

Effizienzsteigerung von Windenergieanlagen durch neuartige LiDAR-Systeme

Beitrag zum Symposium „EnergieCampus 2015“ der Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg: „Wie geht Klimaschutz morgen?“

Dipl.-Ing. Maik Fox

Arbeitsgruppe Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Karlsruhe School of Optics & Photonics (KSOP)

maik.fox@partner.kit.edu

Adresse Institut:	Besucher	Engesserstraße 5 (Gebäude 30.10) 76131 Karlsruhe
	Postanschrift	Postfach 6980 76049 Karlsruhe

Inhalt

Umfeld und Stand der Technik.....	1
Idee und Lösungsansatz	2
Nutzen für Windenergieanlagen und Energiegewinnung.....	3
Ertragssteigerung	3
Lastreduzierung bei besonders großen Rotoren.....	3
Innovative Ansätze und Forschungsziele	4
Stand der Forschung und bisherige Ergebnisse	4
Ausblick	5
Zusammenfassung.....	5
Danksagungen	5
Quellen (Auszug)	5

Umfeld und Stand der Technik

Wer träumt nicht davon, sich einen kleinen Blick in die nahe Zukunft zu erhaschen und mit einem Vorsprung gegenüber dem Unbekannten zu entscheiden? Auch wenn diese Frage für die menschliche Erfahrung eher in den Bereich der Philosophie gehört, findet sich im Bereich der Maschinen doch die ein oder andere Möglichkeit zur Realisierung dieser Vision.

Eine Windenergieanlage (WEA) soll uns als Beispiel und Motivation für die vorliegende Arbeit dienen. Ein solche, in der Industrie auch als „Mühle“ bezeichnete, Anlage zur Gewinnung erneuerbarer Energie zeichnet sich nach aktuellem Stand der Technik überraschenderweise dadurch aus, dass sie in Hinblick auf ihren wichtigsten Betriebsparameter, den Wind, nur einen Blick in die Vergangenheit besitzt. Die auf der Gondel hinter den Rotorblättern angebrachten Windmesser, die entweder klassisch als Schalenanemometer oder modern als Ultraschallanemometer ausgeführt sind, kämpfen mit den Turbulenzeffekten der eigenen Maschine. Die Messwerte der Anemometer sind nur nach langer Mittelung im Bereich von 10 Minuten oder mehr nutzbar. Entsprechend werden ihre Daten hauptsächlich bei Maschinenstillstand für die Entscheidung genutzt, ob ausreichend Wind vorhanden ist, um die WEA erfolgreich anzufahren.

Im Produktionsbetrieb mit drehenden Blättern kann zwar über bekannte Zusammenhänge die Windgeschwindigkeit aus der Rotordrehzahl und Generatorleistungsabgabe geschätzt werden. Jedoch ist dabei zu beachten, dass sich ein Mittel über die gesamte Rotorfläche ergibt. Zudem weist das Wind-Rotor-Generator-System aufgrund der großen Masse eine hohe Totzeit auf, die eine verspätete Reaktion auf veränderte Windverhältnisse nach sich zieht.

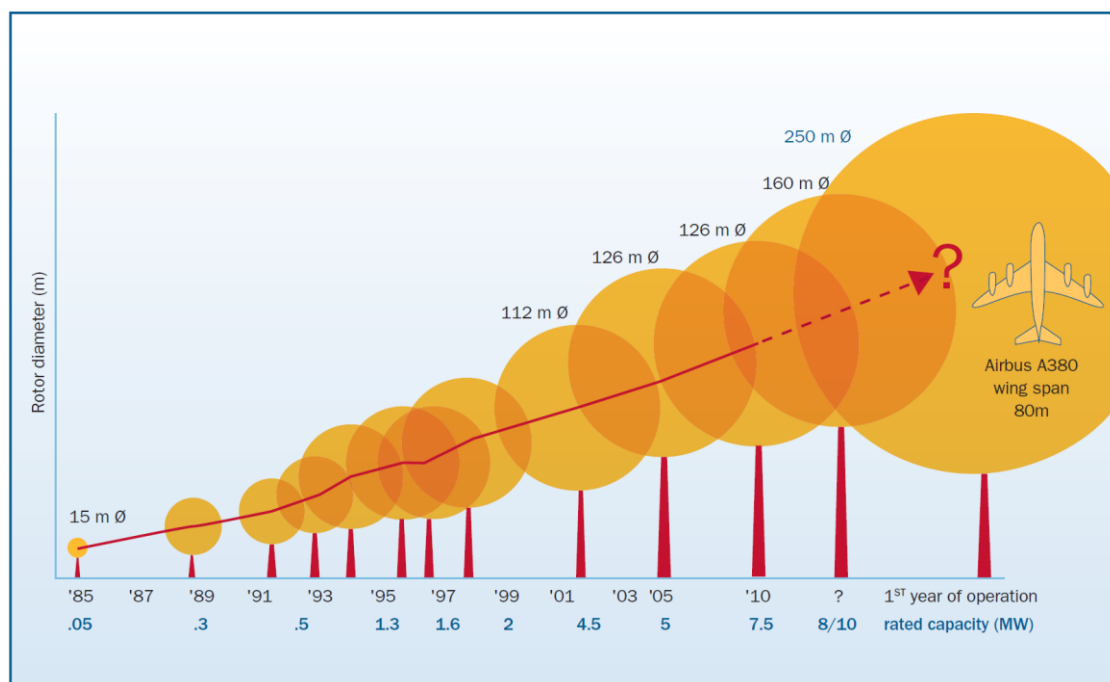


Abbildung 1: Größen- und Leistungsentwicklung von Windenergieanlagen
(Quelle: UpWind, „Design Limits and Solutions for very large Wind Turbines“ (2011))

Windenergieanlagen werden immer größer, siehe Abbildung 1. Rotordurchmesser und Turmhöhe steigen, um den vorhandenen Wind immer besser in Strom wandeln zu können. Die länger werdenden Rotorblätter werden dabei auch immer schwerer, da sie ihrem eigenen gesteigerten Gewicht und durch die erhöhte Angriffsfläche auch immer mehr den Einflüssen des Winds gerecht werden müssen. Die Belastung der Lager wird ebenso entsprechend höher.

Idee und Lösungsansatz

Wie kann man nun der WEA ermöglichen, die real vorherrschenden Windverhältnisse zu messen? Oder findet sich ein Weg, wie man sogar eine sichere Kurzzeitvorhersage für den kommenden Wind erstellen kann? Für die Messung des aktuellen Windes gibt es seit kurzem den Ansatz, ein Ultraschallanemometer direkt in der Nabe zu montieren, um knapp vor der Turbulenz zu messen (ROMO Wind). Somit kann zwar die angesprochene Totzeit vermieden werden, eine Möglichkeit zur Reaktion auf Böen fehlt der WEA allerdings noch. Die vorhandenen Stellmechanismen (vor allem für den Rotorblattanstellwinkel) erlauben keine instantane Reaktion. Die daher vorteilhaftere Messung des zukünftigen Windes bedarf allerdings technologisch aufwändigerer Lösungsansätze.

Hier bietet sich als Alternative mit deutlich erhöhtem Reichweitenspektrum ein optisches Verfahren an, genauer ein sogenanntes Doppler-LiDAR (Light detection and ranging). Der aus der Akustik bekannte und hier namensgebende Doppler-Effekt tritt auch beim Einsatz von auf Laserstrahlung basierender Messtechnik auf und ist für die Geschwindigkeitsermittlung in entsprechend aufgebauten Systemen nutzbar.

Dieser Typ Geschwindigkeitsmesssysteme ist für den Einsatz in der Meteorologie mit Reichweiten im Kilometerbereich und auch zur Standortexploration für neue Windparks am Markt etabliert. Dies zeigt die Machbarkeit einer entfernten Windmessung, jedoch verhindern Gerätepreise weit über 100.000 € einen seriemäßigen Einsatz auf Windenergieanlagen zur individuellen Optimierung. Die verfügbaren Geräte sind außerdem hauptsächlich als eigenständige Messsysteme entwickelt und nicht als Sensor für Regelungssysteme gedacht.

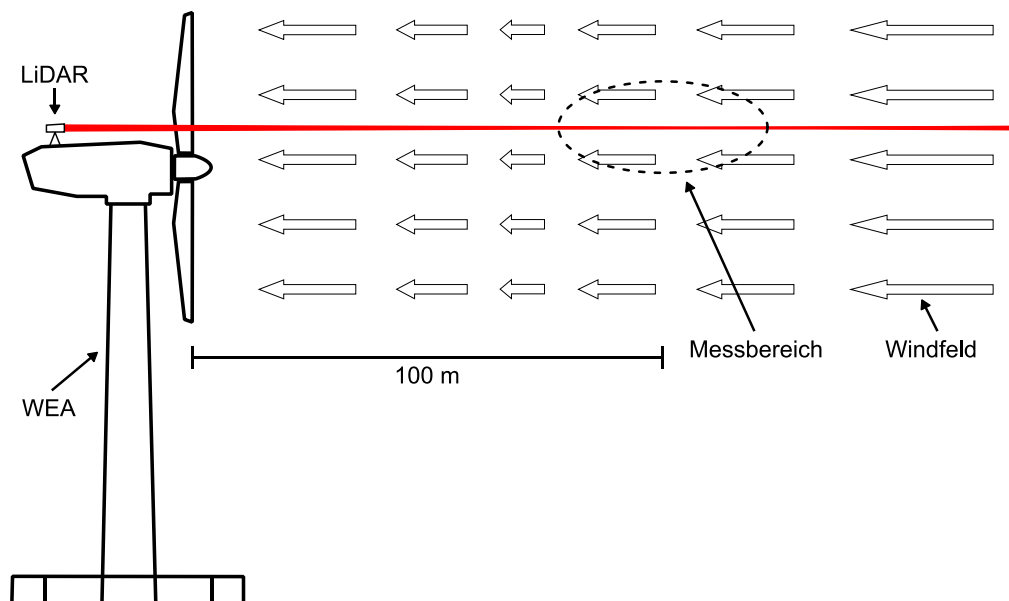


Abbildung 2: Einsatz eines Wind-LiDAR-Systems zur Windenergieanlagen-Regelung

Um nun die Windvorhersage und damit die Anlagenoptimierung in Zukunft zu ermöglichen, bietet sich die Forschung an einem neuartigen Sensorsystemkonzept an. Es soll zum einen die angesprochenen Vorteile der entfernten Windmessung bieten, zum anderen aber auch wirtschaftlich interessant für den Serieneinsatz auf Windenergieanlagen sein, siehe Abbildung 2. Dies ist Intention und Thema der hier vorgestellten wissenschaftlichen Arbeit. Die folgenden Kapitel zeigen die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der LiDAR-Winddaten.

Nutzen für Windenergieanlagen und Energiegewinnung

Die vorgestellte Idee der Windmessung in einer gewissen Entfernung vor einer WEA erlaubt mehrere potentielle Einsatzzwecke, die unterschiedliche Aspekte des Anlagenbetriebs optimieren können. Dabei handelt es sich um eine Steigerung des produzierten Stroms (Effizienzsteigerung), um Vermeidung von Ausfällen und Verminderung des Verschleißes (Belastungsreduktion) und um das kontinuierliche Monitoring der Anlage (Früherkennung).

Ertragssteigerung

Allein durch die bessere Ausrichtung der Anlage in den Wind ist eine Effizienzsteigerung von zwei bis drei Prozent möglich, wie eine aktuelle Studie aus den USA zeigt. Über die Studie hinausgehend kann mittels der Windgeschwindigkeitsvorhersage die Einstellung des Rotoranstellwinkels (Pitch) auf den kommenden Wind angepasst werden (Abbildung 3).

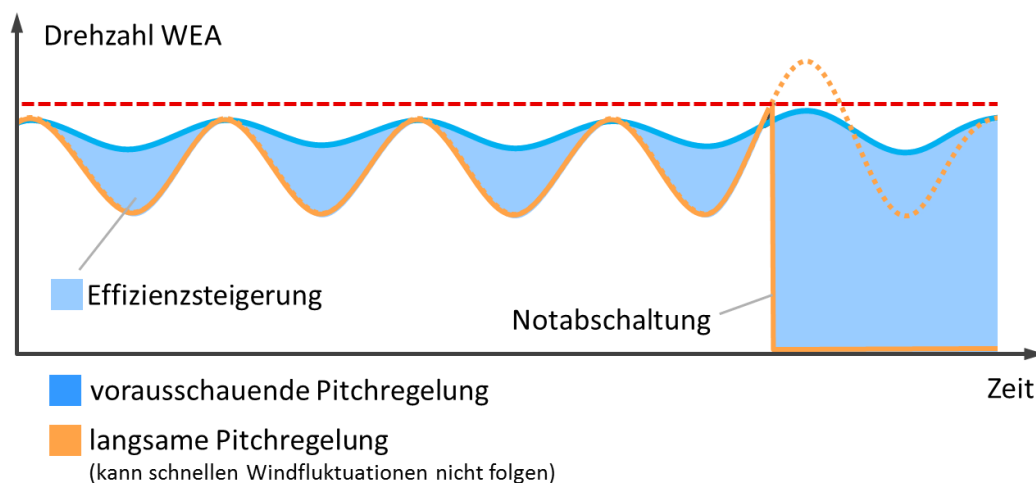


Abbildung 3: Illustration des Gewinns einer vorausschauenden Pitchregelung und Vermeidung von Notabschaltungen

Der Pitch beeinflusst aufgrund der Rotorblattgeometrie die Umwandlungseffizienz von Wind- in Rotationsenergie. Seine Verstellung benötigt aufgrund der großen Rotorblätter und wirkenden Kräfte viele Sekunden. Neben mehr Ertrag verspricht man sich hier auch eine Vermeidung von Abschaltungen der Anlage, wenn die vorgegebene Rotorhöchstdrehzahl aufgrund überraschender, starker und daher nicht ausregelbarer Böen überschritten wurde.

Das kontinuierliche Vermessen der sogenannten Leistungskurve (abgegebene Leistung über Windgeschwindigkeit) wird bisher nur an Prototypenanlagen durchgeführt. Beim Serieneinsatz eines entsprechenden Sensors kann eine Früherkennung von Schäden anhand Abweichungen der Leistungskurve ermöglicht werden.

Lastreduzierung bei besonders großen Rotoren

Die Lastreduktion basiert im Prinzip auf den gleichen Mechanismen wie im vorigen Unterkapitel. Notabschaltungen und unausgeregelter Böen stellen große Belastungen für die Mechanik, vor allem die verschiedenen Lager, dar.

Der Trend zu größeren Rotoren, wie im ersten Kapitel gezeigt, stellt große Anforderungen an die Mechanik. Mittels der gezielten Lastreduktion durch das vorgestellte Messsystem können bei der Auslegung der Rotorblätter und Lagerkomponenten Optimierungen vorgenommen werden, die ohne das Wind-LiDAR so nicht möglich wären. Zudem sind Kosteneinsparungen beim Anlagenbau vorstellbar.

Innovative Ansätze und Forschungsziele

Die Idee eines kostengünstigen Sensors zur entfernten Windmessung in ungefähr 100 m Abstand ist durch die vorgestellten Anwendungsszenarien strengen Anforderungen unterworfen, um erfolgreich eingesetzt zu werden und um die Serienintegration überhaupt möglich zu machen. Hierfür wurden innovative Ansätze entwickelt, wie mit verfügbarer und erprobter Technik aus der Telekommunikationstechnik gegenüber konventionell aufgebauten Doppler-LiDAR-Systemen Komplexität reduziert und somit Kosten stark reduziert werden können. Der Optimierung darf dabei natürlich nicht die Fähigkeit zum Opfer fallen, kleinste Leistungen im Bereich von unter 1 pW, die von winzigen Aerosolen in der Luft gestreut werden, einzufangen und zu verarbeiten.

Die bedeutendste Innovation ist der Einsatz einer kontinuierlich betriebenen, einfachen und kostengünstigen Halbleiterlaserquelle anstatt der üblicherweise eingesetzten Faserpulslaser. Diese weisen hohe Leistungen und eine hohe Kohärenz auf, was den Einsatz deutlich vereinfacht, aber den Komponentenpreis für die Laserquelle alleine schon in den fünfstelligen Bereich setzt. Weitere Neuerungen finden sich in der Nutzung von Glasfasertechnik und modernen Methoden der Signalverarbeitung.

In Kombination ermöglichen die vorgestellten Neuerungen ein robustes Sensorsystem, das Windgeschwindigkeit und -richtung in 50 bis 100 m Abstand vor der WEA zuverlässig misst und mit veranschlagten Kosten unter 20.000 € auch in zukünftige Serienanlagen integriert werden kann.

Stand der Forschung und bisherige Ergebnisse

Speziell die Kombination aus Faserkomponenten und Halbleiterlaserquelle hat sich als forschungsintensives Thema herausgestellt, um die Anwendungsanforderungen erfüllen und ein messfähiges Sensorsystem aufbauen zu können. Da die empfangene, von den Aerosolen gestreute Leistung um mehr als 12 Größenordnungen unter der Sendeleistung liegt, sind kleinste Effekte, die in Kommunikationsanwendungen teils bis vollständig vernachlässigt werden können, plötzlich entscheidend über den Erfolg.



Abbildung 4: Ein frühes Laborsystem im Einsatz auf einem Gebäude des Karlsruher Instituts für Technologie (2014)

Speziell die eingeschränkte Kohärenz (Interferenzfähigkeit, Grundbedingung für das Messprinzip) der günstigen Halbleiterlaserquellen erzeugt hier Effekte, die mittels einer eigens aufgebauten und in zwei Veröffentlichungen vorgestellten Simulationsumgebung sorgfältig berücksichtigt werden müssen.

Mit dem Verständnis der sich auch spektral auf das Doppler-Spektrum auswirkenden Effekte in Abhängigkeit von Kohärenzeffekten und parasitären Effekten aus dem Faseraufbau konnte erfolgreich ein Laborsystem aufgebaut werden, das in der Lage ist, Windgeschwindigkeiten in Entfernungen um die 100 m zuverlässig zu messen.

Bei zahlreichen Messversuchen mit dem Laboraufbau (Abbildung 4) konnten viele der gemachten theoretischen Vorüberlegungen bestätigt werden. Im Hinblick auf das ursprüngliche Konzept wurden kleinere Anpassungen vorgenommen, die sich aus den Erkenntnissen der vollständigen Simulation der Auswirkungen des Phasenrauschens in Verbindung mit den eingesetzten Faserkomponenten ergaben.

Ausblick

Auf Basis des Laboraufbaus wird derzeit ein Demonstrator aufgebaut, der im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens auch auf einer WEA getestet werden wird. Hier wird neben einer langen Testphase für das Sensorkonzept auch die Nützlichkeit der Daten für die WEA-Regelung genauer untersucht werden.

Die Datengewinnung selbst, sprich die Signalverarbeitung des Doppler-Signals, wird im Zuge des Dauertests weiter verfeinert werden, um bei unterschiedlichsten Aerosolkonzentrationen und –typen mit ausreichend hoher Verfügbarkeit ein Messsignal generieren zu können.

Zusammenfassung

Mit bestehender Infrastruktur mehr zu erreichen ist ein zentraler Gedanke der vorgestellten Arbeit. Durch die effizientere Windnutzung durch Pitchregelung und größere Rotoren kann in schwierigen Gebieten auch überhaupt erst ein Aufbau von WEA rentabel werden. Mit einem Laser-Sensor in die Zukunft zu schauen war eine Vision, die allerdings mit den vorgestellten Methoden Alltag werden wird.

Auch wenn Produktionszugewinne im einstelligen Prozentbereich zunächst überschaubar erscheinen, ist für eine durchschnittliche Anlage ein Mehrertrag von 150.000 kWh respektive 10.000 € pro Jahr nicht unrealistisch. Die im Jahr 2014 allein in Deutschland neu aufgestellten Windräder (5.278 Anlagen [1]) könnten so, wenn sie mit einem LiDAR ausgestattet wären, zusätzlich 750 MWh pro Jahr erzeugen. Ein intelligentes Sensorsystem, das hier zusätzlich hinsichtlich Wartung und Lebensdauer Verbesserungsmöglichkeiten und Kosteneinsparungen ermöglichen kann, amortisiert sich außerdem in der vorhandenen Kostenstruktur einer WEA schnell [2].

Die Forschung und inbegriffene Ingenieursleistungen für das Doppler-Wind-LiDAR sind fokussiert auf die Verwendung am Markt etablierter und bewährter Komponenten aus der Telekommunikation und den Einsatz moderner Methoden des System-Engineering zur Beherrschung des Entwurfsraumes. Neben grundlegenden Arbeiten an Simulationsumgebungen für Halbleiterlaserquellen sind Interferometer- und Optikdesign und Integration in eine WEA zentrale Themen des Forschungsvorhabens und der hier vorgestellten Arbeit.

Danksagungen

Die wissenschaftliche Arbeit findet im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Vorhabens LAWAL (FKZ 0325386B) statt. Der Autor dankt außerdem der Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP) sowie seinen geschätzten Kollegen für die Unterstützung.

Quellen (Auszug)

[1] <http://strom-report.de/windenergie/#wind-de>

[2] Deutsche Wind Guard GmbH, „Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland“, 2013