

Erfahrungen beim Aufbau und der messtechnischen Charakterisierung der Dresdener Modenverwirbelungskammer

Dipl.-Ing. Stephan Pfennig, Prof. Hans Georg Krauthäuser,
 Professur für Theoretische Elektrotechnik und EMV, TU Dresden

1 Einleitung

Der Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit der TU Dresden verfügt seit 2010 über eine Modenverwirbelungskammer (MVK) mit einem vertikalen Modenrührer und den Abmessungen 5.3 m/3.7 m/3.0 m. Als Sende- und Empfangsantennen werden in der MVK ein Paar log.-per. Antennen und ein Paar Hornantennen verwendet, die zusammen den Frequenzbereich von 200 MHz bis 18 GHz abdecken. Weiterhin steht eine lasergespeiste Feldsonde zur Messung der elektrischen Feldstärke zur Verfügung.

Bei der messtechnischen Charakterisierung der MVK fielen verschiedene Erfahrungen an, die in ihrer Gesamtheit einen praxisnahen Einblick in das Thema der Modenverwirbelungskammern geben und erfahrenen Anwendern interessante Vergleichsdaten liefern. Ziel des Konferenzbeitrages ist es anhand ausgewählter Messergebnisse einen ersten Einblick in die aktuellen Forschungsthemen zu geben.

2 Einfluss von Lichtwellenleitern auf die Schirmdämpfung

Zum Nachweis der Schirmwirkung der MVK erfolgte nach deren Aufbau zunächst eine Schirmdämpfungsmessung nach IEEE Std. 299-2006 an fünf Messpositionen. Dabei wurde festgestellt, dass die an der Durchführungsplatte bereits in die Kammer geführten Lichtwellenleiter (LWL) einen Einfluss auf die Schirmdämpfung a_s im Frequenzbereich von 1 GHz bis 18 GHz zeigen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Messung mit und ohne LWL-Kabel zusammengefasst, wobei jeweils nur der Minimalwert für vertikale und horizontale Polarisation der Antennen aufgeführt ist.



Abbildung 1: LWL-Durchführung

f in GHz	Schirmdämpfung a_s in dB									
	mit LWL, Position					ohne LWL, Position				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	110	106	105	110	103	115	125	122	118	110
4	100	93	104	100	100	104	103	110	103	109
10	92	84	90	98	99	108	110	108	103	101
14	76	98	97	97	85	105	114	102	97	83
18	65	82	84	97	75	88	87	90	92	81

Tabelle 1: Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessung - Messpositionen (1) Mitte der Durchführungsplatte, (2) Türspalt links, (3) Türspalt rechts, (4) Netzfilter und (5) Wabenkamin am Rührer

Bei Entfernung der LWL-Kabel aus der LWL-Durchführung verbesserte sich die Schirmdämpfung an der Durchführungsplatte (Position 1) bei 18 GHz z.B. von 65 dB auf 88 dB. Es

konnte weiterhin gezeigt werden, dass der Wert der Schirmdämpfung mit steigender Anzahl der LWL-Kabel fällt. Insgesamt belegen die Messungen, dass die verwendeten LWL-Kabel einen signifikanten Einfluss auf die Schirmdämpfung der Kammer haben und dieser Effekt nicht nur auf die Messposition an der Durchführung begrenzt ist.

Um den Einfluss auf die Güte der Kammer zu untersuchen, wurde bei der späteren Bestimmung der Güte eine Vergleichsmessung im Frequenzbereich von 1 GHz bis 18 GHz mit und ohne LWL-Kabel durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten jedoch keinen Einfluss auf die Güte der Kammer und lassen den Schluss zu, dass die Verluste durch die LWL-Kabel vernachlässigbar klein gegenüber den Wandverlusten sind.

3 Resonanzfrequenzen der Modenverwirbelungskammer

Betrachtet man die MVK zunächst als idealen quaderförmigen Hohlraumresonator können dessen Resonanzfrequenzen berechnet werden. Für den Fall der Dresdener Modenverwirbelungskammer liegt die erste Resonanzfrequenz bei ungefähr 50 MHz. Zur messtechnischen Untersuchung wurde der Vorwärtstransmissionsfaktor S_{21} der Kammer an der Durchführungsplatte mit angeschlossener Sende und Empfangsantenne in Abhängigkeit der Rührerstellung aufgenommen. Die Messdaten für den Frequenzbereich von 60 MHz bis 110 MHz, in dem erste Resonanzerscheinungen beobachtet werden konnten, sind in Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Resonanzfrequenzen durch die Drehung des Rührers, das heißt durch die Änderung der räumlichen Randbedingungen, in der realen MVK wie erwartet verschieben.

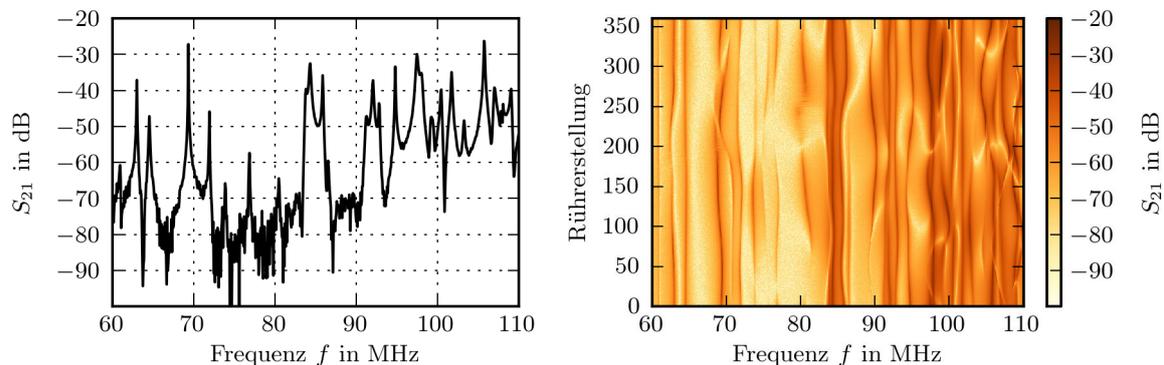


Abbildung 2: Vorwärtstransmissionsfaktor S_{21} in Abhängigkeit der Frequenz

Ein Vergleich mit den berechneten Resonanzfrequenzen der idealen Kammer zeigte, dass eine Zuordnung schwer ist. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die nicht durchgehend ebenen Wände und deren endliche Leitfähigkeit sowie zusätzliche Reflexionen am Modenrührer und anderen Ausrüstungsgegenständen in der Kammer zu einer Verschiebung und unterschiedlich starken Ausprägung der einzelnen Resonanzen führt.

4 Zeitverhalten des Feldes in der Kammer

Zur weiteren Charakterisierung der MVK wurde das Zeitverhalten des Feldes in der Kammer untersucht. Dazu wurde die Kammer über die Sendeantenne mit einem pulsmodulierten Sinussignal angeregt und anschließend der zeitliche Verlauf der Leistung an der Empfangs-

antenne in Abhängigkeit der Frequenz und der Stellung des Modenrührers aufgenommen. Die Untersuchung erfolgte im Frequenzbereich von 50 MHz bis 200 MHz, in dem die ersten Resonanzfrequenzen (Moden) der Kammer liegen und die Modendichte langsam ansteigt. Die Pulsdauer betrug dabei 15 μs und die Periodendauer 200 μs . Die Messung an der Empfangsantenne erfolgte mit einem Spektrumanalysator im 'Zero-Span' Modus und einer Auflösebandbreite von 10 MHz.

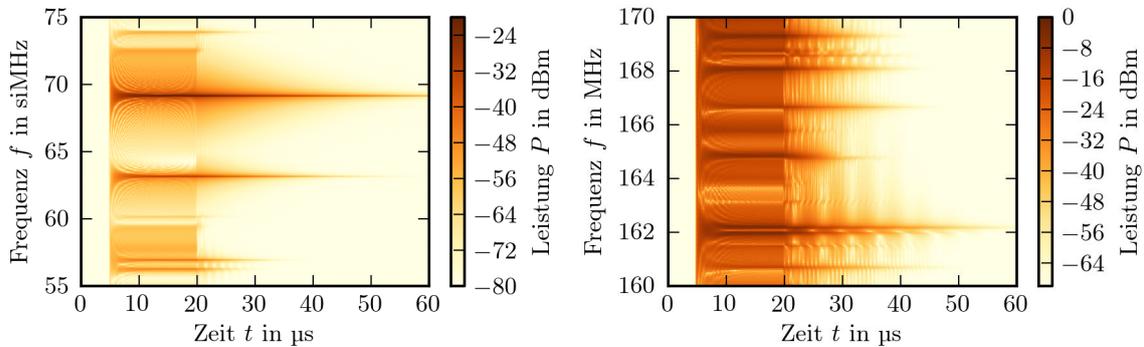


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Leistungspegels an der Empfangsantenne in Abhängigkeit der Frequenz und der Rührerstellung

Einen ersten Einblick in die aufgenommenen Daten geben die Abbildungen 3 und 4, in denen das Zeitverhalten der MVK für verschiedene Frequenzen dargestellt ist. Der Rührer befand sich dabei in seiner Nullstellung. Der dargestellte Verlauf des Leistungspegels kann prinzipiell in 3 Phasen unterteilt werden. In Phase 1, das heißt vor dem Einschalten der Anregungen ist keine Energie in der Kammer gespeichert. Phase 2 beginnt mit dem Einschalten der Anregungen bei 5 μs und dauert 15 μs an. Die bis dahin in der Kammer gespeicherte Energie fällt in Phase 3 bedingt durch Verluste der MVK wieder ab, bis die gesamte Energie verbraucht ist.

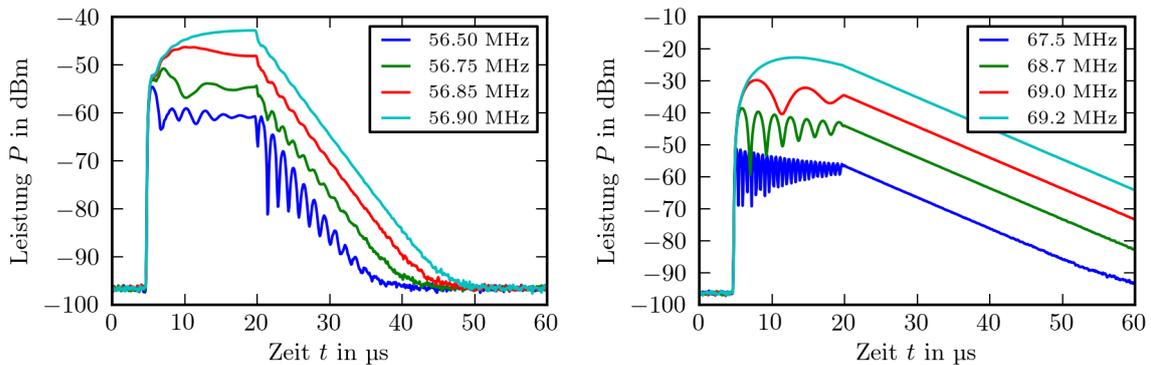


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Leistungspegels in Abhängigkeit der Frequenz

Allgemein würde man für den Abklingvorgang in Phase 3 einen exponentiellen Abfall der Leistung mit der Zeitkonstanten τ der MVK erwarten, d.h. bei logarithmischer Darstellung einen linearen Abfall der Leistungspegels. Anhand der Diagramme sind jedoch überlagerte Effekte zu erkennen, die sowohl in der Anregungsphase und teilweise auch während der Abklingphase auftreten. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Leistungspegel in den beiden Diagrammen unterschiedlich stark abfällt und damit die entsprechenden Zeitkonstanten unterschiedlich groß sind.

Für ausgewählte Frequenzen wurde zusätzlich das Zeitverhalten in Abhängigkeit der Rührerstellung aufgenommen. Die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der zeitliche Abfall der Leistung und damit die Zeitkonstante der MVK in kleinen Winkelsegmenten des Rührers stark variieren kann.

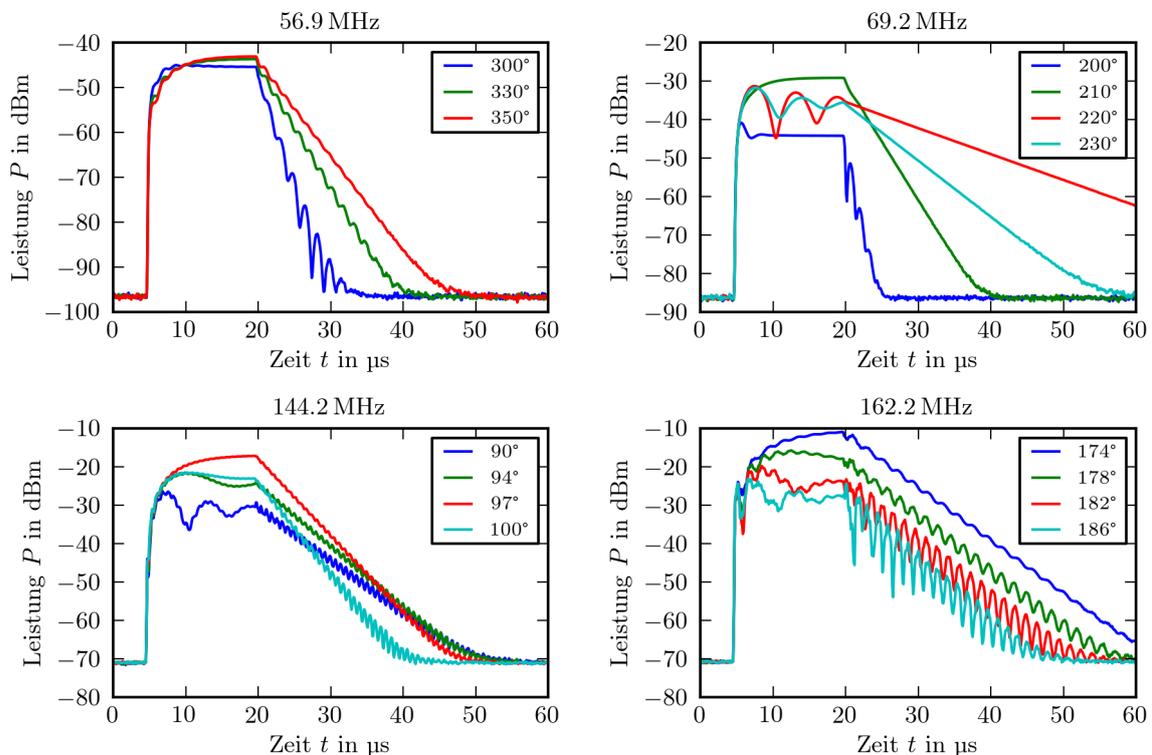


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf des Leistungspegels an der Empfangsantenne in Abhängigkeit der Rührerstellung

Die Untersuchungen des zeitlichen Verhaltens des Feldes in der Kammer zeigen, dass der Abfall der Leistung im betrachteten Frequenzbereich in Abhängigkeit der Frequenz und der Stellung des Rührers signifikant variieren kann und zusätzlich überlagerte Effekte beobachtet werden können. Es wird vermutet, dass sich die in der MVK gespeicherte Energie nach Abschalten der Anregung auf mehreren Eigenmoden im Bereich der Anregefrequenz verteilt, d.h. die Kammer auf mehreren Frequenzen ausschwingt und damit verschiedene Schwebungseffekte auftreten können, die in Überlagerung zum linearen Abfall des Leistungspegels die aufgenommenen Verläufe ergeben.

Da die Zeitkonstante τ der Kammer und deren Güte Q über die Beziehung $Q = \omega \cdot \tau$ verknüpft sind, entspricht die beobachtete Änderung der Zeitkonstanten auch einer Änderung der Güte. Diese soll im nächsten Abschnitt näher untersucht werden.

5 Güte der Kammer

Eine wichtige Größe zur Charakterisierung von Modenverwirbelungskammern ist die Güte Q . Sie ist definiert als das 2π -fache des Verhältnisses der im zeitlichen Mittel im Hohlraumresonator gespeicherten Energie zum Energieverlust pro Schwingungsperiode [2]. Ausgehend von der Definition kann der theoretische Verlauf der Güte berechnet werden, wobei in

der Regel nur die Güteanteile aus den beiden dominierenden Verlustquellen, d.h. den ohmschen Wandverlusten und den Antennenverlusten berücksichtigt werden. Zur Abschätzung des Güteanteils aus den ohmschen Wandverlusten Q_w und des Güteanteils aus den Antennenverlusten Q_a und der daraus resultierenden Güte Q , können die folgenden Gleichungen verwendet werden [4].

$$Q = \left(\frac{1}{Q_w} + \frac{1}{Q_a} \right)^{-1} \quad Q_w \approx \frac{3V}{2S} \sqrt{\pi \mu_0 \sigma_w} f \quad Q_a \approx 16\pi^2 V \left(\frac{f}{c} \right)^3$$

Aus dem Volumen V und der Oberfläche S der MVK, der Leitfähigkeit der Wände σ_w , der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Wellen in der MVK und der Frequenz f können die frequenzabhängigen Güteanteile und anschließend der theoretische Verlauf der Güte Q berechnet werden. Bei Auswertung der Gleichungen ist zu erkennen, dass im unteren Frequenzbereich die Antennenverluste und im oberen Frequenzbereich die Wandverluste den Güteverlauf maßgeblich bestimmen.

Basierend auf den bereits vorgestellten Messungen des zeitlichen Leistungsverlaufes an der Empfangsantenne $P_{Rx}(t)$ nach Anregung der MVK mit einem pulsmodulierten Sinus-signal, wurde zur weiteren Charakterisierung der MVK die frequenzabhängige Güte der leeren Kammer untersucht. Zur Berechnung der Güte Q wurde dabei das bandbreitenreduzierte Zeitbereichsverfahren [4] verwendet, d.h. der zeitliche Abfall des Leistungspegels ΔP_{dB} nach der abfallenden Pulsflanke mit Hilfe einer Geradengleichung angenähert und anschließend aus dem Abfall ΔP_{dB} im Zeitintervall Δt die Güte bei der Frequenz f nach Gleichung 1 [4] berechnet.

$$Q = \frac{20\pi}{\ln 10} \cdot f \cdot \frac{\Delta t}{\Delta P_{dB}} \quad \left(\Delta P_{dB} = 10 \lg \frac{P_{Rx}(t_1)}{P_{Rx}(t_2)}, \Delta t = t_2 - t_1 \right) \quad (1)$$

Aufgrund der Abhängigkeit von der Rührerstellung, wurde zunächst der mittlere Abfall des Leistungspegels über eine volle Rührerdrehung bestimmt, wobei die Mittelwertbildung über 500 Einzelmessungen mit langsam drehendem Rührer und unter Verwendung der Mittelwertfunktion des Spektrumanalysators erfolgte. Anschließend wurde daraus die mittlere Güte $\langle Q \rangle$ berechnet.

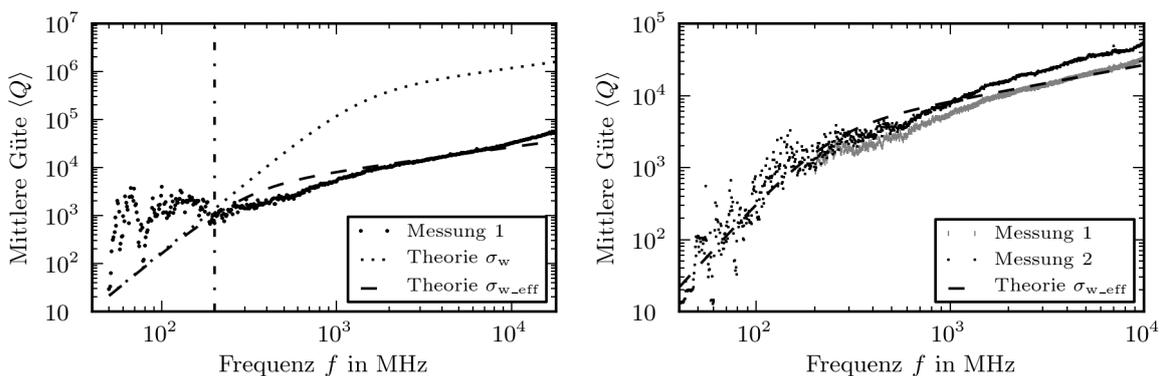


Abbildung 6: Mittlere Güte in Abhängigkeit der Frequenz

Insgesamt wurden zwei Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 6 dargestellt sind. Neben den Messwerten enthalten die Diagramme auch den theoretischen Verlauf der Güte, wobei für die von der Leitfähigkeit des Materials abhängigen Wandverluste zwei verschiedene Werte eingesetzt wurden, ein Richtwert von $\sigma_w = 4 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1}$ für die Kabi-

nenwände sowie ein Effektivwert von $\sigma_{w, \text{eff}} = 2 \cdot 10^4 \text{ S m}^{-1}$, für den der theoretische Verlauf in erster Näherung den Messwerten im oberen Frequenzbereich entspricht.

Messung 1 erfolgte im Frequenzbereich von 40 MHz bis 18 GHz und zeigt, dass die Fehlanpassung der log.-per. Antennen unterhalb von 200 MHz zu deutlichen Abweichungen der Messwerte vom theoretischen Verlauf führt, das heißt die Fehlanpassung nicht vernachlässigt werden darf. Anschließend wurde für Messung 2 im Frequenzbereich bis 200 MHz die log.-per. Sendeantenne durch eine besser angepasste bikonische Antenne ersetzt und statt der log.-per. Empfangsantenne eine spezielle Feldsonde zur Leistungsmessung verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zum theoretischen Verlauf, speziell das erwartete Abknicken der Kurve im Übergangsbereich zwischen den dominierenden Antennenverlusten im unteren Frequenzbereich und den dominierenden Wandverlusten im oberen Bereich ist gut zu erkennen. Die Werte im Frequenzbereich bis 200 MHz weisen jedoch deutliche Schwankungen auf. Eine entsprechende Variation der Güte bzw. die damit verknüpften Variation der Zeitkonstanten der Kammer konnte bereits bei der Untersuchung des zeitlichen Leistungsabfalls beobachtet werden. Weiterhin zeigen die Messwerte der mittleren Güte im oberen Frequenzbereich, in dem eine Abhängigkeit von der Wurzel der Frequenz erwartet wurde, einen größeren Anstieg der Werte. Dies und die unerwartet hohen Gütewerte bei Verwendung der log.-per. Antennen im Frequenzbereich bis 200 MHz bilden zwei offene Fragestellungen, die noch untersucht werden sollen.

6 Bestimmung der Antenneneffektivitäten

Die Bestimmung der Antenneneffektivität erfolgt in der Regel in einem dafür ausgelegten Antennenmessraum. Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Antenneneffektivität in Modenverwirbelungskammern wird in [3] vorgestellt. Dieser Ansatz ist eine Erweiterung des bandbreitenreduzierten Zeitbereichsverfahrens [4] zur Messung der Güte von Modenverwirbelungskammern.

Allgemein kann die Antenneneffektivität von log.-per. Antennen mit $\eta = 0.75$ und die von Hornantennen mit $\eta = 0.9$ angenommen [1] und davon ausgegangen werden, dass diese konstant über den Arbeitsbereich der Antenne sind. Die Ergebnisse der Messung in der MVK sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Diagramme enthalten zur besseren Veranschaulichung des Verlaufes neben den Messwerten jeweils eine den Messwerten angepasste Fitfunktion.

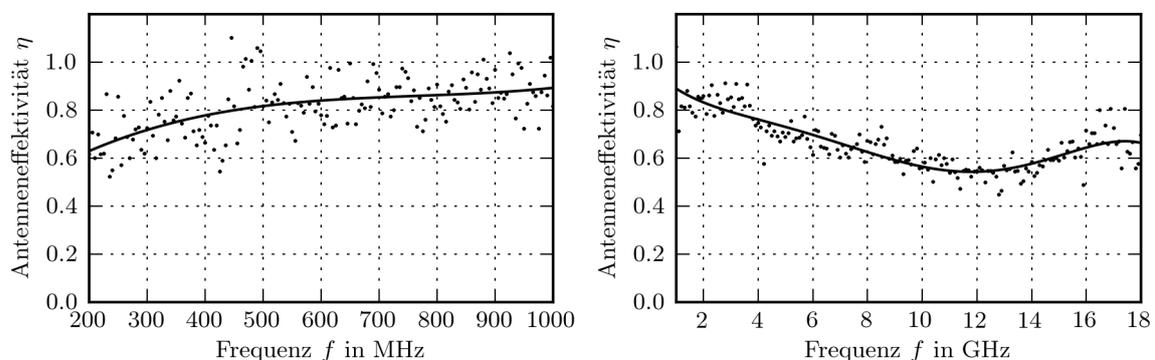


Abbildung 7: Bestimmung der Antenneneffektivität in der MVK, Ergebnisse für die log.-per. Antennen und die Hornantennen

Bei der Bestimmung der Antenneneffektivitäten in der MVK ergab sich für die log.-per. Antennen eine Antenneneffektivität, die im unteren Arbeitsbereich der Antennen nur $\eta \approx 0.6$ beträgt, sich mit steigender Frequenz aber einem Wert von $\eta \approx 0.9$ annähert und damit in einem breiten Frequenzbereich oberhalb des erwarteten Wertes von $\eta = 0.75$ liegt. Im Gegensatz dazu, ergab sich für die Hornantennen eine Antenneneffektivität, die über den gesamten Arbeitsbereich der Antenne unterhalb des erwarteten Wertes von $\eta = 0.9$ liegt und im Frequenzbereich von ungefähr 9 GHz bis 15 GHz unter 0.6 fällt.

Um die Ergebnisse der Messung in der MVK besser bewerten zu können, erfolgte eine Vergleichsmessung im Antennenmessraum des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik der TU Dresden. Dabei wurden für beide Hornantennen die Direktivitäten im Frequenzbereich von 1 GHz bis 10 GHz bestimmt. Mit Hilfe der im Datenblatt gegebenen Gewinne der Antennen konnten anschließend die Antenneneffektivitäten berechnet werden. Die Ergebnisse für die Hornantennen in Abbildung 8 zeigen, dass die Werte der Antenneneffektivitäten bis auf geringe Abweichungen sehr gut übereinstimmen und die beiden Hornantennen bei der Messung in der MVK in erster Näherung als identisch betrachtet werden können und dies als Grund für die unerwartet niedrigen Werte bei der Messung in der MVK ebenfalls ausgeschlossen werden kann.

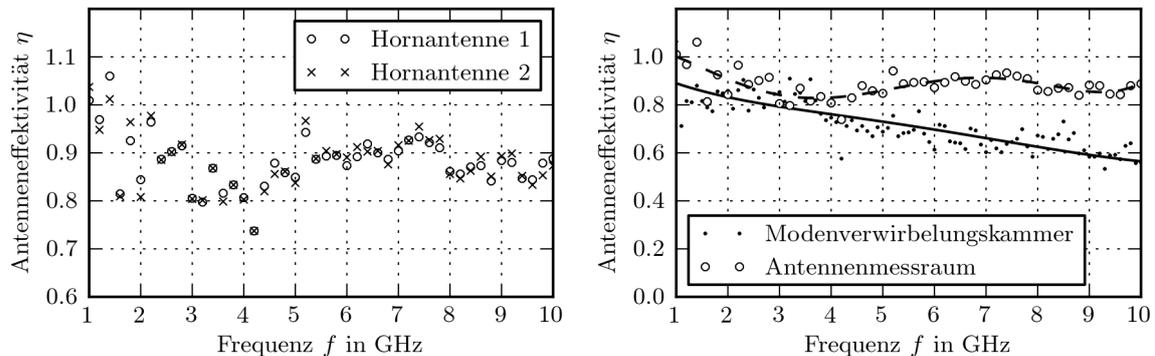


Abbildung 8: Bestimmung der Antenneneffektivität im Antennenmessraum, Ergebnisse für die Hornantennen

Im untersuchten Frequenzbereich von 1 GHz bis 10 GHz ergab die Messung im Antennenmessraum Antenneneffektivitäten im Bereich des erwarteten Wertes von $\eta \approx 0.9$. Der direkte Vergleich der Messergebnisse aus der MVK und aus dem Antennenmessraum in Abbildung 8 unterstützt die Vermutung, dass die in der MVK verwendete Methode zu kleine Werte liefert, der Grund dafür ist jedoch noch unbekannt. Die erwartete Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Position und der Ausrichtung der Antennen in der MVK konnte durch zusätzliche Messungen bestätigt werden.

7 Homogenität des Feldes

Zur Untersuchung der Feldhomogenität in der MVK wurde ein würfelförmiges Prüfvolumen mit der Seitenlänge 1 m und 27 ($3 \times 3 \times 3$) gleichmäßig verteilten Messpunkten definiert, wobei ein Mindestabstand von 0.5 m zu den Wänden, den Antennen und dem Modenrührer eingehalten wurde. Der Abstand der Messpunkte beträgt in den Koordinatenrichtungen jeweils 0.5 m. Anschließend wurde die elektrische Feldstärke in Abhängigkeit der definierten 27 Ortspunkte, 360 äquidistanter Rührerstellungen und 10 diskreter Frequenzen im Bereich

von 150 MHz bis 1000 MHz aufgenommen. Dabei wurde auf eine Eingangsleistung von 20 W am Fußpunkt der Sendeantenne geregelt.

Zur Bewertung der Feldhomogenität wurde - basierend auf den Messwerten der num360 Rührerstellungen - für jede Frequenz und jede Position zunächst der Maximalwert jeder Feldstärkekomponente sowie der Maximalwert des Betrages der Komponenten bestimmt und die Ergebnisse für zwei ausgewählte Frequenzen in Abbildung 9 dargestellt. Anschließend

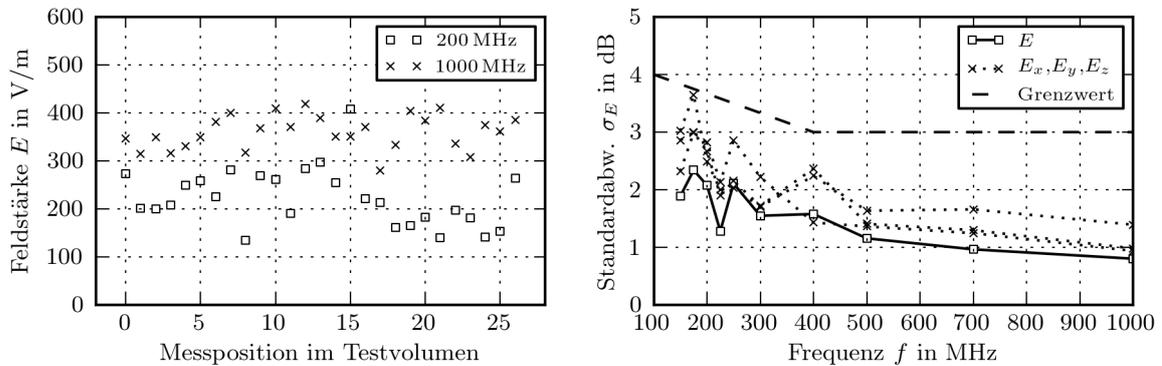


Abbildung 9: Feldhomogenität im definierten Testvolumen

wurde für jede Frequenz die Standardabweichung σ_E der den Ortspunkten zugehörigen Maximalwerte berechnet und dargestellt. Zur Bewertung der Homogenität wurde dem Diagramm der Grenzwert nach DIN EN 61000-4-21 [1] beigefügt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung von 360 Rührerstellungen der Grenzwert bei den betrachteten Frequenzen eingehalten wird. In der Praxis soll diese Anforderung an die Homogenität des Prüffeldes mit einer möglichst geringen Anzahl von Rührerstellungen realisiert werden. Die Bestimmung der Rührerstellungen, die bei minimaler Anzahl ein möglichst homogenes Prüffeld erzeugen ist ein Schwerpunkt der geplanten Dissertation [5]. Teil dieser Arbeit wird weiterhin eine ausführliche Darstellung und Auswertung der hier nur kurz vorgestellten Ergebnisse sein.

Literatur

- [1] DIN EN 61000-4-21:2011 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren - Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer.
- [2] JACKSON, JOHN DAVID: *Klassische Elektrodynamik*. 2. Auflage, de Gruyter, 1982.
- [3] KRAUTHÄUSER, H. G. und M. HERBIG: *Yet another Antenna Efficiency Measurement Method in Reverberation Chambers*. In: *Electromagnetic Compatibility, 2010.*, Seiten 536 – 540, Fort Lauderdale, USA, August 2010.
- [4] KRAUTHÄUSER, HANS GEORG: *Grundlagen und Anwendungen von Modenverwirbelungskammern*. Nummer 17 in *Res Electricae Magdeburgenses*. Nitsch, Jürgen and Styczynski, Z. A., Magdeburg, 1. Auflage, 2007.
- [5] PFENNIG, STEPHAN: *Charakterisierung der Modenverwirbelungskammer der TU Dresden und Untersuchung von Verfahren zur Bestimmung der unabhängigen Rührerstellungen (geplante Dissertation, Entwurf vom 17.07.2013)*.