

# Ultraschall- und Magnetpulverprüfungen an Komponenten für Windkraftanlagen

Wolfram A. Karl DEUTSCH, Frank BARTHOLOMAI, Stefan KLEIN, Stefan KIERSPEL  
KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal  
Tel.: (+49-202) 7192-0, Fax: (+49-202) 714-932, info@karldeutsch.de,  
www.karldeutsch.de

**Kurzfassung.** Die deutsche Industrie ist weltweit führend im Bereich der Stromerzeugung mittels Windkraft. Die dafür erforderlichen Komponenten, insbesondere die Getriebe, unterliegen starken Belastungen. Anders als bei konventionellen Kraftwerken sind die Drehzahlen sehr stark schwankend und nach Windmangel erfolgt ein erneuter Hochlauf mit enormen Beanspruchungen für diese Komponenten.

Solche Rahmenbedingungen haben auch für die ZfP eine Vielzahl von Prüfaufgaben nach sich gezogen. Bereits für die Getriebe-Rohlinge kommt die Ultraschallprüfung als Volumenprüfverfahren zum Einsatz. Die Oberflächengüten sind in Bezug auf die minimal auffindbaren Fehlergrößen ein limitierender Faktor. Oft wird in reiner Senkrecht-Einschallung auf 2 bis 3 mm KSR geprüft. Ungleich empfindlicher (0,5 bis 1 mm KSR) kann die Prüfung im bearbeiteten Zustand erfolgen, wobei aber komplex geformte (verzahnte) Bereiche schwer zugänglich sein können. Senkrecht- und Winkeleinschallungen kommen zur Anwendung. Die Kombination beider Prüfschritte (im Roh- und Endzustand) ist ein sinnvolles Vorgehen, um eine hohe Produktqualität sicherzustellen.

Zahnräder für Hochleistungsgetriebe werden im Endzustand mit der Magnetpulver-Rissprüfung (zumindest im verzahnten Bereich) auf Oberflächenrisse untersucht. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Sonderprüfmaschinen nach Kundenspezifikation entwickelt. Wichtige Faktoren sind eine kurze Prüfzeit durch eine kombinierte Prüfung (mindestens zwei Feldkreise und daher das Auffinden aller Fehlerrichtungen in einem Prüfdurchgang) und die Ergonomie beim Bauteilhandling. Eine gute Zugänglichkeit der zu inspizierenden Oberflächenbereiche ist in Einklang zu bringen mit den komplexen Geometrien und den außergewöhnlich hohen Bauteilgewichten.

Eine weitere interessante Aufgabe ist die Entmagnetisierung (nicht Prüfung) spezieller Windkraft-Bauteile durch eine Spulenanordnung. Dieser Prozessschritt ist eine wichtige Vorbedingung für die weitere mechanische Bearbeitung.



**Bild 1: Alpha Ventus.** 45 Kilometer vor der Küste der Insel Borkum ging im April 2010 der erste deutsche Offshore-Windpark Alpha Ventus in Betrieb [1].

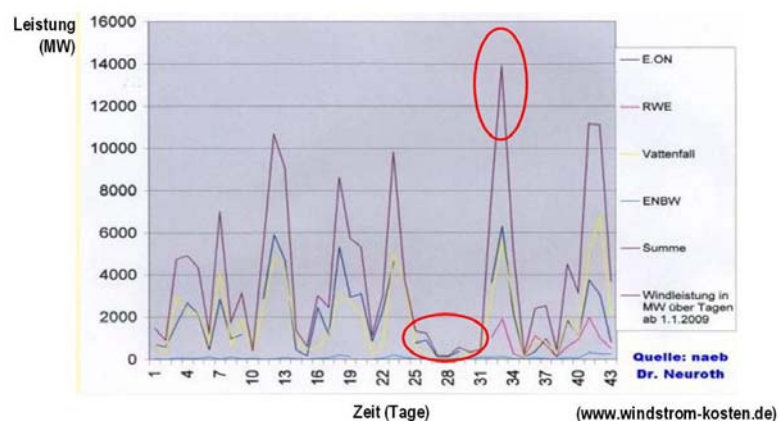
## Einführung

Die weltweit installierte Leistung von Windkraftanlagen hat sich in den letzten Jahren auf 158 MW deutlich erhöht [2]. Deutschland steht derzeit mit knapp 28 MW an dritter Stelle nach den USA und China. Spanien folgt an vierter Stelle; weitere Länder weisen deutlich geringere installierte Leistungen auf [3]. Diese Entwicklung in Deutschland ist politisch gewollt und wird stark gefördert über subventionierte Strompreise. Offshore-Windparks sind das einzige Segment alternativer Energien, bei welchem in den nächsten Jahren ein deutliches Wachstum prognostiziert wird. Durch die starke Förderung dieses Segments ist die deutsche Industrie entsprechend erfolgreich tätig. Man schätzt, dass 25 % der weltweiten Wertschöpfung im Windkraftsegment aus Deutschland kommt und dass 100 000 Arbeitsplätze in Deutschland davon abhängen [2].

Die Windkraftanlagen haben sich in den letzten Jahren bzgl. Leistung und Bauform deutlich verändert [2]. Während erste Anlagen in den 1980ern Nabenhöhen von 30 m und Rotordurchmesser von 15 m aufwiesen, sind derzeit Nabenhöhen von bis zu 135 m und Rotordurchmesser bis zu 126 m gängig. Die Leistung hat sich im gleichen Zeitraum von 30 kW auf 6 MW erhöht [2]. Bei zukünftigen Anlagen sind Leistungen von bis zu 10 MW avisiert. Bei solchen Leistungsdaten ist verständlich, dass die Beanspruchungen an die verbauten Komponenten ebenfalls deutlich steigen.

Die Baukosten und Betriebskosten nach Kraftwerkstyp sind leider nur schwer zu ermitteln, weil die meisten Informationen im Internet entweder von Befürwortern oder von Gegnern der Windenergie eingestellt werden. Letztendlich sind alle Energieformen subventioniert und die Kosten abhängig von vielen Faktoren. Wenn die Entsorgung von nuklearem Abfall (z.B. am Endlager Asse) durch den Steuerzahler getragen wird und nicht durch die Energieerzeuger, verändern sich die Zahlen dramatisch. Gleiches gilt für die Windenergie: Die Kosten für neue flexible bzw. intelligente Netze, die Anschlusskosten bei Offshore-Windparks und die Kosten, die durch die starken Leistungsschwankungen entstehen, fehlen in vielen Statistiken. Zumindest erscheint die Windenergie bzgl. der Baukosten einigermaßen wettbewerbsfähig [4], wobei ein zukünftig starker Anstieg der Kosten für fossile Brennstoffe (den der Autor prognostiziert) die Zahlen für die Windkraft günstiger ausfallen lassen würde.

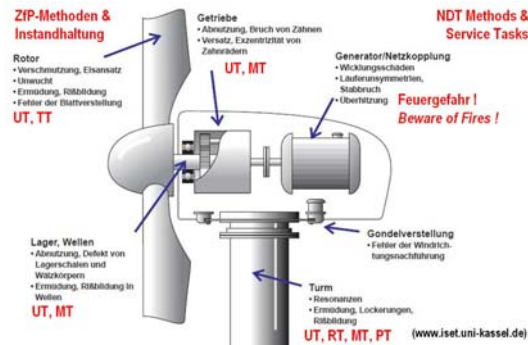
Die Leistungsschwankungen der Windenergie sind sicherlich die größte Schwachstelle dieser Technik. Obwohl durch eine größere Verbreitung von Windkraftanlagen ein statistischer Ausgleich denkbar erscheint, sind die Onshore-Standorte in Deutschland prinzipiell ausgereizt, weisen ein starkes Nord-Süd-Gefälle auf und decken sich nicht mit den Ballungszentren der deutschen Industrie.



**Bild 2: Leistungsschwankungen Windenergie.** Die eingespeiste Leistung in den ersten 44 Tagen des Jahres 2009 wies ein ausgeprägtes Minimum um den 28. Januar und ein Maximum Anfang Februar auf.

Windkraftfreundliche Statistiken gehen davon aus, dass ca. 40 % der installierten Leistung im Mittel zur Verfügung stehen und ca. 20 % garantiert werden können. Diese Aussage deckt sich nicht mit dem obigen Bild und auch nicht mit einer ähnlich chaotischen Kurve für den Januar 2008, die kürzlich von der Firma RWE bei einem Symposium gezeigt wurde [7].

## 1. Komponenten und Prüfaufgaben



**Bild 3: Komponenten & Prüfmethode.** Diese Grafik gibt einen guten (aber sicherlich nicht vollständigen) Überblick der zu prüfenden Komponenten [6].

Bei jeder Form der Energieerzeugung sind auch die einzusetzenden Ressourcen zu betrachten. Bei fossilen Brennstoffen und entsprechenden Kraftwerken sind die Brennstoff-Kosten sicherlich ausschlaggebend. Bei der Windenergie sind vor allem die verbauten Materialien nennenswert: In den 20 000 in Deutschland errichteten Windkraftanlagen ist immerhin fast so viel Beton und Stahl verbaut wie in den 38 Braunkohlekraftwerken, obwohl diese eine 4-fach größere Nennleistung aufweisen [8]. Gerade weil viele metallische Komponenten verbaut werden (Türme und Getriebe), kommen die klassischen ZfP-Verfahren häufig zum Einsatz.

Die Flügel stellen Herausforderungen dar, denen mit neuen Prüfmethode (z.B. Thermografie) aus dem Luftfahrtbereich begegnet werden soll [9]. Verfahren der Schwingungsanalyse und in anderen Industriesegmente gängige Systeme zur Betriebsüberwachung (CMS: Condition Monitoring Systems) werden zukünftig im Segment der Windkraftanlagen eine größere Rolle spielen müssen, um Schäden im laufenden Betrieb möglichst zu vermeiden [10].

Der weitere Text wird sich auf Prüfaufgaben zur Ultraschall- und Magnetpulverprüfung an Komponenten für Windkraftanlagen beschränken, die bei der Neuproduktion entstehen. Da viele Schadensfälle durch Getriebedefekte verursacht werden, sind die Anforderungen an die entsprechenden Komponenten entsprechend gestiegen. Besonders das Getriebe im Antriebsstrang für die Leistungsübertragung ist hier zu nennen.



**Bild 4: Getriebe in Windkraftanlage.** a) Getriebe zur Verstellung der Rotorblätter (A), Getriebe im Antriebsstrang (B) und Getriebe zur Ausrichtung der Gondel entsprechend der Windrichtung (C) [11], b) ein Größenvergleich zeigt die imposanten Ausmaße dieser Komponenten [1].

## 2. Ultraschallprüfung an Getriebekomponenten

Die verzahnten Bereiche von hochbelasteten Getriebekomponenten werden mit Ultraschall geprüft. Da man sehr oberflächennah und empfindlich prüfen möchte, kommt ein SE-Prüfkopf mit einer Frequenz von 10 MHz, einer Fokustiefe von 4 mm und einer Schwingergröße von je 4 mm x 2 mm zum Einsatz (Typ TSE4.2/4PB10).



**Bild 5: Prüfanordnung.** Ultraschall-Prüfung an Verzahnung einer Getriebewelle.

Die Empfindlichkeitsjustierung erfolgt an einem treppenförmigen Testkörper mit 1-mm-Flachbodenbohrungen in verschiedenen Tiefenlagen. Über einen Empfindlichkeitszuschlag wird die DAC-Kurve für 0,5 mm KSR auf dem Ultraschallgerät erzeugt und als Fehlerschwelle genutzt.



**Bild 6: Justierung.** Anhand des Testkörpers mit 1 mm KSR in verschiedenen Tiefenlagen wird die DAC-Kurve auf dem Prüfgerät erzeugt bzw. regelmäßig überprüft.

## 3. Magnetpulver-Rissprüfung an Getriebekomponenten

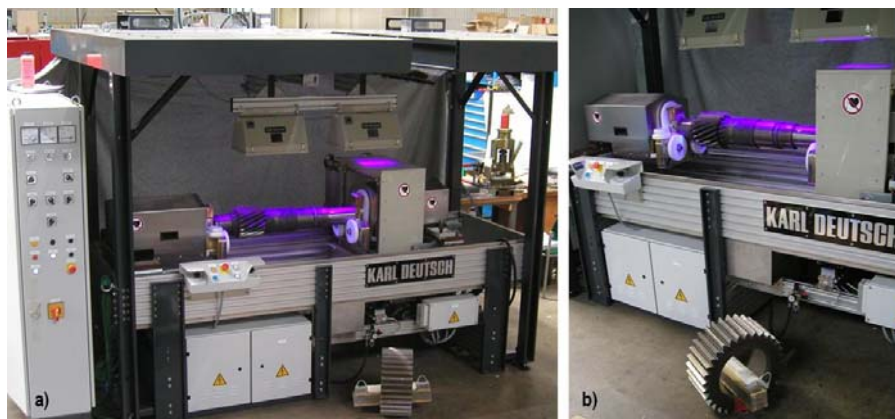
Komponenten für die Windenergieerzeugung stellen durch die unterschiedlichen Bauteilgeometrien und mitunter hohen Bauteilgewichte an den Maschinenbau hohe Anforderungen. Oftmals ist mehr als eine Maschine pro Kunde erforderlich, um sämtliche relevanten Komponenten zu prüfen.

Für die Stelter Zahnradfabrik in Bassum bei Bremen wurde eine DEUTROMAT-Prüfanlage für Windkraft-Zahnräder gebaut. Die Anlage wurde für Bauteile mit Durchmessern von 0,5 m bis zu 1,8 m und einem Gewicht bis zu 5 000 kg ausgelegt. Zunächst werden die Zahnräder über eine Drehvorrichtung in der Maschine zentrisch positioniert. Ein Antrieb dreht das Prüfteil Zahn für Zahn an einer Magnetisierungsstation vorbei (Kreuzjoch, bestehend aus horizontalem und vertikalem Jochpaar für Längs- und Querrisse). Nach einer vollen Umdrehung kann die Verzahnung auf Risse aller Richtungen inspiziert werden. Um die komfortable Betrachtung von Zahnrädern mit stark unterschiedlichen Durchmessern zu ermöglichen, ist der Abstand der Drehvorrichtung zum vorderen Rand des Maschinengestells einstellbar. So ist sichergestellt, dass der Prüfer zur Betrachtung immer einen ergonomisch günstigen Abstand zum Bauteil hat.



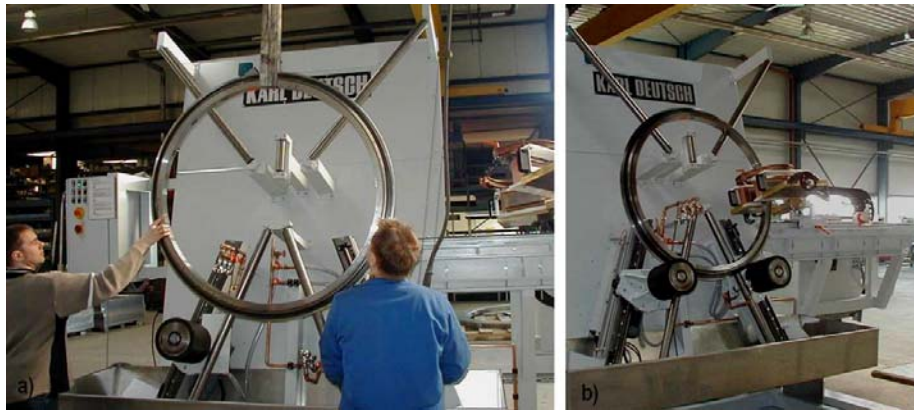
**Bild 7: MT-Prüfung an Zahnrad.** a) Zustellung und Winkelverstellung der horizontalen Magnetisierjochs, b) die MT-Prüfung erfolgt in einer vollen Umdrehung des Zahnrads (die Drehrichtung ist durch den Pfeil gekennzeichnet), die Auswertung unter UV-Licht erfolgt durch den Prüfer.

Wellen mit Längen oberhalb von 900 mm werden in Maschinen mit Überlaufspule geprüft. Ringe mit ausreichend großem Innendurchmesser können in der gleichen Maschine über die ebenfalls verbauten seitlichen Magnetjochs und mit einem Magnetisierdorn geprüft werden.



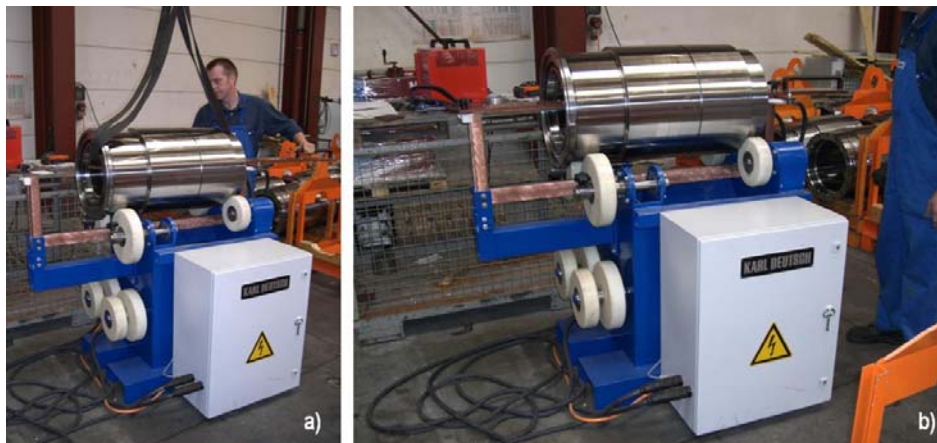
**Bild 8: MT-Prüfung an Wellen und Ringen.** a) Gesamtansicht der Prüfmaschine mit pneumatisch zu öffnendem Dach (Kranbeladung) und pneumatisch positionierbaren UV-Leuchten, b) Prüfung von Wellen und kleineren Ringen entweder mit seitlichen Jochs oder mit Überlaufspule (zwei Varianten zur Erzeugung des Längsfeldes).

Große Lagerringe werden mit einer Kombination von Klappspule und Jochpaar geprüft. Dazu müssen die Ringe mindestens einmal vollständig gedreht werden. Aufgrund der einfacheren Beladung per Kran wurde eine fast vertikale Prüfposition gewählt.



**Bild 9: MT-Prüfung an großen Ringen.** a) Kranbeladung der Prüfmaschine, b) Prüfung von Großringen mit Klappsple und Jochpaar.

Für mehrere unserer Kunden wurden Entmagnetisier-Einrichtungen für Hohlwellen geliefert. Deren gemeinsamer Endkunde verlangt einen sehr geringen Restmagnetismus. Dies gelang über eine Hochstromspule, die das Bauteil umschließt. Die Wechselfeld-Magnetisierung wird über einen Regelkreis definiert heruntergefahren.



**Bild 10: Entmagnetisierung an Hohlwellen.** a) nach der Kranbeladung schließt der Prüfer manuell die Hochstrom-Spule, b) Entmagnetisiervorgang an Hohlwelle.

#### 4. Schweißnahtprüfung an Windkrafttürmen

Verschiedene Konstruktionsprinzipien für Windkrafttürme ziehen unterschiedliche ZfP-Methoden nach sich. Viele Türme werden aus Großrohr-Segmenten zusammengesetzt. Im Offshore-Bereich erhalten sie noch einen charakteristischen Unterbau und werden Tripods genannt. Viele Firmen, die solche Türme fertigen, haben sich küstennah angesiedelt, um kurze Wege zu den Offshore-Windparks zu gewährleisten.

Die Firma AMBAU war mit der Lieferung aller 12 Türme für den ersten deutschen Offshore-Windpark beauftragt. Viele Schweißnähte (Y- und K-Nähte) am Standort Gräfenhainichen werden mit Ultraschallgeräten vom Typ ECHOGRAPH 1090 geprüft. Winkelprüfköpfe mit Frequenzen 2 MHz bzw. 4 MHz sowie Einschallwinkeln von 45°, 60° und 70° waren im Einsatz. Die Wandstärken betragen typischerweise 10 – 70 mm.



**Bild 11: Windkrafttürme.** Fertigung bei der Firma AMBAU.

Das Erndtebrücker Eisenwerk hat eigens ein Komponentenwerk in Rostock errichtet: die EEW Special Pipe Constructions. Viele Schweißnähte werden dort manuell geprüft. Wenn aber Großrohrsegmente verbaut werden, kommen diese aus einem der Rohrwerke der EEW-Gruppe und werden dann automatisiert geprüft. Insgesamt vier Ultraschall-Schweißnahtprüfanlagen vom Typ ECHOGRAPH-SNUL sind bei der EEW-Gruppe weltweit im Einsatz, davon zwei im Stammwerk Erndtebrück.



**Bild 12: Schweißnahtprüfanlage.** Prüfanlage im Werk Erndtebrück-Malaysia mit zehn Prüfköpfen zur Längsfehler-, Querfehler- und Dopplungsprüfung, Empfindlichkeitsjustierung mit einer Blechschale.

## Fazit und Ausblick

Der Ausbau der Windkraft-Energie wird durch die politischen Rahmenbedingungen weiterhin positiv beeinflusst. Die schwankende Verfügbarkeit stellt jedoch einen großen Schwachpunkt dieser Technik dar. Wären geeignete Techniken zur Speicherung elektrischer Energie verfügbar, könnte man dieses Manko besser ausgleichen. Lösungen, die einem Industriestandort wie Deutschland gerecht würden, sind derzeit nicht absehbar [7].

Der Autor will nicht missverstanden werden: Jede Form der Energieerzeugung sollte untersucht, ggfs. gefördert und genutzt werden. Ein wichtiger Aspekt für die nähere Zukunft sollte das Einsparen von Energie und ein verantwortungsvoller Umgang mit den Ressourcen sein. Was im privaten Umfeld inzwischen weit verbreitet ist (Wärmedämmung, Solarkollektoren für Warmwasser, Wärmepumpen etc.), wird im industriellen Umfeld oft nur zögerlich angegangen.

Dennoch müssen für einen Industriestandort wie Deutschland Rahmenbedingungen wie wettbewerbsfähige Energiepreise und sichere Verfügbarkeit sicher gestellt werden. Insellösungen und Entscheidungen einzelner Länder (Ausbau Windkraft, Rückbau Kernkraft, Baustopp Kohlekraftwerk Datteln) werden sich in einem globalen Markt schnell auswirken und auch die energieintensive Schwerindustrie und Energieversorger zu entsprechenden Standortentscheidungen bringen.

Neue Bauformen für Windkraftanlagen werden sowohl die Leistung pro Anlage steigern können, als auch Lösungen für den privaten Einsatz bieten [12, 13]. Für die zerstörungsfreie Prüfung liefert die Energieerzeugung mit Windkraft viele neue Prüfaufgaben, die Anlass für die Erstellung dieses Beitrags waren. Der Text konzentriert sich auf Anwendungen der Ultraschall- und Magnetpulver-Prüfung an Komponenten während der Fertigung und enthält nur Literaturhinweise auf Prüfkonzepte, die während des Betriebs einer Windkraftanlage zum Tragen kommen.

## Referenzen

- [1] Webseite und Bilderarchiv zum ersten deutschen Offshore-Windpark Alpha Ventus [www.alpha-ventus.de](http://www.alpha-ventus.de) bzw. <http://bildarchiv.alpha-ventus.de>
- [2] Internetseite des VDMA Power Systems Bundesverband Windenergie e. V. [www.deutsche-windindustrie.de](http://www.deutsche-windindustrie.de)
- [3] Internetseite des Bundesverband WindEnergie e.V. [www.wind-energie.de](http://www.wind-energie.de)
- [4] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie – zum Thema Kraftwerk [de.wikipedia.org/wiki/kraftwerk](http://de.wikipedia.org/wiki/kraftwerk)
- [5] Internetseite des Vereins NAEB (Nationale anti-EEG-Bewegung, EEG = Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich) e.V. in Berlin [www.windstrom-kosten.de](http://www.windstrom-kosten.de)
- [6] Internetseite des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel [www.iset.uni-kassel.de](http://www.iset.uni-kassel.de)
- [7] Symposium zur Energie-Versorgung, -Sicherheit und Effizienz, Bergische Universität Wuppertal, Vortrag Jörg Kerlen (RWE Power AG Essen): Energieversorgungssicherheit — eine Selbstverständlichkeit?, 18. Mai 2010.
- [8] Symposium zur Energie-Versorgung, -Sicherheit und Effizienz, Bergische Universität Wuppertal, Vortrag Dr. Stefan Bringezu (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH): Ressourcenaufwand der Energieerzeugung, 18. Mai 2010.
- [9] Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie, A. Jüngert, C. Große (Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart), J. Aderhold, P. Meinschmidt, F. Schlüter (WKI Fraunhofer Institut für Holzforschung, Braunschweig), T. Förster, T. Felsch, N. Elkmann (Fraunhofer IFF, Magdeburg), M. Krüger (Smartmote, Stuttgart), O. Lutz (Sachverständigenbüro Otto Lutz), Fachbeitrag in der DGZfP-Zeitung, Juni 2009.
- [10] Schäden durch Schwingungen nicht im Griff, Artikel in den VDI-Nachrichten anlässlich einer VDI-Tagung in Hannover, siehe auch [www.windenergietagung.de](http://www.windenergietagung.de), Februar 2010.
- [11] Technik-Lexikon im Internet (spanisch / englisch) [www.petervaldivia.com](http://www.petervaldivia.com)
- [12] Windkraftanlagen für den privaten Einsatz [www.earth4energy.com](http://www.earth4energy.com)
- [13] Umfassender Überblick und Historie zur Energieerzeugung mit Windkraft [www.buch-der-synergie.de](http://www.buch-der-synergie.de)