

# Messung der Feldverteilung von Windkraftanlagen anhand eines skalierten Modells

M.Sc. Cornelia Reschka, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Deutschland  
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Deutschland

## 1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende werden in Deutschland zunehmend Windkraftanlagen (WKA) errichtet. Dabei werden weiträumig unbebaute, erhöht gelegene Flächen bevorzugt. Diese exponierte Lage wird jedoch ebenfalls für sicherheitsrelevante Funkdienste, wie Anlagen der terrestrischen Flugnavigation oder zur Schiffsnavigation, genutzt. In dem dadurch entstandenen Interessenkonflikt dürfen unter anderem die unbeabsichtigten elektromagnetischen Emissionen von Windkraftanlagen normativ vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten.

Für diese Messungen sind in der CISPR 11 [1] und CISPR 16 [2] sowie in der TR9 [3] Messpositionen und Frequenzbänder definiert. Die Messungen werden in einem Abstand von 30 m an vier, um 90° versetzten, Positionen um die Anlage herum vorgenommen. Für Messungen im Frequenzbereich 150 kHz bis 30 MHz ist dabei gemäß [2] eine Messhöhe von 1 m vorgesehen, für Messungen von 30 MHz bis 1 GHz 2 m Höhe.

Bei vorherigen Untersuchungen [4] wurde das elektrische Feld in dem Abstand von 29,75 m bis 30,25 m und der Höhe von 1 m bis 4 m numerisch simuliert. Dabei konnte eine nichthomogene Feldverteilung mit lokalen Minima und Maxima gezeigt werden. Es bleibt jedoch offen, welche Feldverteilung im Bereich 4 m bis 120 m zu erwarten ist. Diese ist jedoch durchaus von Interesse, wenn der Einfluss auf beispielsweise terrestrischer Flugnavigation bewertet werden soll. Da in diesen Höhen an einer WKA nur schwer bis unmöglich gemessen werden kann, wird in dieser Arbeit ein Windkraftanlagenmodell im Maßstab 1:100 vorgestellt. Bevor dieses Modell im Detail präsentiert wird, wird die numerische Überprüfung der Angaben aus [6] zur Skalierung des Messobjektes vorgestellt.

## 2 Simulationen

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wird das in [4] beschriebene Modell einer WKA verwendet. Bei diesem wird die Windkraftanlage nicht in allen Einzelheiten nachgebildet, sondern auf die Leitungen zwischen Gondel und Turmfuß reduziert. Die Leitungen entsprechen einem Monopol, dessen Länge der Nabenhöhe einer WKA entspricht, der Erdboden dient als Groundplane. Diese Vereinfachung wurde bereits für Simulationen in [4] und [5] getroffen und zeigt gute Übereinstimmungen mit Messungen an WKAs. In [4] wurde für die Untersuchung der Feldverteilung in Bodennähe ein 100 m langer Monopol simuliert. Dabei konnte gezeigt werden, dass das elektrische Feld nicht homogen verteilt ist und starke Minima und Maxima auftreten.

Da Messungen an realen Windkraftanlagen vielen Einschränkungen unterworfen und zusätzlich ein großer zeitlicher und logistischer Aufwand sind, wird in dieser Arbeit ein Modell einer Windkraftanlage vorgestellt. Das Modell wird im Maßstab 1:100 aufgebaut. Zuvor werden jedoch Simulationen des skalierten Modells vorgenommen.

Die Skalierung des Modells beruht auf den Angaben aus [6]. Diese Angaben werden anhand eines skalierten Simulationsmodells überprüft. Für die Simulationen wird, wie in [4], ein am Fuß gespeister Monopol über PEC gewählt, aufgrund des gewählten Skalierungsfaktors hat dieser eine Länge von 1 m. In [6] wird angegeben, dass die Frequenz um den gleichen Faktor erhöht werden muss, wie das Modell verkleinert wird. Wenn nun der Frequenzbereich, der in der CISPR 16 angegeben wird, um diesen Faktor skaliert wird, geht dieser von 3 GHz bis 100 GHz. Da die Angaben auch messtechnisch überprüft werden sollen und dies in diesem Frequenzbereich mit den zur Verfügung stehende Mitteln nicht möglich ist, werden mit dem Modell

aus [4] Simulationen im Frequenzbereich von 300 kHz bis 10 MHz, also um den Faktor 100 geringer als eigentlich vorgesehen, durchgeführt. Diese werden mit Simulationsergebnissen für das skalierte Modell im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz verglichen. Auch die Spannungsversorgung wird mit dem Faktor 100 skaliert. Die Simulationen werden bis zu einer Höhe von 120 m bzw. 1,2 m durchgeführt in Abständen von 4 m respektive 4 cm. Diese Abstände werden hinsichtlich einem überschaubaren Aufwand der messtechnischen Überprüfung und der Wellenlängen in diesem Frequenzbereich gewählt.

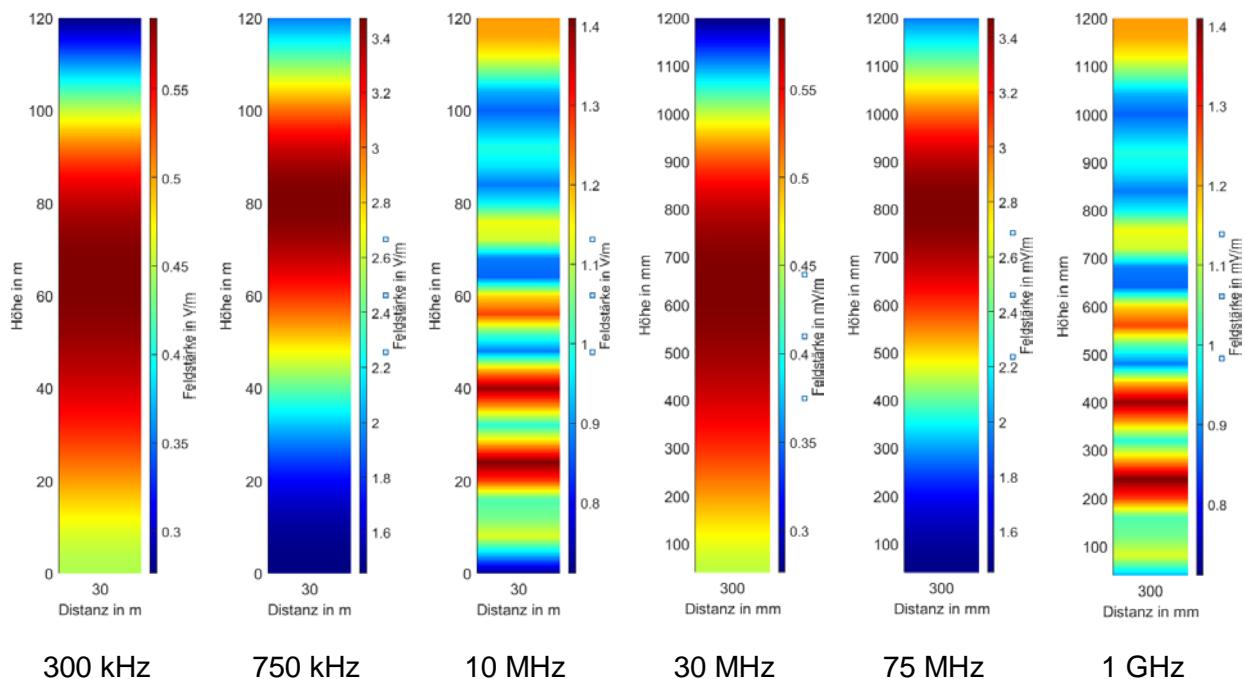


Bild 1: Feldstärken der simulierten Windkraftanlagen; links bei 300 kHz, 750 kHz und 10 MHz für das ursprüngliche Modell, rechts bei 30 MHz, 75 MHz und 1 GHz für das skalierte Modell

In Bild 1 sind links die Simulationsergebnisse für einen 100 m langen Monopol dargestellt, rechts für einen 1 m langen Monopol bei Frequenzen, die um den Skalierungsfaktor 100 größer sind als bei dem unskalierten Modell. Auf der horizontalen Achse ist die Entfernung von 30 m bzw. 30 cm zum Monopol dargestellt, auf der vertikalen Achse die Höhe über dem Boden bis 120 m bzw. 1,2 m. Die Feldstärke ist farblich in V/m dargestellt, rot entspricht einer hohen Feldstärke, blau einer geringen.

Die ausgewählten Frequenzen von 30 MHz und 1 GHz entsprechen den Frequenzen von 300 kHz und 10 MHz gemäß der CISPR 16 [2]. Für den 1 m langen Monopol entspricht 75 MHz (WKA: 750 kHz) der Resonanzfrequenz, daher wird auch diese untersucht.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine vollständige Übereinstimmung der beiden Modelle.

In [4] wurde die bodennahe, räumliche Verteilung des elektrischen Feldes untersucht. Insbesondere für 500 MHz konnten dabei lokale Maxima und Minima, die auch auf dem relativ kleinen untersuchten Ausschnitt stark alternierend auftreten, gezeigt werden. Da zur Überprüfung hiervon an dem Modell eine Frequenz von 50 GHz notwendig wäre und dies messtechnisch nicht umsetzbar ist, wird dieses Verhalten ausschließlich in der Simulation überprüft.

In Bild 2 ist diese Simulation dargestellt. Sie zeigt das gleiche Verhalten wie in [4] gezeigt wurde auch für das skalierte Modell. Daraus folgt, dass die Skalierung mit dem Faktor 100 in der Simulation die gleichen Ergebnisse liefert.

Daher wird als nächstes das Modell aufgebaut und messtechnisch untersucht.

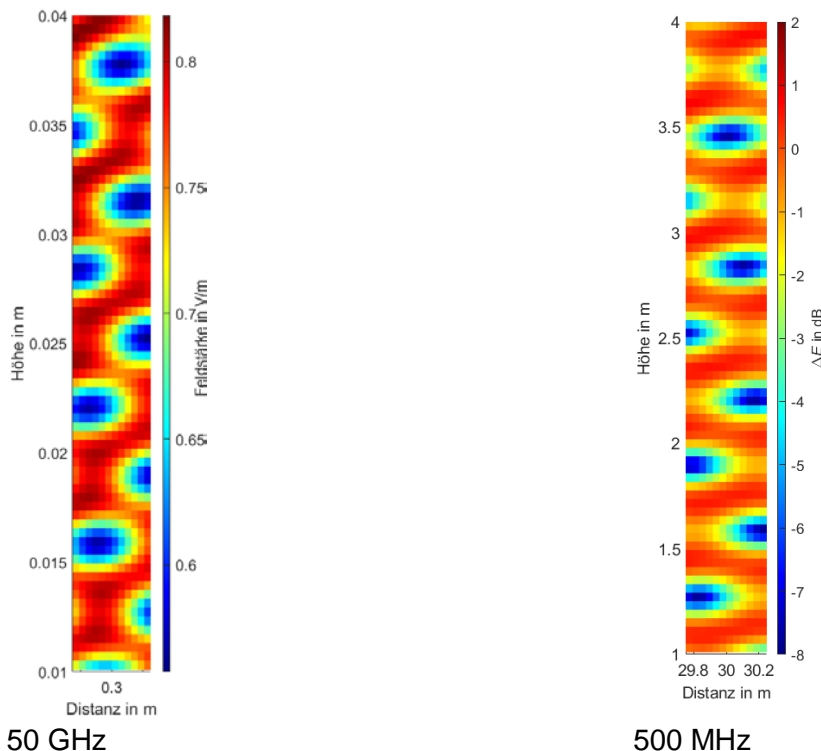


Bild 2: Darstellung der Feldverteilung des skalierten Simulationsmodells bei 50 GHz (links) und des ursprünglichen Modells gemäß [4] bei 500 MHz (rechts)

### 3 Modell einer Windkraftanlage

Wie zuvor erwähnt, wird das Windkraftanlagenmodell im Maßstab 1:100 aufgebaut. Da vorherige Simulationen [4], [5] von einer Nabenhöhe von 100 m ausgingen, wird der Monopol 1 m lang. Gemäß [6] muss der Frequenzbereich, in dem gemessen wird, um den gleichen Faktor hochskaliert werden. Da der so geforderte Frequenzbereich von 3 GHz bis 100 GHz messtechnisch nicht umsetzbar ist, wird wie bei den Simulationen an dem skalierten Modell bei 30 MHz, 75 MHz und 1 GHz gemessen. Diese Messwerte werden dann mit den Simulationen verglichen. In diesem Kapitel wird zunächst das aufgebaute Windkraftanlagenmodell vorgestellt. Darauf folgt der Messaufbau und die Darstellung der Messergebnisse.

Bild 3 zeigt links das in dieser Arbeit verwendete Modell einer Windkraftanlage. In dem Bild auf der rechten Seite ist der Monopol zu sehen, auf der linken in schwarz der Messturm mit der Messsonde.

Die elliptische Groundplane aus Kupfer ist aufgrund ihrer Maße, sie ist 2,23 m lang und 1,73 m breit, nicht vollständig zu sehen. Um eine bessere Stabilität zu erreichen, ist die Groundplane auf einer Holzplatte mit stabilisierender Unterkonstruktion montiert. In der Mitte der Platte ist ein Kupferrohr zu sehen, welches als Monopol genutzt wird. Es hat einen Durchmesser von 28 mm. Der Holzblock am Fuß des Kupferrohrs dient zur Stabilisierung, die unterste Schicht des Holzblocks ist zusätzlich eine Isolation gegenüber der Kupferplatte. Die Kupferplatte ist notwendig, um einen möglichst guten Übergang zwischen dem Massepotential des Koaxialkabels und der Groundplane zu schaffen. Gespeist wird der Monopol über eine N-Buchse, die von der Unterseite der Groundplane erreichbar ist. Der Außenleiter der Buchse ist mit der Kupferplatte verbunden, der Innenleiter mit dem Monopol. Um einen möglichst guten Übergang zwischen dem Innenleiter und dem Monopol herzustellen, wird am Ende des Monopols eine Kupferkappe über das Rohr gestülpt und dann über einen kurzen Leiter mit dem Innenleiter der N-Buchse verbunden. Dieser Aufbau ist in Bild 3 rechts dargestellt.

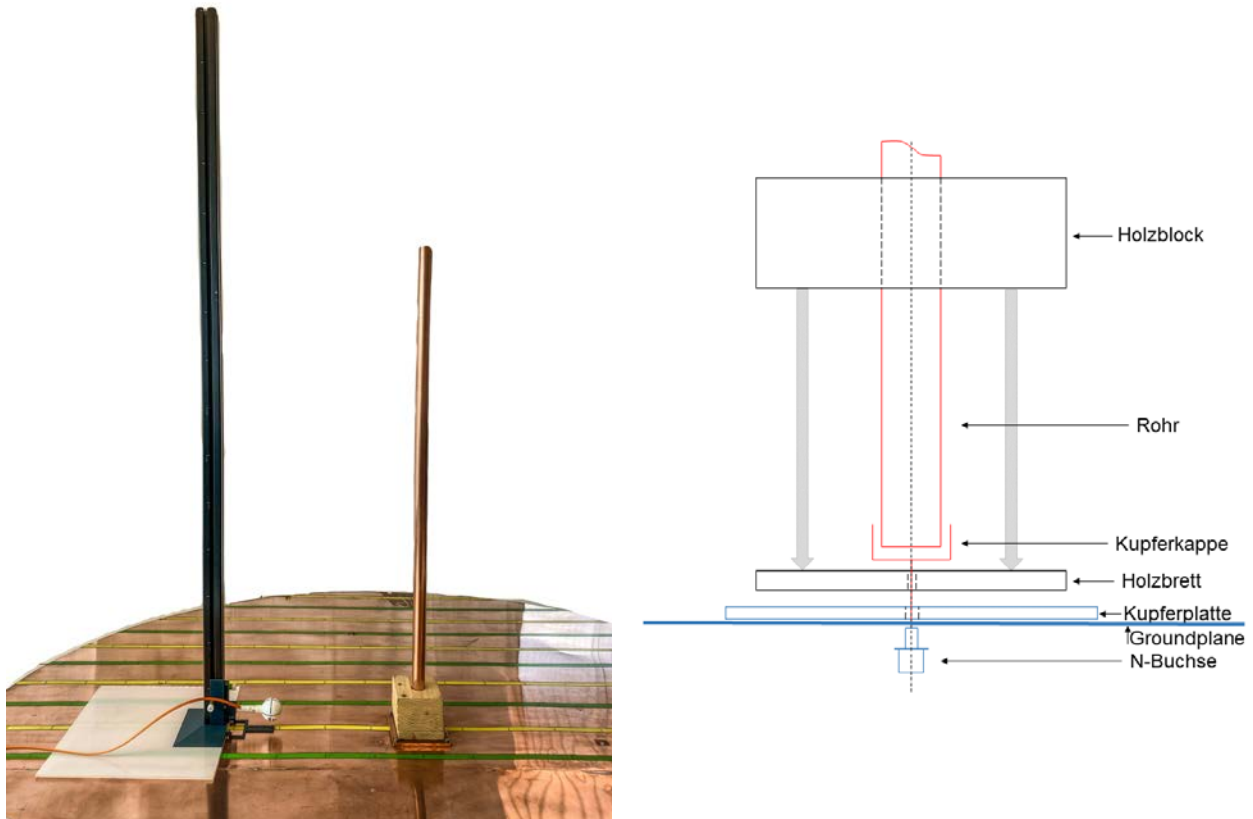


Bild 3: links: Foto des Windkraftanlagenmodells mit schwarzem Messturm (links) und Monopol (rechts), rechts: Zeichnung der Halterung des Monopols

### 3.1 Messaufbau

Um entlang der gesamten Höhe des Modells messen zu können ist für den Messaufbau neben dem zuvor beschriebenen Windkraftanlagenmodell ein Messturm notwendig, an welchem eine Messsonde befestigt wird. Der Monopol wird mit einem Vektor-Signalgenerator SMBV100A von Rohde & Schwarz gespeist. Dieser wird über ein Koaxialkabel mit dem Monopol verbunden.

Als Messsonde wird von Lumiloop die LSProbe 1.2 verwendet. Das hier verwendete Sondenmodell misst das elektrische Feld in einem Bereich von 10 kHz bis 8,2 GHz. Das Besondere an dieser Messsonde ist, dass sie über Lichtwellenleiter angeschlossen wird und so eine Beeinflussung des zu messenden elektrischen Feldes minimiert wird. Für den Messturm wird hauptsächlich ein nicht leitendes Item Profil KH [7], verwendet. Der Vorteil dieses metallfreien Profils ist, dass es laut Herstellerangaben gegenüber elektromagnetischen Wellen eine hohe Transparenz aufweist. Der Turm ist auf einer Kunststoffplatte befestigt, die Stabilisation des Turmes erfolgt über Kunststoffteile aus PLA, welche 3D gedruckt sind. Um die Messsonde an dem Turm befestigen zu können wurde ebenfalls eine Halterung entworfen und mittels 3D Druck gefertigt. Für die Messung kann die Sonde nun in der gewünschten Höhe befestigt werden.

### 3.2 Durchführung der Messung

Analog zu der Skalierung des Windkraftanlagenmodells werden auch die Messentfernungen und Messhöhen um den Faktor 100 herunter skaliert. Es besteht jedoch weiterhin das Ziel, dass die Messung der elektrischen Feldstärke der Simulation wie auch der Messung an einer realen WKA möglichst ähnlich sein soll. Daher ist bereits die Simulation auf die Durchführung der Messung ausgelegt. Wie auch bei den Simulationen wird an 30 Punkten bis zu einer Höhe von 120 cm im Abstand von jeweils 4 cm gemessen. Da die Messsonde jedoch einen Radius von 2,3 cm aufweist, liegt der erste Messpunkt in einer Höhe von 4 cm.

Wie bereits bei den Simulationen beschrieben, ist auch eine Skalierung des Frequenzbereichs notwendig. Dem entsprechend werden an diesem Modell wie bereits in der Simulation des Modells die Frequenzen 30 MHz, 75 MHz und 1 GHz untersucht.

Um dem Vorsatz, dass die Messungen an dem Modell Messungen an einer realen Windkraftanlage möglichst nah kommen sollen, gerecht zu werden, werden auch die Messungen an dem Modell nicht in einer Messkammer sondern in situ, also am Aufstell- und Betriebsort, durchgeführt. Damit Störquellen in der Umgebung das Messergebnis möglichst nicht verfälschen, wird bei Messungen an realen WKAs jede Messung zwei mal durchgeführt. Einmal eine Umgebungsmessung, bei der die WKA ausgeschaltet ist, und eine Betriebsmessung, bei der die Windkraftanlage angeschaltet ist. So können Störungen der Windkraftanlage zugeordnet werden, auch wenn keine abschirmende Messkammer verwendet wird. Für die Messungen an dem Windkraftanlagenmodell wird dieses Verfahren ebenfalls angewendet.

### 3.3 Messergebnisse

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird jede Messung im Modus Umgebung und im Modus Betrieb durchgeführt. Um die Abstrahlungen des Modells zu ermitteln, wird die Differenz aus diesen beiden Messungen gebildet.

In Bild 4 sind die Ergebnisse für die untersuchten Frequenzen dargestellt. Dabei ist, wie schon bei den Simulationen, auf der X-Achse die Entfernung von 30 cm zum Monopol, auf der Y-Achse die Höhe aufgetragen. Die Werte sind jeweils in mm angegeben.

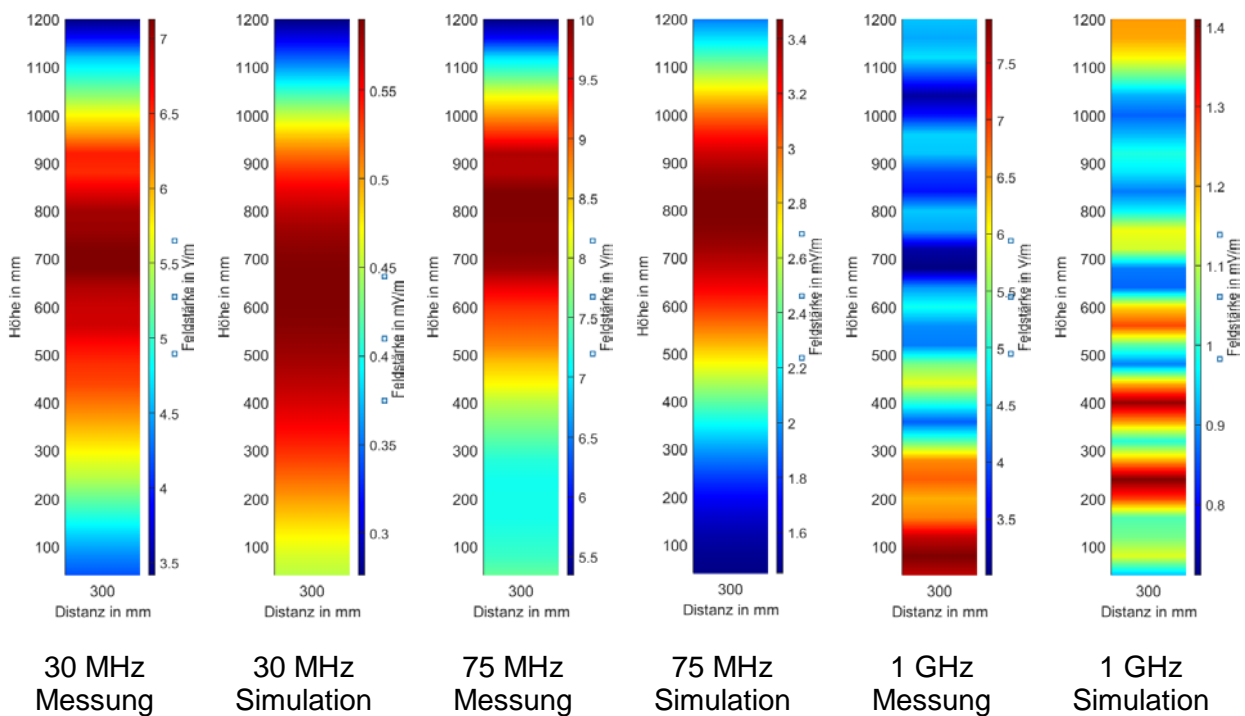


Bild 4: Am Windkraftanlagenmodell gemessene Feldstärken für ausgewählte Frequenzen abwechselnd dargestellt mit den Bereits in Bild 1 präsentierten Simulationsergebnisse des skalierten Modells

Die Messungen bei 30 MHz und 75 MHz zeigen ein deutliches Maximum ungefähr bei zwei Dritteln der Gesamthöhe des Monopols. Das Maximum bei 30 MHz ist dabei jedoch räumlich größer als jenes bei 75 MHz. Die Messung bei 1 GHz (WKA: 10 MHz) zeigt bei den unteren Messpunkten ein besonders ausgeprägtes Maximum, welches deutlich von der Simulation abweicht. Der Grund könnte darin liegen, dass mit einer Sonde (Radius ca. 2 cm) in einer Höhe von ca. 4 cm gemessen worden ist. Damit sind erhebliche Rückwirkungen von der Grundplane auf die Sonde vorstellbar.

## 4 Auswertung

Der Vergleich der Feldstärken der beiden Simulationsmodelle zeigt, dass das skalierte Modell ( $h=1$  m) mit dem ursprünglichen Modell ( $h=100$  m) sehr gut übereinstimmt. Anhand der in Bild 4 dargestellten Messung ist zu sehen, dass dies auch für die Messung an dem skalierten Modell gut zutrifft. Insbesondere bei 30 MHz und 75 MHz ist zu sehen, dass wie auch in den Simulationen das Maximum für 30 MHz räumlich größer ist als für 75 MHz, insgesamt jedoch geringe Feldstärken auftreten. Die Messungen für 1 GHz weichen insbesondere im unteren Bereich von den Simulationen ab. Die Ursache dafür können Rückwirkungen von der Groundplane auf die Messsonde sein. Des Weiteren sind bei dieser Frequenz für die Messungen auftretenden Maxima weniger stark ausgeprägt gegenüber den Minima als es bei den simulierten Feldstärken auftritt. Die Maxima sind jedoch weiterhin gut gegenüber der Minima zu erkennen. Die Maxima treten bei den Messungen um einen Messpunkt verschoben auf gegenüber den Simulationen. Dies ist auf die Kombination, dass die Messsonde einen Durchmesser von 4,6 cm aufweist und der Messabstand 4 cm beträgt zurückzuführen.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein skaliertes Modell einer Windkraftanlage vorgestellt. Dazu wurde als erstes anhand von Simulationen gezeigt, dass die Feldverteilung des skalierten Modells ( $h=1$  m) bei entsprechender Frequenzanpassung der des ursprünglichen Modells ( $h=100$  m) entspricht. Im darauffolgenden Kapitel wurde das Windkraftanlagenmodell sowie der Messaufbau beschrieben und das abgestrahlte Feld gemessen.

In Kapitel 4 wurden die Ergebnisse der Simulationen mit denen der Messung verglichen. Insbesondere für die Messungen am Modell bei 30 MHz und 75 MHz wird eine sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationen festgestellt. Die Messung bei 1 GHz zeigt im unteren Bereich Abweichungen zu den Simulationen, insgesamt jedoch eine gute Übereinstimmung mit den Simulationen. Insgesamt kann daraus geschlossen werden, dass das Windkraftanlagenmodell mit den Simulationen gut übereinstimmt. Somit können Messungen am skalierten Modell Auskunft über Messorte geben, die bisher an der realen WKA nur mit erheblichem Aufwand zugänglich waren.

## Literaturangaben

- [1] IEC/CISPR 11: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement
- [2] IEC/CISPR 16-2-3: 2010 + A1 2010: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity – Radiated disturbance measurements
- [3] Technical Guidelines for Wind Turbines (FGW Guideline) Part 9: Determination of High Frequency Emissions from Renewable Power Generating Units
- [4] C. Reschka, S. Koj, H. Garbe: Analyse der Feldverteilung von Windkraftanlagen, emv: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Köln, 2020, pp. 113-119
- [5] S. Koj, C. Reschka, S. Fisahn and H. Garbe: Radiated electromagnetic emissions from wind energy conversion systems, 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Washington, DC, 2017, pp. 243-248,
- [6] H.U. Schmidt: NEMP-Modellsimulation, Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für naturwissenschaftlich-technische Trendanalysen, Interner Bereich Nr.: 7/84, August 1984, pp. 7-8
- [7] Industrietechnik GmbH, Solingen, Germany, <https://product.item24.de/produkte/produktkatalog/products/profil-kh-1001043001/> (Accessed Feb. 25, 2022)