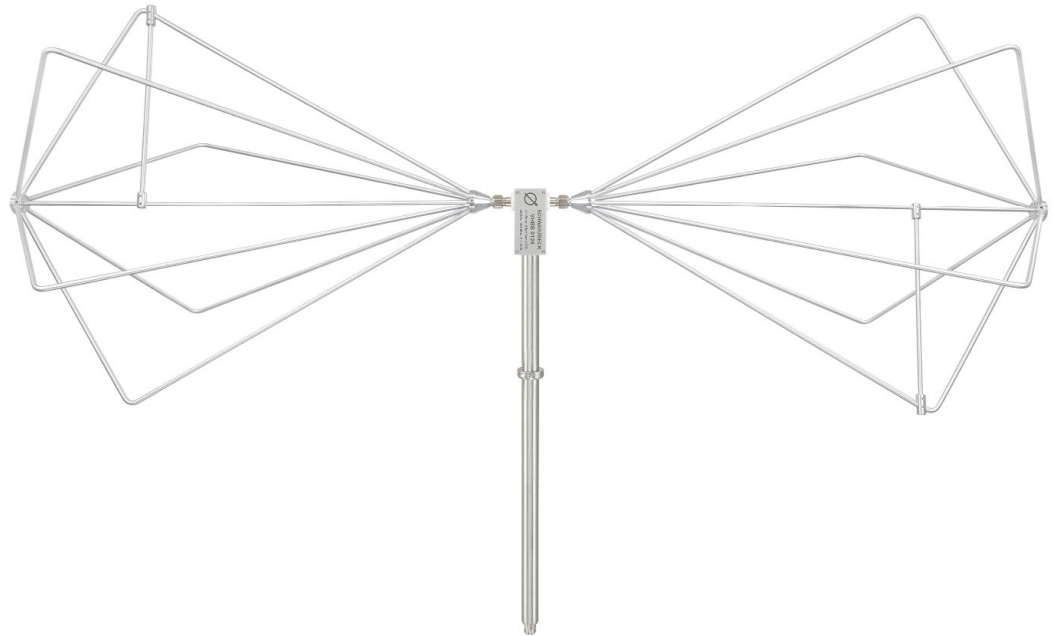
VHBB 9124 + BBA 9106

$L_E = 1.35 \text{ m}$

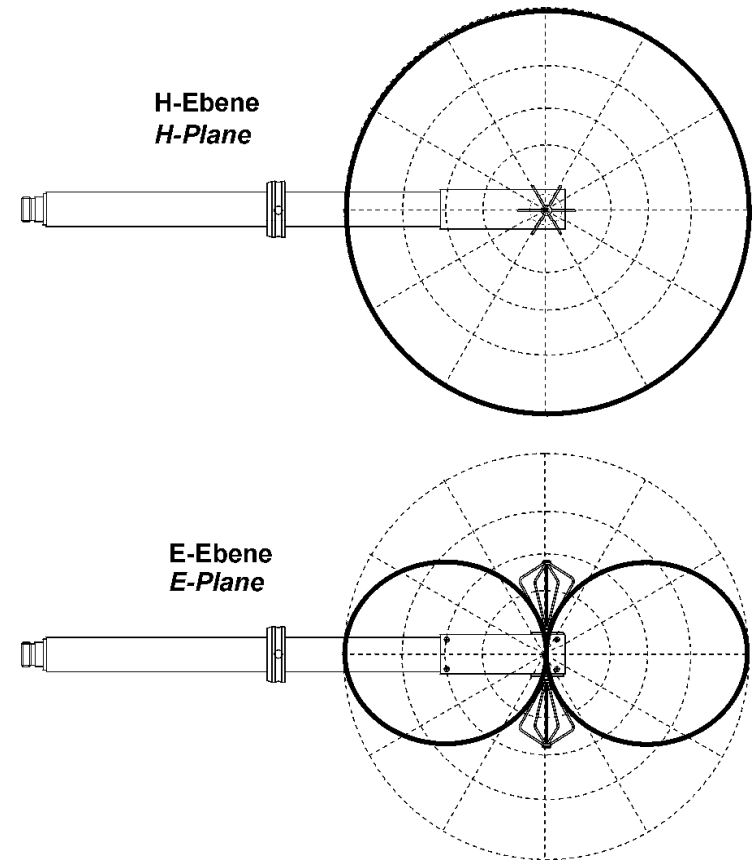
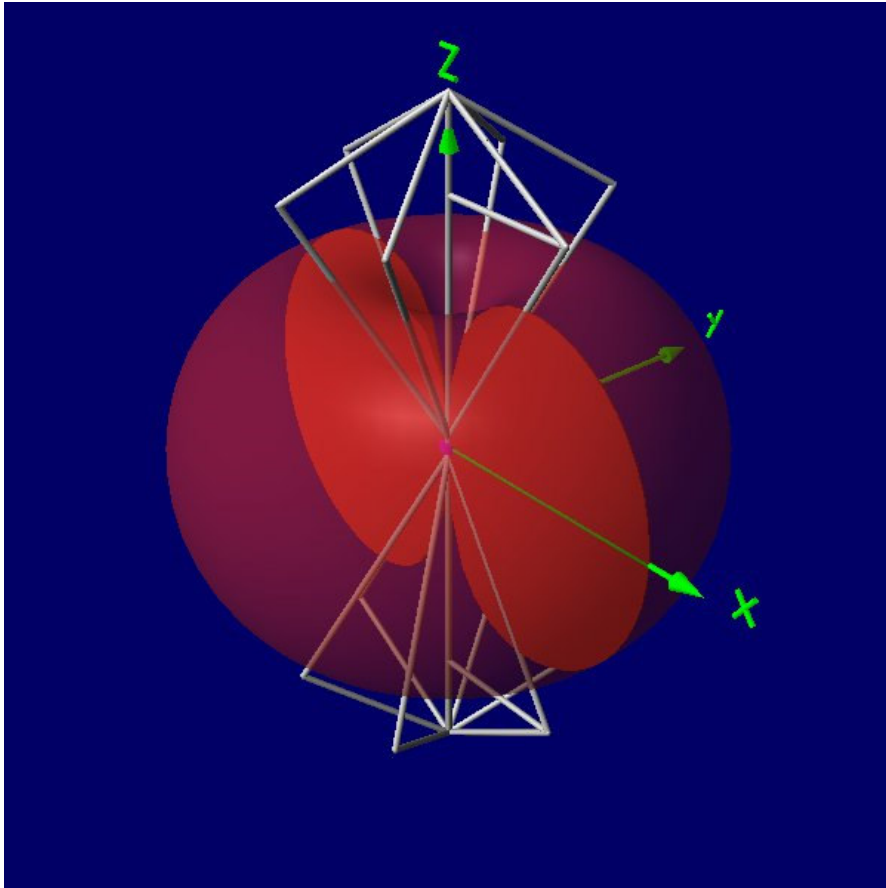
30 – 300 MHz

Passiv

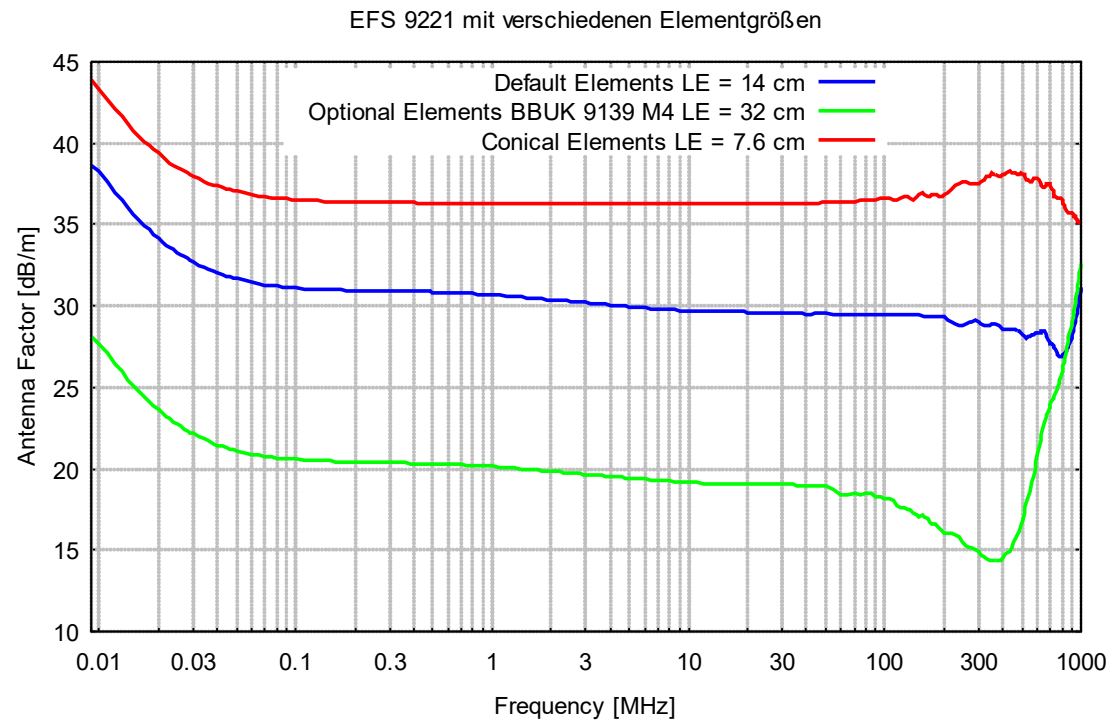
4:1 Balun



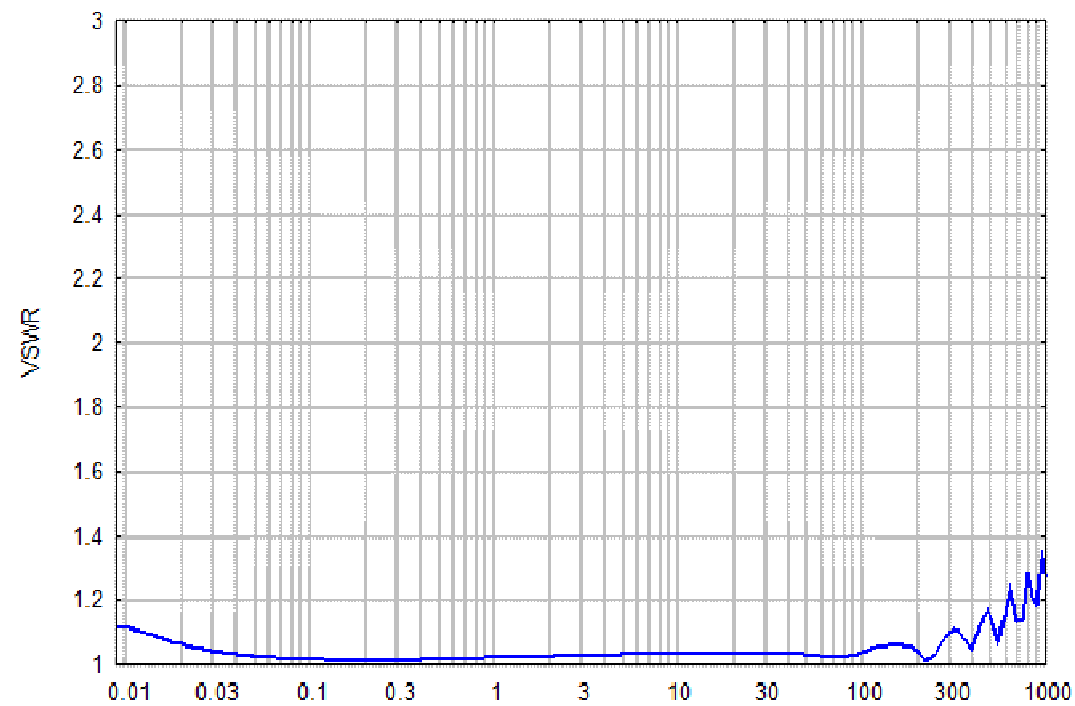
Richtdiagramm von aktiven Bikonusantennen



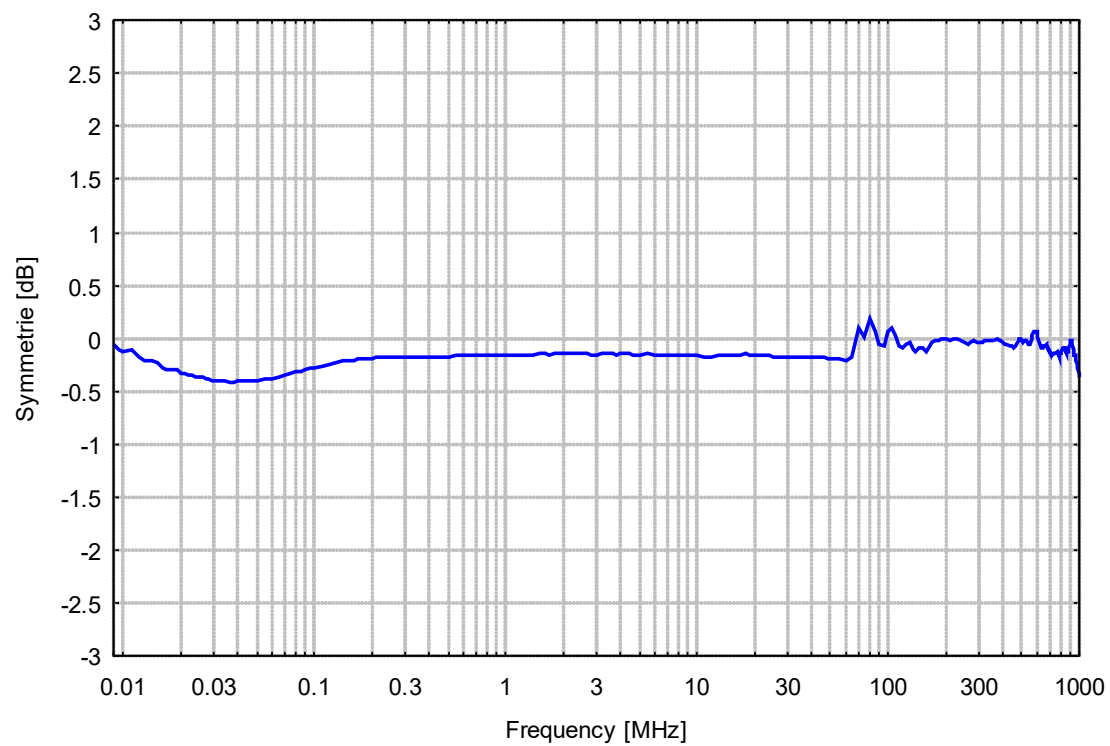
Antennenfaktor bei verschiedenen Elementgrößen



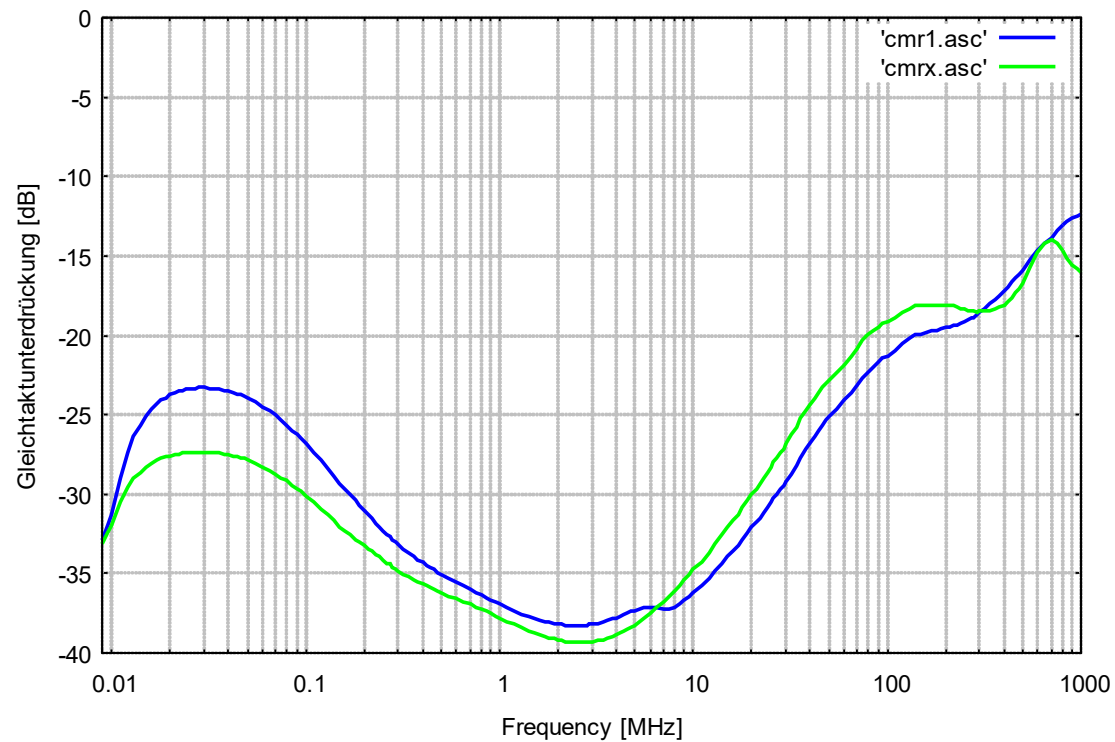
Anpassung im 50 Ω System



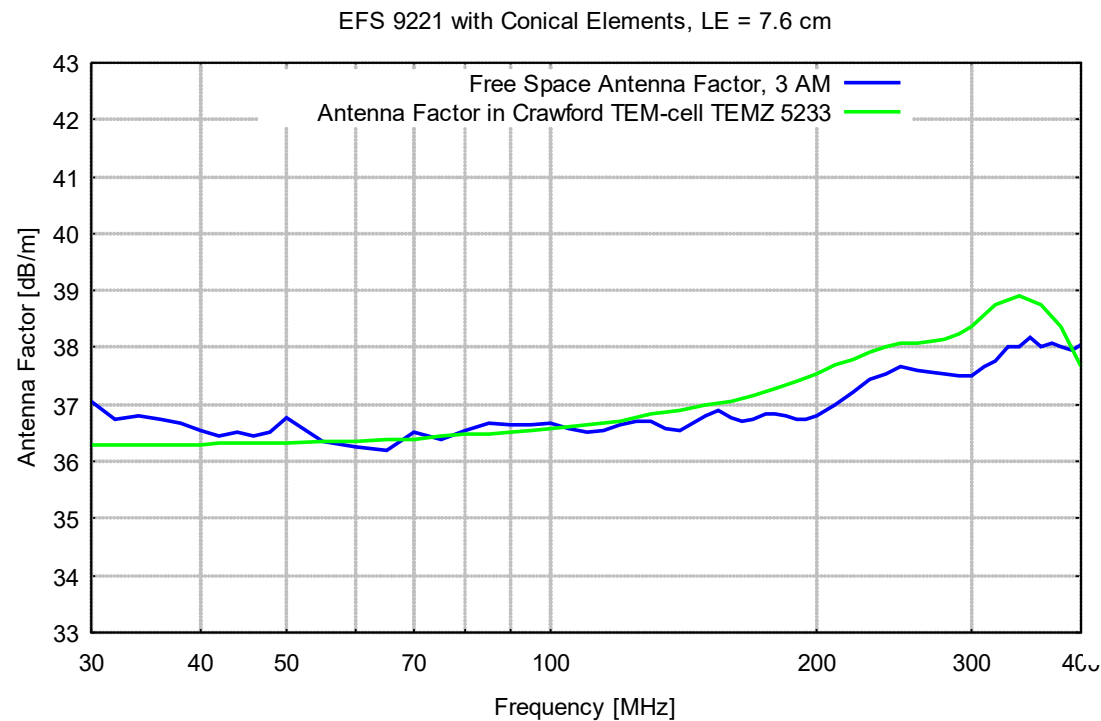
Symmetrie



Unterdrückung von (unerwünschten) Gleichtaktsignalen



EFS 9221 mit Konuselementen



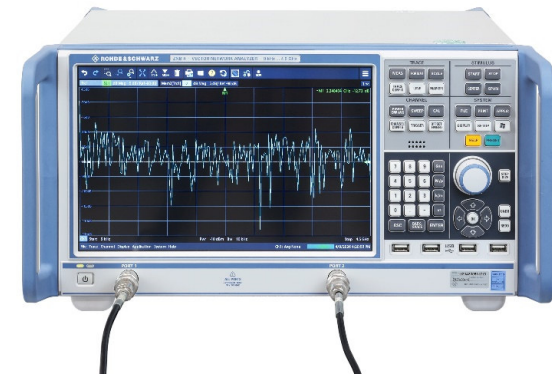
Erreichbare Messunsicherheiten für den Antennenfaktor

- Kalibrierung in der TEM-Zelle: 0.8 dB
- Kalibrierung nach der Drei-Antennen-Methode auf dem Freifeld: 0.7 dB
- Eine Überlappung von ca. einer Frequenzdekade ist möglich (typ. 30-300 MHz), bei weiterer Miniaturisierung auch mehr

Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich / Messspanne	Messbedingungen / Verfahren ¹⁾	Erweiterte Messunsicherheit ²⁾	Bemerkungen
Freiraum- Antennenfaktor und Gewinn	durch Antennen vorgegeben	20 MHz bis 40 GHz 3-Antennenmethode 2-Antennenmethode	0.7 dB	CISPR 16-1-6:2022 SAE ARP958D
Antennenfaktor von aktiven Stabantennen	durch Antennen vorgegeben	9 kHz bis 30 MHz ECSSM (Substitution des Antennenstabs durch Stabnachbildung)	1.0 dB	CISPR 16-1-6:2022 MIL-STD-461G
Antennenfaktor von aktiven Breitbandantennen	durch Antennen vorgegeben	9 kHz bis 840 MHz Erzeugung definierter Feldstärken in Crawford TEM-Zelle	0.8 dB	Linearpolarisation

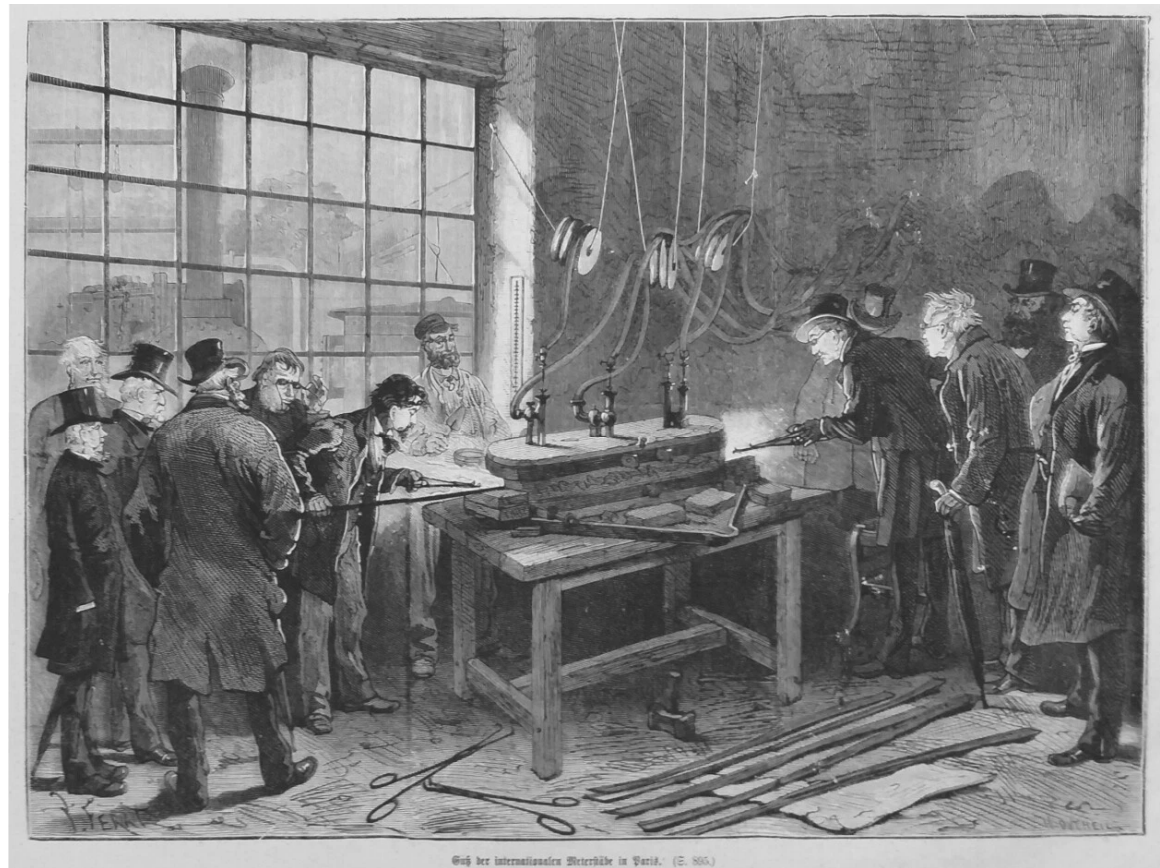
Grundgrößen für die metrologische Rückführbarkeit

- HF-Dämpfung / Transmissionsfaktor S_{21} (f)
(z.B. über vektorielle Netzwerkanalysatoren VNA)
- Länge / Dimensionelle Messgrößen
(z.B. Messschieber, Maßband, Laser)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit! Gerne stehe ich für Rückfragen zur Verfügung

Dieter Schwarzbeck
Schwarzbeck Mess Elektronik OHG
Ziegelhäuser Straße 25
D-69250 Schönau / Germany
e-mail: support@schwarzbeck.de
www.schwarzbeck.com



Guss der internationalen Meterstäbe in Paris, Urmeter,
Original-Holzstich 1874