

Analyse der Feldverteilung von Windkraftanlagen

M.Sc. Cornelia Reschka, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik

Dr.-Ing. Sebastian Koj, IAV GmbH, EMC & Antenna

Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik

1 Motivation

Die elektromagnetischen Emissionen von Windkraftanlagen (WKAs) dürfen sicherheitsrelevante Funkdienste, wie sie zur terrestrischen Flugnavigation oder auch zur Schiffsnavigation genutzt werden, nicht störend beeinflussen. Zur Überprüfung dieser Anforderung werden diese Störemissionen üblicherweise gemäß der normativen Lage [1], [2] und [3] messtechnisch charakterisiert und mit gegebenen Grenzwerten verglichen. Für diese Messungen wird eine Messentfernung von 30 m vorgeschrieben. Bei dieser Messentfernung kann zwar für elektrisch kleine Strahler von einer homogenen Feldverteilung und Fernfeldbedingungen ausgegangen werden, aber wie bereits in [4], [5] und [6] dargestellt, ist jedoch eine WKA ein elektrisch großer Strahler, man befindet sich noch im reaktiven Nahfeld. Die Feldverteilung bei der geforderten Messentfernung ist nicht unbedingt homogen. Ziel dieser Arbeit ist es daher die Feldverteilung um eine WKA herum mithilfe von numerischen Simulationen zu analysieren. Insbesondere steht hier der Einfluss der Feldverteilung auf die resultierende Messunsicherheit im Fokus [7]. In Ergänzung zu [5] wird in diesem Beitrag die Feldverteilung in vertikaler Richtung berücksichtigt. Weiterhin wird das simulierte elektrische Feld in einer Ebene um eine WKA analysiert.

2 Normative Situation

Für reproduzierbare Messungen der magnetischen und elektrischen Emissionen von Windkraftanlagen definieren die CISPR 11 [1] und die CISPR 16 [3] Messpositionen und Frequenzbänder (Tabelle 1). Es werden vier Messpositionen im Abstand von 30 m und 90 m zueinander versetzt um die WKA herum definiert. Eine Darstellung dazu ist in der Technischen Richtlinie (TR9) [2] zu finden, welche eine Präzisierung der Anforderungen nach CISPR 11 in Hinblick auf die Eigenschaften der WKAs darstellt. Die Messungen der Emissionen werden am Aufstell- und Betriebsort (in situ) durchgeführt. Dafür gibt die CISPR 11 zusätzlich zu der Messentfernung von 30 m für das Frequenzband B eine Höhe von 1 m zur Messung des magnetischen Feldes und für die Frequenzbänder C und D jeweils 2 m zur Messung des elektrischen Feldes vor. Für die Messhöhe zur Messung des elektrischen Feldes erlaubt die Norm eine Abweichung von $\pm 0,2$ m. In [5] wird lediglich der Einfluss einer Abweichung von der definierten Messentfernung analysiert.

CISPR-Band	A	B	C	D
Frequenzbereich	9 kHz – 150 kHz	150 kHz – 30 MHz	30 MHz – 300MHz	300 MHz – 1 GHz

Tabelle 1: Frequenzbänder gemäß [3]

In dieser Arbeit wird nun die Feldverteilung in der Nähe der WKA analysiert mit einem besonderen Fokus auf das Höhenverhalten.

Da die Norm einen Messbereich von 1,8 bis 2,2 m Höhe zulässt, wird insbesondere dieser Bereich untersucht. Des Weiteren ist ebenfalls die Feldverteilung in einer Höhe von 1 bis 4 m Höhe interessant, da dies dem typischen vorgegebenen Messbereich für Emissionsmessungen auf einem Freifeldmessplatz entspricht. Bei der Messung auf dem Freifeldmessplatz soll so die maximale Feldstärke gemessen werden. Die Messung des maximalen Feldes sollte jedoch auch das Ziel für Messungen der Emissionen von WKAs sein, da nur so der worst case betrachtet werden kann. Bei in situ Tests an WKAs mit Turmhöhen von über hundert Metern drängt sich somit die Frage auf, ob entlang der Turmhöhe stärkere Feldstärken zu erwarten sind.

3 Simulationen

Da Messungen an WKAs sehr Zeitaufwendig sind und eine Variation der Höhe bei Messungen von 1 bis 4 m Höhe nur mit speziellem Messequipment möglich sind, werden in dieser Arbeit die Höhenfehler basierend auf Simulationen abgeschätzt. In diesem Abschnitt wird zunächst das Simulationsmodell vorgestellt und im Anschluss daran die Simulationsergebnisse präsentiert.

3.1 Simulationsmodell

Für die Analyse der Feldverteilung um eine WKA wird in dem Feldsimulator FEKO von Altair [8] ein Simulationsmodell erstellt. Ein reales Modell einer WKA ist sehr komplex. Um den dadurch entstehenden hohen Rechenaufwand zu vermindern wird die WKA durch ein Monopol angenähert. Das verwendete Simulationsmodell ist in Bild 1 dargestellt. Der Monopol hat eine Höhe von $h=100$ m und wird durch eine ideale Wechselspannungsquelle mit konstanter Amplitude gespeist. Die unendlich große Massefläche ist ideal elektrisch leitend. Dieses Simulationsmodell orientiert sich an dem in [4] verwendeten Modell welches genutzt wird, um den Einfluss des Turms auf das Feld einer Windkraftanlage zu analysieren. In [4] wird auch die gute Übereinstimmung der simulierten Felder mit real gemessenen Feldwerten gezeigt. Durch die Verwendung dieses Modells sowohl in dieser Arbeit wie auch in [5] sind die Ergebnisse des Einflusses einer Abweichung der von der CISPR 11 definierten Messentfernung aus [5] mit dem in dieser Arbeit untersuchten Höheneinfluss direkt vergleichbar.

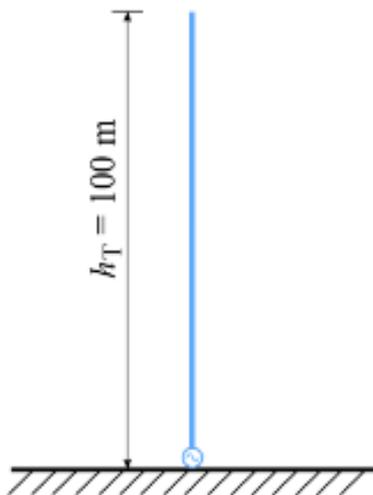


Bild 1: Simulationsmodell

Da das magnetische Feld sowohl bei Messungen auf einem Freifeldmessplatz wie auch bei in situ Messungen nur in 1 m Höhe gemessen wird, wird nur die Feldverteilung des elektrischen Feldes in unterschiedlichen Höhen untersucht.

Zur Untersuchung des elektrischen Feldes wird aufgrund der in Abschnitt 2 vorgestellten normativen Situation im Folgenden die Feldverteilung in der Höhe von 1 bis 4 m untersucht, wobei ein besonderer Fokus auf den Höhenbereich von 1,8 bis 2,2 m gelegt wird.

3.2 Simulationsergebnisse

Die elektrische Feldstärke im Abstand von 30 m zum Turmmodell wird für die diskreten Frequenzen 30 MHz, 100 MHz, 150 MHz, 300 MHz, 500 MHz und 1 GHz untersucht. Diese sind in Bild 2 auf die im genannten Höhenbereich maximal auftretende Feldstärke normiert.

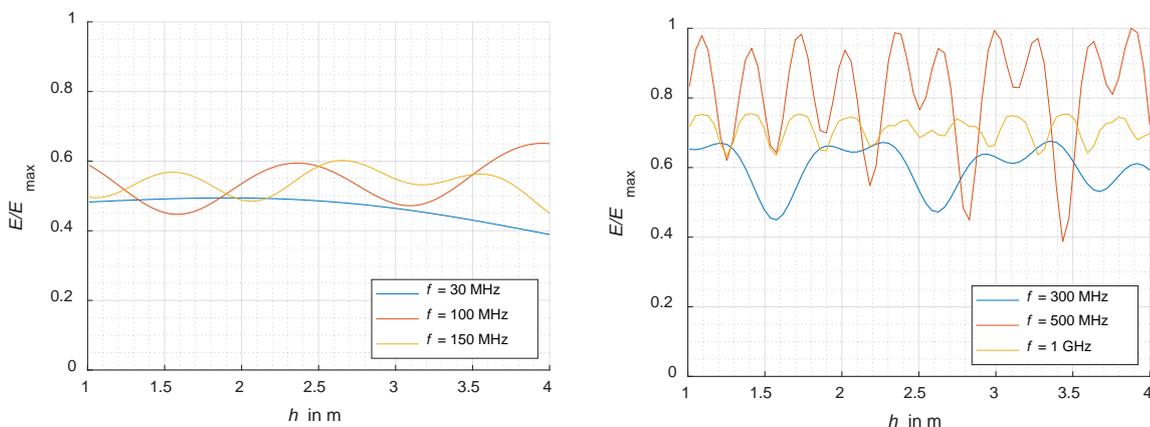


Bild 2: Elektrisches Feld normiert auf maximales Feld im Höhenabschnitt von 1 bis 4 m für ausgewählte diskrete Frequenzen

In Bild 2 ist deutlich zu erkennen, dass sich Minima und Maxima ausbilden. Dieser Effekt zeigt sich auch schon für die Entfernungsunsicherheit in [5]. Besonders deutlich zu sehen ist er für die Frequenzen 100 MHz oder 500 MHz. Es ist zu erkennen, dass die Dichte von lokalen Extremwerten im betrachteten Höhenbereich mit der Frequenz ansteigt.

4 Auswertung

Die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 3 zeigen ein deutliches Wellenverhalten. In diesem Abschnitt soll die Auswirkung dieses Verhaltens auf die Messergebnisse untersucht werden.

4.1 Einfluss der Höhe auf das Messergebnis

Das in Bild 2 deutlich erkennbare Wellenverhalten der Verteilung der elektrischen Feldstärke zeigt, dass schon eine geringe Abweichung von der in der Norm geforderten Messhöhe von 2 m einen signifikanten Unterschied bei der gemessenen Feldstärke bedeuten kann. Um die dadurch entstehende Abweichung $\Delta E(h)$ des elektrischen Feldes vom Normpunkt entlang der Höhe h abschätzen zu können, werden die elektrischen Feldstärken $E(h)$ aller Höhen auf die elektrische Feldstärke bei 2 m Höhe $E(h_{2m})$ normiert und logarithmiert:

$$\Delta E(h) = 20 \log \left(\frac{E(h)}{E(h_{2m})} \right).$$

Die so bestimmte Abweichung der elektrischen Feldstärke wird für die ausgewählten Frequenzen aus Abschnitt 3 in Bild 3 dargestellt.

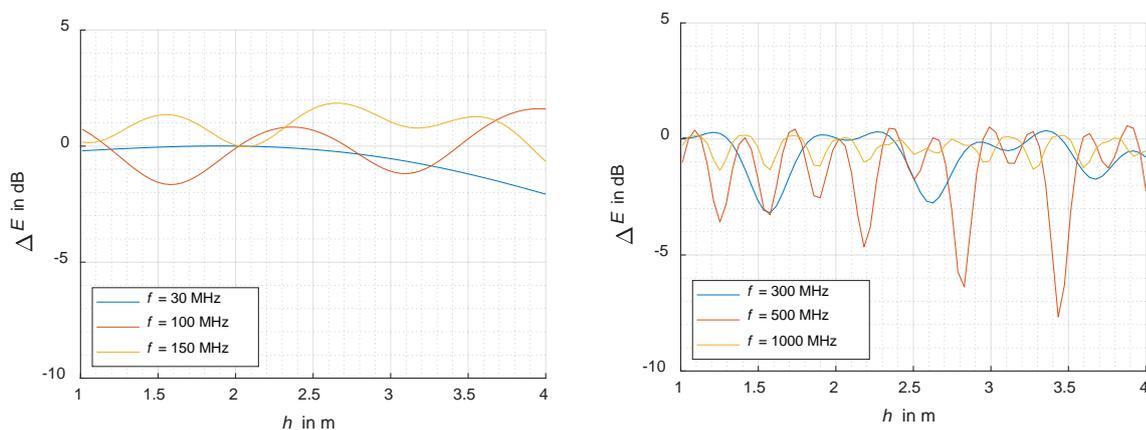


Bild 3: Abweichung der elektrischen Feldstärke entlang der Höhe h für ausgewählte Frequenzen

Wird der Höhenbereich von 1,8 bis 2,2 m betrachtet, ergeben sich bei den Frequenzen bis 150 MHz Abweichungen von etwa 2 dB. In diesem Höhenbereich kommt es jedoch bei 500 MHz zu Abweichungen von über 4,5 dB. Wird nicht nur der von der Norm für in situ vorgesehene Höhenbereich für Messungen von 1,8 bis 2,2 m betrachtet, sondern der Höhenbereich für Freifeldmessungen von 1 bis 4 m ergeben sich Abweichungen von über 7,5 dB. Es ist somit deutlich zu erkennen, dass die Abhängigkeit des elektrischen Feldes von der Höhe bei den Messungen nicht vernachlässigt werden sollte.

4.2 Frequenzabhängigkeit der Abweichung

In dem vorangegangenen Abschnitt lässt sich deutlich erkennen, dass die Frequenz einen signifikanten Einfluss auf die Höhenabhängigkeit der Messergebnisse hat. Daher wird in Bild 4 die Abweichung der Feldstärke zu dem Bezugspunkt in 2 m Höhe über den Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz untersucht. Für jede Frequenz wird die maximale Abweichung des Feldes zu der Bezugshöhe berechnet. Die Abweichungen in dem von der Norm zugelassenen Bereich für in situ Messungen von 1,8 bis 2 m werden in Rot dargestellt, in Blau der Bereich für Messungen auf einem Freifeldmessplatz von 1 bis 4 m.

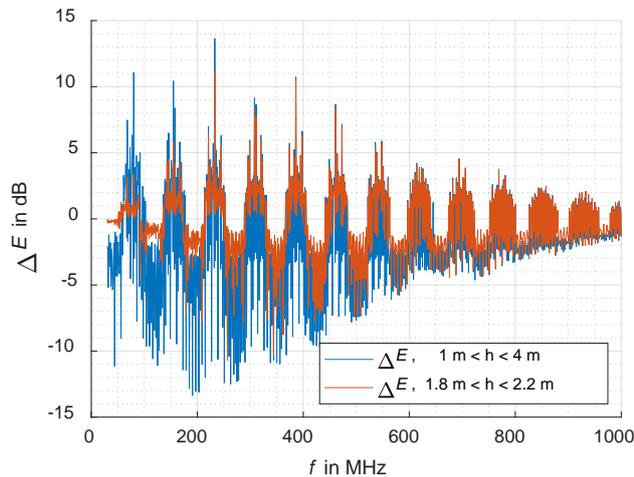


Bild 4: Abweichung der elektrischen Feldstärke im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz

In Bild 4 ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichung mit steigender Frequenz kleiner wird und von über 13 dB um 200 MHz auf unter 2 dB ab etwa 900 MHz sinkt. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass insbesondere im tieferen Frequenzbereich eine Abtastung der Höhe erstrebenswert ist.

5 Zweidimensionale Verteilung des elektrischen Feldes

In diesem Abschnitt werden die in diesem Paper vorgestellten Ergebnisse des Einflusses der Höhe mit den in [5] gewonnenen Erkenntnissen bezüglich des untersuchten Einflusses der Entfernung auf das Messergebnis zusammengeführt. Dazu wird mit dem in Abschnitt 3 vorgestellten Simulationsmodell in FEKO eine Fläche im Abstand von 29,75 bis 30,25 m zum Monopol und einer Höhe von 1 bis 4 m simuliert.

Die Auswertung erfolgt analog zum Abschnitt 4. In diesem Fall wird zur Ermittlung der Abweichung der von der Norm vorgesehen Punkt in 30 m Entfernung und 2 m Höhe $E(r_{30m}, h_{2m})$ genutzt. Da in diesem Abschnitt sowohl die Höhe wie auch die Entfernung dargestellt werden, wird die Abweichung ΔE der Feldstärke vom Normpunkt farblich dargestellt. In Bild 5 werden die Abweichungen zum Normpunkt für die Frequenzen 30 MHz, 100 MHz, 150 MHz, 300 MHz, 500 MHz und 1 GHz dargestellt. Wie schon in Abschnitt 4.2 deutlich zu erkennen ist, treten bei 500 MHz die größten Abweichungen zum Normpunkt mit über 7,5 dB auf.

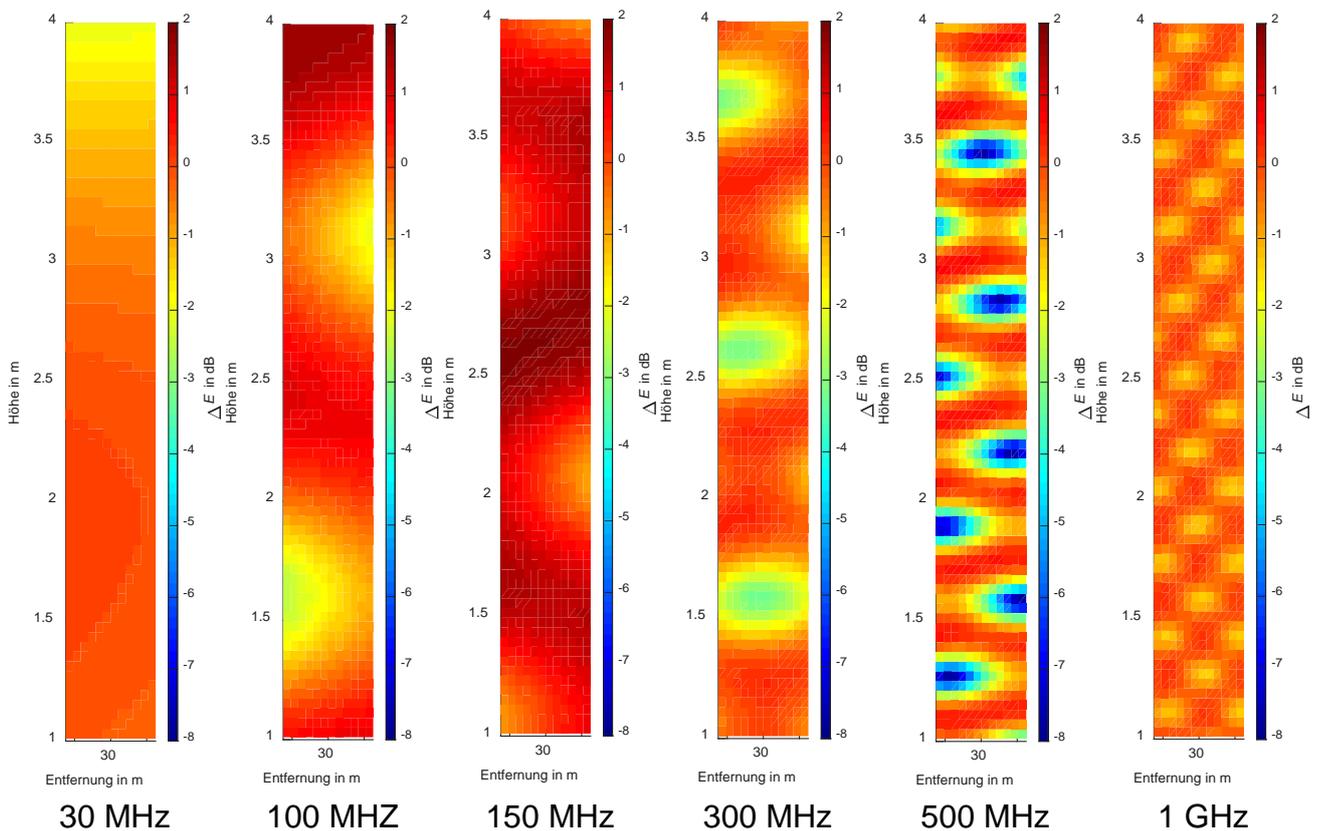


Bild 5: Abweichung der elektrischen Feldstärke für ausgewählte Frequenzen im Abstand von 29,75 bis 30,25 m und der Höhe von 1 bis 4m

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird gezeigt, dass das elektrische Feld um eine Windkraftanlage in einem Abstand von 30 m nicht homogen ist. Anhand der Simulationen wird deutlich, dass die Feldstärke selbst über dem gewählten Höhenabschnitt von 1,8 bis 2,2 m bzw. 1 bis 4 m variiert. In den Abschnitten 3 und 4 wird gezeigt, dass die Feldstärke eine wellenartige Verteilung aufweist. Ebenso zeigen die in den Bildern 4 und 5 dargestellten Simulationsergebnisse deutlich, dass es zur Bildung von Minima und Maxima in der Feldstärke kommt. Durch diese kann es zu Abweichungen von über 13 dB gegenüber der Messung bei normativ geforderter Höhe kommen.

Um sicherzustellen, dass die maximalen Emissionen ermittelt werden, ist es dabei sinnvoll, das Feld sowohl horizontal wie auch vertikal um den vorgeschriebenen Messpunkt abzutasten. Hilfreich und empfehlenswert ist es dabei, sich an den Vorgaben der Messungen auf einem Freifeldmessplatz zu orientieren.

Literatur

- [1] IEC/CISPR 11: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement
- [2] Technical Guidelines for Wind Turbines (FGW Guideline) Part 9: Determination of High Frequency Emissions from Renewable Power Generating Units
- [3] 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
- [4] 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, doi: 10.1109/ISEMC.2017.8077874
- [5] C. Reschka, S. Koj, S. Fisahn and H. Garbe: Measurement uncertainty caused by distance error during in situ tests of wind turbines, Adv. Radio Sci., 17, 1–7, 2019, <https://doi.org/10.15488/8801>
- [6] S. Koj: Messunsicherheit bei in situ Tests der elektromagnetischen Verträglichkeit von Windkraftanlagen, sierke, 2019, ISBN 13: 978-3-96548-039-1
- [7] S. Koj, A. Hoffmann, H. Garbe: Measurement uncertainty of radiated electromagnetic emissions in in situ tests of wind energy conversion systems, Adv. Radio Sci., vol. 16, 13-22, <https://doi.org/10.5194/ars-16-13-2018>, 2018
- [8] Altair Engineering GmbH, Calwer Straße 7, 71034 Böblingen, Germany, <http://www.feko.info>, <http://www.altair.com>, 2015