

# Rückwirkung von Positioniersystemen auf die Feldverteilung in einer GTEM-Zelle

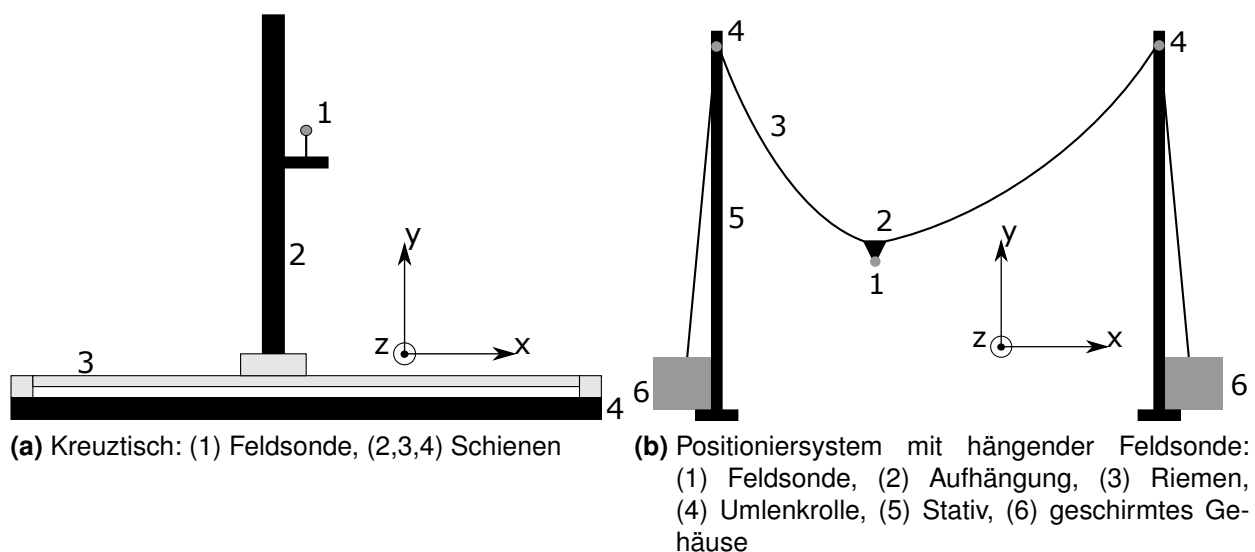
Dipl.-Ing. Max Rosenthal, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Deutschland,  
Dr.-Ing. Ralf Theo Jacobs, Technische Universität Dresden, Deutschland,  
Dipl.-Ing. Konstantin Pasche, Technische Universität Dresden, Deutschland,  
Dipl.-Ing. Eike Suthau, Lumiloop GmbH, Dresden, Deutschland

## 1 Einleitung

Eine GTEM-Zelle (Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell) ist eine standardisierte Mess- und Prüfumgebung für elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Sie zeichnet sich durch die Erzeugung homogener elektromagnetischer Felder über ein breites Frequenzspektrum aus [1]. Für die Untersuchung feldgebundener EMV-Probleme ist neben der analytischen und numerischen Betrachtung, die präzise Messung [2] elektromagnetischer Felder von großer Bedeutung. Automatisierte Positioniersysteme für Feldsonden [3, 4] ermöglichen dabei eine Reduzierung der benötigten Messzeit und eine Erhöhung der Reproduzierbarkeit, wobei das verwendete System möglichst keinen Einfluss auf das Feld haben sollte. In dieser Arbeit werden die Rückwirkungen von zwei verschiedenartigen Positioniersystemen auf das zu messende Feld in einer GTEM-Zelle untersucht und aufgezeigt. Dazu werden ein automatisierter Kreuztisch und ein Positioniersystem mit einer hängenden Feldsonde in die Zelle eingesetzt.

## 2 Systemüberblick

Die betrachteten Positioniersysteme sind in Abb. 1 dargestellt. Die Messungen werden jeweils mit einer  $E$ -Feldsonde durchgeführt, die über Lichtwellenleiter gespeist wird. Der Kreuztisch besteht aus einem Schienenrahmen, der mit Schrittmotoren versehen ist, um



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Positioniersysteme

die Sonde über Schienen im Raum zu positionieren. Die Schienen sind aus einem Nature-Fibre-Composite (NFC) gefertigt und haben im Querschnitt jeweils eine Abmessung von  $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ . NFC besteht aus etwa 30% Polypropylen und 70% Holzfaser und hat eine relative Dielektrizitätskonstante von etwa 4,4. Metallische Komponenten wie Steuerleitungen und Taster an den Schienenenden befinden sich weitestgehend außerhalb des Arbeitsvolumens. Die Abmessungen des Kreuztisches betragen  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ .

Bei dem System mit hängender Feldsonde ist die Sonde an zwei Riemen aufgehängt, deren Längen ihre Position in der  $z$ -Ebene bestimmt. Die Riemen werden jeweils über eine auf einem Stativ angebrachte Umlenkrolle zu einer Antriebseinheit am Fußpunkt des Stativs geführt. Jede Einheit enthält dabei eine Aufwickelspule, einen Motor, einen Akku, einen Prozessor, eine Digitalkamera und einen optischen Kommunikationsanschluss. Das System ist wiederum auf Schienen montiert, wodurch die Positionierung in  $z$ -Richtung ermöglicht wird. Der Lichtwellenleiter zur Speisung der Sonde ist in diesem Fall in einem der Riemen eingebettet. Durch kodierte Positionsmarkierungen auf den Riemen und Schienen wird eine initialisierungsfreie direkte Positionssteuerung ermöglicht. Eine alternative Positionsermittlung wird in [4] beschrieben. Aufgrund der modularen Aufbauweise ist der Positionierer mit hängender Feldsonde auf verschiedene Prüfvolumina skalierbar.

### 3 Rückwirkung der Positioniersysteme auf das Feld

Zur Ermittlung des Einflusses der Positioniersysteme wird das Feld an  $N = 121$  Messpunkten, die in einem Raster von  $11 \times 11$  äquidistant angeordneten Punkten mit einem Abstand von  $20 \text{ mm}$  in einer Transversalebene liegen, aufgenommen. Messungen werden dabei im Frequenzbereich von 30 MHz bis 6 GHz in Schritten von 2 MHz durchgeführt. Als Referenz dient eine weitere Messung ohne automatisiertes Positioniersystem, die mit Hilfe einer in der gleichen Transversalebene eingefügten dünnen Platte aus Rohacell durchgeführt wird, an der die Feldsonde an den  $N$  Messpunkten angebracht wird. Rohacell [5] besitzt eine relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  von etwa 1,1 und hat damit Eigenschaften ähnlich Vakuum. Zur Bewertung der Feldverteilung werden die gemittelte und maximale Abweichung der primären elektrischen Feldkomponente relativ zur manuellen Referenzmessung ohne automatisiertes Positioniersystem, sowie die Kriterien für den gleichförmigen Bereich und für den dominanten TEM-Mode der Norm IEC-61000-4-20 [6] herangezogen. Zur Verdeutlichung der Feldverteilung werden die gemessenen Feldstärken in Abhängigkeit des Ortes aufgetragen. Die für den TEM-Mode erwünschte primäre elektrische Feldkomponente ist im Arbeitsvolumen der GTEM-Zelle sowohl senkrecht zur Ausbreitungsrichtung als auch senkrecht zum Septum gerichtet. Die unerwünschten sekundären elektrischen Feldkomponenten treten senkrecht zu den primären Komponenten auf. Nach Norm spricht man in der Zelle von einer TEM-Welle, wenn die Feldstärken an 75% der Messpunkte die in Tabelle 1 aufgelisteten Bedingungen erfüllen. Die aufgeführten gelockerten Bedingungen dürfen dabei für maximal 5% der abgetasteten Frequenzen angewendet werden.

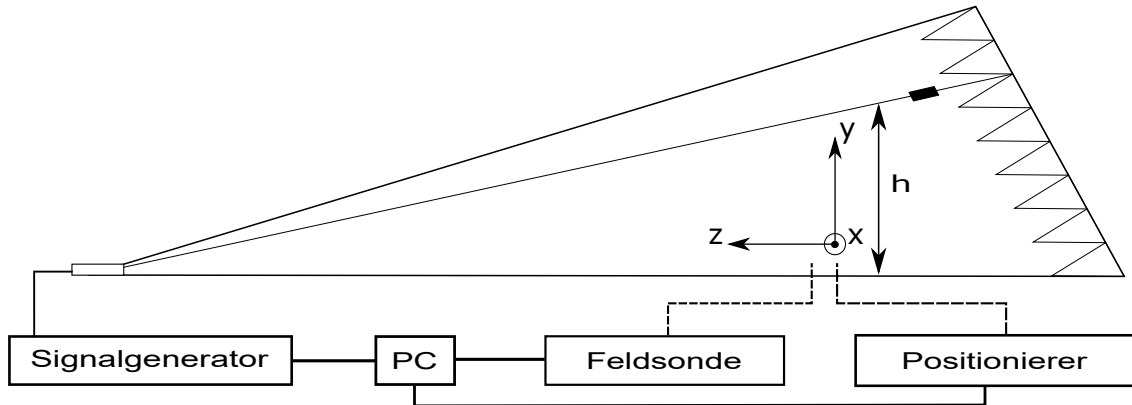
Der Messaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Die Messungen wurden in einer GTEM-Zelle mit einer maximalen Septumshöhe von  $1,75 \text{ m}$  durchgeführt, wobei das beschriebene Messraster im Arbeitsvolumen bei einer Septumshöhe von  $h = 1,0 \text{ m}$  platziert wurde. Der Mittelpunkt des Rasters lag dabei in der Transversalebene auf halber Septumshöhe.

Abb. 3c zeigt die Messung ohne Positioniersystem zu einer zweiten Referenzmessung mit Rohacellhalterung. Zwischen Abb. 3c und der Messung mit hängender Feldsonde in Abb. 3b sind keine signifikanten Unterschiede durch das Einbringen des Positioniersystems festzustellen. Die ansteigende maximale Abweichung  $\Delta E_{max}$  oberhalb von 3 GHz ist

**Tabelle 1:** Bedingungen für gleichförmigen Bereich und dominanten TEM-Mode nach IEC 61000-4-20.

|   | 75% der Messpunkte erfüllen  |
|---|--|
| Bedingung für gleichförmigen Bereich            | $E_{\text{prim,min}} \leq E_{\text{prim,i}} \leq E_{\text{prim,min}} + 6 \text{ dB}$ |
| gelockerte Bedingung für gleichförmigen Bereich | $E_{\text{prim,min}} \leq E_{\text{prim,i}} \leq E_{\text{prim,min}} + 6 \text{ dB}$ |
| Bedingung für dominanten TEM-Mode               | $E_{\text{sek}} \leq E_{\text{prim}} - 6 \text{ dB}$                                 |
| gelockerte Bedingung für dominanten TEM-Mode    | $E_{\text{sek}} \leq E_{\text{prim}} - 6 \text{ dB}$                                 |

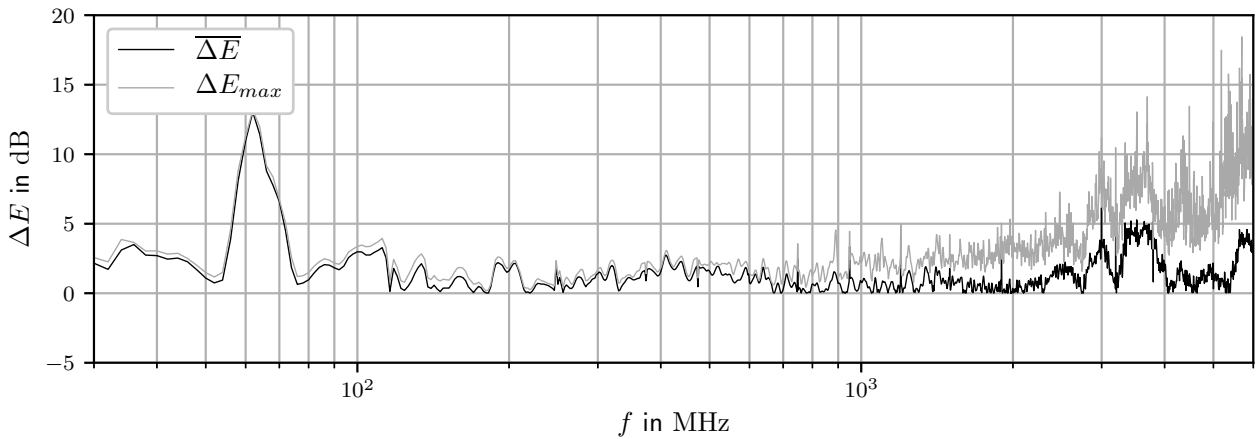
$E_{\text{prim,i}}$ : Betrag der Feldstärke am Messpunkt  $i$ ;  $E_{\text{prim,min}}$ : Betrag der minimal auftretenden Feldstärke  
 $E_{\text{prim}}$ ,  $E_{\text{sek}}$ : Beträge der gemittelten Feldstärken; alle Feldstärkeangaben in  $\text{dB } \mu\text{V}$



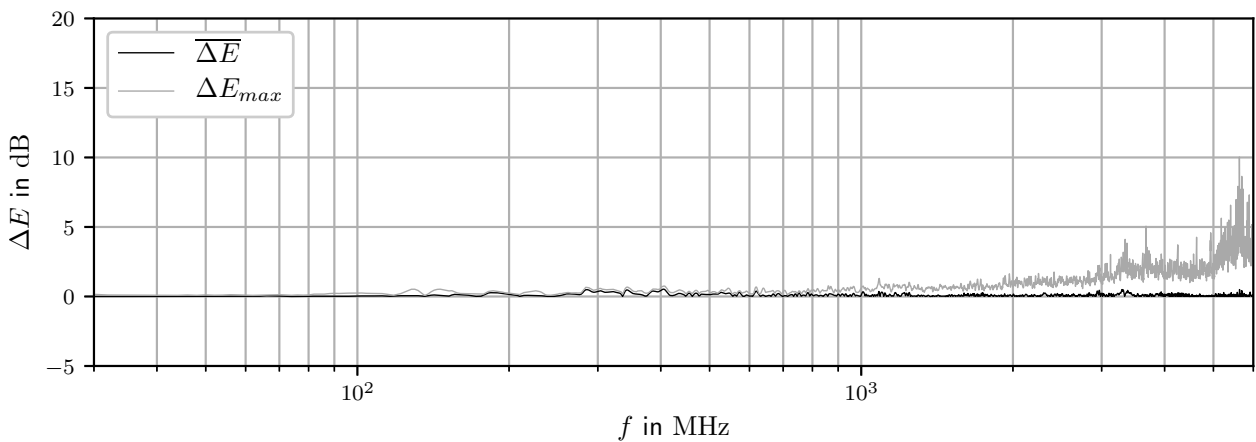
**Bild 2:** Messaufbau

auf die gemessenen Feldstärken nahe der maximalen Auflösung der verwendeten Feldsonde zurückzuführen. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei der mittleren und maximalen Abweichung durch das Einbringen des Kreuztisches in das Prüfvolumen in Abb. 3a. Das Kriterium für den dominanten TEM-Mode in Abb. 4a, 5a, 6a wird unabhängig vom Positioniersystem oberhalb 300 MHz erfüllt und nur in einem schmalen Band im unteren Frequenzbereich verletzt. Alle Messungen zeigen deutliche Abweichungen der sekundären Feldkomponenten im Bereich von 120 MHz bis 160 MHz, die jedoch auf leichte geometrische Unebenheiten der verwendeten GTEM-Zelle zurückzuführen sind. Die Messwerte bei Verwendung des Kreuztisches in Abb. 4a zeigen die Verletzungen des Kriteriums für den dominanten TEM-Mode bis zu einer Frequenz von etwa 300 MHz. Diese können den mechanischen Komponenten des Kreuztisches zugeschrieben werden, die in das Prüfvolumen hineinragen und dadurch das Feld beeinflussen. Das Kriterium für den gleichförmigen Bereich in Abb. 4b, 5b, 6b wird jeweils bis zu einer Frequenz von 3 GHz erfüllt. Die Messwerte ohne Positioniersystem und mit hängender Feldsonde lassen keine merklichen Abweichungen erkennen. Abb. 7a verdeutlicht, dass trotz Verletzung des Kriteriums für den dominanten TEM-Mode die Homogenität des elektrischen Feldes in allen Anordnungen gegeben ist. Zwischen den Anordnungen sind keine Unterschiede in den Intensitäten der Feldstärke festzustellen. Die Homogenität in Abb. 7b ist für mehr als 75% der Messpunkte gegeben. Es zeichnen sich sichtbare Unterschiede in den Intensitäten der Feldstärke bei der Messung mit Kreuztisch ab. In Abb. 7c ist die Homogenität in keiner der Messanordnungen gegeben. Auch hier zeichnen sich sichtbare Unterschiede in der Intensität der Feldstärke bei der Messung mit Kreuztisch ab. Die gemessenen Feldstärken bei der Anordnung mit Rohacell und mit hängender Feldsonde liegen bei einem Großteil der Messpunkten unterhalb von  $1 \text{ V/m}$ . Der bereits beschriebene Effekt, dass die Feldsonde

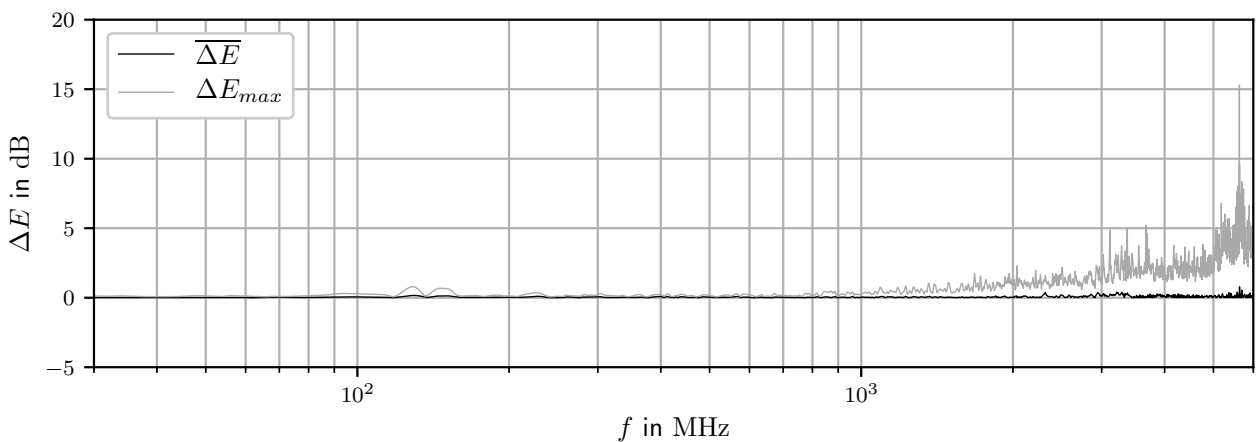
nahe ihrer maximalen Auflösung misst, wird hier noch einmal verdeutlicht. Höhere Leistung und Rauschunterdrückungsverfahren können angewendet werden, um diesen Effekt zu reduzieren.



(a) mit Kreutztisch

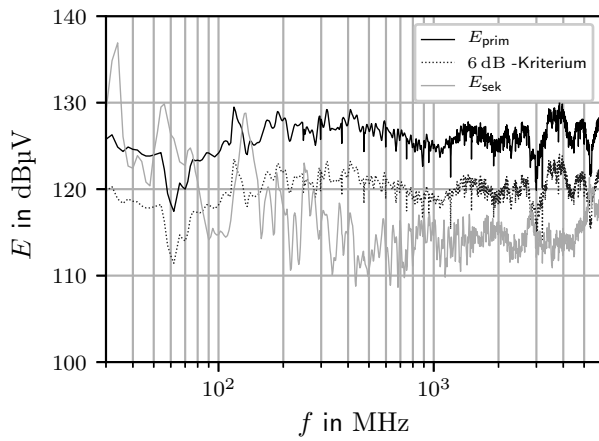


(b) mit Positioniersystem mit hängender Feldsonde

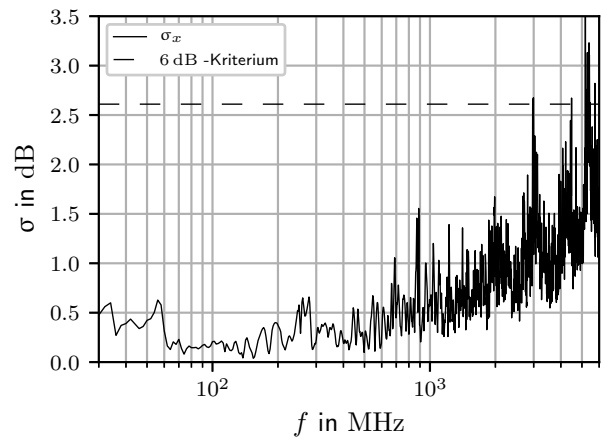


(c) ohne automatisiertes Positioniersystem

**Bild 3:** Relative Abweichung der elektrischen Feldstärke bezogen auf eine Referenzmessung

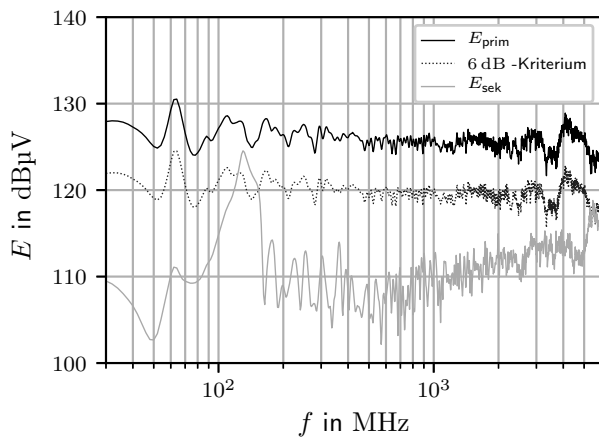


(a) Gemessene Feldstärken

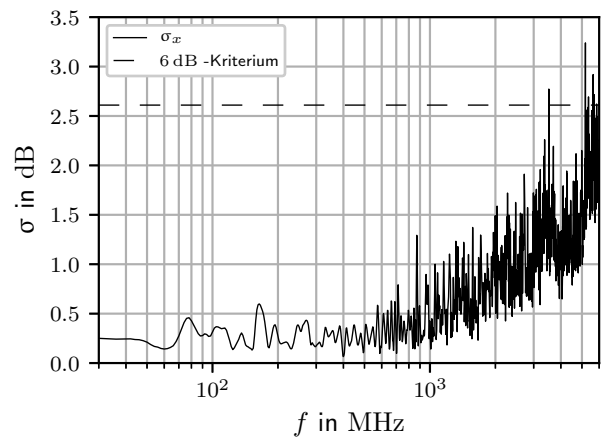


(b) Standardabweichung

**Bild 4:** Gemessene Feldstärken und Standardabweichung mit Kreuztisch

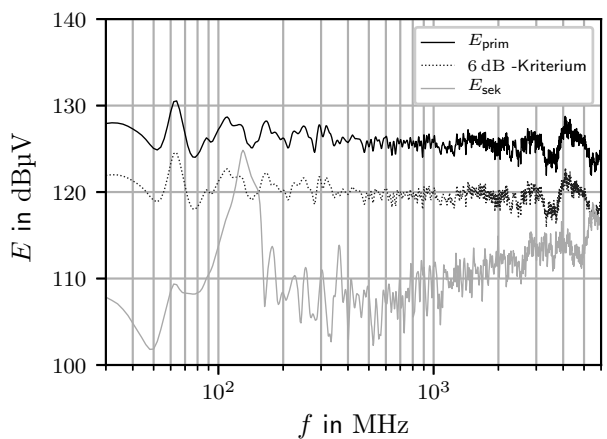


(a) Gemessene Feldstärken

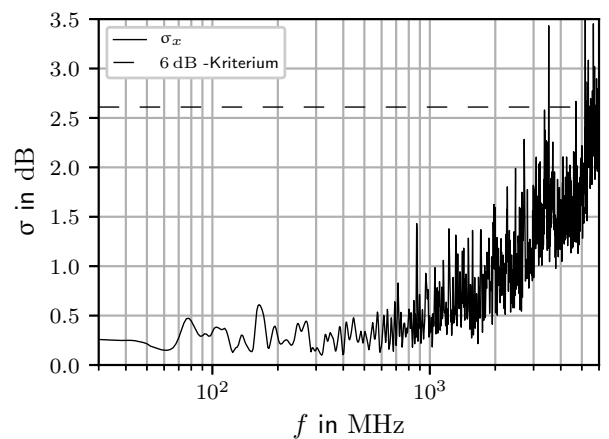


(b) Standardabweichung

**Bild 5:** Gemessene Feldstärken und Standardabweichung mit Positioniersystem mit hängender Feldsonde

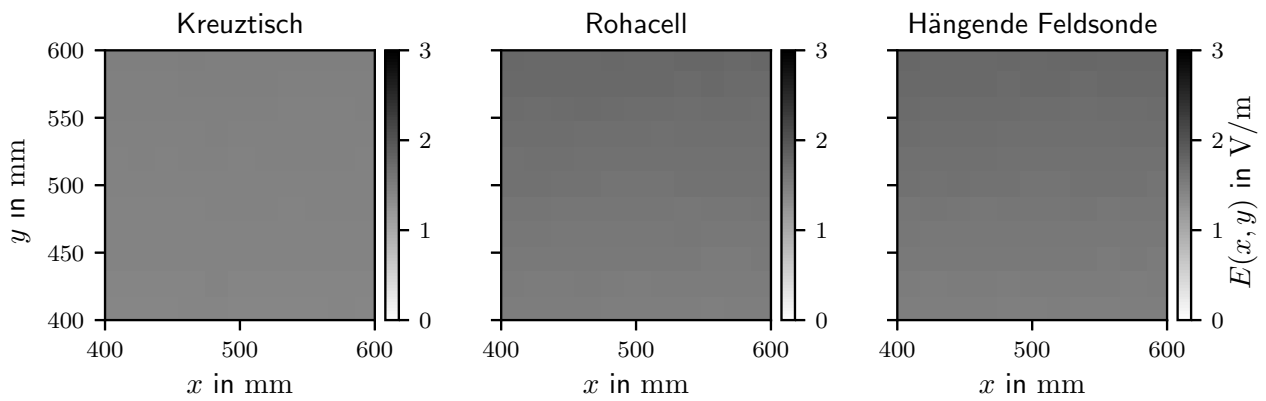


(a) Gemessene Feldstärken

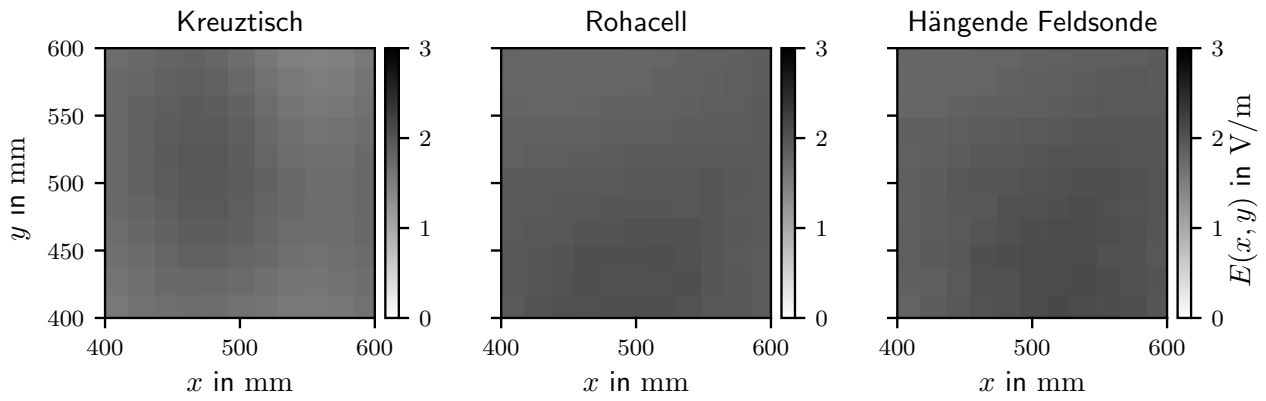


(b) Standardabweichung

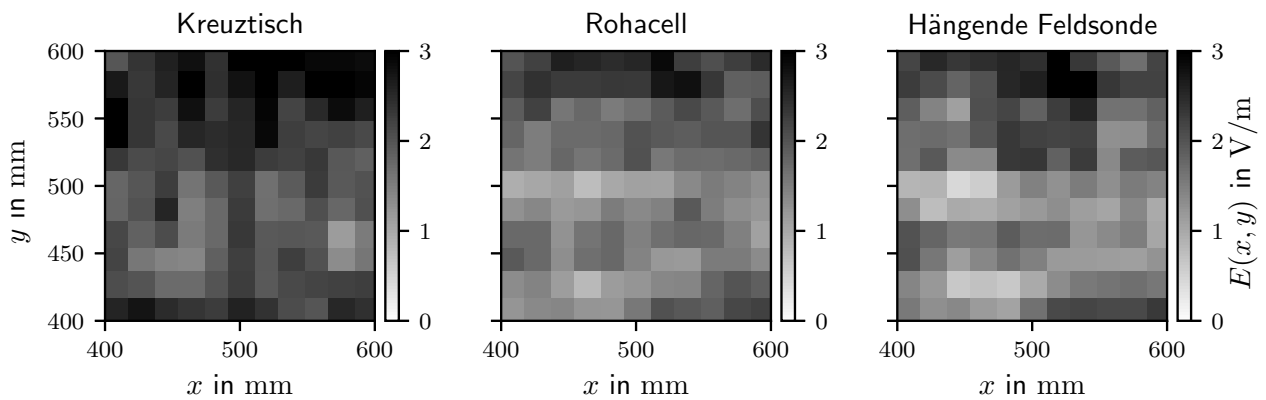
**Bild 6:** Gemessene Feldstärke und Standardabweichung ohne automatisiertes Positioniersystem



(a) 80 MHz



(b) 1 GHz



(c) 6 GHz

**Bild 7:** Örtliche Auflösung der gemessenen primären Feldstärken

## 4 Zusammenfassung

Durch die Verwendung automatisierter Positioniersysteme können die Messzeiten reduziert und die Reproduzierbarkeit einer Messung erhöht werden. Dies eröffnet die Möglichkeit die Auflösung in der vermessenen Ebene zu erhöhen. Für die statistischen Auswertungsmethoden der IEC-61000-4-20 bei der Beurteilung von gleichförmigen Bereich und dominanten TEM-Mode führt dies zu aussagekräftigeren Bewertungen des Feldes. Für unterschiedliche Positioniersysteme konnte in hoher Auflösung nachgewiesen werden, in welchen Frequenzbereichen Verletzungen der Norm auftreten. Bei der Verwendung des Positioniersystems mit hängender Feldsonde konnte keine Veränderung zur Referenzmessung ohne automatisiertes Positioniersystem festgestellt werden. Bei dem verwendeten Kreuztisch waren Veränderungen der gemessenen Feldkomponenten erkennbar, welche auf die Anwesenheit mechanischer Komponenten im Arbeitsvolumen zurückgeführt werden kann.

## Literatur

- [1] C. Groh, J. P. Karst, M. Koch and H. Garbe, "TEM waveguides for EMC measurements", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999. doi: 10.1109/15.809846
- [2] K. Haake and J. L. ter Haseborg, "Precise investigation of field homogeneity inside a GTEM cell", 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, Hamburg, 2008, pp. 1-4. doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786927
- [3] K. A. Haake and J. L. ter Haseborg, "A New Type of Robot System for High-Resolution Field Mapping", in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 3, pp. 747-751, Aug. 2008. doi: 10.1109/TEMC.2008.924391
- [4] K. Haake and J. L. ter Haseborg, "Development of a Modular Low Cost Robot for Scanning the Electromagnetic Field within Very Large Arbitrary Areas or Volumes", *Serbian Journal of Electrical Engineering* Vol. 5, no. 1, pp. 49-56, 2008. doi:10.2298/SJEE0801049H
- [5] Evonik Resource Efficiency GmbH, Rohacell HF Product Information, Darmstadt Germany, 2019
- [6] IEC 61000-4-20:2010: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, IEC, 2010