

Einfluss mechanischer Umgebungseffekte auf Messungen

in Modenverwirbelungskammern

Dipl.-Ing. Georg Zimmer, Dr.-Ing. Robert Geise, Dipl.-Ing. Björn Neubauer,
Technische Universität Braunschweig, Institut für EMV, {g.zimmer, r.geise,
b.neubauer}@tu-braunschweig.de

1. Einleitung

Modenverwirbelungskammern (MVK) bieten eine Messumgebung, die sich besonders für Störfestigkeitsuntersuchungen eignet, da auch mit geringer Leistung hohe Prüffeldstärken erreicht werden können, indem Veränderungen geometrischer Randbedingungen zu Feldüberhöhung führen. Diese können statistisch als homogen verteilt im Prüfvolumen angesehen werden.

Zunehmend finden MVK auch für die Messung von Antennen oder Transferpfaden Anwendung. Dies geschieht auch bei Frequenzen, die Größenordnungen über der Mindestfrequenz von beispielsweise 30 MHz liegen, wobei die Randbedingungen der MVK grundsätzlich immer als statisch angenommen werden [1]. Bei deutlich höheren Frequenzen, z.B. über 10 GHz, können schon kleine Änderungen der Geometrie die konstruktiven und destruktiven Überlagerungen ändern, weil sie im Bereich/der Größenordnung der Wellenlänge liegen. In [2] wird gezeigt, dass bereits Vibrationen des Tuners oder der Wände Einfluss auf die Feldverteilung in der MVK haben. Diese Vibrationen können einerseits für beabsichtigte Feldveränderungen genutzt werden, andererseits können diese auch von Umgebungseinflüssen kommen und so die Qualität einer Messung in einer vermeintlich als statisch angenommenen MVK beeinträchtigen. Dies zeigen die im vorliegenden Beitrag präsentierten Messungen.

2. Messaufbau für zeitvariante Übertragungskanäle in einer MVK

Im Folgenden werden zwei Messaufbauten für unterschiedliche Übertragungsfrequenzen beschrieben, mit denen der Einfluss transienter Änderungen der Übertragungskanäle in der MVK durch mechanische Einwirkungen gemessen werden kann. Ersterer benutzt eine Frequenz von 15,9 GHz, letzterer wird für die Frequenzen 500 MHz und 3 GHz verwendet.

Die Messungen werden mit einem vektoriiellen Channel-Sounder [3] durchgeführt, der zeitlich variante Übertragungskanäle in Abhängigkeit unterschiedlicher Ausbreitungsrichtungen charakterisieren kann. Seine Architektur sieht vor, dass zwölf Sendeantennen in unterschiedliche Richtungen periodisch und zeitlich nacheinander bei einer Frequenz von 15,9 GHz abstrahlen. Zu jedem Zeitpunkt ist somit höchstens eine Sendeantenne aktiv. Lediglich eine einzige Signalquelle erzeugt die HF-Leistung. Eine zweistufige HF-Schaltmatrix führt diese der jeweils sendenden Antenne zu. Empfangsseitig wird das Signal auf 200 MHz heruntergemischt und die Leistung über die Zeit mit einem Power Detector gemessen, siehe

Abb. 1 (a). Obwohl die Sendeantennen zeitversetzt betrieben werden, erfolgen die Messungen auf der Zeitskala des sich ändernden Übertragungskanals quasi gleichzeitig [4].

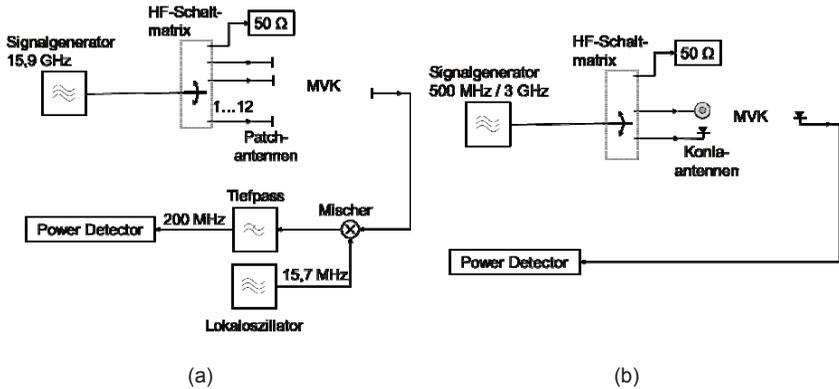


Abbildung 1: Signalkette für die Übertragungskanalmessung. In (a) ist die Signalkette für 15,9 GHz dargestellt, in (b) für 500 MHz und 3 GHz

Abb. 2 zeigt den Messaufbau in der MVK. Sowohl als Sende- wie auch als Empfangselement finden linear polarisierte Patchantennen Verwendung. Die Antennen werden in der Messung so ausgerichtet, dass die Polarisationsebene horizontal, also parallel zum Boden, liegt.

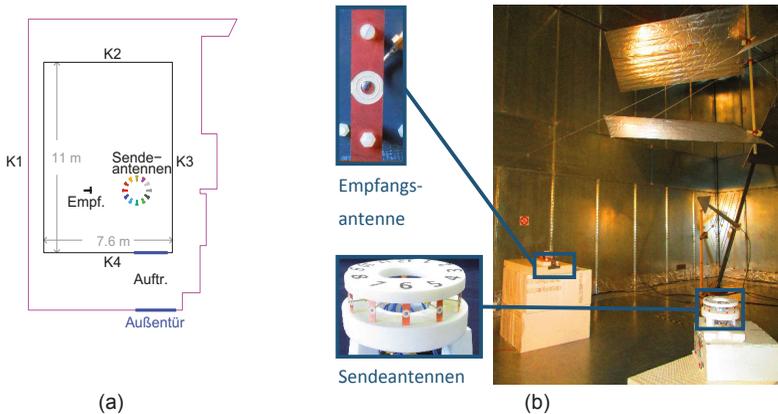


Abbildung 2: 15,9 GHz: (a) Geometrie der Messumgebung und der umliegenden Halle sowie Positionen der mechanischen Anregung. (b) Foto vom Messaufbau in der MVK.

Vielfach wird die MVK für Messungen in einem Frequenzbereich bis 6 GHz genutzt. Die Messungen bei 500 MHz und bei 3 GHz demonstrieren auch in diesem Bereich vorhandene Auswirkungen. Dazu wird eine vergleichbare Architektur eingesetzt. Statt der in [4] verwen-

deten VCO-PLL wird der SMR 20 von Rohde und Schwarz als Signalquelle benutzt, welcher wechselweise zwei Antennen speist, siehe Abb. 1 (b). Es werden sowohl sende- als auch empfangsseitig linear polarisierte Konia-Antennen [5] eingesetzt (Abb. 3). Gegenüber der in [5] beschriebenen Antenne wird eine größere Version benutzt, um eine Abstrahlung schon bei 500 MHz zu ermöglichen. Eine Sendeantenne wird in horizontaler Polarisation und eine in vertikaler Polarisation aufgestellt. Die Konia-Antennen besitzen in der H-Ebene ein omnidirektionales Verhalten korrespondierend zu ihrer Rotationsymmetrie.

Wechselweise werden Messungen mit horizontaler als auch vertikaler Polarisation durchgeführt. Damit finden alle vier Kombinationsmöglichkeiten Berücksichtigung: D. h. die beiden kopolaren als auch die beiden kreuzpolaren. Da sowohl 500 MHz als auch 3 GHz im Arbeitsbereich des Power Detectors liegen, entfällt ein Heruntermischen. Das Empfangssignal gelangt somit ohne Zwischenschritte direkt von der Konia-Antenne zu dem Power Detector.

Die Messung erfasst somit die Dämpfung der entsprechenden zeitvarianten Übertragungskanäle. Es werden dabei folgende transiente mechanische Anregungsvorgänge an unterschiedlichen Orten (siehe Abb. 2 (a) und Abb. 3 (a)) durchgeführt:

- 5-maliges Klopfen in der Mitte der vier Seitenwände der MVK 1,5 m über dem Boden (**K1-K4**).
- Anschließend erfolgt ein kräftiges Auftreten (**Auftr.**), ebenfalls 5-mal.
- Das Gebäude wird verlassen, wobei die **Außentür** des Gebäudes zufällt.

Für das Klopfen und das Auftreten wird eine Frequenz von ca. 1 Hz benutzt, sodass der Vorgang ca. 4 s benötigt. Es folgt eine Pause von mindestens 25 s, damit die mechanische Anregung abklingen kann.

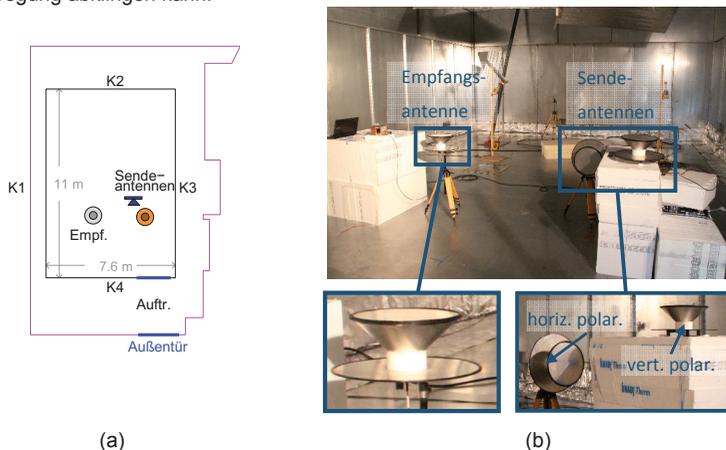


Abbildung 3: 500 MHz und 3 GHz: (a) Geometrie der Messumgebung und der umliegenden Halle sowie Positionen der mechanischen Anregung. (b) Foto vom Messaufbau in der MVK.

3. Messergebnisse bei 15,9 GHz

Die Beeinflussungen durch Verlassen (V) und Betreten (B) der MVK spielen für den Messbetrieb keine Rolle, da eine genaue Messung eine geschlossene Kammer voraussetzt und daher die Messwerte dieser Zeiträume verworfen und nach dem Verlassen mindestens 30 s gewartet werden, damit die mechanischen Schwingungen abgeklungen sind. Das Klopfen (K1-K4) zeigt einen deutlichen Effekt: Die Kanaldämpfungen für die zugehörigen zwölf Sendeantennen verändern sich um ca. 5 dB (Abb. 4). An K4 zeigt das Klopfen weniger Effekt. Der Grund hierfür findet sich in dem Rahmen der nahegelegenen Kabinentür, welcher die Wand mechanisch verstärkt und somit die Schwingung stärker dämpft. Das Auftreten hat einen geringeren Effekt als das Klopfen, da die Kabine nicht direkt berührt wird, allerdings beeinflusst es die Messung noch deutlich. Der größte Effekt, mit doppelt so hoher Störampplitude wie K1-K3, zeigt sich durch das Schließen der Außentür des Gebäudes. Offenbar wirkt die hierbei auftretende Luftbewegung entsprechend stark auf die MVK, so dass die Störung erst nach 20 s abklingt. Nach der Abklingzeit der mechanischen Schwingungen stellen sich jeweils die alten Feldverhältnisse wieder ein.

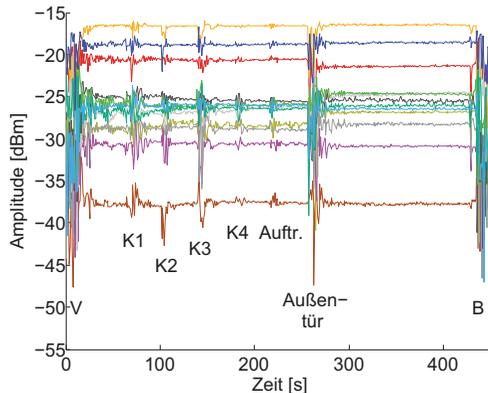


Abbildung 4: Messergebnisse für 15,9 GHz. Die Farbe einer Kurve entspricht der, der jeweils zugehörigen Sendeantenne in Abb. 2.

4. Messergebnisse bei 500 MHz und 3 GHz

Bei 500 MHz (Abb. 5) und bei 3 GHz (Abb. 6) sind die Auswirkungen des Klopfens mit einer Störampplitude von 2 dB geringer als bei 15,9 GHz. Beim Schließen der Außentür ist die Störampplitude weiterhin größer als beim Klopfen, sie beträgt 5 dB. Wie schon bei der höheren Frequenz klingt die Störung erst nach 20 s ab.

Grund für den insgesamt kleineren Einfluss ist die entsprechend größere Wellenlänge. Da die mechanische Anregung gleich groß ist, sind die Störampplituden im Verhältnis zur Wellenlänge geringer. Somit wird die Auswirkung der Störung reduziert. Bei einer quasistationären Betrachtung liegen die Wegänderungen der ggf. mehrfach reflektierten Ausbreitungspfade mit kleiner werdender Frequenz deutlich unter einer Wellenlänge liegen und der Einfluss auf die konstruktiven und destruktiven Interferenzen verringert sich.

Dagegen besitzt die Polarisation keinen Einfluss auf das Ergebnis. Außerdem zeigt sich der statistische Charakter der Kammer in ihrem Ausbreitungsverhalten, da die Übertragung in kreuzpolarer Anordnung mit der bei kopolarer Anordnung der Antennen vergleichbar ist.

In der Natur der MVK liegt, dass die lokale Feldstärke, respektive im vorliegenden Fall die empfangene Leistung, von minimalen Änderungen der Randbedingungen abhängig ist. Daher ist die Reproduzierbarkeit der empfangenen Leistung nicht gegeben. Abb. 6 und Abb. 7 zeigen die Resultate zweier nacheinander durchgeführter Messungen mit vertikal polarisierter Empfangsantenne bei 3 GHz. Dabei zeigt sich, dass jetzt die Empfangsantenne im Gegensatz zur vorher durchgeführten Messung in kopolarer Anordnung wesentlich weniger Leistung empfängt als von der Sendeantenne in kreuzpolarer Anordnung. Dies zeigt auf, dass minimale Positionsveränderungen, z. B. bedingt durch einen Neuaufbau, zu einem anderen Übertragungsverhalten führen.

In der zu Abb. 7 gehörenden Messung hat sich außerdem scheinbar der Einfluss der mechanischen Störung bzgl. der kopolaren Anordnung signifikant erhöht. D. h. die Störung, dargestellt als Amplitudenschwankung in dB ist wesentlich größer (Abb. 7 (a)) als zuvor (Abb. 6 (b)). In allen Fällen wird mit der gleichen Leistung gesendet, daher ist die Gesamtenergie in der Kammer gleich. Das Niveau einer lokalen Empfangsleistung wird folglich dadurch bestimmt, inwiefern konstruktive bzw. destruktive Interferenz auftritt. Die mechanische Beeinflussung stellt allerdings eine nur lokale Änderung dieser Gesamtenergie als absolute Größe dar. Ein solches Error Level ist daher in Relation zur – in diesem Fall gleich gebliebenen – Sendeleistung zu sehen, welches sich auf einer absoluten Skala in μW darstellen lässt (Abb. 7 (b)), etwa $0,5 \mu\text{W}$ bei K1-K4 für die horizontale Polarisation. Bei destruktiver Interferenz bzw. bei ohnehin schon geringerer lokaler Feldstärke hat ein solches Error Level entsprechend größeren Einfluss, wodurch die größeren Amplitudenschwankungen im logarithmischen Maßstab in Abb. 7 (a) für die vertikale Polarisation bzw. in 6 (b) für die horizontale Polarisation zu erklären sind.

Ist die Empfangsleistung kleiner als das durch die mechanische Anregung verursachte Error Level, wirkt sich dieses überwiegend auf konstruktive Interferenz aus, so dass Amplitudenschwankungen kleiner sind als bei mittleren Empfangsleistungen. Als Beispiel sei hier die in Abb. 7 (b) dargestellte Messung bei vertikaler Polarisation der Empfangsantenne, die eine Empfangsleistung von etwa $0,1 \mu\text{W}$ besitzt, angeführt.

Im Gegensatz zu den Messungen bei 15,9 GHz, besitzt der empfangene Signalpegel auch nach dem Abklingen der Störung ein anderes Niveau als vor der Störung. Ein Grund kann darin liegen, dass die Konia-Empfangsantenne und die horizontal polarisierte Sendeantenne mit Hilfe eines Kugelkopfs auf einem Stativ montiert sind. Über das am Boden stehende Stativ können Schwingungen des Kabinenbodens den Kugelkopf erreichen und, wenn auch mi-

nimal, bleibend die Antennenausrichtung ändern. Da schon eine leichte Änderung der Ausrichtung die empfangene Leistung stark beeinflussen kann, ist dieses eine mögliche Erklärung für die Signalpegeländerung z. B. nach dem Türschließen in Abb. 5 (a).

Hingegen waren die bei 15,9 GHz eingesetzten Patchantennen durch die Lagerung auf Polystyrol respektive Rohacell besser vor Erschütterungen geschützt.

Die einzelnen, schmalen Peaks nach oben mit einer Amplitude von bis zu 3 dB sind nicht auf die mechanische Anregung zurückzuführen. Unabhängig von der mechanischen Störung und welche Antenne aktiv ist, treten sie alle 60 s auf und bestehen aus einer Gruppe von mehreren Peaks. Die Peaks in der Gruppe sind jeweils kürzer als 2 ms. Je nachdem welche Antenne sie treffen, falls gerade eine aktiv ist, sind sie in der jeweiligen Messkurve sichtbar. Diese Peaks treten auch dann auf, wenn der Sender ausgeschaltet ist. Da der Power Detektor sehr breitbandig ist, ist die Störung auf externe Einflüsse, die nicht notwendigerweise bei den untersuchten Frequenzen liegt, zurückzuführen. Diese Störung tritt nicht bei der mit 15,9 GHz durchgeführten Messung nicht auf, da die Empfangsantenne in diesem Fall bei weit unterhalb von 15,9 GHz nicht empfindlich genug ist. Mögliche Quellen können z. B. das angeschlossene Notebook oder die außerhalb der MVK befindliche Überwachungseinrichtung, welche via Kabeldurchführung mit Kammerinneren verbunden ist, sein.

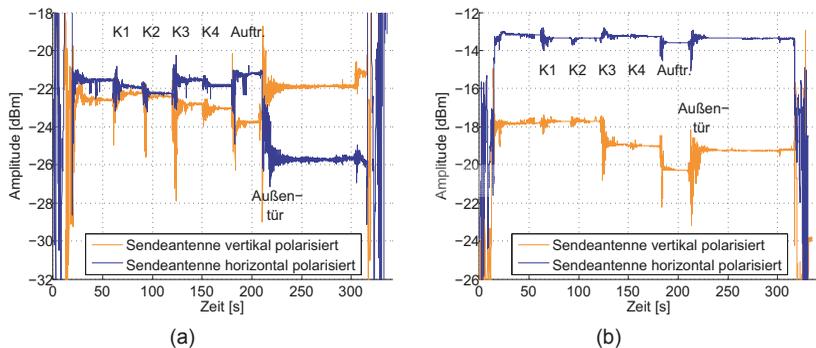


Abbildung 5: Messergebnisse bei 500 MHz. In (a) ist die Empfangsantenne horizontal polarisiert, in (b) vertikal.

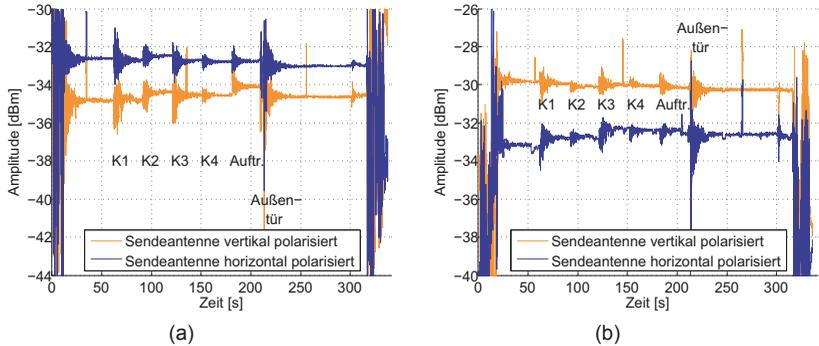


Abbildung 6: Messergebnisse bei 3 GHz. In (a) ist die Empfangsantenne horizontal polarisiert, in (b) vertikal.

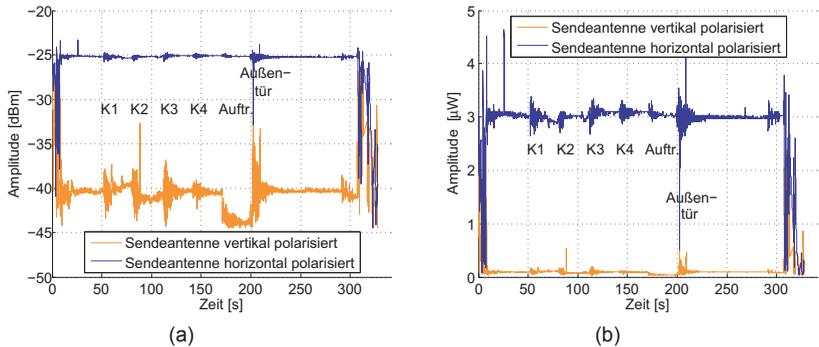


Abbildung 7: Messergebnisse bei 3 GHz mit vertikal polarisierter Empfangsantenne. In (a) ist die Amplitude logarithmisch dargestellt, in (b) linear.

5. Zusammenfassung

Durch Messung der zeitlich veränderlichen Kanaldämpfungen wird gezeigt, dass externe Einflüsse, wie z. B. das Schließen von Türen in der Umgebung, die Feldverteilung innerhalb der MVK beeinflussen. Diese Einflüsse sind bei statischen Untersuchungen zu berücksichtigen und sollten für genaue Messungen durch einen entsprechenden Betriebsablauf minimiert werden. Es lässt sich schlussfolgern, dass der Einfluss stark frequenzabhängig ist und mit höheren Frequenzen zunimmt. Dabei treten neben abklingenden Störungen auch permanente Änderungen auf. Letztere können ihre Ursache in einer sich minimal verändernden Antennenausrichtung finden. Bereits bei 500 MHz und bei 3 GHz ist ein signifikanter Einfluss

festzustellen, besonders beim Schließen der Außentür, was eine normale Störung im täglichen Betriebsablauf darstellt. Folglich sind bei statischen Messungen nicht nur Einflüsse unmittelbar an der MVK zu berücksichtigen, sondern auch in der näheren Umgebung. Daher sind längere, genaue, statische Messungen idealerweise automatisiert und ohne Personen in der Nähe oder andere vergleichbare Einflüsse durchzuführen. Für kürzere Messungen kann die Genauigkeit z. B. durch spezielle Arbeitsanweisungen sichergestellt werden.

Für die Mehrheit der Messungen ist eine statistische Umgebung wünschenswert. Daher stellen solche mechanischen Anregungen eine Ergänzung zum Modentuner dar, um für zusätzliche Variabilität der Felder zu sorgen. Da die Effektivität einer mechanischen Beeinflussung mit größerer Frequenz zunimmt, sind sie insbesondere im GHz-Bereich interessant.

Literaturangaben

[1] Ryan J. Pirkl, John M. Ladbury, Kate A. Remley, *The Reverberation Chamber's Unstirred Field: A Validation of the Image Theory Interpretation*, Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011 IEEE International Symposium on, pp. 670-675.

[2] Nikolaos K. Kouveliotis, Panagiotis T. Trakadas, *Theoretical Investigation of the Field Conditions in a Vibrating Reverberation Chamber*, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Vol. 45, No. 1, February 2003, pp. 77-81.

[3] Georg Zimmer, Robert Geise, Björn Neubauer, Jens Schüür, Achim Enders, *Vectorial Channel Sounding in a Reverberation Chamber – Measuring Dynamic Behaviour*, Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden 2015.

[4] Robert Geise, Björn Neubauer, Georg Zimmer, *Navigation Signal Disturbances by Multipath Propagation – Scaled Measurements with a Universal Channel Sounder Architecture*, Frequenz. ISSN (Online) 2191-6349, ISSN (Print) 0016-1136, DOI: 10.1515/freq-2015-0080, September 2015, pp.1-16

[5] Ingo Schmidt, Martin Schwark, Robert Geise, *Electrically Small Ultra Wideband Antenna for EMC Measurements in Vehicles Optimized by Electromagnetic Simulation*, 2008 IEEE Antennas and Propagation, pp. 1-4.