

Schnelle E-Feldmessungen mit lasergespeisten Feldsonden in Modenverwirbelungskammern

B. Sc. Konstantin Bredenfeld, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

Dr.-Ing. Mathias Magdowski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

Dipl.-Ing Robert Gratzl, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Deutschland

Dr. rer. nat. Hendrik Bartko, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

Abstract

Im Beitrag geht es um die schnelle Messung und direkte Leistungsregelung von elektromagnetischen Feldern in einer Modenverwirbelungskammer. Hierfür werden elektrische Feldsonden mit einer hohen Abtastrate verwendet. Das Ziel ist es, einen optimalen Betriebszustand der Modenverwirbelungskammer für die kontinuierliche Änderung der Randbedingungen zu finden. Dafür stehen zwei drehbare Rührer und ein bewegliches, leitfähiges Textil zur Verfügung. In der Untersuchung werden Homogenität, Feldverteilung und die Rührereffektivität berücksichtigt. Zusätzlich wird die aktive Feldregelung auf Basis von Feldstatistikparametern durchgeführt und analysiert.

1 Einleitung

Zur Untersuchung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von elektronischen Systemen hinsichtlich der Störfestigkeit (Immunität) und Störaussendung (Emission) werden abgeschirmte Testumgebungen wie Modenverwirbelungskammern (MVKn) benötigt. Diese sind Gegenstand der aktuellen Forschung und finden zunehmend Verwendung in der Industrie. Eine MVK stellt aufgrund ihrer leitfähiger Wände, die elektromagnetische Wellen reflektieren, einen Hohlraumresonator dar. Wird Leistung in den Resonator eingespeist, bilden sich stehende Wellen bzw. Hohlraumresonanzen (Moden) aus. Um ein homogenes (ortsunabhängiges) und isotropes (richtungsunabhängiges) Feld zu erzeugen, sind Modenrührer erforderlich. Diese verändern die Randbedingungen der Kammer, um das Feld zu verwirbeln. Durch die starken Reflexionen besitzt die MVK eine hohe Güte und es ist möglich, hohe Testfeldstärken mit vergleichsweise geringer Verstärkerleistung zu erzeugen. Des Weiteren können in der MVK auch große Prüflinge simultan aus allen Richtungen überprüft werden. Dabei müssen die Antenne oder das Prüfobjekt nicht bewegt werden, wie es bei traditionellen EMV-Testumgebungen der Fall ist, womit die Messzeit reduziert werden kann.

Die herkömmliche Messung in einer MVK erfolgt bei schrittweiser Drehung des Rührers. Der Vorteil bei einer kontinuierlichen Drehung des Rührers liegt in der reduzierten Messzeit, da die Rührerpositionen nicht einzeln angefahren werden müssen und die Verweilzeit pro Rührerpositionen entfällt. Um das elektrische Feld bei schneller Änderung der Randbedingungen messen zu können, sind Feldsonden mit hoher Abtastrate notwendig. Die Randbedingungen der Kammer werden beispielsweise durch schnell drehende Modenrührer oder bewegliche Wände aus leitfähigem Textil rapide verändert. Durch die Verfügbarkeit von Sonden mit hoher Abtastrate bieten sich neue Möglichkeiten für Messungen in der MVK. Ein neues Verfahren [1] verwendet eine aktive Regelung, die auf den Statistikparametern des elektromagnetischen Feldes basiert. Dieses regelt die Verstärkerleistung in Echtzeit, um Testfeldstärken für Störfestigkeitsmessungen zu erzeugen. Ziel dieses Beitrags ist, ein Modell zu entwerfen, welches eine optimale Änderung der Randbedingungen in der MVK und der dadurch erreichbaren Zielgrößen, insbesondere der Messzeit, beschreibt. Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Für die beispielhaft untersuchte MVK der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg soll eine optimale Konfiguration der schnellen Feldverwirbelung experimentell ermittelt werden. Dafür stehen zwei Rührer und ein Textil aus leitfähigem Material zur Verfügung.

- Die aktive Feldregelung soll erstmalig mittels der Messsoftware EMC32 des Anbieters Rohde & Schwarz umgesetzt und dabei validiert werden.
- Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen anschließend zu einem allgemeinen Modell erweitert werden.

2 Theorie

2.1 Homogenität

Durch die Ermittlung der Homogenität kann eine Aussage über die Gleichförmigkeit der Prüfumgebung getroffen werden. Diese ist notwendig, um die korrekte Funktionsweise der Kammer sicherzustellen. In der DIN EN 61000-4-21 [2, Abschnitt B.1] werden das Verfahren für die Validierung der Gleichförmigkeit des Feldes beschrieben und Grenzwerte definiert. Für die Messung werden acht Feldsonden innerhalb der Kammer aufgestellt, die das quaderförmige Prüfvolumen aufspannen.

Die Messung beginnt mit der Startfrequenz f_S , welche der niedrigsten nutzbaren Frequenz entspricht. Dabei wird über die Sendeantenne die Eingangsleistung P_{Input} in die Kammer eingespeist. Währenddessen werden die maximalen Feldstärkewerte aller acht Positionen, sowie Feldkomponenten über eine volle Rührerumdrehung gemessen. Die Messung ist für Frequenzschritte mit logarithmischen Abständen zu wiederholen, wie es die Norm [2] vorschreibt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Anforderung an die Messwertaufnahme [2]

Frequenzbereich	empfohlene Rührerpositionen	erforderliche Frequenzen
f_S bis $3f_S$	12	20
$3f_S$ bis $6f_S$	12	15
$6f_S$ bis $10f_S$	12	10
$> 10f_S$	12	10/Dekade

Für die Vergleichbarkeit der Messwerte bei unterschiedlichen Eingangsleistungen ist die Feldstärke nach folgender Gleichung zu normieren.

$$\vec{E}_{x,y,z} = \frac{E_{\text{Max}_{x,y,z}}}{\sqrt{P_{\text{Input}}}} \quad (1)$$

Dabei ist $\vec{E}_{x,y,z}$ das normierte maximale E -Feld in $\frac{\text{V/m}}{\sqrt{\text{W}}}$, $E_{\text{Max}_{x,y,z}}$ sind die maximalen Werte der drei Feldkomponenten $r = x, y, z$ an acht Positionen, $i = 1$ bis 8 in V/m und P_{Input} ist die mittlere eingespeiste Eingangsleistung in W. Aus dem normierten maximalen E -Feld kann der arithmetische Mittelwert $\langle \cdot \rangle$ über die Sondenpositionen und/oder deren Achsen gebildet werden:

$$\left\langle \vec{E}_x \right\rangle_8 = \frac{\sum_{i=1}^8 \vec{E}_{x,i}}{8} \quad (2)$$

Der arithmetische Mittelwert kann ebenfalls über alle drei Feldkomponenten gebildet werden:

$$\left\langle \vec{E} \right\rangle_{24} = \left\langle \frac{\vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z}{3} \right\rangle_8 = \frac{\sum_{r=x,y,z} \sum_{i=1}^8 \vec{E}_{r,i}}{24} \quad (3)$$

Über die Standardabweichung σ des normierten arithmetischen Mittelwerts der normierten Maximalwerte wird die Homogenität (räumliche Gleichförmigkeit des Feldes) angegeben. Die einzelnen

Feldkomponenten werden folgendermaßen nach [2] berechnet:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 \left(\overleftrightarrow{E}_{x,i} - \langle \overleftrightarrow{E}_x \rangle \right)^2}{(8-1)}} \quad (4)$$

Mit der folgenden Gleichung wird die Standardabweichung in dB umgerechnet:

$$\sigma_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\langle \overleftrightarrow{E} \rangle} + 1 \right) \quad (5)$$

Die DIN EN 61000-4-21 schreibt einen Grenzwert (siehe Tabelle 2) für die Standardabweichung σ der Feldhomogenität vor.

Tabelle 2: Anforderungen für die Gleichförmigkeit des Feldes

Frequenzbereich in MHz	Grenzwert für die Standardabweichung
80 bis 100	4 dB
100 bis 400 ab 400	4 dB bei 100 MHz linear abfallend auf 3 dB bei 400 MHz 3 dB

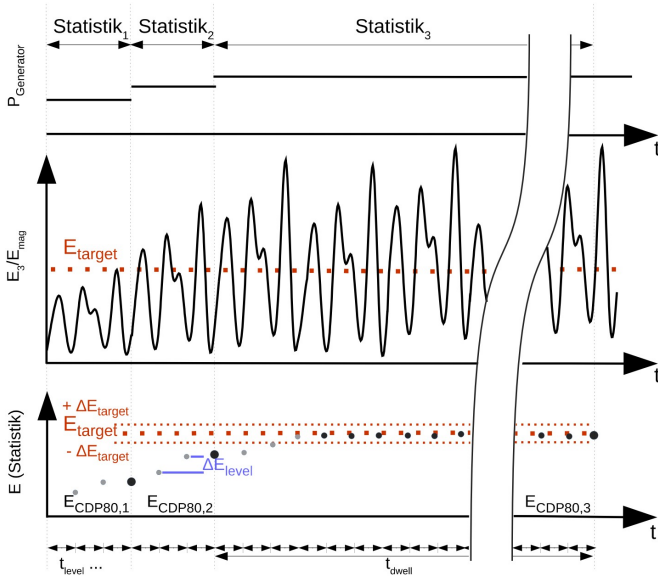
2.2 Aktive Feldregelung

Durch die Verfügbarkeit von Feldsonden mit hoher Abtastrate bietet die MVK neue Möglichkeiten für die Durchführungen von Störfestigkeitsmessungen mit aktiver Feldregelung (engl.: closed-loop control). Diese findet Erwähnung in der ISO 11451-5 [1]. Bisher existieren jedoch kaum wissenschaftliche Veröffentlichungen zu diesem Thema.

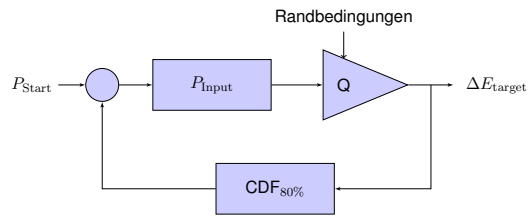
Das Prinzip der aktiven Feldregelung beruht auf der Messung der elektrischen Feldstärke mit einem Mehrsondensystem mit typischer 8 Feldsonden und der Berechnung des Prüfpegels in Echtzeit. Für die Regelung wird die kumulierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (CDF, engl.: cumulative distribution function) von allen acht Sonden verwendet. Dadurch lassen sich Aussagen treffen, wie oft DUT einer bestimmten Feldstärke ausgesetzt war. Beispielsweise ist bei einer Verweilzeit von 10 s und einer Feldstärke von $CDF_{80\%} = 100 \frac{V}{m}$ sichergestellt, dass das DUT mindestens 2 s einer Prüffeldstärke von $100 \frac{V}{m}$ ausgesetzt war. In Abbildung 1a ist der Ablauf der aktiven Feldregelung zu sehen. Nach diesem Schema erfolgt die Regelung in der Messsoftware EMC32 von Rohde & Schwarz in Verbindung mit Feldsonden von LUMILOOP.

Zu Beginn der Messung ist eine Generatorleistung einzustellen, die eine Feldstärke unterhalb der Zielfeldstärke E_{target} erzeugt. Es folgt die Messung des CDF-Wertes nach t_{level} . Diese Zeit ist notwendig, damit sich das System stabilisiert und der CDF-Wert konstant bleibt. Wurde eine Feldstärke ermittelt, welche sich nicht im Zielbereich $E_{target} \pm \Delta E_{target}$ befindet, wird die Generatorleistung bis zum maximalen Feldstärkepegel E_{level} erhöht. Der neue Generatorpegel wird über den linearen Zusammenhang von $E_{dB} \sim P_{dB}^2$ ermittelt. Die Prozedur wird wiederholt, bis eine Feldstärke erreicht wurde, welche innerhalb des Zielbereichs $E_{target} \pm \Delta E_{target}$ liegt. Ab diesem Zeitpunkt startet die Verweilzeit t_{dwell} , in der das DUT der Prüffeldstärke ausgesetzt wird.

Der Startpegel für die Generatorleistung und der Regelalgorithmus sollte so eingestellt sein, dass die Zielfeldstärke möglichst schnell erreicht wird. Andernfalls kann die Leistungsregelung zu langen Nivellierungszeiten führen oder zur Übertestung des DUT, da das Einschwingverhalten der Statistik nicht ausreichend ist [1]. Die Ursache kann eine zu geringe Rührergeschwindigkeit sein, da keine ausreichende Anzahl an unabhängigen Rührerpositionen erreicht wurde.



(a) Ablauf der aktiven Feldregelung [3]



(b) Regelkreis

Abbildung 1: Aktive Feldregelung

Vorteile dieser Methode gegenüber dem vorgestellten Verfahren in der DIN EN 61000-4-21 [2] sind das Entfallen des DUT-Beladungstests und eine reduzierte Messzeit. Die einzelnen Rührerpositionen müssen nicht angefahren werden und benötigen keine Verweilzeit pro Position. Der Regelalgorithmus passt sich durch seine aktive Regelung auf die aktuellen Feldverhältnisse der Kammer und des Prüflings an. Dieses Verfahren eignet sich ausgezeichnet für die Automobilindustrie, da die Beladung mit Fahrzeugen einen großen Einfluss auf die Güte darstellt [3]. Der geschlossene Regelkreis ist in Abbildung 1b dargestellt.

Der Startpegel des Generators P_{Start} stellt die Führungsgröße dar. Der Regler wird durch den Zusammenhang von Feldstärke E und Leistung P_{Input} realisiert. Die Randbedingungen wirken sich als Störgröße auf die Regelstrecke (Güte der Kammer) aus. Die zu regelnde Größe ist die Feldstärke, welche den Wertebereich ΔE_{target} erreichen soll. Die Rückführung erfolgt über den Statistikparameter $\text{CDF}_{80\%}$.

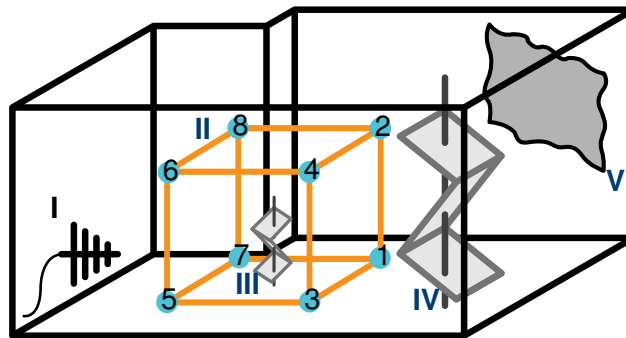
3 Messaufbau

Die Messungen erfolgten in der großen MVK an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Diese besitzt ein Volumen von etwa 160 m^3 und eine niedrigste nutzbare Frequenz von ca. 200 MHz [4], [5]. Eine logarithmisch-periodische Breitbandantenne VULP 9118 C [6] von Schwarzbeck dient als Sendeantenne (I). Acht lasergespeiste Feldsonden LSProbe 1.2 (II) von LUMILOOP werden in Kombination mit dem Mehrsondensystem eingesetzt, welche eine direkte Auswertung der Statistikdaten des elektrischen Feldes ermöglichen [7]. Um die Randbedingungen der Kammer zu verändern, stehen ein kleiner, schnelldrehenden Modenrührer (III), ein großer, langsamdrehenden Modenrührer (IV) und ein leitfähiges Textil (V) zur Verfügung. Um das Textil in Bewegung zu versetzen, wurden mehrere Konfigurationen realisiert. Zum einen wurde ein Seil mittig am Textil befestigt, welches mit dem Motor verbunden war (siehe Abbildung 2a). Zum anderen wurde das Textil direkt am Motor aufgehängt, um eine möglichst große Auslenkung zu erreichen.

Die für die Messungen in der MVK notwendigen Messgeräte und deren Verschaltung sind in Abbildung 3 als Übersicht dargestellt. Der HF-Signalgenerator SMC100A erzeugt eine Leistungsspegel, welcher vom Leistungsverstärker 100W1000M1 verstärkt wird. Über den Richtkoppler kann die Vorwärts- und Rückwärtsleistung mit dem Leistungsmessgerät NRP2 gemessen werden. Die Kommunikation mit dem Signalgenerator und dem Leistungsmessgerät erfolgt über eine LAN-Schnittstelle. Das Mehrsondensystem ist über die Computerschnittstelle per USB angeschlossen.



(a) Modenverwirbelungskammer in Magdeburg



(b) Modell

Abbildung 2: Messaufbau

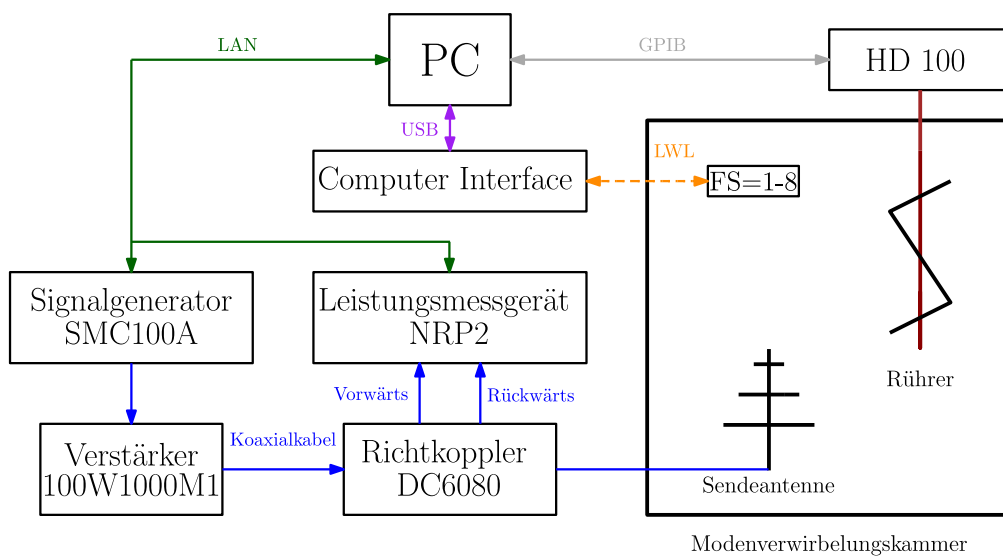


Abbildung 3: Blockschaltbild der Zusammenschaltung der Messgeräte

Die Kommunikation und Stromversorgung der einzelnen Feldsonden erfolgt über Lichtwellenleiter. Der Rührercontroller kann über GPIB angesteuert werden. Ein eigens konzipierte Pythonprogramm diente zur Ansteuerung der Messgeräte, der Regelung des Systems sowie der Speicherung und Auswertung der Messdaten.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt eine Auswertung und Analyse der erhobenen Messdaten. Die MVK wurde zum einen hinsichtlich der besten Konfiguration der Homogenität untersucht und zum anderen wurde die aktive Feldregelung realisiert. Dafür wurden die Messparameter in Tabelle 3 verwendet.

Tabelle 3: Messparameter

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Verstärkerleistung	1 W	Frequenzpunkte	112
Startfrequenz	63 MHz	Abtastrate der Feldsonden	$5 \frac{kS}{s}$
Endfrequenz	1 GHz	Statistikwerte	≈ 3500

Um das Grundprinzip der MVK zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4 der zeitliche Verlauf der Feldstärke für eine Feldsonde bei 200 MHz und 1 GHz dargestellt. Für diese Messung wurde ausschließlich der große Rührer verwendet, welcher für eine Umdrehung 4,5 s benötigt.

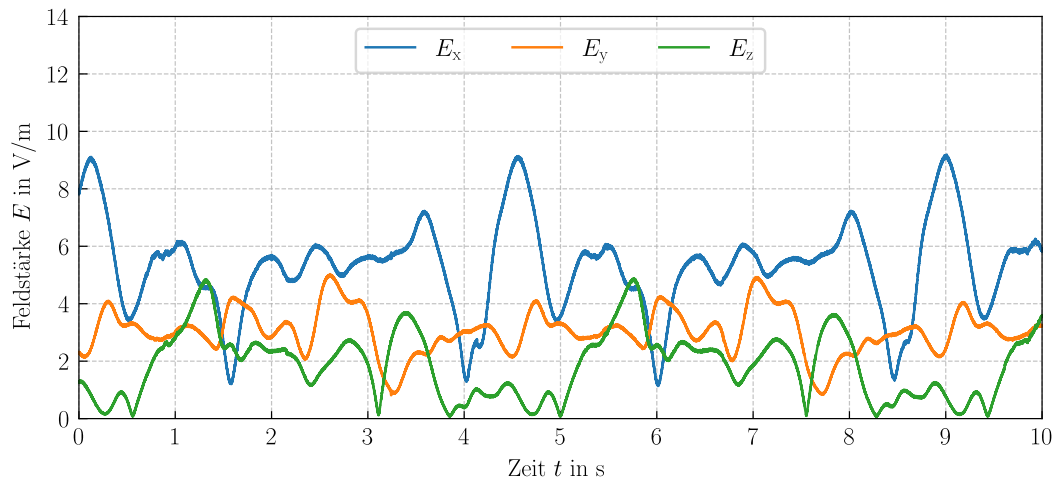
Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der höheren Frequenz von 1 GHz im Vergleich zu 200 MHz deutlich häufiger Minima und Maxima auftreten. Dies lässt sich durch die Wellenlänge des elektromagnetischen Feldes erklären. Bei einer geringen Wellenlänge, also bei höheren Frequenzen, kann es häufiger zu konstruktiver oder destruktiver Überlagerung des Feldes kommen.

Zur Beurteilung der Homogenität der Messungen wird die normierte Standardabweichung als Maß verwendet. Dieses Konzept wurde in Abschnitt 2.1 eingeführt und bietet eine geeignete Möglichkeit, die Streuung der Messwerte zu quantifizieren. Für die Analyse wurden verschiedene Betriebszustände der beiden Rührer und des Textils untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 zu finden. Für die Berechnung der Standardabweichung wurde Formel (5) verwendet.

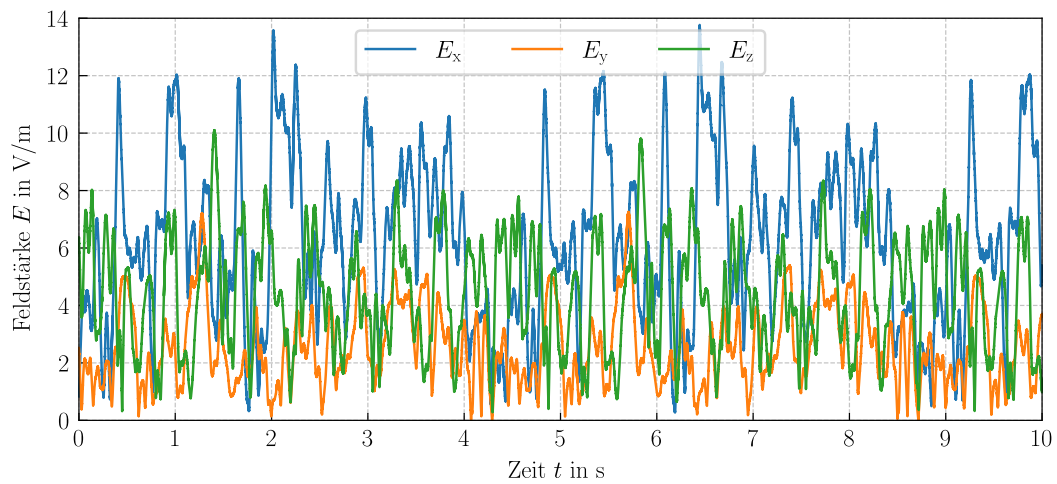
Eine geringe Standardabweichung deutet auf eine hohe Gleichförmigkeit der elektrischen Feldstärke über eine Rührerumdrehung und damit auf eine effektive Verwirbelung hin. Ein unzureichendes Ergebnis stellt die ausschließliche Verwendung des kleinen Rührers und des Textils dar, da der Grenzwert der Standardabweichung überschritten wird. Erwartungsgemäß entspricht der große Rührer den Anforderungen der Homogenität. Das optimale Ergebnis wurde durch den simultanen Betrieb der Rührer und des Textils erzielt.

Für die aktive Feldregelung wurde die Messsoftware EMC32 von Rohde & Schwarz verwendet. Das Konzept der aktiven Feldregelung wurde in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Für die Validierung der Funktionsweise der Software wurden mehrere Konfigurationen geprüft. Eine Übersicht dieser und der dafür benötigten Messdauer ist in Diagramm 6 zu finden.

Bei Betrachtung der Messdauer bestätigen sich die gewonnenen Erkenntnisse aus vorherigen Messungen, da die aktive Feldregelung auf dem Statistikparameter basiert. Der große Rührer wurde für fünf Geschwindigkeitsstufen (G1 bis G5) geprüft. Mit der höchsten Stufe konnte im Vergleich zu den anderen Geschwindigkeitsstufen die geringste Messdauer erreicht werden. Für Testzwecke wurde eine Messung durchgeführt, bei der keine der Konfigurationen zum Einsatz kam. Das heißt weder Rührer noch Textil wurden betrieben und es gab keine Änderung der Randbedingungen. Dadurch ergibt sich instantan ein stabiler CDF-Wert, da keine Einpegelzeit notwendig ist. Bei Analyse der optimalen Konfiguration ist diese Messung jedoch außer Acht zu lassen, da die Bedingungen der Feldhomogenität nicht erfüllt werden. Gleiches gilt für den alleinigen Betrieb des kleinen Rührers. Daher sind die beiden Messungen im Säulendiagramm grau dargestellt. Die geringste Messdauer wird mit der Konfiguration unter Verwendung aller Rührer und des Textils erreicht.



(a) für eine Frequenz von $f = 200$ MHz



(b) für eine Frequenz von $f = 1$ GHz

Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Feldstärke

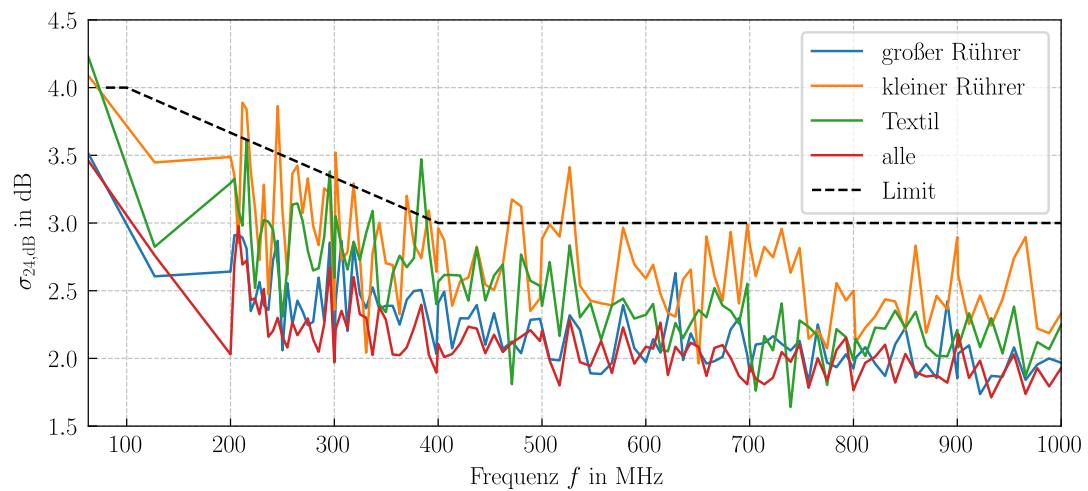


Abbildung 5: Normierte Standardabweichung der 24 Feldkomponenten

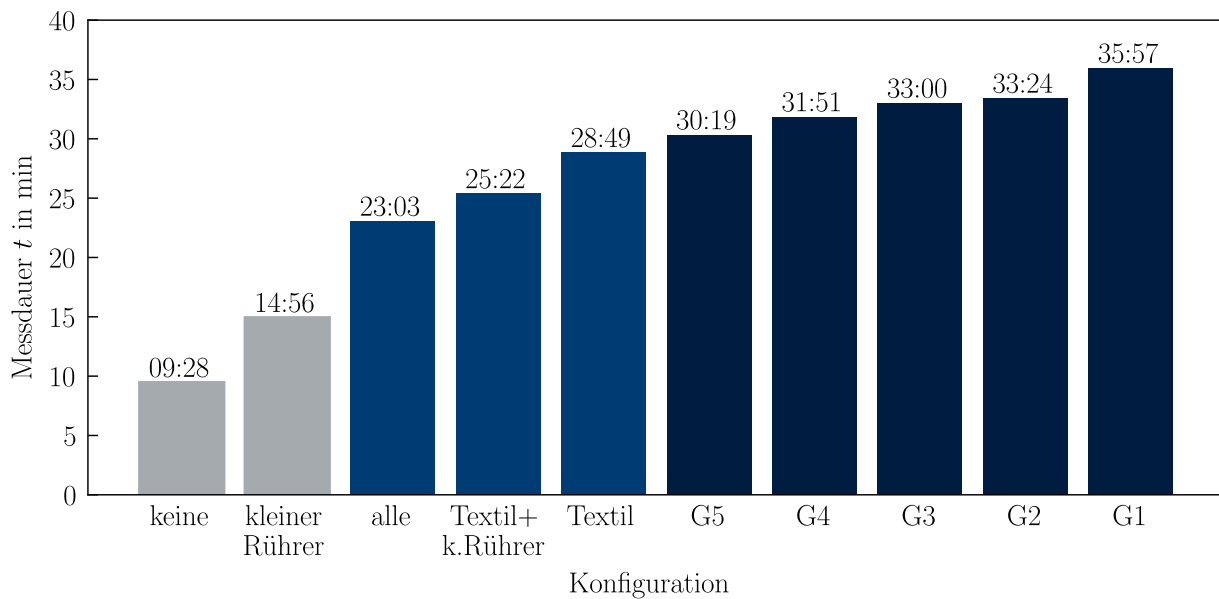


Abbildung 6: Messdauer für verschiedene Konfigurationen (Zeitangaben in mm:ss). Für die Konfigurationen „keine“ und „kleiner Rührer“ funktioniert zwar die aktive Feldregelung, jedoch werden die Grenzwerte für die Feldhomogenität überschritten, weshalb diese Fälle keine praktische Relevanz besitzen.

5 Zusammenfassung

Ein simultaner Betrieb von mehreren Rührern und einem beweglichen leitfähigen Textil in einer Modenverwirbelungskammer ermöglicht eine schnelle und effektive Veränderung der elektromagnetischen Randbedingungen. Durch die gleichzeitige Nutzung schneller elektrischer Feldsonden mit hoher Abtastrate lässt sich eine aktive Feldregelung für Störfestigkeitsmessungen umsetzen, die eine vorherige Prüflingsvalidierung obsolet macht und dadurch die Messzeit signifikant reduzieren kann, ohne gleichzeitig die statistische Unsicherheit der Messung zu erhöhen.

Literatur

- [1] ISO, *11452-11 Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy*, Switzerland, 2022.
- [2] DIN EN, *61000-4-21: (VDE 0847-4-21):2011-12 Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer*, Berlin, VDE Verlag, 2011.
- [3] LUMILOOP GmbH, *Closed-Loop-Regelung EMC32 in VIRC Unter Verwendung eines LUMILOOP Multisonden-Systems*. 2019.
- [4] H. G. Krauthäuser, „Grundlagen und Anwendungen von Modenverwirbelungskammern,“ Habilitation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Magdeburg, 2007.
- [5] A. Somani, „Measurement and Statistical Analysis of Boundary Fields in a Reverberation Chamber,“ Masterarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für elektromagnetische Verträglichkeit, Magdeburg, 2012.
- [6] Schwarzbeck - Mess-Elektronik. „Logarithmisch Periodische Breitband Antenne VULP 9118 C, Datenblatt.“ (2023), Adresse: <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9118c.pdf>.
- [7] LUMILOOP GmbH. „LSProbe 1.2: User’s Manual.“ (2021), Adresse: <https://lumiloop.de/support/documents-and-downloads/>.