

Korrelation von wiederholten Messungen in einer Modenverwirbelungskammer

C. Cammin¹, R. Heynicke¹, G. Scholl¹

¹Professur für Elektrische Messtechnik,

*Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg,
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Deutschland*

Zusammenfassung

Modenverwirbelungskammern (MVKn) stellen vielfältig verwendbare, reproduzierbare Messumgebungen dar. Grundsätzlich handelt es sich dabei um elektromagnetisch geschirmte Volumina, in denen sog. Modenrührer eingebracht sind, die ein elektromagnetisches Feld „verwirbeln“, sodass ein Prüfling einer definierten aber statistisch variierenden Umgebung ausgesetzt wird. Die Modenrührer in MVKn können schrittweise zwischen den einzelnen Messzeitpunkten oder kontinuierlich verfahren werden. In diesem Beitrag werden die jeweiligen Eigenschaften von wiederholten Messungen, die sowohl bei kontinuierlichem als auch schrittweisem Betrieb der Modenrührer aufgenommen wurden, betrachtet. Mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten wird jeweils die Wiederholbarkeit der aufgenommenen Messwertsequenzen insgesamt untersucht. Darüber hinaus wird die Wiederholbarkeit von Fadingeinbrüchen gesondert betrachtet, da diese einen wesentlichen Einfluss auf Funkssysteme haben, die mittels einer MVK charakterisiert werden können. Als Ursache für Abweichungen bei Wiederholungen wird abschließend das zeitliche Verhalten bzw. die Streuungen zwischen den Messzeitpunkten betrachtet.

Keywords: Modenverwirbelungskammer, Korrelation, Drahtlose Sensor/Aktor Netzwerke, drahtlose Sensorsysteme, Test

Einleitung

Modenverwirbelungskammern (MVKn) werden als reproduzierbare Messumgebungen für Messungen zur Elektromagnetischen Verträglichkeit [1] sowie für Antennen und drahtlose Kommunikationsgeräte [2] genutzt. MVKn bestehen grundsätzlich aus einem elektromagnetisch abgeschirmten Volumen, in das ein Prüfling eingebracht wird. Neben mindestens einer Antenne zur Ein- sowie Auskopplung eines elektromagnetischen Feldes befindet sich in einer MVK mindestens ein sogenannter Modenrührer. Häufig sind die Modenrührer als mechanisch bewegte oder rotierende Metallplatten oder als Drehteller für den Prüfling ausgeführt, um die Ausbreitungsbedingungen der elektromagnetischen Welle im Prüfvolumen zu verändern. Für eine bestimmte Anzahl von unterschiedlichen Positionen des bzw. der Modenrührer werden einzelne Messungen durchgeführt. Über eine vollständige Sequenz dieser einzelnen Messungen ist der Prüfling einem statistisch quasi-isotropen und quasi-homogenen elektromagnetischem Feld mit Rayleigh-verteilter Amplitude ausgesetzt, unabhängig von der Position oder Ausrichtung des Prüflings innerhalb des Prüfvolumens.

Zudem kann eine MVK als Kanalemulator genutzt werden, um Fadingeinbrüche eines Funkkanals zu emulieren [3,4,5]. Typischerweise sind die Mittelwerte der Einzelmessungen von Interesse zur Beurteilung des Prüflings, womit die Abfolge bzw. Sequenz der Einzelmessungen meistens irrelevant ist [1,2].

MVKn können grundsätzlich entweder bei kontinuierlichem oder schrittweisem bzw. quasi-statischem Betrieb der mechanischen Modenrührer eingesetzt werden [1]: Kontinuierlicher Betrieb bedeutet, dass während der Bewegung der Modenrührer zeitlich unsynchronisiert eine definierte Anzahl an Einzelmessungen bzw. Frequenzsweeps (z.B. Streuparametermessungen mittels Vektor-Netzwerkanalysator (VNA)) durchgeführt werden.

Schrittweiser Betrieb bzw. quasi-statisch bedeutet, dass zunächst eine bestimmte, definierte Position jeweils durch die Modenrührer mechanisch angefahren wird und nach Erreichen dieser Position eine Einzelmessung oder ein Frequenzsweep (z.B. Streuparametermessung mittels VNA) gestartet wird. Nach Abschluss einer Einzelmessung bzw. eines Frequenzsweeps wird eine neue

Position durch die Modenrührer mechanisch angefahren und danach eine weitere Messung durchgeführt.

In diesem Beitrag werden wiederholte Messungen des gleichen Prüflings, die sowohl kontinuierlich als auch schrittweise in einer MVK aufgenommen wurden, hinsichtlich ihrer statistischen Eigenschaften und ihrer Wiederholbarkeit untersucht.

Messaufbau

In einer MVK wurden die komplexwertigen Streuparameter zwischen einer fest installierten Anordnung aus drei umschaltbaren Antennen und einer Discone-Antenne als Prüfling mit einem VNA im Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz in $L = 1001$ Frequenzschritten gemessen. Die Messbandbreite des VNA betrug stets 100 kHz.

Die verwendete MVK ist vom Typ RTS60 des Herstellers Bluetest [6]. Die Innenabmessungen betragen ca. 1,8 m (Höhe), 1,2 m (Tiefe) und 1,9 m (Länge). Als Modenrührer sind zwei Bleche die jeweils entlang der Decke und einer Seitenwand sowie ein Drehteller für das Equipment Under Test (EUT) eingebaut, die allesamt über Schrittmotoren bewegt werden. Zudem ist hinter einem festen Blech eine Antennenanordnung, bestehend aus drei zueinander orthogonal angeordneten Antennen fest installiert, wovon über eine Umschaltvorrichtung jeweils eine Antenne zur Anregung des elektromagnetischen Feldes in der MVK ausgewählt wird. Jenes Blech dient dabei zur Unterdrückung einer direkten Sichtverbindung zwischen der festen Antennenanordnung und dem EUT [4].

Insgesamt war die MVK derart mit Absorbieren beladen, dass das die RMS-Delayaufspreizung (engl. RMS Delay Spread) des Verzögerungsleistungsprofils (engl. Power Delay Profile, PDP) ca. 50 ns betrug. Ein Wert in dieser Größenordnung ist typisch für Funkkanäle in industriellen Umgebungen im 2,4 GHz Band [7].

Die Konfiguration der MVK, d.h. die Beladung mit Absorbieren sowie die Position der Prüflingsantenne wurde für alle Messungen beibehalten. In Abbildung 1 ist ein Teil des Innenraums mit dem Drehteller, der Discone-Antenne (als EUT) sowie eingebrachten Absorbieren gezeigt.

Sowohl bei kontinuierlichem Betrieb als auch bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer wurden jeweils $N = 600$ Frequenzsweeps bei verschiedenen Kombination der Modenrührer und $A = 3$ festinstallierten umschaltbaren Antennen gespeichert.



Abb. 1: Foto des Innenraums der MVK.

Diese Messungen wurden jeweils viermal wiederholt, sodass jeweils $M = 4$ Messwertsequenzen für jede Konfiguration und Einstellung aufgenommen wurden.

Im schrittweisen Betrieb wurde jeweils eine von insgesamt $K = 200$ Kombinationen von Positionen der Modenrührer an Wand und Decke sowie eine Drehtellerposition angefahren und auf eine ($a = 1$) der drei fest installierten Antennen geschaltet. Danach wurde ein Frequenzsweep des VNA gestartet. Anschließend wurde auf die zweite fest installierte Antenne ($a = 2$) umgeschaltet und ein erneuter Frequenzsweep des VNA gestartet. Danach wurde auf die dritte fest installierte Antenne ($a = 3$) umgeschaltet und erneut ein Frequenzsweep gestartet. Im Anschluss wurde eine neue Kombination von Modenrührerstellungen angefahren und die jeweiligen Messungen sowie Umschaltungen wurden fortgesetzt, bis insgesamt $N = A \cdot K = 600$ Frequenzsweeps aufgenommen wurden.

Beim kontinuierlichen Betrieb wurde zu Beginn auf die erste fest installierte Antenne ($a = 1$) geschaltet und alle Modenrührer in Bewegung versetzt. Mit dieser Antenne wurden während der Bewegungen $K = 200$ Frequenzsweeps aufgenommen. Nach Erreichen von jeweils $K = 200$ Frequenzsweeps wurde auf die nächste fest installierte Antenne ($a = 2; 3$) umgeschaltet und die Messungen bei bewegten Modenrührern fortgesetzt, bis insgesamt $N = A \cdot K = 600$ Frequenzsweeps aufgezeichnet wurden. Die minimale Zeit zwischen den einzelnen Frequenzsweeps wurde dabei auf nominell 100 ms eingestellt, damit sich die Modenrührer bis zum nächsten Frequenzsweep ausreichend weit bewegen konnten.

Für beide Betriebsmodi wurden jeweils die Zeitpunkte zu Abschluss einer Messung in einer Log-Datei protokolliert. In Tabelle 1 sind die Messparameter aufgelistet.

Tab. 1: Zusammenfassung der Messparameter.

Laufvariable	Gesamtzahl	Beschreibung
a	$A = 3$	Feste Antennen
k	$K = 200$	Kombinationen der Modenrührerpositionen
l	$L = 1001$	Frequenzschritte
m	$M = 4$	Messwertsequenzen
n	$N = A \cdot K = 600$	Antennen- und Modenrührerkombinationen bzw. aufgenommene Frequenzsweeps

In Tabelle 2 sind jeweils die Messparameter fett dargestellt, über die in den folgenden Abschnitten die gemessenen S_{21} -Parameter gemittelt werden.

Tab. 2: Kennzeichnung der Messparameter, über die gemittelt wird.

Bezeichnung	Mittlung über alle
$\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)$	Antennen und Modenrührerkombinationen
$\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)$	Frequenzen
$\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)$	Messwertsequenzen

Mittlere Leistungsübertragung

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen jeweils die Mittelwerte der gemessenen S_{21} -Parameter über der Frequenz für den kontinuierlichen (Abb.2) sowie den schrittweisen (Abb.3) Betrieb der Modenrührer, d.h. $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$. Beim schrittweisen Betrieb der Modenrührer sind die Mittelwerte $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$ identisch über die jeweiligen Messwertsequenzen, d.h. über M . Im Vergleich dazu unterscheiden sich die Mittelwerte bei kontinuierlichem Betrieb jeweils geringfügig. Insgesamt sind die Mittelwerte $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$ im untersuchten Bereich jeweils nahezu frequenzflach, da in den Abbildungen 2 und 3 jeweils nur ein kleiner Bereich dargestellt ist. In Tabelle 3 sind die Mittelwerte über alle Modenrührerkombinationen sowie über alle betrachteten Frequenzen, d.h. $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$, dargestellt. Diese Werte sind für alle Messsequenzen faktisch identisch.

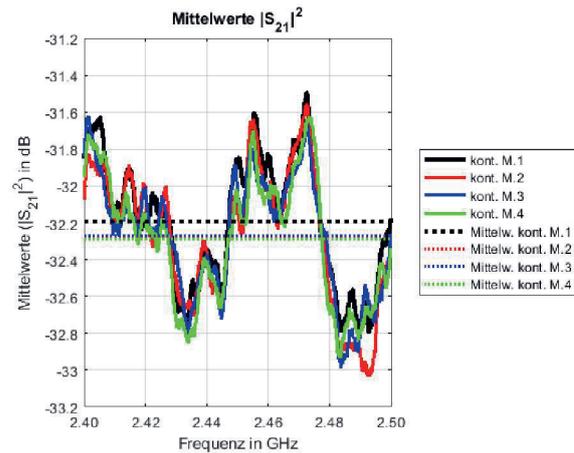


Abb. 2: Mittelwerte der Beträge der S_{21} -Parameter in dB bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

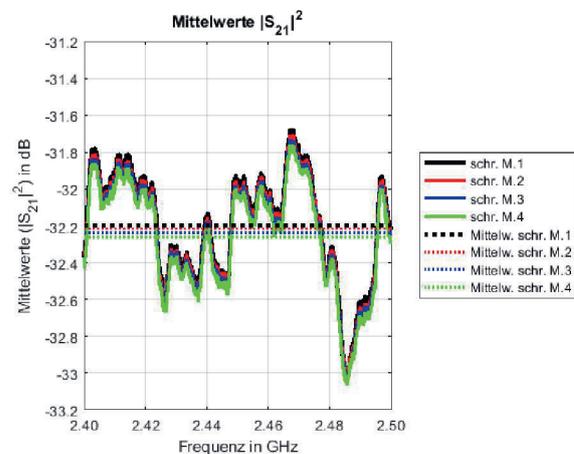


Abb. 3: Mittelwerte der Beträge der S_{21} -Parameter in dB bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

Tab. 3: Mittelwerte der Beträge der S_{21} -Parameter in dB über alle Antennen-/Modenrührerkombinationen N sowie über alle betrachteten Frequenzen L für die jeweiligen Messsequenzen.

Name	Betrieb der MVK	$ \overline{S_{21}} ^2$ in dB
kont. M.1	kontinuierlich	-31,14
kont. M.2	kontinuierlich	-31,22
kont. M.3	kontinuierlich	-31,22
kont. M.4	kontinuierlich	-31,24
schr. M.1	quasi-statisch	-31,15
schr. M.2	quasi-statisch	-31,17
schr. M.3	quasi-statisch	-31,19
schr. M.4	quasi-statisch	-31,22

Korrelation der Messwertsequenzen

In [8,9] wurde die Nutzung des frequenzabhängigen Korrelationskoeffizienten zur Detektion von Abweichungen einer

Referenz, wie etwa zur Detektion abweichender Polarisationen oder eines Defekts von Antennen gezeigt.

In gleicher Weise wird im Folgenden der frequenzabhängige (Leistungs-) Korrelationskoeffizient zwischen zwei Messwertsequenzen genutzt, um Divergenzen zwischen diesen zu verdeutlichen. Der (Leistungs-) Korrelationskoeffizient $\rho_P(i, j)$ zwischen zwei Messwertsequenzen i und j von $|S_{21}|^2$ -Parametern ($i, j \in M; i \neq j$) ist definiert als

$$\rho_P(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \left[\left(|S_{21,i,n}|^2 - \overline{|S_{21,i}|^2} \right) \cdot \left(|S_{21,j,n}|^2 - \overline{|S_{21,j}|^2} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \left(|S_{21,i,n}|^2 - \overline{|S_{21,i}|^2} \right)^2 \cdot \sum_{n=1}^N \left(|S_{21,j,n}|^2 - \overline{|S_{21,j}|^2} \right)^2}}, \quad (1)$$

wobei $N = 600$ der Gesamtzahl der Kombinationen der Modenrührer und Antennen entspricht. Neben diesem (Leistungs-) Korrelationskoeffizienten wird zudem der komplexe Korrelationskoeffizient $\rho_C(i, j)$, bezogen auf die komplexwertigen Streuparameter zwischen zwei Messwertsequenzen i und j untersucht. Dieser ist definiert als

$$\rho_C(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \left[\left(S_{21,i,n} - \overline{S_{21,i}} \right)^* \cdot \left(S_{21,j,n} - \overline{S_{21,j}} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |S_{21,i,n} - \overline{S_{21,i}}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |S_{21,j,n} - \overline{S_{21,j}}|^2}}, \quad (2)$$

wobei mit dem *-Symbol die konjugiert komplexe Zahl bezeichnet wird.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen jeweils den (Leistungs-) Korrelationskoeffizienten der aufgenommenen Messwertsequenzen von Streuparametern für je zwei Messreihen bei kontinuierlichem (Abb. 4) bzw. schrittweisem (Abb. 5) Betrieb der Modenrührer.

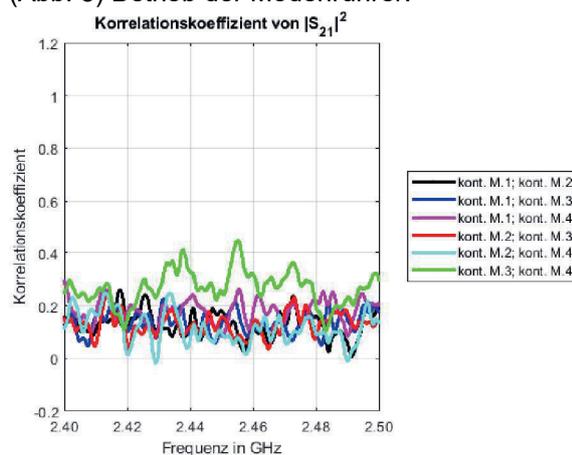


Abb. 4: Korrelationskoeffizienten über der Frequenz für jeweils zwei aufgenommene Messwertsequenzen bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

Bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer (Abb. 4) liegen die Korrelationskoeffizienten der aufgenommenen Messwertsequenzen im Mittel über der Frequenz bei ca. 0,2 bis 0,3 und sind somit jeweils als unkorreliert zu betrachten. Für den schrittweisen Betrieb (Abb. 5) liegen die Korrelationskoeffizienten über alle Frequenzen und alle Kombination von Messreihen bei 1 und sind somit stark korreliert.

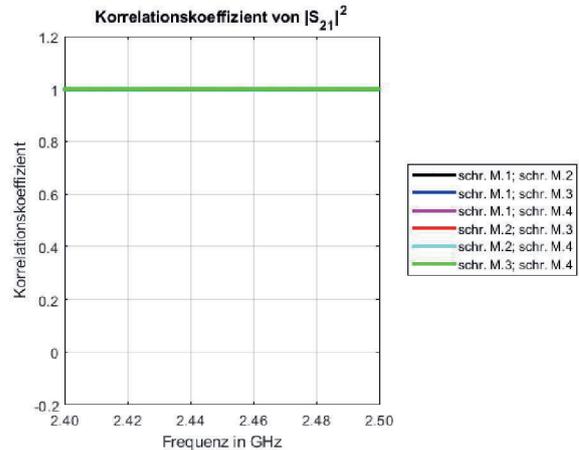


Abb. 5: Korrelationskoeffizienten über der Frequenz für jeweils zwei aufgenommene Messwertsequenzen bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

Zusätzlich zum (Leistungs-) Korrelationskoeffizienten wird im folgenden der komplexe Korrelationskoeffizient nach Gl. (2) ausgewertet, da dieser zudem Unterschiede der Phase der gemessenen S_{21} -Parameter darstellen kann. In den Abbildungen 6 und 7 sind jeweils die Real- und Imaginärteile des komplexen Korrelationskoeffizienten als Funktion der Frequenz gezeigt.

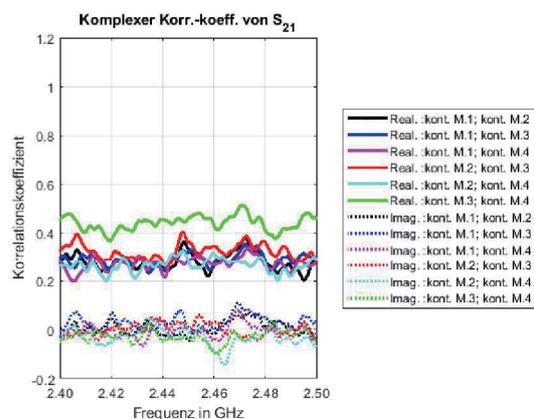


Abb. 6: Real- und Imaginärteil des komplexen Korrelationskoeffizienten über der Frequenz bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

Bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer (Abb. 6) liegen die Realteile jeweils zwischen 0,2 und 0,5 und die Imaginärteile jeweils ungefähr bei 0. Bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer (Abb. 7) liegen die Realteile jeweils für alle Kombinationen der untersuchten Messsequenzen bei 1, wohingegen die Imaginärteile allesamt bei 0 liegen. Folglich ist jeweils die Phasendifferenz der aufgenommenen Sequenzen bei schrittweisem Betrieb zu vernachlässigen.

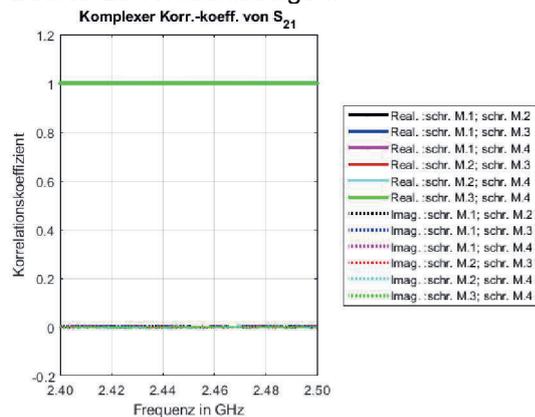


Abb. 7: Real- und Imaginärteil des komplexen Korrelationskoeffizienten über der Frequenz bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

Wiederholbarkeit der Fadingeinbrüche

In [7] wurde bereits für diese MVK (bei schrittweisem Betrieb) der Modenrührer gezeigt, dass die Beträge der S_{21} -Parameter tatsächlich Rayleigh-verteilt sind. Für solche Rayleigh-verteilten $|S_{21}|$ -Parameter bzw. für einen solchen Rayleigh-Funkkanal sind die Empfangsleistungen bzw. $|S_{21}|^2$ exponentialverteilt.

Für (Schmalband-) Funkanwendungen ist die Wahrscheinlichkeit von tiefen Fadingeinbrüchen von besonderem Interesse, da diese zu einem Übertragungsfehler führen können [5,10]. Im Folgenden wird daher die Wiederholbarkeit dieser Fadingeinbrüche bzw. von übertragener Leistung, die unterhalb der mittleren übertragenen Leistung, d.h. $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$, liegt, untersucht.

In den folgenden beiden Abbildungen 8 und 9 sind jeweils die empirischen Verteilungsfunktionen der Empfangsleistung über alle Frequenzen und Modenrührer- sowie Antennenkombinationen für kontinuierlichem als auch schrittweisem Betrieb der Modenrührer dargestellt. Dabei wurden alle $|S_{21}|^2$ -Werte von jeder Messwertsequenz auf deren Mittelwert, d.h. $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$, normiert. Die Farben der einzelnen Messwertsequenzen sind jeweils

transparent, sodass sich in deren Überlappung eine petrol-grüne Färbung ergibt. Insgesamt sind die jeweiligen Verteilungsfunktionen nahezu identisch, lediglich für tiefe Fadingeinbrüche ab etwa 30 dB unterhalb der Mittelwerte $|\overline{S_{21}}(\mathbf{n}, l, m)|^2$ gibt es geringfügige Differenzen. Diese sind auch darauf zurück zu führen, dass die absolute Anzahl der Werte in diesem Bereich sehr gering ist.

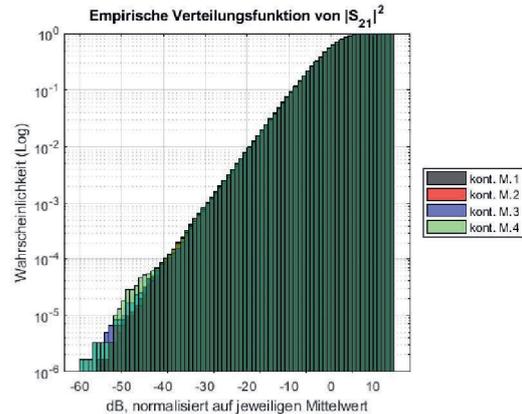


Abb. 8: Empirische Verteilungsfunktionen der Empfangsleistung bei kontinuierlichem Betrieb über alle Frequenzen und Antennen- / Modenrührerkombinationen, normiert auf den jeweiligen Mittelwert der Messwertsequenz.

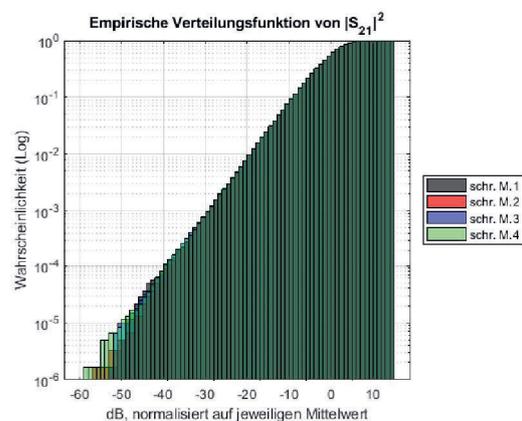


Abb. 9: Empirische Verteilungsfunktionen der Empfangsleistung bei schrittweisem Betrieb über alle Frequenzen und Antennen- / Modenrührerkombinationen, normiert auf den jeweiligen Mittelwert der Messwertsequenz.

Zur Verdeutlichung des tiefen Fadingbereichs ist in den Abbildungen 10 und 11 jeweils die absolute Anzahl der Fadingeinbrüche über alle Frequenzen und Modenrührer- sowie Antennenkombinationen dargestellt, die jeweils im Bereich von (mindestens) 20 dB bis (mindestens) 35 dB unter dem Mittelwert der

jeweiligen Messwertsequenz, d.h. $|\overline{S}_{21}(n, l, m)|^2$, liegen, da dieser Bereich für den typischen Betrieb von (Schmalband-) Funk-systemen relevant ist.

Generell ist jeweils die absolute Anzahl der Fadingeinbrüche bei kontinuierlichem als auch bei schrittweisem Betrieb nahezu identisch. Bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer (Abb. 10) wird die absolute Differenz zwischen der Anzahl der Fadingeinbrüche für tiefere Einbrüche geringer. Bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer (Abb. 11) sind die Differenzen zwischen der absoluten Anzahl der Fadingeinbrüche insgesamt geringer als bei kontinuierlichem Betrieb.

Zudem wurden jeweils die Indices (über Frequenz und Modenrührer-/Antennenkombination bzw. Samplenummer, d.h. n, l) der Messwertsequenzen, die jeweils zu einem Fadingeinbruch von mindestens 1, 2, 3, ..., 35 dB unter dem Mittelwert führten, in einem Array gespeichert. Somit entstanden 35 Arrays von Indices je Messwertsequenz und je kontinuierlicher / schrittweiser Betrieb der MVK. Von den jeweils viermal 35 Arrays bzw. Mengen von Indices je Betriebsmodus wurden jeweils 35 Schnittmengen und Vereinigungsmengen über die Wiederholungen, d.h. M , gebildet.

Die Schnittmengen haben die Bedeutung, dass bei allen Messwertsequenzen für die enthaltenen Indices ein entsprechend tiefer Fadingeinbruch erfolgte.

Die Vereinigungsmengen haben hingegen die Bedeutung, dass für jeden enthaltenen Index (n, l) es mindestens eine Messwertsequenz für diesen Betriebsmodi gibt, bei dem ein entsprechend tiefer Fadingeinbruch erfolgte. Die jeweilige Anzahl der Elemente in den Schnitt- und Vereinigungsmengen ist ebenfalls in den Abbildungen 10 und 11 gezeigt.

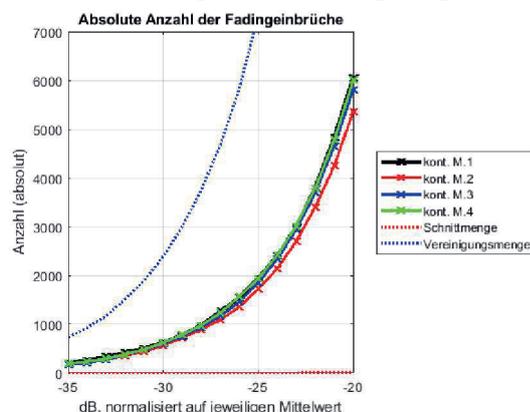


Abb. 10: Absolute Anzahl der Fadingeinbrüche bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

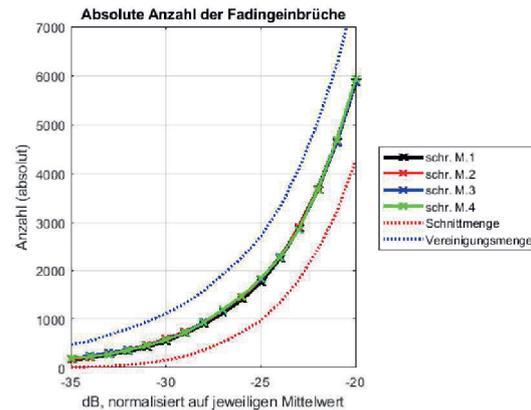


Abb. 11: Absolute Anzahl der Fadingeinbrüche bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

An diesen jeweiligen Indices (n, l) wurden zudem die Messwertsequenzen verglichen, d.h. der Mittelwert von den Differenzen der Fadingtiefe über die Anzahl der Indices. Die Differenz der Fadingtiefe bezeichnet hier die Differenz zwischen dem Maximum (über m) und dem Minimum (über m) von $|\overline{S}_{21}(n, l, m)|^2$ für diesen Fadingeinbruch.

In den Abbildungen 12 und 13 sind diese mittleren Differenzen in dB zwischen den vier Wiederholungen (d.h. M) über der Fadingtiefe dargestellt. Generell nehmen die mittleren Differenzen der absoluten Fadingeinbrüche für tiefere Fadingeinbrüche zu.

Für den kontinuierlichen Betrieb der Modenrührer (Abb. 12) ist die Schnittmenge der Indices, die zu einem Fadingeinbruch von mindestens 28 dB unter dem Mittelwert führen, leer, weshalb in diesem Bereich die Differenz nicht bestimmt werden kann. Die mittleren Differenzen für die Vereinigungsmenge der Indices sind stets höher als für die Schnittmenge der Indices. Ab einer Fadingtiefe von mindestens 10 dB unter dem Mittelwert verläuft die mittlere Differenz in dB für die Vereinigungsmenge nahezu linear mit steigender Einbruchtiefe, wobei die mittlere Differenz jeweils ca. 5 dB höher ist als die Einbruchtiefe unterhalb des Mittelwertes.

Dies bedeutet beispielsweise, dass für einen Index, der in mindestens einer Messwertsequenz einen Fadingeinbruch von 30 dB repräsentiert, im Vergleich zu den anderen Messwertsequenzen mittlere Abweichungen von 35 dB zu erwarten sind. Folglich sind diese tiefen Fadingeinbrüche bei kontinuierlichem Modenrührerbetrieb nicht wiederholbar.

Für den schrittweisen Betrieb der Modenrührer (Abb. 13) sind sowohl die Schnittmenge als auch die Vereinigungsmenge in dem dargestellten Bereich stets nicht leer.

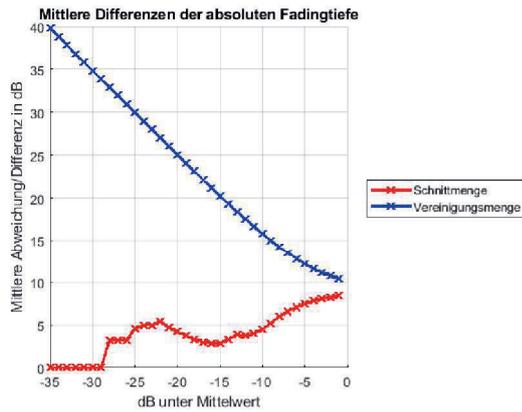


Abb. 12: Mittlere Differenzen in dB der absoluten Fadingtiefe bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

Zudem sind die mittleren Differenzen in dB deutlich geringer als bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer. Die mittleren Differenzen verlaufen für die Schnitt- sowie die Vereinigungsmenge der Indices nahezu identisch bis zu einer Fadingtiefe von ca. 20 dB unter dem Mittelwert. Für tiefere Fadingeinbrüche weichen die mittleren Differenzen bereichsweise voneinander ab. Bei einer Fadingtiefe von 30 dB unter dem Mittelwert beträgt die mittlere Differenz jeweils ca. 10 dB für beide Mengen. Dies bedeutet, dass für einen Index, der einen Fadingeinbruch von 20 dB repräsentiert, im Vergleich zu den anderen Messwertsequenzen mittlere Abweichungen von ca. 5 dB zu erwarten sind. Als Konsequenz können die Fadingeinbrüche bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer und beibehaltender Konfiguration der MVK als wiederholbar angesehen werden.

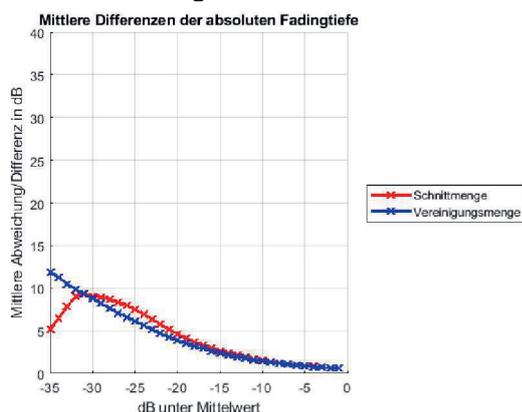


Abb. 13: Mittlere Differenzen in dB der absoluten Fadingtiefe bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

Zeitliches Verhalten der Messungen

In diesem Teil werden die Log-Dateien, welche die Messzeitpunkte protokollieren, untersucht. Dabei sind insbesondere die Zeitdifferenzen zwischen den einzelnen Ereignissen der Messwertaufnahme von Interesse. In Tabelle 4 sind Minimum, Mittelwert, Maximum und Streuung der Zeitdifferenzen in Sekunden zwischen den einzelnen Frequenzsweeps für den kontinuierlichen Betrieb der Modenrührer angegeben. Dabei wurden jeweils die Zeiten für das Umschalten zur nächsten fest installierten Antenne von ca. 0,4 – 0,5 s nicht in die Betrachtungen mit einbezogen.

Bei allen vier Wiederholungen liegen die Werte dicht beieinander. Der minimale zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Frequenzsweeps betrug bei allen Wiederholungen jeweils knapp 90 ms und lag somit unter der nominell eingestellten Dauer von 100 ms. Im Mittel wurde jeweils die nominell eingestellte Dauer überschritten. Die maximalen Werte betragen jeweils etwa das Doppelte des Mittelwerts.

Obwohl die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Zeitdifferenzen gering sind, bedeutet diese Abweichung, dass sich bei insgesamt $N = 600$ Frequenzsweeps die Gesamtdauer der Messungen zwischen den Wiederholungen um mehr als 2 s unterscheiden. Dies entspricht wiederum der vielfachen Dauer eines Frequenzsweeps. Somit begründet sich, wie zuvor bereits gezeigt, dass die Messwertsequenzen bei kontinuierlichem Modenrührerbetrieb unkorreliert sind.

Tab. 4: Zeitdifferenzen in s zwischen den einzelnen Frequenzsweeps bei kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer.

Zeit in s	kont. M.1	kont. M.2	kont. M.3	kont. M.4
Min.	0,086	0,088	0,088	0,087
Mittelwert	0,111	0,115	0,115	0,114
Max.	0,213	0,212	0,232	0,234
Streuung	0,015	0,015	0,016	0,015

In Tabelle 5 sind Minimum, Mittelwert, Maximum sowie Streuung der Zeitdifferenzen für den schrittweisen Betrieb der Modenrührer und die vier Messwertsequenzen angegeben. Bei jeder dieser schrittweisen Messwertsequenzen wird eine Modenrührerkombination angefahren und bei dieser Position dann zu den weiteren Antennen umgeschaltet, wie im Abschnitt „Messaufbau“ beschrieben. Daher sind die Mittelwerte und Streuungen für das jeweilige Umschalten sowie das Fahren der Modenrührer zusätzlich getrennt angegeben.

Das mechanische Fahren der Modenrührer dauert im Mittel ca. 1,8 s, wohingegen das Umschalten zur nächsten Antenne inklusive eines Frequenzsweeps in ca. 0,4 s abgeschlossen ist. Auffällig ist zudem, dass die Streuungen der Umschaltzeiten ohne ein Fahren der Modenrührer ca. 10 ms betragen und damit geringer sind als die Streuungen für den kontinuierlichen Modenrührerbetrieb (ohne ein Umschalten der Antennen).

Tab. 5: Zeitdifferenzen in s zwischen den einzelnen Frequenzsweeps bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer.

Zeit in s	schr. M.1	schr. M.2	schr. M.3	schr. M.4
Min.	0,416	0,417	0,415	0,408
Mittelwert	0,879	0,880	0,880	0,866
Max.	1,876	1,848	1,887	1,851
Streuung	0,635	0,634	0,634	0,640
Umschalten zu Ant. 2:	0,436	0,437	0,437	0,417
Mittelwert	/	/	/	/
/ Streuung	0,010	0,012	0,011	0,005
Umschalten zu Ant. 3:	0,436	0,437	0,435	0,420
Mittelwert	/	/	/	/
/ Streuung	0,007	0,009	0,006	0,010
Fahren und Umschalten zu Ant. 1:	1,770	1,771	1,770	1,765
Mittelwert	/	/	/	/
/ Streuung	0,145	0,145	0,146	0,145

Fazit

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass bei einer MVK zunächst unabhängig davon, ob die Modenrührer kontinuierlich oder schrittweise bewegt werden, die gleichen mittleren Leistungsübertragungsfunktionen und gleichen Fadingeinbrüche erzielt werden. Jedoch sind bei zeitlich nicht-synchronem, kontinuierlichem Betrieb der Modenrührer die aufgenommenen Messwertsequenzen zwischen den Wiederholungen unkorreliert. In Folge dessen sind bei kontinuierlichem Betrieb für Wiederholungen der Messsequenzen zwar die statistischen Eigenschaften konstant, nicht jedoch die Abfolge der Messwerte. Somit ist hierbei für bestimmte Samplenummern das spezifische frequenzselektive Verhalten nicht reproduzierbar.

Im Gegensatz dazu sind bei schrittweisem Betrieb der Modenrührer die Messwertsequenzen stark korreliert. Darüber hinaus sind für eine bestimmte Frequenz und Modenrührerkombination auch die Fadingeinbrüche gut reproduzierbar. Daher

können die Messwertsequenzen bei Wiederholungen als nahezu identisch angesehen werden.

Insgesamt sollte folglich dessen eine MVK ausschließlich schrittweise betrieben werden, wenn eine Reproduzierbarkeit der Messwertsequenzen oder Fadingeinbrüche gefordert ist.

Literaturnachweis

- [1] DIN EN 61000-4-21:2011-12; VDE 0847-4-21:2011-12, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer (IEC 61000-4-21:2011); Deutsche Fassung EN 61000-4-21:2011, 2011
- [2] 3GPP TR 25.914 V15.0.1, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Measurements of radio performances for UMTS terminals in speech mode (Release 15)
- [3] C. L. Holloway, et al.: On the Use of Reverberation Chambers to Simulate a Rician Radio Environment for the Testing of Wireless Devices, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 54 (11), 3167-3177 (2006), DOI: 10.1109/TAP.2006.883987
- [4] P.S. Kildal, et al.: Characterization of Reverberation Chambers for OTA Measurements of Wireless Devices: Physical Formulations of Channel Matrix and New Uncertainty Formula, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60 (8), 3875-3891 (2012), DOI: 10.1109/TAP.2012.2201125
- [5] C. Cammin, D. Krush, R. Heynicke, G. Scholl: Test method for narrowband F/TDMA-based wireless sensor/actuator networks including radio channel emulation in severe multipath environments, *J. Sens. Sens. Syst.*, 7, 183-192 (2018), DOI: 10.5194/jsss-7-183-2018
- [6] Bluetest AB: *RTS60 Reverberation Test System*, Datasheet, Rev. G, 2014. URL: https://bluetest.se/sites/default/files/RTS60_BT_D-10-019_Rev_G.pdf (Download: 20.04.2019)
- [7] C. Cammin, D. Krush, R. Heynicke, G. Scholl: Charakterisierung einer Modenverwirbelungskammer als Testumgebung für drahtlose Sensor/Aktor-Module, *tm - Technisches Messen* 85(6), 420-433 (2018) DOI: 10.1515/teme-2018-0003
- [8] C. Cammin, D. Krush, R. Heynicke, G. Scholl: Employing Correlation for Wireless Device Characterization in Reverberation Chambers, 19. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 2018, Nürnberg, erschienen in *ITG-Fb. 281: Sensoren und Messsysteme*, VDE Verlag
- [9] C. Cammin, D. Krush, R. Heynicke, G. Scholl: Employing correlation for wireless component and device characterization in reverberation chambers, *J. Sens. Sens. Syst.* 8, 185-194 (2019), DOI: 10.5194/jsss-8-185-2019
- [10] M. Pätzold: *Mobilfunkkanäle*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1999. ISBN: 978-3-663-05656-0