

# Untersuchungen zur Bestimmung von hochfrequenten elektromagnetischen Emissionen von Windkraftanlagen

M. Sc. Sebastian Koj, Dipl.-Ing. Sven Fisahn, Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik  
Fachgebiet Elektromagnetische Verträglichkeit  
Appelstraße 9a, 30167 Hannover, Deutschland

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Messkonzept zur vergleichbaren Bestimmung der gestrahlten elektromagnetischen Emissionen von Windkraftanlagen vorgestellt. Dazu wird anhand der normativen Lage die Notwendigkeit einer präzisierten Messvorschrift für Windkraftanlagen erläutert. Hierzu werden zunächst die Textstellen der aktuellen internationalen Norm IEC/CISPR 11 [1] bzw. der nationalen Norm DIN EN 55011 [2] aufgezeigt, die einen großen Interpretationsspielraum in Bezug auf Windkraftanlagen bieten. Anschließend werden die in der Technischen Richtlinie 9 [3] erarbeiteten Lösungen vorgestellt und analysiert. Zur Beurteilung der aktuellen normativen Lage werden sowohl Emissionsmessungen nach [2] als auch nach [3] durchgeführt, wobei bei den Messungen nach [2] bewusst die vorhandenen Interpretationsspielräume ausgenutzt werden. Die somit gewonnenen Messergebnisse zeigen, dass zum einen die in [3] beschriebene Vorgehensweise zur Reduzierung der Messunsicherheit beiträgt, zum anderen aber auch, dass weiterhin noch Aspekte mit Handlungsbedarf bestehen.

## 1 Einleitung

Bedingt durch die politisch beschlossene Energiewende kommen immer mehr dezentrale Energieerzeugungseinheiten wie Windkraftanlagen (WKA) oder Photovoltaikanlagen zum Einsatz. Diese müssen, genau wie jedes andere elektrische oder elektronische Gerät, die vorgeschriebenen Grenzwerte für gestrahlte und leitungsgebundene elektromagnetische Emissionen einhalten, um andere Geräte nicht in ihrer Funktionsweise zu beeinträchtigen. Dieser Aspekt wird in der internationalen Norm IEC/CISPR 11 [1] bzw. in der nationalen Spiegelnorm DIN EN 55011 [2] behandelt. Laut dieser Normen stellen WKAs Geräte der Klasse A, Gruppe 1 dar und werden im Normalfall am Aufstell- und Betriebsort vermessen, so dass eine Bewertung der leitungsgeführten Störungen nicht erforderlich ist und daher auch nur die gestrahlten elektromagnetischen Emissionen gemessen und bewertet werden müssen. Aufgrund der großen Abmessungen einer modernen WKA von mehr als einhundert Metern kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Energieleitungen in einer WKA unbeabsichtigte Strahler bilden und daher auch elektromagnetische Felder im kHz-Bereich emittieren.

Die o.g. Normen beinhalten zum einen die maximal zulässigen Feldstärkewerte der emittierten elektrischen und magnetischen Felder von industriellen, wissenschaftlichen und medizinischen Geräten, zum anderen aber auch die Messverfahren zur Vermessung dieser Felder. Bei Anwendung der normativ beschriebenen Messverfahren auf WKAs ergeben sich jedoch einige Aspekte, die einen sehr großen Interpretationsspielraum zulassen, sodass die Vergleichbarkeit und Objektivität von Messungen an WKAs nach [2]

nicht immer gewährleistet ist. Aus diesem Grund wurde die Technische Richtlinie für Erzeugungseinheiten und –anlagen, Teil 9 (TR 9) [3] erarbeitet und von der Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien (FGW e.V.) herausgegeben, um die oben beschriebenen Interpretationsspielräume bei Messungen nach [2] zu minimieren.

## 2 Aktuellen Normung und Vermessung von Windkraftanlagen

Die aktuelle internationale Norm [1] bzw. die nationale Norm [2] unterscheidet zwischen elektrischen und elektronischen Geräten, die unbeabsichtigt oder aber beabsichtigt elektromagnetische Felder erzeugen. Sind die elektromagnetischen Emissionen eine ungewollte Nebenerscheinung der Hauptfunktion des Gerätes, wie z. Bsp. bei Schaltnetzteilen, so sind solche Geräte in Gruppe 1 einzustufen. Erzeugt ein Gerät hingegen beabsichtigt elektromagnetische Felder, wie dies z. Bsp. bei Mikrowellen-Therapiegeräten der Fall ist, so werden diese Geräte der Gruppe 2 zugeordnet. Der zweite Aspekt, nach dem eine Unterteilung der Geräte erfolgt, ist der Bereich, in dem die jeweiligen Geräte Anwendung finden. Ist ein Gerät für eine Anwendung außerhalb des Wohnbereichs konzipiert, so ist es in die Klasse A einzustufen, ansonsten in die Klasse B. Nach diesen Kriterien sind WKAs folglich der Klasse A und Gruppe 1 zuzuordnen. Eine Besonderheit bei Geräten der Klasse A ist, dass diese entweder auf einem Messplatz oder am Aufstell- und Betriebsort (In-Situ) vermessen werden dürfen. Aufgrund der geometrischen Dimensionen von modernen WKAs kann nur eine Messung am Aufstell- und Betriebsort den Nachweis für das Einhalten der geltenden Grenzwerte liefern. Als Konsequenz der Einstufung von WKAs in die Klasse A, Gruppe 1 und aufgrund der technisch erforderlichen In-Situ Messung folgt, dass lediglich die gestrahlten elektromagnetischen Emissionen gemessen und bewertet werden müssen. Hierzu werden die gemessenen Werte mit den Grenzwerten nach Tabelle 1 verglichen, die in [2] zu finden ist.

**Tabelle 1: Grenzwerte für elektromagnetische Störstrahlung nach Tabelle 17 der [2]**

Frequenzbereich			Grenzwerte für eine Messentfernung von 30 m von der äußeren Oberfläche der Außenwand des Gebäudes, in dem sich das Gerät befindet	
MHz			Elektrisches Feld Quasispitzenwert dB( $\mu$ V/m)	Magnetisches Feld Quasispitzenwert dB( $\mu$ A/m)
0,15	bis	0,49	–	13,5
0,49	bis	3,95	–	3,5
3,95	bis	20	–	–11,5
20	bis	30	–	–21,5
30	bis	230	30	–
230	bis	1000	37	–

Aus Tabelle 1 geht weiterhin hervor, dass im Frequenzbereich von 15 kHz bis 30 MHz das emittierte Magnetfeld und im Bereich von 30 MHz bis 1 GHz das elektrische Feld erfasst und bewertet werden muss.

Neben eindeutigen Angaben zur Durchführung einer Messung ergeben sich jedoch bei der Anwendung der Norm auf WKAs Aspekte, die einen großen Interpretationsspielraum aufweisen. Diese werden im Folgenden aufgezeigt.

## 2.1 Betriebsarten

In Abschnitt 7.6 der nationalen Norm [2] sind die bei Emissionsmessungen erforderlichen Betriebsbedingungen für ausgewählte Geräte angegeben. Für Geräte bzw. Anlagen wie WKAs, die dort nicht explizit aufgelistet sind, folgt lediglich der Hinweis, dass diese „unter den üblichen Betriebsbedingungen“ und in dem Zustand vermessen werden sollen, in dem die maximale Störemission auftritt. Bei WKAs sind die Betriebszustände jedoch von diversen Einflüssen wie beispielsweise dem Wetter - konkret von der herrschenden Windstärke - abhängig. Daher stellt sich hier die Frage, welche und wie viele Betriebsbedingungen bei einer WKA möglich und üblich sind. Erst nach Festlegung dieser Betriebsmodi ist eine standardisierte Vermessung von WKA möglich.

## 2.2 Definition und Anzahl der Messpositionen

Weiterhin wird in [2] gefordert, dass Geräte, die In-Situ vermessen werden, durch Messungen an mindestens vier verschiedenen Positionen geprüft werden. Die Messpunkte sollen dabei auf zwei senkrecht zueinander angeordneten Linien in 30 m Entfernung von der äußeren Oberfläche der Außenwand des Gebäudes liegen, in dem sich das elektrische oder elektronische Gerät befindet. Die Problematik in Bezug auf WKAs besteht darin, dass aufgrund der räumlichen Ausdehnung einer Anlage mit abgesetzter Transformatorstation die „Außenwand“ dieser (Gesamt-)Anordnung nicht gleichzusetzen ist mit der Außenwand des Turms. Aus demselben Grund ist eine eindeutige und auf den maximalen Störpegel bezogen, reproduzierbare Festlegung der Messpositionen nicht möglich.

## 2.3 Anordnung des Prüflings und Erfassung des maximalen Emissionspegels

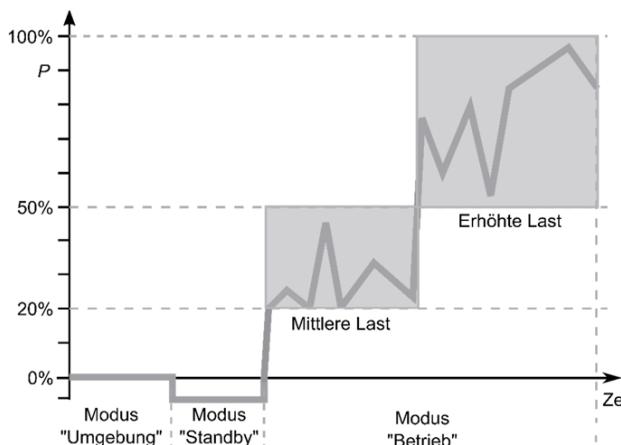
Nach Abschnitt 7.5 der Norm [2] soll der Prüfling so angeordnet sein, dass das Maximum des emittierten Störpegels erfasst werden kann. Dieser Forderung kann in Falle einer WKA zwar insofern nicht nachgekommen werden, weil diese ortsfest verbaut ist, denkbar ist es jedoch, die Messantennen so auszurichten, dass der gemessene Störpegel maximal wird.

# 3 Lösungsvorschläge der Technischen Richtlinie

Ein Gremium von Herstellern und Betreibern von WKAs, als auch Vertretern von Messinstituten und Hochschulen hat sich zum Ziel gesetzt, die Technische Richtlinie 9 [3] zu erstellen, die durch Vorgabe von eindeutigen und allgemein anerkannten Messvorschriften die im vorherigen Kapitel erläuterte Interpretationsfreiräume reduziert. Diese werden im Folgenden erläutert.

## 3.1 Definition von bestimmten Betriebszuständen

Zur Definition der Betriebszustände zieht [3] den Wirkleistungsumsatz einer WKA heran, wobei die Beschreibung der Anlage im Erzeugerpeilsystem erfolgt. In Abb. 1 sind die drei generellen Zustände einer WKA, die aus diesem Ansatz resultieren, dargestellt. Auf der Ordinate ist die von der WKA ins Netz eingespeiste Wirkleistung (bezogen auf die Nennleistung der WKA) aufgetragen. Auf der Abszisse sind die Modi „Umgebung“, „Standby“ und „Betrieb“ dargestellt.



**Abbildung 1:**  
Betriebszustände einer  
WKA nach [3]

Im Modus „Umgebung“ ist die Anlage, bis auf sicherheitsrelevante Komponenten, ausgeschaltet. Dabei speist die WKA keine Leistung ins Netz ein, bezieht aber auch kaum Leistung aus diesem. Daher sollen in diesem Modus die Umgebungsstörungen bestimmt werden. Im Weiteren verweist die Richtlinie auf die Festlegungen der nationalen Norm [2]. Im Modus „Standby“ ist die Wirkleistung der WKA negativ, d.h. der Generator erzeugt keine elektrische Leistung und die WKA bezieht eine (nicht vernachlässigbare) elektrische Leistung aus dem Stromversorgungsnetz. Dies ist z. Bsp. der Fall, wenn die Rotorblätter zwecks Enteisung geheizt werden.

Die Anlage befindet sich im Modus „Betrieb“, wenn die ins Stromversorgungsnetz stabil eingespeiste Leistung 20% der Nennleistung der WKA übersteigt. Bei Vermessung der elektrischen und magnetischen Emissionen ist auch in diesem Modus der Zustand mit dem größten Störpegel zu erfassen. Da zum Zeitpunkt der Erstellung der Richtlinie keine Erfahrungen bezüglich dieses „Worst Cases“ vorlagen, fordert die Richtlinie für den Modus „Betrieb“ die Erfassung der Störpegel sowohl im Bereich von 20% bis 50% (mittlere Last) als auch im Bereich von 50% bis 100% der Nennleistung (erhöhte Last).

Jeder der o.g. Betriebsmodi sollte vermessen werden, die Reihenfolge dieser Messungen ist jedoch frei wählbar.

### 3.2 Eindeutige Lokalisierung der Messpositionen

Bei der Definition der Messpositionen um die WKA verfolgt die Richtlinie [2] den Ansatz, dass die Emissionen der größten Störquellen auf jeden Fall erfasst werden sollen. Bei einer WKA stellen die Wandler der elektrischen Energie wie Umrichter und Transformatoren die größten potentiellen Störer dar. Je nach Anlagentyp befinden sich diese Wandler entweder in der Gondel oder im unteren Bereich des Turms der WKA. Auch die Anordnung eines Transformators neben dem Turm ist denkbar.

Die aus dem genannten Ansatz resultierenden Möglichkeiten zur Festlegung der Messpositionen werden anhand der Abb. 2 erläutert. Dort sind jeweils Draufsichten auf eine WKA dargestellt. Im oberen Teil ist die Definition der Messpositionen für den Fall angegeben, dass der größte Störer in der Gondel positioniert ist. Für diesen Fall

schreibt die Richtlinie eine Kopplung der Messpositionen MP 0° bis MP 270° anhand der Position der Gondel vor. Diese Positionen müssen während der Messung mit einer Genauigkeit von  $\pm 15^\circ$  eingehalten werden. Dreht sich die Gondel während der Messung um mehr als  $\pm 15^\circ$ , so müssen die Messpositionen entsprechend verschoben werden.

In der Mitte von Abb. 2 ist die Definition der Messpositionen für den Fall aufgezeigt, dass sich die größten Störer im unteren Bereich des Turms befinden. Hier ist es ausreichend, die Messpositionen anhand eines festen Bezugspunktes zu definieren, z. Bsp. in Bezug auf die Turmtür.

Im unteren Teil von Abb. 2 ist die Definition der Messpunkte für den Fall angegeben, dass der größte Störer, hier ein Transformator, neben der WKA aufgestellt ist. Für diesen Fall schreibt die Richtlinie eine weitere, fünfte Messposition MP 5 vor. Diese Messposition liegt auf dem Schnittpunkt der durch die Mitte des Turmes und des danebenstehenden Störers verlaufenden Gerade mit dem Kreis um ebendiesen Störer. Der Kreis hat dabei wiederum einen Radius von 30 m.

### 3.3 Erfassung des maximalen Emissionspegels an einer Messposition

Um den maximalen Emissionspegel an der jeweiligen Messposition zu erfassen, kann die Lage des Prüflings (WKA) wegen seiner Dimensionen und der ortsfesten Montage nicht verändert werden. Die TR 9 liefert zu diesem Aspekt Hinweise zur Ausrichtung der Antennen an der jeweiligen Messposition. Bei den Messungen des magnetischen Feldes im Frequenzbereich 150 kHz bis 30 MHz soll die Rahmenantenne vertikal aufgestellt sein. Während eines Max-Peak-Scans ist die Antenne um ihre vertikale Achse zu drehen, bis die gemessenen Emissionspegel maximal werden. Im Weiteren ist gemäß der aktuellen Norm [2] zu verfahren. Für die

Messung des elektrischen Feldes im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz schreibt die TR 9 vor, den Elevationswinkel der Antenne zwischen der horizontalen Ausrichtung und

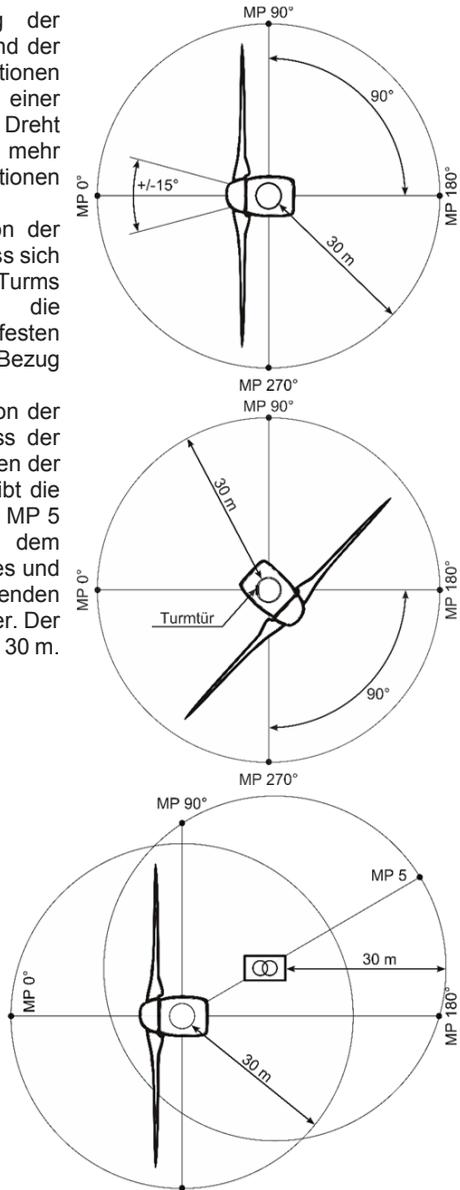


Abbildung 2: Positionierung der Messpositionen nach [3]

der Ausrichtung auf die Gondel so zu variieren, dass die aufgezeichneten Messwerte maximal werden. Die Messungen sind sowohl für horizontale als auch für vertikale Polarisationen der Antenne durchzuführen.

#### 4 Messungen an einer Windkraftanlage

Für die Messungen wird ein Zeitbereichs-Messempfänger (TDEMI) mit Quasi-Spitzenwert Detektor verwendet. Die magnetische Feldstärke wird mit einer aktiven Rahmenantenne und die elektrische Feldstärke mit einer bikonischen Antenne gemessen. Die WKA und deren Umgebung werden in Folgenden charakterisiert.

##### 4.1 Charakterisierung der Anlage

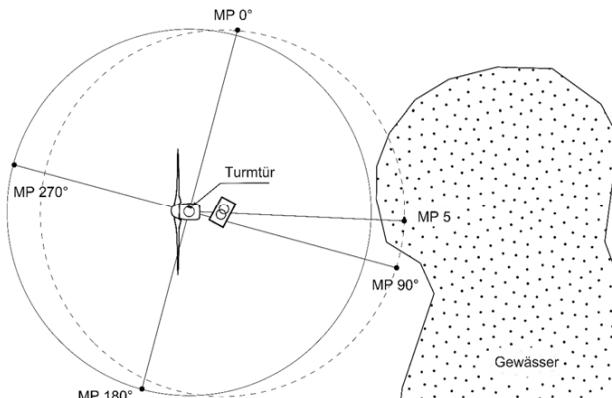
Die Vergleichsmessungen werden an der großen Forschungs-WKA der Fachhochschule Flensburg durchgeführt. Die technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 2 aufgelistet. Der in einem getriebelosen Synchrongenerator erzeugte Strom wird über die im metallischen Turm verlaufenden Leiter zu dem am Boden des WKA-Turms angeordneten Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis geführt. Nach Umrichtung des Stroms auf Netzfrequenz wird die Energie über einem neben der WKA stehenden Drehstromtransformator in das Niederspannungsnetz eingespeist.

**Tabelle 2: Technische Daten der vermessenen WKA**

Nennleistung	240 kW
Turmhöhe	50 m
Rotor Durchmesser	30 m
Einschaltwindgeschwindigkeit	3 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	11 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit	25 m/s
Maximale Rotordrehzahl	50 U/min

##### 4.2 Beschreibung der Messumgebung und Definition der Messpositionen

In Abb. 3 ist die unmittelbare Umgebung der WKA illustriert. Direkt neben der WKA ist das Transformatorhaus angeordnet. Weiterhin befindet sich im Abstand von ca. 30 m ein



**Abbildung 3: Definition der Messpositionen in Anlehnung an die TR 9. Die größten Störer befinden sich in unterem Bereich des Turms. Die Messpositionen werden nach der Turmtür orientiert.**

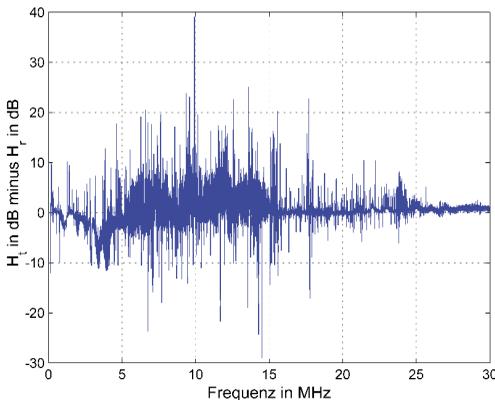
stehendes Gewässer. Das Gelände um die Anlage variiert um ca. 1 m in der Höhe und ist teilweise mit Gebüsch bewachsen.

Die in Abb. 3 dargestellten Messpositionen MP 0° bis MP 270° werden in Anlehnung an die TR 9 festgelegt. Bei der vermessenen WKA befinden sich die größten potentiellen Störer – der Umrichter und der Transformator – im unteren Teil des Turms, d. h. sie sind nicht drehbar eingebaut. Die Messpunkte werden daher an der Turmtür orientiert. Aufgrund des neben der WKA stehenden Transformators ist eine fünfte Messposition „MP 5“ erforderlich, die sich aber im Gewässer befindet. Da der Winkel zwischen den Radialen, auf denen MP 5 und MP 90° liegen, weniger als 15° beträgt, wird auf eine Messung am MP 5 verzichtet. Diese Vorgehensweise ist normkonform mit [1] und [2].

## 5 Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

Im Folgenden werden exemplarisch jeweils die Ergebnisse einer Messung der magnetischen Feldstärke im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz (CISPR-Band B) und der elektrischen Feldstärke im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz (CISPR-Bänder C und D) vorgestellt.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der magnetischen Feldstärkemessung am MP 90° im Modus „Betrieb“ mit erhöhten Last dargestellt, genauer gesagt die Differenz der Messwerte bei tangentialer und radialer Ausrichtung der Rahmenantenne (Loopantenne) in Bezug auf Turmaußenwand (Da die Messwerte als logarithmische Größen bestimmt werden,

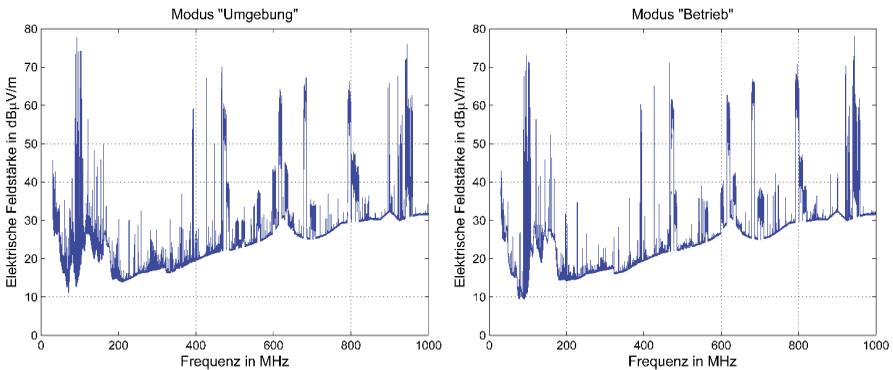


**Abbildung 4: Differenz der logarithmischen Messwerte  $H_t$  und  $H_r$  der magnetischen Feldstärke am MP 90° im Modus Betrieb mit erhöhten Last. Die Orientierung der Loopantenne bewusst verändert.**

entspricht diese Differenzbildung einer Normierung der linearen Größen). Hier wird bewusst der Spielraum der [2] in Bezug auf die Orientierung der verwendeten Messantenne ausgenutzt. Es ist zu erkennen, dass ohne die eindeutige Festlegung der Antennenorientierung eine Erfassung des maximalen Störpegels nicht möglich ist und je nach Orientierung der Antenne z. Bsp. ein Peak bei ca. 10 MHz (tangentiale Orientierung) bzw. bei ca. 15 MHz (radiale Orientierung) detektiert wird.

Abb. 5 zeigt die Messergebnisse für die elektrische Feldstärke am MP 270° für die Betriebsmodi „Umgebung“ (links) und „Betrieb“ (rechts). In beiden Fällen sind

typische Frequenzbelegungen wie beispielsweise durch Rundfunk (UKW) im Bereich von 87 bis 107 MHz oder Mobilfunk (GSM 900) im Bereich um 900 MHz herum zu sehen. Auffällig ist jedoch, dass bei einigen Frequenzen (wie im UKW-Bereich) die gemessenen Pegel im Modus „Umgebung“ entgegen der Erwartung größer sind als im Modus „Betrieb“. Als mögliche Ursache hierfür ist die erhöhte Luftfeuchtigkeit aufgrund des starken Niederschlags während der Messung im Modus „Betrieb“ anzusehen, die eine Erhöhung der Funkfeldämpfung hervorruft. Die Messergebnisse in diesem Frequenzbereich



**Abbildung 5: Messwerte der elektrischen Feldstärke am MP 270° im Modus "Umgebung" (links) und im Modus "Betrieb" (rechts)**

zeigen, dass für die Bewertung einer WKA bezüglich ihrer Emissionen auch die Unsicherheit durch Umwelteinflüsse berücksichtigt werden muss. Hierzu entsteht ein weiterer Untersuchungsbedarf.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die aktuelle normative Lage zur Bewertung der Emissionen von WKA durchleuchtet. Dabei wurde gezeigt, dass die in der TR 9 [3] vorgeschlagenen Vorgaben bezüglich der Definition von Messpositionen sowie der Ausrichtung der Messantennen zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Vermessung von WKAs beitragen. Weiterhin wird anhand von Messergebnissen gezeigt, dass noch Klärungsbedarf bezüglich der durch Umwelteinflüsse (insbesondere durch Witterung mit erhöhter Luftfeuchtigkeit) entstehenden Messunsicherheiten herrscht.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich bei den Mitarbeitern der Fachhochschule Flensburg für die Bereitstellung ihrer Forschungs-WKA. Hierdurch wurde den Autoren überhaupt erst die Möglichkeit eröffnet, Messungen an einer realen WKA in den verschiedenen Betriebsmodi durchführen zu können. Besonderer Dank gilt dabei den Herren Dipl.-Ing.oec. Arne Gloe sowie Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Kruse für ihre Unterstützung während der Messkampagne

## Literatur

- [1] IEC/CISPR 11:2009 + A:2010 Industrial, scientific and medical equipment – Radiofrequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement
- [2] DIN EN 55011:2009 + A1:2010 Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte – Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren
- [3] Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und –anlagen, Teil 9: Bestimmung der hochfrequenten Emissionen von regenerativen Erzeugungseinheiten, FGW e.V.