

## Netzrückwirkungen von Windenergieanlagen in Windparks

### Grid Interferences of Wind Turbines in Wind Farms

Berding, Jens; Inst. für elektrische Energieversorgung/Universität Hannover;  
Santjer, Fritz; Gerdes, Gerhard J.; DEWI

#### **Summary**

*It is generally assumed, that specific power fluctuations and power quality problems are reduced, if wind turbines (WT) are operated in a wind farm. To verify these assumptions single turbines and a wind farm were investigated by measurements and theoretical calculations. The investigated wind farm consists of two different types of WTs, fixed speed machines with direct coupled asynchronous generator and variable speed machines with pulse width modulated-converter (PWM-converter)*

*The influence of the asynchronous type WTs on harmonics is very small, they are mainly acting passively, absorbing harmonics existing in the utility grid. The extent of absorption depends on the impedances of the generators and compensation units. Harmonics generated by PWM-converter WTs are low compared to 6 or 12-puls inverter systems. The distortion of the output current has a stochastic characteristic and leads to no single high amplitude harmonics but to a broad band of low amplitude distortions. Due to their stochastic characteristic the currents of the single WTs within the wind farm superimpose by vector addition. The cumulated distortion is not increasing linearly with growing number  $n$  of WTs but by  $\sqrt{n}$ . Thus the specific distortion of a single WT in the wind farm is decreasing with  $1/\sqrt{n}$ . Further results of the investigations concerning the WT with PWM-converter are discussed in this paper.*

#### **1. Einleitung**

Beim Anschluß von Windenergieanlagen (WEA) an das öffentliche Netz entstehen Netzrückwirkungen, deren Höhe festgelegte Verträglichkeitspegel nicht überschreiten dürfen. In Verbindung mit der am Anschlußpunkt zur Verfügung stehenden Netzkurzschlußleistung stellen die einzuhaltenden Grenzwerte ein entscheidendes Anschlußkriterium dar. Um die Kosten für die Stromerzeugung aus Windenergie nicht durch eventuell unnötige Netzverstärkungen zu erhöhen, sind insbesondere Erkenntnisse darüber erforderlich, wie sich die Netzrückwirkungen von mehreren WEA in Windparks im Vergleich zur Einzelanlage verändern. Dabei ist es auch wichtig, Wechselwirkungen zwischen Anlagen unterschiedlicher technischer Konzepte zu erforschen.

Vor diesem Hintergrund hat das Deutsche Windenergie-Institut in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover umfangreiche Messungen in einem bestehenden Park durchgeführt. Untersucht wurden fünf WEA (à 500 kW) mit direkter Netzkopplung sowie fünf drehzahlvariable Anlagen (à 500 kW) mit Netzanbindung über Stromrichter, die nach dem Prinzip der Pulsweitenmodulation (PWM) arbeiten (PWM-Umrichter, Puls-Umrichter). Die gleichzeitige Erfassung der Ströme mehrerer Einzelanlagen und des Summenstroms im Umspannwerk des EVU ermöglicht detaillierte Aussagen über die Überlagerung von Spannungsschwankungen bzw. Oberschwingungsströmen bei verschiedenen Anlagenzahlen. Die Windparkgröße ließ sich durch Zu- und Abschalten einzelner Anlagen beliebig variieren.

Im Rahmen dieses Berichts kann nur ein Ausschnitt der Ergebnisse vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt in der Vorstellung der an den WEA mit PWM-Umrichter durchgeführten Untersuchungen, die sich auf die Einspeisung nicht-netzfrequenter Störströme konzentrierten. Zuvor wird eine kurze Zusammenfassung der Oberschwingungsverhältnisse an WEA mit Asynchrongeneratoren gegeben.

## 2. Oberschwingungen bei WEA mit direkter Netzkopplung

Bei WEA mit Asynchrongenerator geht man allgemein davon aus, daß die Anlagen im Normalbetrieb für Frequenzen oberhalb 50 Hz ein passives Verhalten aufweisen, d.h. keine Oberschwingungsströme in das Netz einspeisen. Die durchgeführten Untersuchungen haben diese Auffassung bestätigt. Im Falle einer im betrachteten Netzweig bereits vorhandenen Verzerrung der Spannung nehmen die WEA sogar Oberschwingungsströme auf und tragen damit zur Reduzierung der Netzbelastung bei.

Der überwiegend induktive Widerstand des Asynchrongenerators steigt linear mit der Frequenz  $f$ , während der kapazitive Innenwiderstand der Blindleistungs-Kompensationseinrichtung mit  $1/f$  fällt. Eine Analyse der umgesetzten Oberschwingungsleistungen zeigt, daß bereits ab der 5. Ordnung, also ab 250 Hz, die aufgenommenen Ströme ausschließlich in die Kompensationskondensatoren fließen.

Insbesondere bei fehlender oder unzureichender Verdrosselung der Kondensatoren kommt es zu einer Serienresonanz von Kompensationskapazität und Streuinduktivität des MS/NS-Transformators. In der Nähe der Resonanzfrequenz liegt die Impedanz dieses Saugkreises nahe Null, Oberschwingungsströme entsprechender Frequenz werden verstärkt aufgenommen. An dem untersuchten WEA-Typ liegt die Resonanzfrequenz im Nennbetrieb bei ca. 550 Hz, wenn alle Kompensationsstufen zugeschaltet sind. Als Folge ist im Anlagen-Strom eine 550 Hz-Komponente in Höhe von 2 % bezogen auf Nennstrom meßbar. Die diesen Strom treibende Oberschwingungsspannung 11. Ordnung, die bereits im Netz vorhanden ist, hat einen Anteil von 0,2 % bezogen auf Nennspannung.

## 3. Störströme von WEA mit Netzanbindung über Puls-Umrichter

Drehzahlvariable Windenergieanlagen wurden in der Vergangenheit zunächst mit netzgeführten 6-Puls- bzw. 12-Puls-Umrichtern an das Netz gekoppelt. Die dabei entstehenden Oberschwingungsströme niedriger, ungerader Ordnung waren nur durch aufwendige Filter-Einheiten innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen zu halten. In jüngster Zeit bietet die Verwendung von selbstgeführten Stromrichtern, die mit abschaltbaren Halbleiter-Ventilen ausgerüstet sind, die Möglichkeit, die angestrebte Sinusform des eingespeisten Stroms mit hoher Schaltfrequenz zu erzeugen. Durch dieses als Pulsweitenmodulation bezeichnete Verfahren wird die Entstehung niederfrequenter Harmonischer weitgehend vermieden.

Die Eigenschaften der dabei entstehenden Rückwirkungen hängen stark von dem verwendeten Steuerverfahren ab. Bei dem untersuchten WEA-Typ wird zur Bestimmung der Schaltmomente der Halbleiter-Ventile die sogenannte Hystereseregulierung angewendet. Dabei wird um den vorgegebenen Strom-Sollwert ein Toleranzband gelegt, in dem sich der Ist-Strom bewegt. Dieses Toleranzband hat eine Breite von ca.  $\pm 5\%$  des Nennstroms der WEA.

Die Transistoren werden dann ein- bzw. ausgeschaltet, wenn der Ist-Strom gegen die obere oder untere Grenze des Toleranzbandes stößt. Aus diesem Verfahren resultiert ein Verzerrungsstrom, der dem eigentlichen Nutzsignal überlagert ist. Da die Breite des Bandes über dem Leistungsbereich der WEA konstant ist, ist auch der Verzerrungsstrom weitgehend unabhängig von der Leistungsabgabe. Dieser Störanteil fällt daher bei kleinen Anlagenleistungen besonders stark auf. Der in Abb.1 dargestellte Stromverlauf ist aber unkritisch. Bei Abgabe der Nennleistung entspricht die Kurvenform etwa dem in der Abbildung dargestellten Spannungszeitverlauf.

Abb.1 macht deutlich, daß der Verzerrungsanteil zufälligen Charakter aufweist und auch keine Symmetrie zwischen unterer und oberer Halbwelle besteht. Die momentane Schaltfrequenz der Transistoren ändert sich auch innerhalb einer Periode zwischen 1 kHz und 10 kHz. Auf den Kuppen des Strom-Zeitverlaufs ist die Schaltfrequenz deutlich geringer als im Bereich der steilen Flanken.

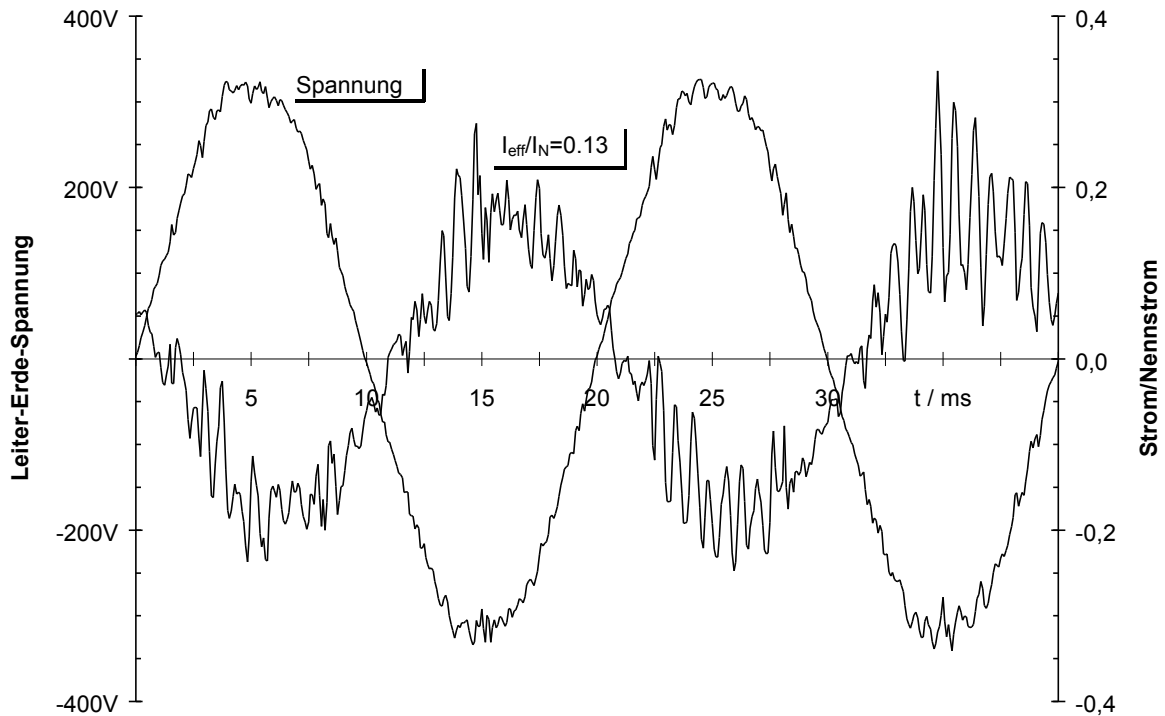


Abb.1: Niederspannungsseitig gemessener Phasenstrom und Leiter-Erde-Spannung einer WEA mit PWM-Umrichter bei 65 kW abgegebener Leistung

Fig.1: Phase current and line-to-earth voltage of a wind turbine with PWM-converter measured at the low voltage section of the WT at 65 kW power output.

Im Frequenzbereich ergeben sich aufgrund des Steuerverfahrens keine diskreten Harmonischen. Vielmehr äußert sich der Verzerrungsstrom im Bildbereich als breites Rauschband, das den gesamten Bereich der auftretenden Schaltfrequenzen von 1 kHz bis 10 kHz umfaßt. Die auftretenden Amplituden liegen deutlich unter 1% bezogen auf Nennstrom. In der niederspannungsseitig gemessenen Spannungskurve machen sich die Stromsprünge in Form von Spannungsverzerrungen bemerkbar. Die Höhe der Verzerrungen hängt von der Impedanz des Netzes ab, in das die Anlage speist. Da der Netzanschluß grundsätzlich über eigene Transformatoren an das Mittelspannungsnetz erfolgt, sind die in Abb.1 zu erkennenden Verzerrungen unkritisch. Auf der Mittelspannungsseite des Transformators ist die Kurzschlußleistung des Netzes etwa um den Faktor 10 höher, entsprechend sinkt die Netzimpedanz gegenüber der Niederspannungsseite auf 1/10. Spannungsbeeinträchtigungen sind dann kaum noch erkennbar.

Mit Blick auf die Überlagerung der Störaussendungen mehrerer Umrichter ist insbesondere der stochastische Charakter des Verzerrungsstroms von Bedeutung. Betrachtet man im folgenden nur die Verzerrungsströme von n auf denselben Verknüpfungspunkt speisenden Generatoren und nimmt deren Grundstromanteile zu Null an, addieren sich die Verzerrungsströme  $i_{VZ,k}(t)$  der Einzelanlagen zum Summen-Verzerrungsstrom  $i_{VZ,ges}(t)$ :

$$i_{VZ,ges}(t) = \sum_{k=1}^n i_{VZ,k}(t) \quad (Gl.1)$$

Abb.2 zeigt die im Windpark-Abzweig des Umspannwerks gemessenen Summen-Verzerrungsströme von n=1,2 bzw. 5 WEA bezogen auf den Nennstrom von n Anlagen. Dargestellt ist ein Zeitausschnitt von einer Netzperiode. Die jeweiligen Grundstromanteile sind mit Hilfe einer digitalen Filterung gelöscht worden. Deutlich wird die relative Reduzierung des bezogenen Summenverzerrungsstrom. Ausgehend von Gl.1 läßt sich zeigen, daß für die Effektivwerte  $I_{VZ}$  der Verzerrungsströme die Beziehung gilt:

$$I_{VZ,ges} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{VZ,k}^2} \quad (Gl.2)$$

Aufgrund des stochastischen Charakters addieren sich die Störströme also geometrisch. Über genügend lange Beobachtungszeiträume sind die Effektivwerte verschiedener baugleicher Anlagen identisch. Dann folgt aus Gl.2 für n Anlagen:

$$I_{VZ,ges} = \sqrt{n} \cdot I_{VZ,1} \quad (Gl.3)$$

Die Störaussendungen eines Windparks bestehend aus n WEA mit PWM-Umrichter steigen demzufolge nur mit der  $\sqrt{n}$  gegenüber der Einzelanlage. Aufgrund der Linearität der Fourier-Transformation läßt sich dieses Ergebnis unmittelbar in die für die Festlegung von Grenzwerten wichtigere Frequenzebene übertragen. Die harmonischen und zwischenharmonischen Ströme steigen ebenfalls mit  $\sqrt{n}$ .

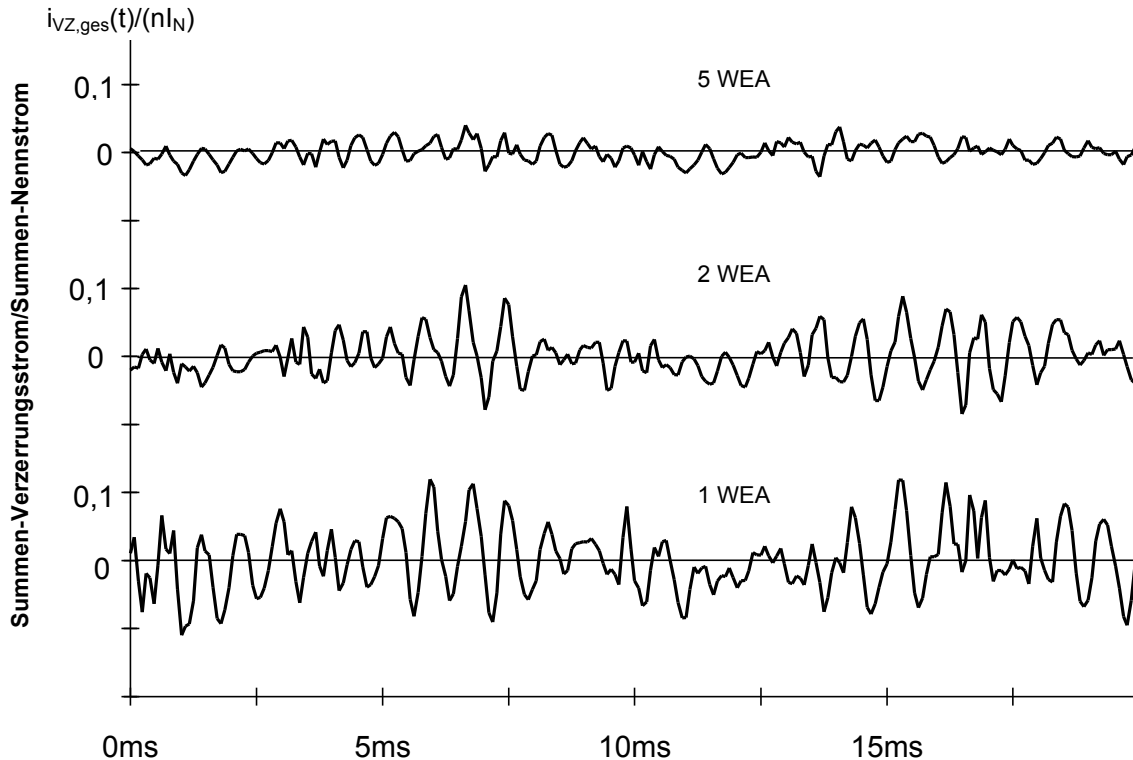


Abb.2: Mittelspannungsseitig gemessene Summen-Verzerrungsströme von n=1,2,5 WEA mit PWM-Umrichter bezogen auf den Nennstrom von n WEA.

Fig.2: Summated distortion currents of n=1,2,5 WT with PWM-converter related to nominal current of n WT; measured at the medium voltage section of the transformer substation.

Der meßtechnische Nachweis läßt sich besonders anschaulich erbringen, wenn man gemessene Ströme über eine Netzperiode fourier-transformiert. Daraus ergibt sich eine sehr grobe Frequenzauflösung von 50 Hz. Die ermittelte Oberschwingung der Ordnung v darf dann nicht als ein-frequenter harmonischer Strom gedeutet werden. Der Meßwert beschreibt vielmehr den Effektivwert aller Frequenzanteile im Band  $(v \cdot 50 \pm 25)$  Hz. Nach anschließender Mittelwertbildung ergeben sich dann die in Abb.3 dargestellten Verläufe. Die Abbildung zeigt für einen Frequenzausschnitt von 1 kHz bis 2,5 kHz die in der Mittelspannungsebene gemessenen Harmonischen von 5 WEA. Zur Verifizierung ist der mit Hilfe der  $\sqrt{n}$ -Beziehung gebildete theoretische Wert ausgehend von der Harmonischen einer einzelnen Anlage dargestellt. Die zugrunde liegenden Harmonischen der Einzelanlage wurden zeitgleich an einer der fünf in Betrieb befindlichen WEA gemessen. Deutlich zu erkennen ist die sehr gute Übereinstimmung von theoretischen Überlegungen und meßtechnischen Untersuchungen.

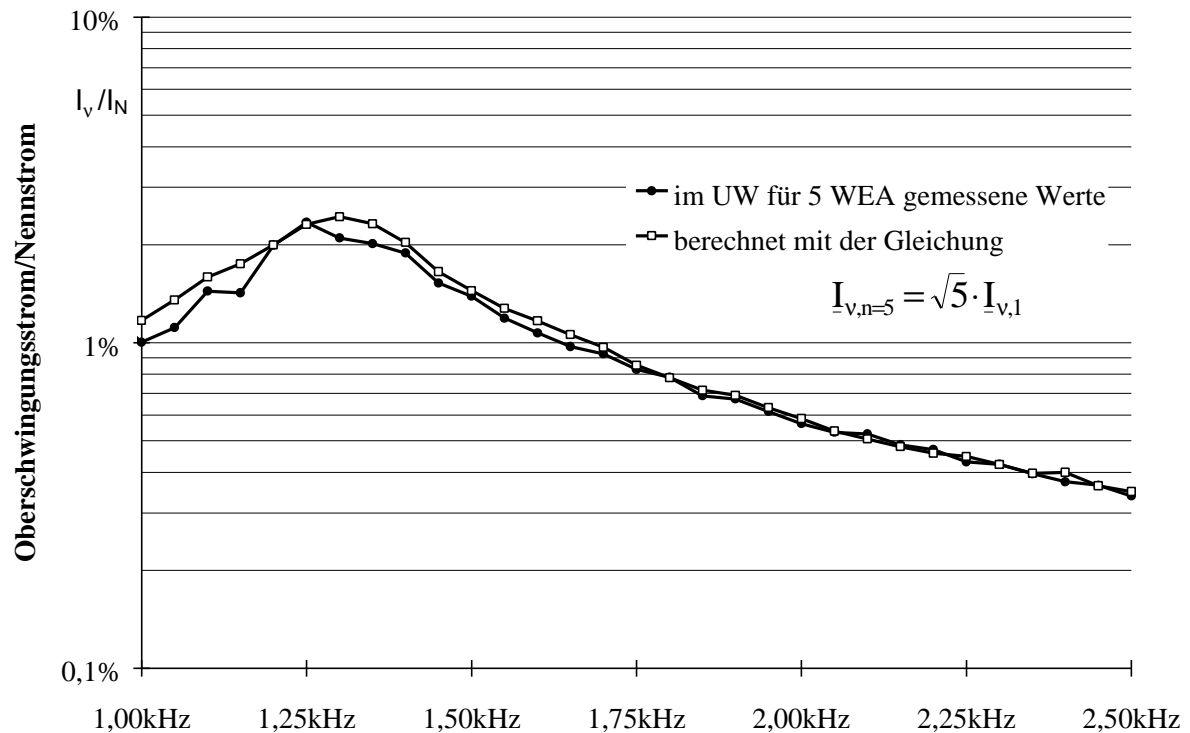


Abb.3: Harmonische des Summenstroms von  $n=5$  WEA mit PWM-Umrichter. Gemessene und aus den Meßwerten der Einzelanlage hochgerechnete Werte. Nur ein kleiner Ausschnitt von 1 kHz bis 2,5 kHz aus dem gesamten Spektrum ist gezeigt. Frequenzauflösung 50 Hz.

Fig.3: Resulting harmonic current of 5 WT with PWM-inverter. Measured and calculated values for a frequency resolution of 50 Hz. Only a small frequency band from 1 kHz to 2.5 kHz is shown.

#### 4. Schlußbetrachtung

Die WEA mit Puls-Umrichtern speisen einen Strom in das öffentliche Netz ein, dem ein nichtperiodischer Verzerrungsanteil überlagert ist. Dieser Verzerrungsanteil ist unabhängig vom Betriebspunkt der Anlage. Aus dem zur Ansteuerung der Transistoren verwendeten Verfahren resultiert, daß der Verzerrungsstrom stochastischen Charakter hat. Die Störströme von  $n$  gleichen Anlagen, die auf denselben Verknüpfungspunkt speisen, addieren sich daher geometrisch. Entsprechend ergibt eine Analyse im Frequenzbereich, daß die dem Netz von  $n$  WEA eingepprägten harmonischen und zwischenharmonischen Ströme nur um  $\sqrt{n}$  größer sind als die entsprechenden Ströme der Einzelanlagen.

Grundsätzlich liegen die Störaussendungen in einem Frequenzbereich, der normativ bisher nur unzureichend erfaßt ist. Für Frequenzen von 2 kHz bis 9 kHz existieren derzeit keine Verträglichkeitspegel. Ebenso sind Fragen der meßtechnischen Erfassung der breitbandigen Störungen ungeklärt.

In jedem Fall ist bei der Festlegung von Anschlußfaktoren für WEA mit Puls-Umrichter zu berücksichtigen, daß die für  $n$  Anlagen erforderliche Netzkurzschlußleistung nur das  $\sqrt{n}$ -fache des für eine WEA benötigten Wertes zu betragen braucht.

Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, daß durch die Kombination von WEA mit unterschiedlichen elektrischen Konzepten eine Reduzierung der in das Netz gelangenden Störströme zu erreichen ist.

Die Kompensationskondensatoren der WEA mit direkter Netzkopplung wirken als Filter für die Störströme der WEA mit Puls-Umrichter. Dies gilt insbesondere für den unteren Frequenzbereich um 1 kHz, wenn die Kondensatoren der Blindleistungskompensation gar nicht oder nur schwach verdrosselt sind. Die Resonanzfrequenz des Saugkreises liegt dann im Bereich um 1 kHz. Für höhere Frequenzen wird die Kompensationsanlage durch die mit der Frequenz wachsende Impedanz des Einspeisetransformators vom Netz entkoppelt.

Weitere Reduktionswirkungen sind durch die Kabelkapazitäten der Mittelspannungskabel zu erwarten. Üblicherweise liegt die Resonanzstelle in Mittelspannungsnetzen im Bereich der 13. Ordnung, d.h. ab 650 Hz überwiegt der Einfluß der Kabelkapazitäten gegenüber den induktiven Impedanzen der Betriebsmittel. Insbesondere in Windparks, die über lange Stickleitungen an das Umspannwerk angeschlossen sind, kann erwartet werden, daß ein nennenswerter Anteil der Störströme über die Kabelkapazitäten zur Erde abfließt.

Eine genaue Quantifizierung der angesprochenen Effekte erfordert jedoch weitere meßtechnische Untersuchungen. Grundsätzlich bietet die Kombination von WEA unterschiedlicher Konzepte in Windparks den Vorteil, daß die Anlagen unterschiedliche Verträglichkeitspegel beanspruchen. Bei WEA mit direkter Netzkopplung begrenzt deren flickererzeugende Wirkung die Anzahl der anzuschließenden Anlagen. Bei WEA mit Umrichter-Konzepten - gleich welcher Art - steht hingegen die Belastung der Netze mit nicht-netzfrequenten Strömen im Vordergrund. Für den Fall, daß die Netzurückwirkungs-Verträglichkeitspegel das an-schlußbegrenzende Kriterium darstellen, kann also durch eine gezielte Anlagenauswahl die Anzahl der aufstellbaren WEA erhöht werden.

## 5. Literatur

- [1] Berding, Jens: Netzurückwirkungen von elektrischen Windkonvertern in Windparks. Diplomarbeit am Institut für elektrische Energieversorgung/ Universität Hannover in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Windenergie-Institut. Hrsg.: Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven, 1996.