

Flickererzeugung durch Windenergieanlagen

Flicker Generation by Wind Turbines

Klosse, Rainer; Santjer, Fritz; Gerdes, Gerhard J.; DEWI

Summary

Flicker, the fluctuating luminance at a consumer's lighting, can be produced by a wind turbine connected to the electrical grid. The Flicker effect is a result of voltage fluctuations. The human physiological visual perception is especially sensitive for luminance fluctuation in surrounding of the frequency of $f = 8.8$ Hz. The main reasons of Flicker from wind turbines are switching operations and the shadow effect of the wind speed at the tower. High but slow fluctuations of the power are unimportant.

1. Einleitung

Das sichtbare Flackern von Lichtquellen aufgrund von Spannungsschwankungen ist in starken Netzen, wie sie in der Bundesrepublik vorherrschen, ein nur noch selten auftretendes Phänomen geworden. Dieser Effekt kann dennoch in Haushalten, Gewerbebetrieben etc. beim Einschalten größerer Lasten (Heizgeräte, Motoren etc.) beobachtet werden. Die sichtbare Änderung der Leuchtstärke im Frequenzbereich zwischen 0.05 und 35 Hz ist als sogenannter Flickereffekt in nationalen und internationalen Normen definiert und ist beschrieben durch die Flickerwirkungskette, die das Verhalten des menschlichen Auges bei Leuchtdichteänderungen einer 60 W-Glühlampe, verursacht durch Netzspannungsschwankungen, nachbildet.

Die flickererzeugende Spannungsschwankung, die kurz als Flicker bezeichnet wird, darf in elektrischen Versorgungsnetzen vorgegebene Verträglichkeitspegel nicht überschreiten. Die Einhaltung von zulässigen Flickerpegeln gilt sowohl für Verbraucher als auch für Energieerzeuger im Versorgungsnetz. Daher ist auch bei der Netzanbindung von Windenergieanlagen (WEA) das Verhalten einer WEA bezüglich seiner Netzverträglichkeit vor der Installation zu überprüfen. Der Flickereinfluß läßt sich durch Maßnahmen im elektrischen Netz minimieren oder der Hersteller von WEA hat konstruktiv solche Störungen von vornherein verringert. Im Folgenden soll die Flickerwirkungskette zurückverfolgt werden, also vom Mensch als Empfänger über das elektrische Netz als Übertragungsglied bis zur WEA als möglichen Sender. Ursachen für Flicker bei WEA sollen genannt werden.

2. Flicker als Subjektives Empfinden des Menschen

Über Auge und Gehirn ist der Mensch in der Lage, sehen zu können. Jedoch nicht jede Lichtänderung kann der Mensch in gleicher Weise erfassen. Äußerst schnelle Vorgänge oder auch extrem langsame bleiben dem Menschen verborgen. Dazwischen liegt ein Bereich der erhöhten Empfindlichkeit. Es ist durch Versuche mit Testpersonen gelungen, eine Bemerkbarkeitsschwelle für Lichtschwankungen zu ermitteln. Hierbei wurden die Testpersonen Lichtschwankungen einer 60W Glühlampe ausgesetzt. Glühlampen haben die Eigenschaft, daß sie in Abhängigkeit des Quadrates der Spannung Lichtstrahlung abgeben, also empfindlich auf Spannungsänderungen reagieren. Durch das Nachglimmen der Glühwendel wird das 100 Hz Flackern, welches durch die 50 Hz Netzfrequenz entsteht, gedämpft. Wenn ein Mensch mit einem durchschnittlichen Sehvermögen als Empfänger in der Flickerwirkungskette betrachtet wird, kann die Bemerkbarkeitsschwelle der Lichtschwankung durch die Amplitude der Spannungsänderung für unterschiedliche Frequenzen mathematisch beschrieben werden.

3. Festlegung der Flickerbemerkbarkeitsschwelle

Die Amplitude, ab der eine regelmäßige rechteckförmige Spannungsänderung in Abhängigkeit der Anzahl der Spannungsänderungen r sichtbar wird, ist nach VDE bzw. IEC [1] genormt, siehe auch Abb. 1. Dabei ist die relative Spannungsänderung d als das Verhältnis der effektiven Spannungsänderung ΔU zur effektiven Spannung U definiert.

Diese frequenzabhängige Grenze wurde mathematisch als Flickerbemerkbarkeitspegel $P_{st} = 1$ festgelegt. In dem Frequenzbereich um $f = 8,8 \text{ Hz}$, also ca. $r = 1000$ Änderungen pro Minute, dürfen die relativen Spannungsänderungen nur sehr klein sein, um den Wert $P_{st} = 1$ zu erreichen. Anders ausgedrückt, der Mensch ist bei diesen Frequenzen besonders empfindlich. Da aber die wenigsten Störquellen regelmäßige rechteckförmige Spannungsänderungen erzeugen, dies gilt insbesondere für WEA, ist ein umfangreiches Berechnungsschema festgelegt worden. Der erste Abschnitt der Flickerberechnung gewichtet und filtert den Spannungsverlauf mit Hilfe eines speziellen Bandpasses. Anschließend erfolgt eine Betragsbildung. Zuletzt schließt sich eine statistische Bewertung mit Hilfe einer Überschreitungswahrscheinlichkeitsfunktion und einem Mehrpunktverfahren, welches auf den Flickereffekt abgestimmt ist, an.

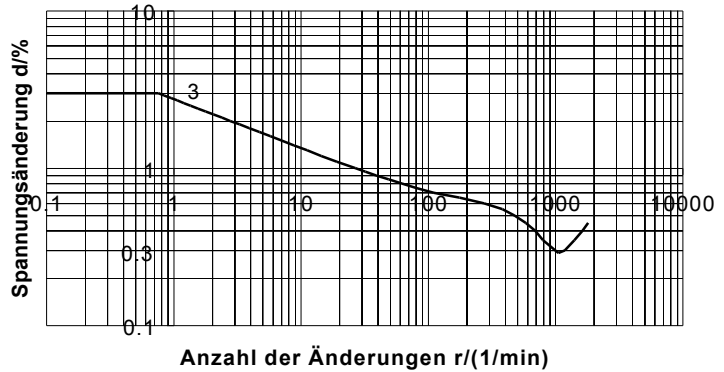


Abb. 1: Kurve gleicher Flickerstärke $P_{st} = 1$
 Fig. 1: Curve with constant flicker value $P_{st} = 1$

4. Übertragung des Störsignals über das elektrische Netz

Je nach Konstellation des elektrischen Versorgungsnetzes können Störsignale unterschiedlich übertragen werden. Die Wirk- und Blindanteile der Netzimpedanzen, ausgedrückt durch die Kurzschlußleistung und durch den Netzimpedanzwinkel, sind die Kenngrößen eines Netzknotenpunktes.

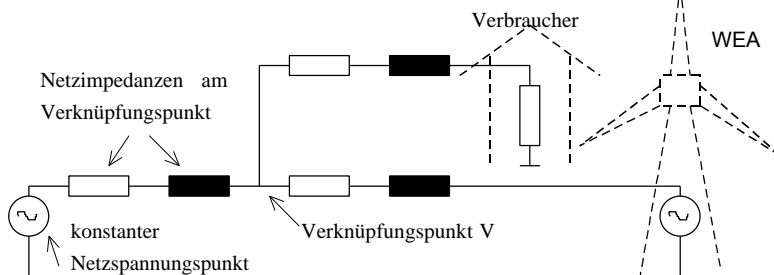


Abb. 2: Beispielhaftes Versorgungsnetz mit angeschlossener WEA
 Fig. 2: Example for an electrical grid with connected wind turbine

Für die Abschätzung der Netzverträglichkeit wird der Verknüpfungspunkt V untersucht, siehe Abb. 2, an dem Verbraucher und Störsender gemeinsam angeschlossen sind. Durch Messungen oder durch spezifische Angaben über das Flickerverhalten der WEA kann der Störpegel für diesen Punkt ermittelt werden. Da die gesamte Störung eine Überlagerung der Einzelstörungen ist, wird einem einzelnen Netz-

teilnehmer nur ein Teil der Gesamtstörung zugebilligt. Eine WEA als Eigenerzeugungsanlage darf daher in der Regel den Gesamtpegel von $P_{st} = 0,46$ nicht überschreiten.

5. Beispiel einer Flickermessung

In Abb. 3 ist beispielhaft der Verlauf der relativen Spannungsänderung d einer WEA am Verknüpfungspunkt für eine angenommene Netzimpedanz aufgetragen. Nach der Frequenzwichtung und der Betragsbildung entsteht das Flickersignal im zeitlichen Verlauf $P(t)$, siehe Abb. 4. Dabei ist zu beobachten, daß der große, aber langsame Anstieg der Spannungsänderung im Bereich zwischen der 35. und 40. Sekunde auf den zeitlichen Flickerverlauf kaum Auswirkungen hat. Dagegen machen sich schnellere Spannungsänderungen deutlich bemerkbar, z. B. in der 42. und 57. Sekunde.

Zur Ermittlung des Flickerstörfaktors P_{st} wird der Flickerverlauf $P(t)$ einer statistischen Auswertung unterzogen. Diese Auswertung besteht zunächst in der Erstellung einer Häufigkeitsfunktion,

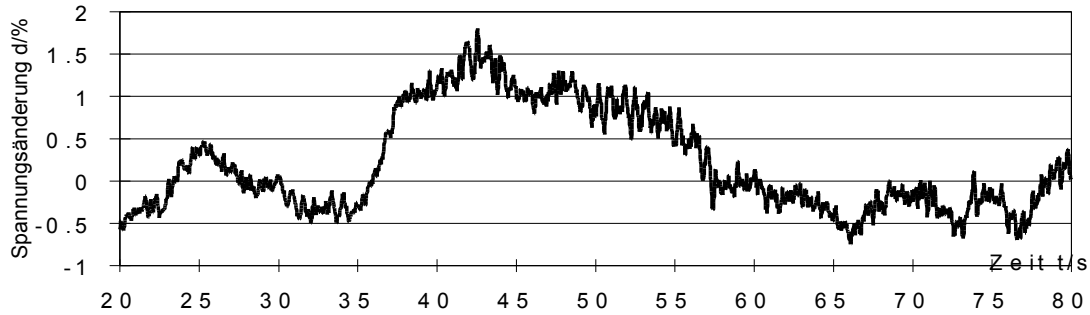


Abb. 3: Verlauf der relativen Spannungsänderung d
 Fig. 3: Timeseries of relative voltage fluctuation d

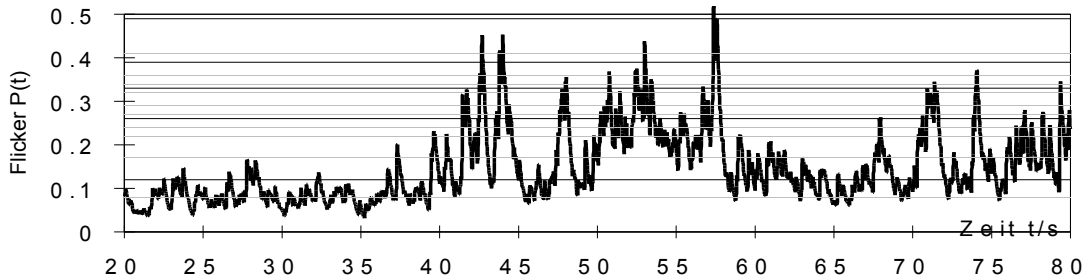


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf des Flickersignals
 Fig. 4: Timeseries of the flickersignal

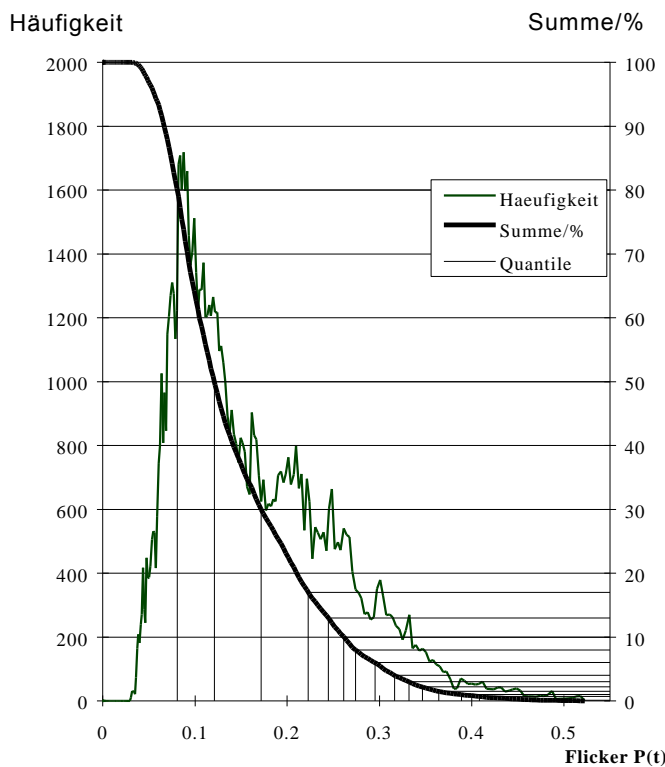


Abb. 5: Häufigkeitsdichtefunktion und Überschreitungswahrscheinlichkeit mit Quantilen
 Fig. 5: Density function and probability distribution function with quantiles

siehe dünne Kurve in Abb. 5. Anschließend werden, beginnend mit dem höchsten Flickerwert, die Häufigkeiten zu einer Summenfunktion addiert, der sogenannten Überschreitungswahrscheinlichkeitsfunktion, siehe dicke Linie in Abb. 5. Um den Flickerwert P_{st} für einen vorgegebenen Zeitintervall zu bestimmen, werden sog. Quantile gebildet, das sind Werte der Summenfunktion mit einer festgelegten Überschreitungswahrscheinlichkeit. Diese Quantile werden gewichtet und addiert. Durch anschließende Wurzelbildung entsteht der Flickerstörfaktor P_{st} .

Um die Ursachen der Störungen analysieren zu können, muß der zeitliche Bezug wieder hergestellt werden. Dabei können die Quantile aus der Überschreitungswahrscheinlichkeitsfunktion in den zeitlichen Verlauf des Flickers von Abb. 4 eingetragen werden. Eine detaillierte Analyse kann nun fortgesetzt werden, indem alle zur Verfügung stehenden Meßgrößen für diesen Bereich betrachtet werden.

6. Ursachen von Flicker bei Windenergieanlagen

Bei Betrieb von WEA entstehen Leistungsschwankungen. Diese Leistungsschwankungen können unterschiedliche Ursachen haben:

- Schalthandlungen
- Turmschatten-, bzw. Turmstau effekt
- Blattwinkelfehler
- Schräganströmung
- Windscherung
- Schwankungen der Windgeschwindigkeit

In Abhängigkeit von der Größe der Leistungsschwankung und von der Häufigkeit bzw. der Frequenz, mit der die Leistungsschwankungen auftreten, wirken sie sich unterschiedlich auf den Flicker aus.

6.1 Schalthandlungen

Zu den Schalthandlungen müssen neben dem eigentlichen Ein- und Ausschalten der WEA auch alle Schalthandlungen während des Betriebs gezählt werden, z. B. Umschaltvorgänge zwischen den Generatorstufen, Schalthandlungen in der Kompensationsanlage oder Schaltvorgänge zwischen Filterstufen.

Schalthandlungen, insbesondere das Einschalten des Generators, erzeugen oftmals hohe Flickerwerte. Wenn die Schalthandlungen selten genug auftreten, können sie bei der Flickerbewertung unberücksichtigt bleiben. Treten Schalthandlungen allerdings häufiger auf, werden diese berücksichtigt und es kann zu einer ungünstigen Flickerbewertung der WEA führen. Bei Blindleistungskompensationsanlagen, die in Abhängigkeit des $\cos \varphi$ oder der Wirkleistung stufig geschaltet werden, sollte die Häufigkeit des Schaltens möglichst klein gehalten werden und die Kondensatoren sollten möglichst sanft einschalten. Das gleiche gilt für WEA mit Wechselrichter, wenn Filter in Stufen schaltbar sind. Generell sollte die Häufigkeit von Schalthandlungen möglichst niedrig gehalten werden. Dieses kann z. B. erreicht werden durch etwas größere Hysteresen bei den Umschaltpunkten von Generatorstufen oder durch Vorgabe von Mindestlaufzeiten bzw. Mindestabschaltzeiten.

6.2 Periodische Leistungsschwankungen

Bei WEA entstehen im normalen Betrieb Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz, d. h. bei einer dreiflügeligen WEA treten z. B. Leistungsschwankungen mit der dreifachen Rotordrehzahl auf. Diese Leistungsschwankungen haben ihre Ursache vor allem in dem sog. Turmstau- bzw. Turmschatteneffekt, d. h. jedesmal, wenn ein Blatt am Turm vorbeistreicht, erfährt die Anlage einen Leistungseinbruch. Aber auch Schräganströmung oder Windscherung erzeugen Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz. Abb. 6 zeigt ein typisches Beispiel für Leistungsschwankungen einer WEA der 500/600 kW Klasse. Neben einer langsamen Änderung der Wirkleistung, hervorgerufen durch die Änderung der Windgeschwindigkeit, zeigt sich eine periodische Leistungsschwankung mit einer Frequenz von 1,5 Hz, entsprechend der dreifachen Rotorfrequenz. Abb. 7 zeigt die Frequenzanalyse dieser Zeitreihe ohne Berücksichtigung des Gleichanteils. Hier wird der starke Einfluß dieser periodischen Leistungsschwankung erkennbar. Für die Beurteilung des Flickers muß die Bewertungskennlinie aus Abb. 1 herangezogen werden. Hierdurch werden die Frequenzen um 8,8 Hz stärker bewertet als niedrigere und höhere Frequenzanteile. WEA erzeugen in der Regel keine großen Frequenzanteile im Bereich von 8,8 Hz. Die typische Blattdurchgangsfrequenz liegt bei 1 Hz bis 2 Hz und ist somit in einem Bereich geringerer Sensibilität der Flickerbewertung.

Die Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz sind charakteristisch für drehzahlstarre WEA und in der Regel Hauptursache für Flicker. Die Größe der Schwankung kann aber bei verschiedenen WEA gleichen Konstruktionsprinzipes (z. B. Stall, direkt netzgekoppelter Asynchrongenerator) sehr verschieden sein. Hier spielt die konstruktive Auslegung der WEA eine wesentliche Rolle, so z. B. der Abstand zwischen Turm und Rotorblatt, der Turmdurchmesser, das Trägheitsmoment des Rotors; aber auch die Steifigkeit der Rotorwelle ist entscheidend.

Aufgrund der geringen Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Rotordrehzahl übertragen drehzahlvariable WEA periodische Leistungsschwankungen des Rotors kaum. Damit entfällt bei diesen Anlagentypen eine wesentliche Ursache für Flicker. Allerdings kann es bei drehzahlvariablen Anlagen andere Ursachen für Flicker geben. Durch die Eingriffsmöglichkeiten der Betriebsführung können z. B. Drehzahländerungen ungewollte Leistungssprünge hervorrufen oder es können auch Schwingungen mit Frequenzen im Bereich der flickerkritischen Frequenz von 8,8 Hz oder höher entstehen. Abb. 8 zeigt hierzu ein Beispiel. Dargestellt sind die normierte Wirkleistung und der Flickerverlauf $P(t)$. Dieser Flickerverlauf nimmt maximale Werte an, wenn sich die Frequenz der Schwingung im Bereich der flickerkritischen Frequenz von 8,8 Hz befindet. Bei gut abgestimmten Systemen lassen sich diese Schwingungen und auch Leistungssprünge durch Regelungseingriffe vermeiden.

Abb. 6: Leistungsschwankungen einer Windenergieanlage

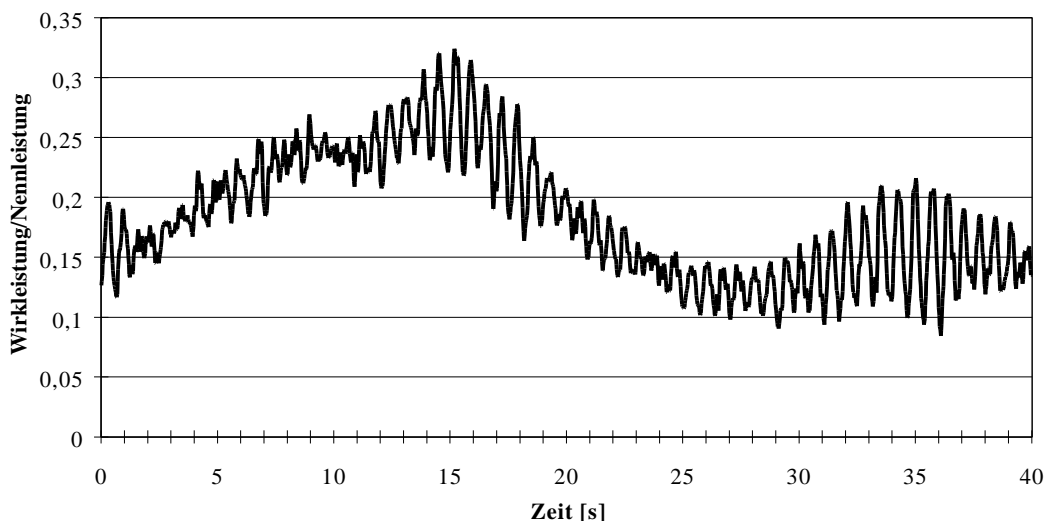


Fig. 6: Fluctuation of active power of a wind turbine

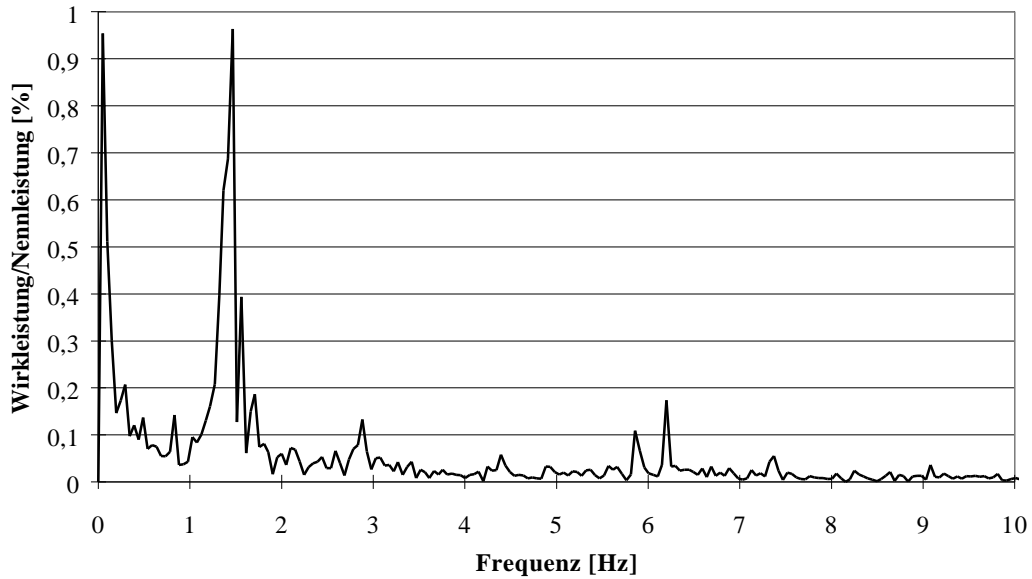


Abb. 7: *Frequenzspektrum der Wirkleistung einer Windenergieanlage*
 Fig. 7: *Frequency spectrum of the active power of a wind turbine*

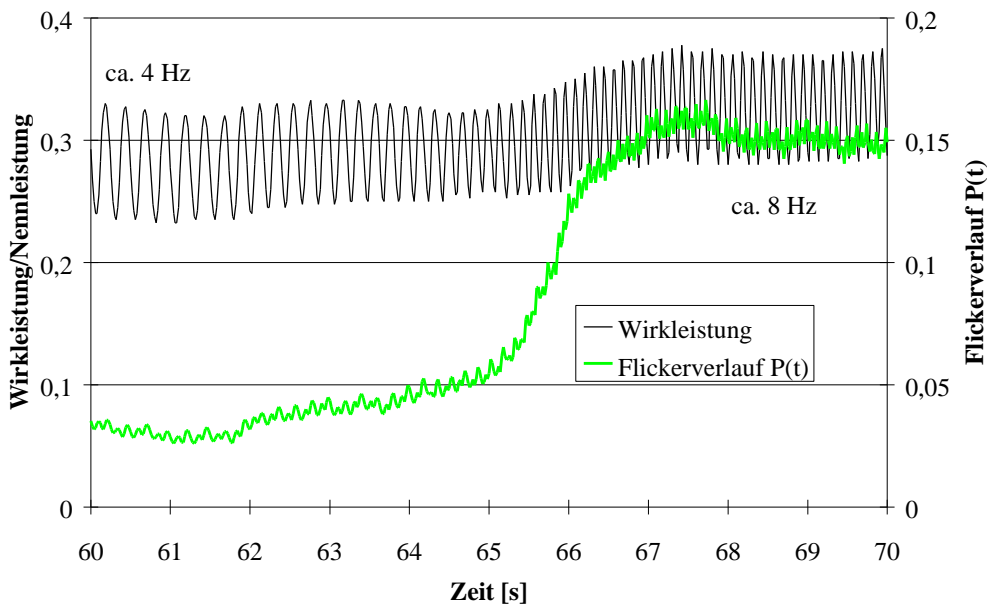


Abb 8: *Schwingungen in der Wirkleistung und Flickerverlauf $P(t)$*
 Fig. 8: *Oscillation of the active power and flicker curve $P(t)$*

6.3 Einfluß des Windes

6.3.1 Windgeschwindigkeit

Bei drehzahlstarrten WEA steigen die Flickerwerte mit zunehmender Wirkleistung und mit zunehmender Windgeschwindigkeit in der Regel an. Oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit bleibt die Wirkleistung durch die Pitch- oder Stallregelung nahezu konstant, der Flicker nimmt aber üblicherweise weiter zu. Dabei kann der Anstieg des Flickers oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit mit der gleichen Steilheit erfolgen wie im Teillastbereich, der Anstieg kann aber auch steiler oder flacher sein. Die eigentliche Ursache für den Anstieg des Flickers ist aber nicht unmittelbar die Windgeschwindigkeit, sondern die Zunahme der periodischen Leistungsschwankungen (Turmschatten-, Turmstaueffekte) mit steigender Windgeschwindigkeit. Abb. 9 zeigt das Verhalten des Flickers bei einer WEA mit direkt netzgekoppeltem Asynchrongenerator.

Bei drehzahlvariablen WEA kann der Flicker im Bereich der Nennwindgeschwindigkeit oder oberhalb davon wieder abnehmen.

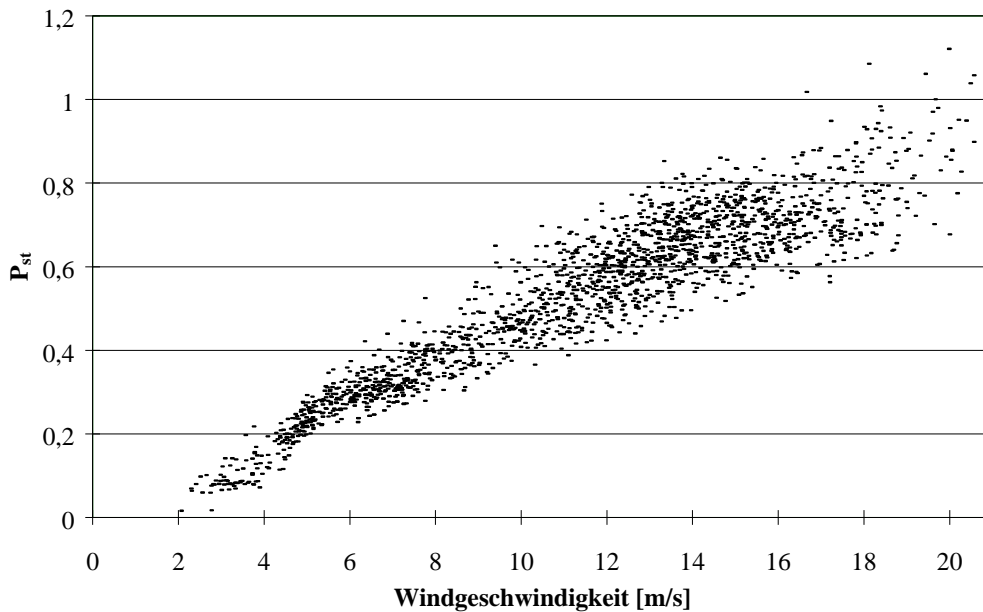
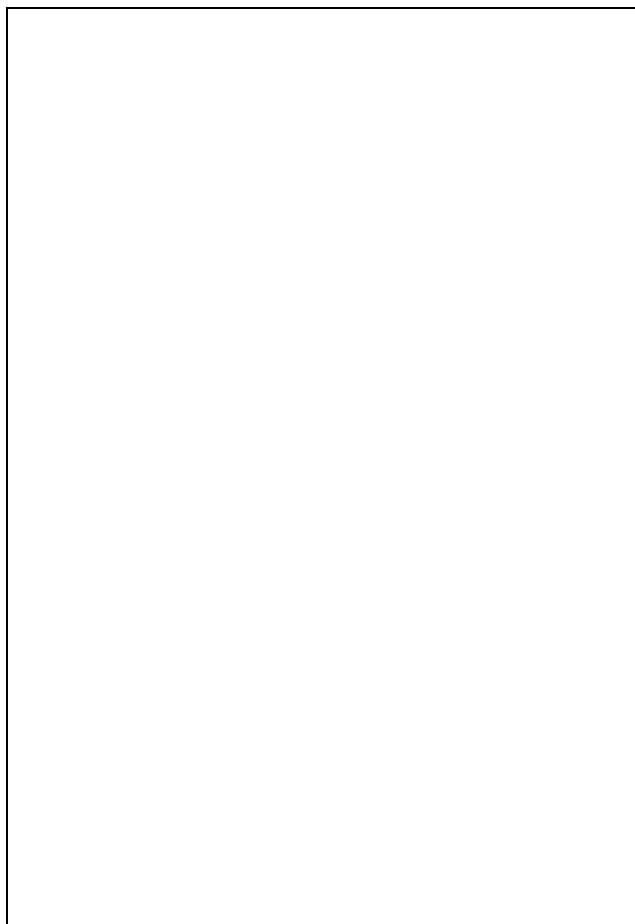


Abb. 9: Flicker in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit
 Fig. 9: Flicker as a function of wind speed

6.3.2 Turbulenzintensität

Windgeschwindigkeitsschwankungen, ausgedrückt durch die Turbulenzintensität des Windes, verursachen Leistungsschwankungen bei WEA. Sehr langsame Windgeschwindigkeitsschwankungen



mit Zykluszeiten im Bereich von Minuten bis zu mehreren Tagen haben keinen Einfluß auf das Flickerverhalten einer WEA. Nur Schwankungen im Sekundenbereich oder kürzer können Auswirkungen auf den Flicker haben. Durch die Größe der vom Rotor überstrichenen Fläche und durch das Trägheitsmoment des Rotors findet eine gewisse Vergleichmäßigung der höherfrequenten Schwankungen statt. Kurzzeitige Leistungsschwankungen übertragen drehzahlvariable WEA kaum, so daß bei diesem Anlagentyp eine Vergleichmäßigung der Leistungsabgabe erfolgt. Erste Meßergebnisse bei unterschiedlichen WEA-Typen zeigen, daß Windgeschwindigkeitsschwankungen in der Regel nur geringen Einfluß auf den Flicker einer WEA haben. Eine deutliche Änderung der Turbulenzintensität des Windes zeigt nur geringe Änderungen im Flicker. Der Einfluß der Windgeschwindigkeitsschwankungen bei WEA, die anlagenspezifisch kleine Flickerwerte aufweisen, ist somit im Verhältnis größer als bei WEA mit anlagenspezifisch schlechtem Flickerverhalten. Die bisherigen Messungen zeigen, daß für Anlagen, bei denen ein

Einfluß der Turbulenzintensität auf den Flicker erkennbar ist, der Flickerpegel in der Regel bereits so klein ist, daß der Flicker bei der Bewertung der Netzverträglichkeit keine Rolle mehr spielt.

Es liegen aber auch gegenteilige Untersuchungen von Risø aus Dänemark vor [3], nach denen die Turbulenzintensität des Windes einen erheblichen Einfluß auf den Flicker hat. Diese Beurteilung beruht auf zwei Messungen in Windparks in Dänemark. In dem einen Windpark traten aus einer Windrichtung (flache Landschaft) nur geringe Turbulenzintensitäten auf und verursachten niedrige Flickerwerte. Aus der anderen Windrichtung traten hohe Turbulenzintensitäten auf, weil ein Hügel den Wind beeinflusste. Damit verbunden waren wesentlich höhere Flickerwerte. Aus dieser Konstellation sollte aber nicht zwangsläufig der Schluß gezogen werden, daß die höhere Turbulenzintensität den höheren Flicker verursacht. Wahrscheinlicher sind hier andere Effekte, wie z. B. eine erhöhte Windscherung, d. h. höhere Windgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen der oberen und der unteren Rotorhälfte. Windscherung verursacht, wie der Turmschatteneffekt, Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz, die flickerkritisch sind.

Bei der zweiten Messung von Risø wurde eine WEA in einem Offshore Windpark untersucht. Hier wurden ebenfalls höhere Flickerwerte gemessen, wenn der Wind vom Land auf das Wasser wehte als umgekehrt. Hier dürfte auch die höhere Turbulenzintensität nicht die Hauptursache für höhere Flickerwerte sein, sondern eher thermische Effekte vom Übergang von Land auf Wasser, die ebenfalls Windscherung verursachen können.

Aus unseren bisher vorliegenden Messungen und auch aus Messungen anderer Deutscher Institute zeigt sich bislang, daß die Turbulenzintensität des Windes nur einen sehr geringen Einfluß auf das Flickerverhalten einer WEA hat. Die Beispiele von Risø machen aber deutlich, daß in diesem Bereich weitere umfangreiche Untersuchungen nötig sind, um verlässlichere Aussagen über den Einfluß des Windes auf den Flicker treffen zu können.

7. Zusammenfassung

Die Flickerbewertung hat ihren Ursprung im menschlichem Sehempfinden. Unterschiedliche Leistungsschwankungen müssen entsprechend der menschlichen Empfindung unterschiedlich bewertet werden. Die größte Empfindlichkeit und damit die kritischste Frequenz liegt bei 8,8 Hz.

WEA erzeugen Flicker durch Leistungsschwankungen. Diese Leistungsschwankungen können verschiedene Ursachen haben. Schalthandlungen erzeugen in der Regel hohe Leistungsschwankungen und damit hohe Flickerwerte, treten allerdings nur relativ selten auf. Leistungsschwankungen mit der Blattdurchgangsfrequenz sind charakteristisch für drehzahlstarre WEA. Sie sind eine der Hauptursachen für Flicker bei diesem Anlagentyp. Windgeschwindigkeitsschwankungen haben nur geringen Einfluß auf den Flicker bei WEA, allerdings besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf.

In einem der nächsten DEWI-Magazine wird die Bewertungsmethode für Flicker bei WEA nach der Richtlinie [2] erläutert. Dabei soll näher auf den Anlagenflickerbeiwert c und auf den flickerrelevanten Winkel φ_f eingegangen werden.

8. Literatur

- [1] DIN VDE 0846 Flickermeter. Teil 0: Beurteilung der Flickerstärke. August 1994; Teil 2: Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation. März 1994
- [2] Richtlinie zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften einer WEA hinsichtlich der Netzanbindung. 15.11.1996, Rev. 9. Hrsg.: Deutsches Windenergieinstitut GmbH, Wilhelmshaven, WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH, Kaiser-Wilhelm-Koog, WINDconsult GmbH, Sievershagen
- [3] Flicker Emission Levels from Wind Turbines. P. Sørensen et al., Risø. Wind Engineering Vol. 20 No.1 1996.