# Betrieb von Modenverwirbelungskammern mit gepulsten Mikrowellensignalen

Chr. Adami, Chr. Braun, P. Clemens, H.-U. Schmidt, M. Suhrke, H.-J. Taenzer, Fraunhofer INT, Euskirchen, Germany

## 1 Einleitung

Die Modenverwirbelungskammer (MVK) ist für Störfestigkeits- und Emissionsmessungen eine immer häufiger genutzte Alternative zu traditionellen EMV-Untersuchungen mit TEM-Feldern in Absorberkammern oder GTEM-Zellen.

Am INT werden Untersuchungen von Störschwellen elektronischer Geräte und Systeme mit gepulsten HF-Signalen durchgeführt. Dazu kann ein HF-Pulsgenerator (Lukas Epsco) von 150 MHz bis 3.4 GHz mit Leistungen bis zu 35 kW sowohl mit dem TEM-Wellenleiter des INT als auch mit einer mobilen Anlage mit Hornantennen benutzt werden. Die Nutzung des Pulsgenerators mit der MVK gestattet gegenüber dem TEM-Wellenleiter die Erzeugung höherer elektrischer Feldstärken, wie sie beispielsweise für Störempfindlichkeitstests in der Automobil- und Flugzeugindustrie benötigt werden.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist das Verhalten von pulsmodulierten HF-Signalen in MVKs. Um den Einfluss von Einschwingvorgängen auszuschließen, schreibt die Norm IEC 61000-4-21 [1] dafür den Betrieb im stationären Bereich vor, wofür die Pulsdauer T<sub>Puls</sub> größer als die Zeitkonstante der Kammer T<sub>MVK</sub> sein muss, T<sub>MVK</sub> < 0.4 T<sub>Puls</sub>. Die Zeitkonstante, d. h. die Abklingzeit der Pulse hängt mit der Güte Q der Kammer, also ihrer Fähigkeit zur Energiespeicherung entsprechend der Beziehung

$$Q = \omega \cdot T_{MVK} = 2\pi \cdot f \cdot T_{MVK}$$
(1)

zusammen. Das bedeutet, dass Kammern mit hoher Güte, die an sich bei vorgegebener Eingangsleistung zur Erzeugung von möglichst hohen Feldstärken wünschenswert sind, zum normgerechten Betrieb hinreichend lange Pulse benötigen. Untersuchungen zum Pulsbetrieb von MVKs wurden bisher seltener publiziert (siehe z. B. [2-4]). Insbesondere bestehen hier noch offene Fragen zur Beschreibung des transienten Bereichs beim Ein- und Ausschalten des Pulses und zur Verwendung von kurzen Pulsen bei der Bestimmung von Störschwellen.

#### 2 Messungen

#### 2.1 MVK des INT

Das INT betreibt für grundlegende Untersuchungen zur Verwendbarkeit für zeitabhängige Messungen mit pulsmodulierten Mikrowellensignalen sowie für Störfestigkeitsmessungen an kleineren Testobjekten mit hohen Feldstärken eine kleine MVK aus Aluminium mit einem Arbeitsvolumen von 0.7 m × 1.0 m × 1.2 m bei äußeren Abmessungen von 1.2 m × 1.9 m × 2.5 m. In ihr können entsprechend der Kalibrierung im Frequenzbereich von 520 MHz bis 18 GHz normierte, d. h. auf eine Eingangsleistung von einem Watt bezogene Feldstärken zwischen 100 und 180 V/m erzeugt werden. Um mit unserem Pulsgenerator in einem großen Frequenzbereich hohe Leistungen im Bereich von einigen 10 kW in die Kammer einzukoppeln, verwenden wir eine selbst entwickelte Discone-Antenne. Untersuchungen mit dieser Sendeantenne ergaben kaum Unterschiede zu einer Hornantenne. Gleiches trifft für die Verwendung einer Feldsonde als Empfangsantenne im Vergleich zu einer Hornantenne zu. Alternativ zum Pulsgenerator können für den Dauerstrichbetrieb Leistungsverstärker (200 W) im Frequenzbereich 0.8 - 7.5 GHz verwendet werden.

Zunächst wurde der Frequenzbereich des Pulsgenerators 550 - 3500 MHz vermessen. Für alle Frequenzen wurden 36 Rührereinstellungen (10°-Schritte) vorgenommen und bei jeder einzelnen der zeitliche Spannungsverlauf der Einhüllenden der Pulse gleichzeitig für die hinlaufenden, rücklaufenden und an der Empfangsantenne gemessenen Pulse aufgezeichnet. Die hinlaufenden und reflektierten Pulse wurden mit einem Oszilloskop über einen Richtkoppler, verbunden mit 30 dB Dämpfungsgliedern und logarithmischen Verstärkern für eine bessere Messdynamik, gemessen. Die Signale an der Empfangsantenne wurden ebenfalls mit einem logarithmischen Verstärker und einem Oszilloskop aufgezeichnet. Mit einem Signalgenerator wurden 10 µs lange HF-Pulse erzeugt, die mit einem 25 W-Verstärker verstärkt wurden. Weiterhin wurden höhere Leistungen getestet, wozu einerseits der 25 W-Verstärker durch den 200 W-Verstärker ersetzt wurde und in einem anderen Setup gepulste Signale (10 µs) mit dem Mikrowellengenerator der Fa. Lukas Epsco mit Leistungen bis zu 35 kW erzeugt wurden. Des Weiteren wurden verschiedene Parameter wie Kammerbeladung und alternative Antennenpositionen gemessen. Um die Einflüsse verschiedener Sende- und Empfangsantennen zu untersuchen, wurden als Sendeantennen eine Hornantenne ETS3115 (0.8 - 18 GHz) und eine Discone-Antenne (0.5 - 18 GHz) sowie als Empfangsantennen ein D-Dot-Sensor und ebenfalls eine Hornantenne ETS3115 (1 - 18 GHz, ältere Bauart) verwendet. Für die beladene Kammer wurde ein Testobjekt typischer Größe (z. B. Netzwerkkomponenten) für dieses Arbeitsvolumen ausgewählt.

## 2.2 MVK der WTD-81 Greding

Der Pulsgenerator wurde ebenfalls in der großen Aluminium-MVK der WTD-81 in Greding benutzt. Sie hat ein Kammervolumen von 9.4 m  $\times$  6.5 m  $\times$  5.3 m und ein Arbeitsvolumen von 4.6 m  $\times$  3.3 m  $\times$  4.5 m. Die minimale Frequenz beträgt hier

80 MHz. Zusammen mit der EADS wurden von uns im Frequenzbereich zwischen 500 MHz und 3.4 GHz Störfestigkeitsuntersuchungen von Flugzeugelektronik (EADS-Pod) durchgeführt [2]. Die benutzten Pulslängen von 10 µs lagen oberhalb der Zeitkonstante dieser Kammer von weniger als 4 µs. Das Testobjekt wurde bei jeder Rührerstellung dem innerhalb von 30 Sekunden rampenförmig ansteigenden Feld ausgesetzt und jeweils neben den minimalen und maximalen Leistungspegeln die entsprechenden Störpegel bei auftretenden Störungen notiert.

Um die hohen Leistungen über den großen Frequenzbereich abstrahlen zu können, mussten fünf Hornantennen eingesetzt werden. Da in der Kammer Feldstärken von mehreren kV/m zu erwarten waren, kamen die üblicherweise verwendeten Log-Perund Horn-Antennen als Empfangsantennen nicht in Frage. Wir benutzten deshalb auch hier eine differenzierende E-Feldsonde. Der übrige Messaufbau entsprach prinzipiell dem in der MVK des INT. Wir wählten insgesamt 56 Frequenzen mit vom Frequenzbereich abhängigen Schrittweiten von 25, 50 und 100 MHz aus. Die Auflösung der Rührerstellungen betrug immer 30°. Die Aufnahme der vor- und rücklaufenden Sendeleistung an den Antennen und der Empfangsleistung an der Sonde erfolgte wieder über die logarithmischen Detektoren. Aus den Ergebnissen der ebenfalls zusammen mit der EADS durchgeführten Kalibriermessungen mit gleichförmigen Feldern konnten dann die für die MVK relevanten Parameter Antennen-Kalibrierfaktor (ACF), Kammer-Kalibrierfaktor (CCF) und Kammer-Beladungsfaktor (CLF) bestimmt werden.

## 3 Messergebnisse

## 3.1 MVK des INT

Abbildung 1 zeigt für eine typische Frequenz f = 1 GHz die an der Empfangsantenne (hier eine Feldsonde) gemessene Leistung (a) und die Leistung des rücklaufenden Pulses an der hier als Sendeantenne verwendeten Discone-Antenne (b) bei einem Eingangspuls von 10 µs Dauer (dick, grau). Die dünnen Kurven stellen die Ergebnisse für verschiedene Rührerstellungen dar, die dicke schwarze Kurve den Rührerstellungen. erkennt Mittelwert über alle Man für die einzelnen Rührerstellungen starke zeitliche Fluktuationen im Einschwing- und Abklingbereich des Pulses und ein Überschwingen bei verschiedenen Rührerstellungen. Aus dem exponentiellen Abklingen der empfangenen Leistung nach Abschalten des Eingangspulses ist eine direkte Bestimmung der Zeitkonstante der Kammer möglich. Die Güte der Kammer erhält man dann unter Benutzung von (1) aus

$$Q = \frac{20 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t}{\ln 10 \cdot \Delta P_{dB}}$$
(2)

mit der Steigung der Tangente der abfallenden Pulsspannung  $\Delta P_{dB}/\Delta t$  [5]. Abbildung (1b) zeigt, dass der rücklaufende Puls an der Sendeantenne mit derselben

Zeitkonstante abklingt, wie der in der Empfangsantenne gemessene Puls. Dies weist darauf hin, dass keine direkte Reflexion des Pulses in der Sendeantenne auftritt und das gemessene rücklaufende Signal fast vollständig aus der Kammer herrührt. Demnach liegt die fast gesamte Eingangsleistung in der Kammer an und diese ist auch anstatt der Nettoleistung  $P_{netto} = P_{vor} - P_{rück}$  bei der Bestimmung der Feldstärke zu verwenden (vergleiche die entsprechende Diskussion in der IEC-Norm [1], [6]).



**Abbildung 1:** Für verschiedene Rührerstellungen gemessene Pulsverläufe in der MVK des INT: a) Leistung an der Empfangsantenne, b) reflektierte Leistung an der Sendeantenne.

Abbildung 2 zeigt die aus dem Abklingen des bezüglich der Rührerstellungen gemittelten Pulses bestimmte Güte (a) und Zeitkonstante (b) im Frequenzbereich zwischen 500 MHz und 3.4 GHz. Es sind Ergebnisse für verschiedene Antennenkonfigurationen in der leeren Kammer (obere 3 Kurven) und in der mit einem typischen Testobjekt beladenen Kammer (untere 3 Kurven) dargestellt. Die Güte der leeren Kammer liegt zwischen 3000 und 30000 und sinkt bei Belastung mit einem typischem Testobjekt auf 1000 bis 10000. Diese hohe Güte wird durch die Reduktion der Wandverluste, die bei höheren Frequenzen gegenüber den Antennenverlusten dominieren, durch die Auskleidung der Kammer mit Aluminium erreicht. Die Wahl der Antennenkombination hat nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse und kann nach der Spannungsfestigkeit der Antennen getroffen werden.



**Abbildung 2:** Aus dem Abklingverhalten der Pulse bestimmte Güte (a) und Zeitkonstante (b) der MVK des INT.

Die Zeitkonstante der Kammer beträgt etwa 1 µs für die leere und 0.5 µs für die beladene Kammer. Dementsprechend ist die Mindestlänge der Pulse für das

Erreichen des stationären Bereichs nach der IEC-Norm [1] etwa 3 µs im Leerzustand und etwa 1.5 µs bei typischer Beladung.



Abbildung 3: Normierte elektrische Feldstärke in der MVK des INT.

Abbildung 3 zeigt die auf eine Eingangsleistung von 1 W normierte erreichbare elektrische Feldstärke entsprechend der Beziehung

$$E_{norm} = \frac{\overline{E}}{\sqrt{P_{netto}}} = \sqrt{\frac{Q}{\omega \epsilon V}} \qquad (3)$$

[7]. Sie beträgt 110 bis 160 V/m für die leere Kammer (obere 3 dünne Kurven) und stimmt damit gut mit den aus der Kalibrierung gewonnenen Ergebnissen (dicke Kurve) überein. Mit einem typischen Testobjekt reduziert sie sich nahezu auf die Hälfte (untere 3 dünne Kurven). Die für Störempfindlichkeitsuntersuchungen erreichbare Feldstärke mit HF-Quellen des INT beträgt demnach bei Benutzung des HF-Pulsgenerators mit einer Leistung von 35 kW bis zu 25 kV/m ohne und 17 kV/m mit Testobjekt und für Dauerstrichquellen mit einer Leistung von 200 W bis zu 2200 V/m ohne und 1400 V/m mit Testobjekt.



**Abbildung 4:** Standardabweichungen bezüglich verschiedener Rührerstellungen in der MVK des INT: a) Leistung an der Empfangsantenne, b) reflektierte Leistung an der Sendeantenne.

Abbildung 4 zeigt die zeitabhängige Standardabweichung für Pulse wie in Abbildung 1. Die gewählte Frequenz beträgt hier f = 2.5 GHz. Zur Orientierung ist auch der mittlere Puls (dünne Linie) dargestellt. Man erkennt klar die zwei Regimes des stationären Betriebs vor und der freien Relaxation nach Abschalten des Pulses. Ein ähnliches Verhalten findet man auch für andere Frequenzen, wobei die

Unterschiede zwischen beiden Regionen im reflektierten Puls an der Sendeantenne gleichfalls meist stärker ausgeprägt sind. An dieser Stelle ist noch auf den glatten zeitlichen Verlauf der bezüglich der Rührerstellungen gemittelten Pulse hinzuweisen.



**Abbildung 5:** Standardabweichung bezüglich verschiedener Rührerstellungen der Pulse in der MVK des INT nach Subtraktion des zeitlich geglätteten Pulses.

Ein Überschwingen beim Ein- und Ausschalten des Pulses wurde ebenfalls z. B. in [8] beobachtet und kürzlich auch im Rahmen einer theoretischen Betrachtung der transienten Anregung von Resonatoren gefunden [9]. Eine statistisch untermauerte Darstellung dieses Verhaltens zeigt Abbildung 5 für f = 2.5 GHz. Hierzu wurde der zeitlich geglättete Puls von den Messwerten für die einzelnen Rührerstellungen subtrahiert, um die zeitlichen Fluktuationen der Pulse vom systematischen Verlauf im Ein- und Ausschalt- sowie im Plateaubereich zu separieren. Für die resultierenden Kurven wurde dann die Standardabweichung bezüglich der Rührerstellungen gebildet. Die dünne Linie stellt den zeitlich geglätteten Puls dar. Man erkennt eine Überhöhung der Schwankungen im transienten Ein- und Ausschaltbereich etwa um einen Faktor 5. Für andere Frequenzen findet man ein sehr ähnliches Verhalten. wobei auch die Überhöhung in der gleichen Größenordnung liegt. Die Standardabweichung aus Abbildung 4 liegt im Plateaubereich des Pulses dagegen in der gleichen Größenordnung wie im Bereich des Ein- und Ausschaltens, da die Plateauhöhe der Pulse selbst in Abhängigkeit von der Rührerstellung in der entsprechenden Größenordnung schwankt.

## 3.2 MVK der WTD-81 Greding

In diesem Abschnitt stellen wir die in der mit dem EADS-Pod beladenen MVK Greding erreichten Feldstärken und die Bestimmung der Zeitkonstanten der Kammer aus der Abklingzeit der Pulse vor. Das Feld in der Kammer berechnet sich nach der IEC61000-4-21 [1] aus der auf 1 Watt bezogenen Kalibrierfeldstärke <E>, dem CLF und der Eingangsleistung P<sub>input</sub> an der Sendeantenne zu  $E = \langle E \rangle \cdot \sqrt{CLF \cdot P_{input}}$ . Das normierte Feld wird dabei nach  $\langle E \rangle = (\langle E_x \rangle + \langle E_y \rangle + \langle E_z \rangle)/3$  bestimmt. Abbildung 6 zeigt die auf diese Weise berechnete Feldstärke (Quadrate) im Vergleich zu der mit der Empfangssonde gemessenen Feldstärke (Rauten) zusammen mit der Eingangsleistung (gestrichelte Kurve). Dabei wurde für jede Frequenz jeweils der

maximale Leistungswert während einer Rührerumdrehung ausgewählt. Es werden Feldstärken von bis zu 5 kV/m erreicht.



Abbildung 6: Erreichbare Feldstärke in der MVK Greding.

Für ein typisches Signal an der Feldsonde bei 925 MHz und einer Rührerstellung von 150° wurde aus dem Abklingen nach Abschalten des Pulses wieder die Kammergüte aus (2) berechnet. Aus dem Feldverlauf an der Sonde ergibt sich demnach bei 925 MHz eine Güte Q von etwa 10000, was einer Zeitkonstante von etwa 2 µs entspricht. Die gleiche Zeitkonstante und eine Güte von etwa 14000 ergeben sich für eine Frequenz von 1250 MHz.

Die aus Messungen bestimmte Güte der MVK Greding ist für die leere Kammer mit Sende- und Empfangsantenne Q<sub>Greding</sub> ~ 20000 - 30000 im Frequenzbereich bei 1 GHz. Aus einer Abschätzung der Skalierung entsprechend den Abmessungen der Kammern erhält man für die Güte der MVK des INT im gleichen Frequenzbereich Q<sub>INT</sub> ~ 5000 - 8000 unter der Annahme, dass bereits die Wandverluste dominieren. Dies zeigt gute Übereinstimmung mit der Güte der INT-Kammer aus der Messung der Abklingzeit der Pulse (Zeitkonstante der Kammer). Die Übergangsfrequenz f<sub>Trans</sub> von dominierenden Antennenverlusten zu dominierenden Wandverlusten skaliert mit den linearen Kammerabmessungen a  $\sim V^{1/3}$  entsprechend der Beziehung f<sub>Trans</sub>  $\sim a^{-1}$ <sup>0.8</sup>. V ist hier das Kammervolumen. Für die MVK Greding liegt f<sub>Trans</sub> bei etwa 350 MHz [10]. Aus der Skalierung erhält man daraus für die MVK des INT eine Übergangsfreguenz von etwa 1 GHz. Das stimmt gut mit theoretischen Abschätzungen der beiden Verlustarten für die INT-Kammer überein, aus denen sich  $f_{Trans} \sim 1.7$  GHz ergibt.

#### 4 Zusammenfassung

An einer kleinen MVK des INT und einer großen MVK der WTD-81 in Greding wurden Untersuchungen zum Betrieb von Modenverwirbelungskammern mit gepulsten Mikrowellensignalen hoher Leistung mit Frequenzen zwischen 500 MHz und 3.4 GHz durchgeführt. Beide Kammern haben durch die Auskleidung mit Aluminium eine hohe Güte. Die aus der Abklingzeit der Pulse bestimmte Güte der MVK des INT liegt für die leere Kammer im obigen Frequenzbereich zwischen 3000 und 30000, die der MVK Greding für Frequenzen um 1 GHz zwischen 20000 und 30000. Die Zeitkonstante der leeren INT-Kammer ergibt sich aus dem Abklingen der Pulse nach Abschalten der Anregung zu etwa 1 µs, die der Kammer in Greding zu etwa 2 µs. In der beladenen MVK des INT können elektrische Feldstärken von bis zu 17 kV/m und in der MVK Greding bis zu 5 kV/m erreicht werden. Die Kammercharakteristika skalieren wie erwartet mit den Abmessungen der Kammern. Die gemessenen Pulse zeigen für verschiedene Rührerstellungen starke zeitliche Fluktuationen und zum Teil ein Überschwingen im transienten Ein- und Ausschaltbereich. Die Untersuchung der zeitabhängigen Standardabweichungen zeigt den generischen Charakter dieses Verhaltens, das sich nicht in den bezüglich der Rührerstellungen gemittelten Pulsen widerspiegelt.

#### 5 Literatur

- [1] IEC 61000-4-21: Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-21: Testing and measurement techniques Reverberation chamber test methods, August 2003.
- [2] Rothenhäusler, M.: Hochleistungsmikrowellentests in einer Modenverwirbelungskammer, Wehrtechnisches Symposium Elektromagnetische Effekte 2009, Mannheim 2009.
- [3] Arnaut, L. R. and Knight, D. A.: Observation of Coherent Precursors in Pulsed Mode-Stirred Reverberation Fields, Phys. Rev. Lett. 98 (2007), pp. 53903-53906.
- [4] Lundén, O., Bäckström, M.: Pulsed Power 3 GHz feasibility study for a 36.7 m3 Mode Stirred Reverberation Chamber, Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, Hawaii, USA.
- [5] Krauthäuser, H. G.: On the Measurement of Total Radiated Power in Uncalibrated Reverberation Chambers, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 49 (2007), pp. 270-279.
- [6] Wei, X. C. and Li, Er-Ping: Transmitting Antenna's Reflected Power and its Influence on Reverberation Chamber Calibration, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 49 (2007), pp. 366-370.
- [7] Krauthäuser, H. G.: Grundlagen und Anwendungen von Modenverwirbelungskammern, Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Juni 2007.
- [8] Krauthäuser, H. G., Arnaut, L. R., and Höijer, M.: Theory and Applications of Reverberation Chambers, EMC Europe 2008, Hamburg 2008.
- [9] Nitsch, J. et. al.: Transiente Anregung von Resonatoren: Flüchtige und eingeschwungene Moden, Wehrtechnisches Symposium Elektromagnetische Effekte 2009, Mannheim 2009.
- [10] Voigt, E.: Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen einer großen Aluminium-Modenverwirbelungskammer (MVK) im beladenen und unbeladenen Zustand und der Vergleich zu Stahlkammern, Diplomarbeit, Fachhochschule Lausitz, 2005.