

FVEE-Jahrestagung, 8. und 9. November 2017, Berlin

Windenergie – wo stehen wir?

Berthold Hahn,

Fraunhoferinstitut für Windenergie und Energiesystemtechnik - IWES, Kassel,

Dr. Raik Becker,

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Leipzig,

Dr. Sarina Keller,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR, Köln,

Andreas Rettenmeier,

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg-

ZSW, Stuttgart,

Dr. Jan Teßmer,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR, Braunschweig

Einleitung

Die Windenergienutzung ist heute integraler Bestandteil der deutschen Energieversorgung und stellt aktuell (2016) mit rund 80 TWh etwa 12% der benötigten elektrischen Energie bereit [1, 2]. Die installierte Leistung wuchs in Deutschland bis Ende 2016 auf etwa 50 GW und international auf rund 487 GW, davon 14 GW offshore [1]. Bei angenommenen, durchschnittlichen 2.000 Volllaststunden ergäbe sich weltweit eine aus Wind generierte elektrische Energiemenge in Höhe von etwa 1.000 TWh.

Für ein zukünftiges Energieversorgungssystem, das sich mehr und mehr auf erneuerbare Energien stützt und einen substantiellen Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes leistet, muss die Windenergienutzung aber noch erheblich ausgebaut werden [3]. Neuere Szenarien gehen bis 2050 von ca. 300 TWh Windstromerzeugung in Deutschland [4] und 8.800 TWh [5] bzw. 15.000 TWh [6] weltweit aus. Für Deutschland würde dies eine Steigerung der aktuellen Energiemenge aus Wind auf das rund 3,5fache innerhalb der kommenden 35 Jahre und weltweit eine Steigerung auf das rund 15fache bedeuten.

Der folgende Beitrag basiert zum Teil auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens TF_Energiewende bzw. auf dem in dessen Rahmen entstandenen Technologiebericht Windenergie (Veröffentlichung in einem Gesamtbericht steht bevor). Dort wird angenommen, dass für den genannten Ausbau wesentliche Herausforderungen zunächst darin bestehen, *geeignete Standorte* zu identifizieren und optimal auszunutzen sowie gezielt für die lokalen/regionalen Bedingungen ausgelegte und technisch weitgehend *optimierte Anlagen* bereitzustellen. Zusätzlich sind die Prozesse von *Betriebsführung und Instandhaltung* kostenoptimal zu gestalten und alle *Umwelteinflüsse* der Windenergienutzung so weit wie möglich zu reduzieren bzw. *Akzeptanz* für die unvermeidlichen Auswirkungen zu schaffen. Die meisten Entwicklungsansätze werden letztendlich durch den allgegenwärtigen Kostendruck angetrieben. Dieser führt nach wie vor zu einem Größenwachstum der Anlagen, sodass die zukünftigen Entwicklungsnotwendigkeiten vor dem Bild einer aus heutiger Sicht extrem großen 20 MW Windenergieanlage (WEA) abzuschätzen sind.

Lediglich Akzeptanz und Umweltaspekte sind nicht aus Kostengründen oder aufgrund technischer Herausforderungen zu thematisieren. Der häufige und intensive Protest gegen neu geplante Windparks zeigt aber auch, dass eine Reihe von Gegenargumenten nur schwer zu widerlegen ist.

Bewertung der Windenergie-Technologie anhand objektiver Kriterien

Auf Basis der Vorgaben im oben genannten Projekt wurden verschiedene Aspekte der Windenergienutzung und zwölf konkrete Bewertungskriterien untersucht. Beispielfolgend die Ergebnisse zu fünf ausgewählten Kriterien.

Beitrag zur Energieeinsparung

Die Windenergie soll zukünftig einen großen Teil der elektrischen Energieversorgung übernehmen. Die Auswertung diverser Szenarien kommt zu dem Schluss, dass in 2050 in Deutschland im günstigsten Fall etwa 1400 PJ bis 2000 PJ (rund 390 TWh bis 550 TWh) elektrische Energie durch Windenergieanlagen bereitgestellt werden können.

Beitrag zu Klimazielen

Da der CO₂-Ausstoß je Energieeinheit verglichen mit anderen Ressourcen und Technologien beinahe verschwindend gering ist, ist der Windenergie zukünftig auch ein großer Anteil an der Reduktion des CO₂-Ausstoßes zuzuschreiben. So kann die Windenergienutzung ab 2050 über 300 Mio. t CO₂ einsparen (bei rund 900 Mio. t CO₂-Äquivalent 2015).

Rohstoffrisiken

Durch die zunehmende Verwendung von permanent-erregten Generatoren und durch den damit verbundenen Bedarf an Seltenen Erden entsteht ein leichtes Rohstoffrisiko. Da der mengenmäßige Bedarf verglichen mit anderen Technologien aber relativ klein ist und mit Kupfer oder Aluminium Ersatzrohstoffe existieren, bleibt das mit der Windenergie verbundene Rohstoffrisiko gering.

Kosteneffizienz

Unter den Rahmenbedingungen des EEG haben die Wind- und Solarenergie in den vergangenen Jahren erheblich zur Preisreduktion an den Strombörsen beigetragen und die letzten Ausschreibungen in Deutschland haben gezeigt, dass diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist. Die Prognosen gehen davon aus, dass sich im progressiven Ausbauszenario im Vergleich zu einem Referenzszenario ab 2050 eine Einsparung von bis zu 40 Mrd. € jährlich ergeben kann. Selbst das pessimistische Szenario verspricht noch eine Einsparung von über 15 Mrd. € jährlich.

Marktpotenziale

Das mit dem Umbau des Energieversorgungssystems verbundene Marktpotenzial ist für deutsche Unternehmen beträchtlich. In einem zurückhaltenden Szenario werden jährliche Investitionen in Höhe von knapp 2 Mrd. € erwartet, im progressivsten Szenario sogar fast 7 Mrd. €. Hinzu kommen die internationalen Marktpotenziale.

Insgesamt kam die genannte Studie zum Ergebnis, dass sich die Windenergienutzung aus Gründen des hohen technischen Potenzials, des großen Beitrags zur Klima- und Ressourcenschonung, der niedrigen Stromgestehungskosten und nicht zuletzt aufgrund der relativ geringen Auswirkungen auf Umfeld und Umwelt für die tragende Rolle der zukünftigen Energieversorgung empfiehlt.

Technische Verbesserungspotenziale bei der Standortfindung

Der erwartete große Beitrag der Windenergie zur Energieversorgung und die begrenzten Flächenpotenziale setzen eine optimale Nutzung geeigneter Standorte voraus. Für die Windenergienutzung an Land und auf See sind die Fragestellungen dabei durchaus verschieden. An Land spielen vor allem der Geländeeinfluss (komplexes Gelände) und die großen Höhen eine Rolle. Offshore sind eher die Auswirkungen von thermischen Effekten (Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft) sowie die Auswirkung der Nachlaufströmung von WEA auf die Windbedingungen innerhalb und zwischen Windparks eine Herausforderung.

Bei wachsender Anlagengröße und weiteren bisher unerschlossenen Standorten an Land wird die Bestimmung der äußeren Einflussgrößen auf die WEA immer wichtiger, um den

Ertrag so genau wie möglich abschätzen zu können. Hierbei gilt es, die meteorologischen Umgebungsgrößen zu bestimmen und vorherzusagen. Die erforderlichen in situ Messungen werden zunehmend mit Fernerkundungsverfahren wie Sodar und Lidar durchgeführt, doch weisen diese sehr attraktiven Messmethoden gerade in bergigem Gelände noch Messfehler auf. Zum Teil können die Fehler bereits heute mit Hilfe numerischer Strömungssimulationen eliminiert werden, zukünftig soll die Kopplung der mikroskaligen und der mesoskaligen Windfeldmodellierung auf Basis momentaner Wetterdaten die Vorhersage des Windertrags verbessern. Ein wichtiger nächster Schritt ist die Synchronisation mehrerer LiDAR-Geräte zu Multi-LiDAR-Systemen, mit denen die Windbedingungen über potenziellen Windpark-Areale quasi flächendeckend und in allen relevanten Höhen über Grund mit einer einzelnen Messkampagne vermessen werden können.



LiDAR-Scanner (links) und Messaufbau mehrere Multi-LiDAR-Systeme im Kassel-Experiment des Europäischen Vorhabens Neuer Europäischer Windatlas NEWA [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

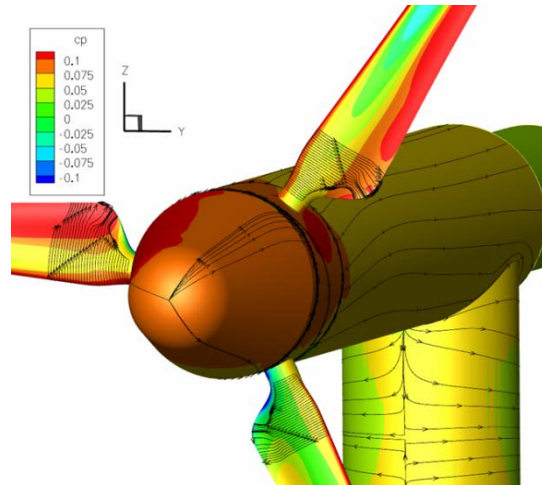
Je mehr bisher vermiedene Regionen für eine zukünftige Nutzung in Betracht gezogen werden, umso eher rücken auch Gründung und Fundament in den Fokus. Im Fundament werden alle Kräfte und Momente abgefangen, welche durch den Staudruck des Windes und die Gewichtskraft der Anlage entstehen, wodurch der Gründung natürlich eine besondere Bedeutung zukommt. Gerade in Gebieten mit Karstgestein können sich Hohlräume oder Dolinen ausbilden, welche bei unsachgemäßer Standortwahl die Standsicherheit der WEA gefährden. Die Detektion solcher nicht-tragenden Untergründe ist mitunter schwierig und die bekannten Messmethoden sind zum Teil noch ungenau.

Anstehende Komponentenentwicklung mit Blick auf Kostenreduktion, Effizienzsteigerung und Minimierung der Umweltauswirkungen

Aktuell werden verschiedene Turmkonzepte mit verschiedenen Werkstoffen für unterschiedliche Nabenhöhen entwickelt, wie z.B. Fertigbetonteiltürme mit faserverstärkten Feinkornbetonen, Türme in Hybridbauweise oder Gittermasttürme. Neuartige Methoden bei der Nachbehandlung von Schweißnähten von Stahltürmen, aber auch von Gründungsstrukturen für den Offshore-Einsatz, verlängern die Lebensdauer des Materials und erhöhen somit die Standfestigkeit.

Auf der anderen Seite birgt eine geringe Turmkopfmasse nicht nur Potenzial zur Kostenreduktion bei der Maschine selbst sondern auch Vorteile für den Turm sowie für Fundament bzw. Offshore-Tragstruktur. Es wird u. a. an gestaltungsoptimierten Maschinenträgern aus Gussstahl gearbeitet und an Naben aus Faserverbundwerkstoffen. Leichtbau ist auch das Ziel bei der Weiterentwicklung der Rotorblätter. Die Länge der Blätter wird weiter stetig steigen, sodass auch Kohlenstofffasern zum Einsatz kommen, um einerseits für ausreichend Steifigkeit zu sorgen und andererseits das Gewicht zu begrenzen. Weiteres Entwicklungspotential besteht beim strukturellen Aufbau der Rotorblätter. So kann durch den Einsatz moderner dreidimensionaler Textiltechniken, wie Flechten, Sticken und Nähen der Aufbau punktuell bei reduziertem Masseneinsatz verstärkt werden.

CFD-Simulationen spielen eine große Rolle im Bereich der Anlagenkonstruktion und Rotorblattauslegung. Eine adaptive Strömungsbeeinflussung mit sogenannten „smart blades“ kann die Auftriebseigenschaften während des Betriebs verändern, entweder passiv durch eine Biege-Torsionskopplung oder aktiv durch Aktuatoren wie Flaps. Die Einbindung dieser Systeme in die Anlagenregelung und -steuerung stellt zwar einen hohen Aufwand dar, doch steckt in diesem Bereich ein sehr großes Potential, die Lasten zu reduzieren und die Leistung zu steigern, vor allem in Verbindung mit einer prädiktiven Regelung.



Numerische Strömungsberechnung an einer WEA [Quelle: IAG, Universität Stuttgart]

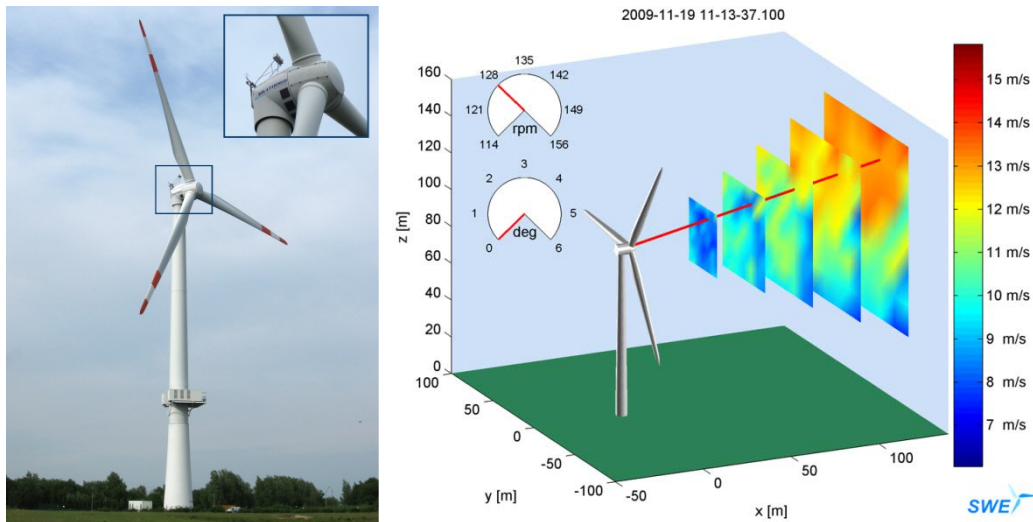
In der mechanisch-elektrischen Energiewandlung sind Synchrongeneratoren, die entweder über ein Getriebe oder direkt mit der Nabe verbunden werden, auf dem Vormarsch. Grund hierfür liegt in der einfacheren Bereitstellung von Blindleistung, was für die WEA im Einzelnen, aber auch für einen Windpark im Gesamten bzgl. des Netzanschlusses von Vorteil ist. Hier kommen zunehmend Generatoren mit permanentmagnetischer Erregung, zum Einsatz, was wiederum zu einer geringeren Turmkopfmasse führt. Zum Nachteil könnten hier die für die Magnete notwendigen Seltenen Erden führen. Auch die Generatoren selbst bergen noch Potenzial zu Gewichtsreduktion und Effizienzsteigerung. Der neu entwickelte Prototyp eines Magnetring-Generators verspricht eine erhebliche Gewichtsreduktion im Vergleich zu herkömmlichen Vielpol-Generatoren bei gleichbleibender Effizienz. Eine andere Entwicklungsschiene beschäftigt sich mit hocheffizienten, supraleitenden Generatoren.



Magnetring-Generator im Labormaßstab (176 kW) [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Letztendlich steckt auch in der Anlagenregelung noch Potenzial zur Effizienzsteigerung. Mithilfe von LiDAR-Messungen und CFD-Simulationen soll zukünftig das herannahende turbulente Windfeld erfasst bzw. eingeschätzt werden, bevor es auf die WEA trifft. Dies ermöglicht es, rechtzeitig zu agieren und nicht wie im konventionellen Fall auf Böen im Nachhinein zu reagieren. In Hinblick auf den Einsatz der Technologie in Windparks oder in bergig komplexem Gelände bietet die adaptive Vorsteuerung zusammen mit der soge-

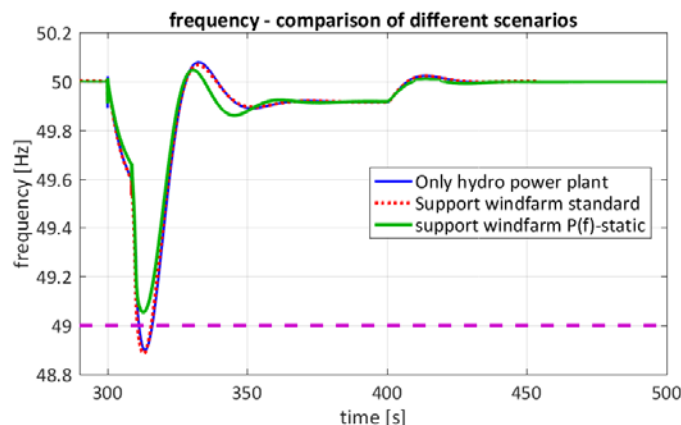
nannten Einzelblattsteuerung („Individual Pitch Control“) das Potenzial, auch die Schallemissionen zu senken.



Lidar Scanner des SWE auf der Gondel einer 5MW WEA (li.). Visualisierte Messdaten des herannahenden Windfelds (re.) [Quelle: SWE, Universität Stuttgart]

Entwicklungsbedarf in Betrieb und Instandhaltung

Im Zuge der Transformation des Energieversorgungssystems müssen WEA zunehmend netzstützende und wahrscheinlich auch netzbildende Aufgaben übernehmen, um eine sichere Energieversorgung gewährleisten zu können. Hier werden neue Regelalgorithmen bzw. Module sowie Funktionalitäten zur Erbringung von Systemdienstleistungen, wie negativer Sekundärregelleistung, entwickelt, die den steigenden Forderungen hinsichtlich der Netzstützung nachkommen. U. a. die schnelle Variation der eingespeisten Leistung und die regelungstechnische Nachbildung „virtueller Rotationsenergie“ gehören zu den aktuellen Aufgaben.

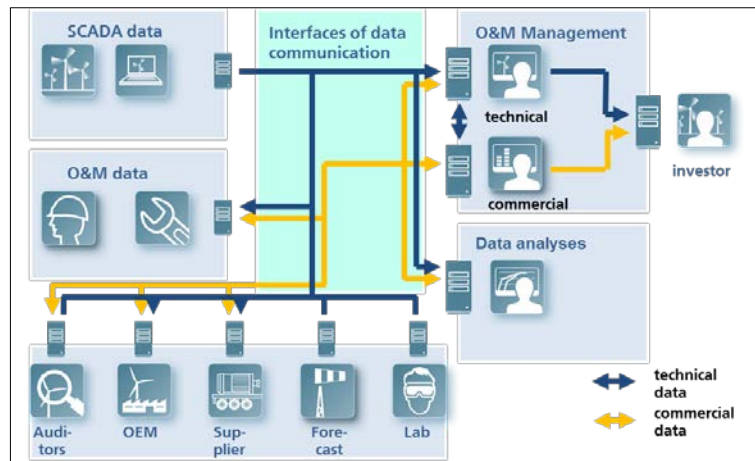


Antwort der Frequenz auf einen Lastsprung in einem Inselnetz bei unterschiedlichen netzstützenden Funktionen einer WEA [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Diese zukünftigen Aufgaben sowie die stark volatilen Eigenschaften der Windenergie und der anderen erneuerbaren Energien regen in der jüngeren Vergangenheit immer mehr Ansätze der virtuellen Kopplung der einspeisenden Anlagen sowie eine Kopplung der Verbrauchssektoren an. Ferner werden Konzepte für eine Integration dezentraler Erzeugungsanlagen in den Netzwiederaufbauprozess nach einem Black-out erarbeitet sowie die notwendigen Funktionalitäten auf Anlagenebene abgeleitet.

Der Anteil der Betriebs- und Instandhaltungskosten an den Stromgestehungskosten (LCOE) aus Windenergie bewegt sich onshore- und offshore um 25%. Die Zuverlässigkeit

der Anlagen und ihrer Komponenten nahm zuletzt sogar ab, sodass Instandhaltungsaufwand und -kosten gestiegen sind.

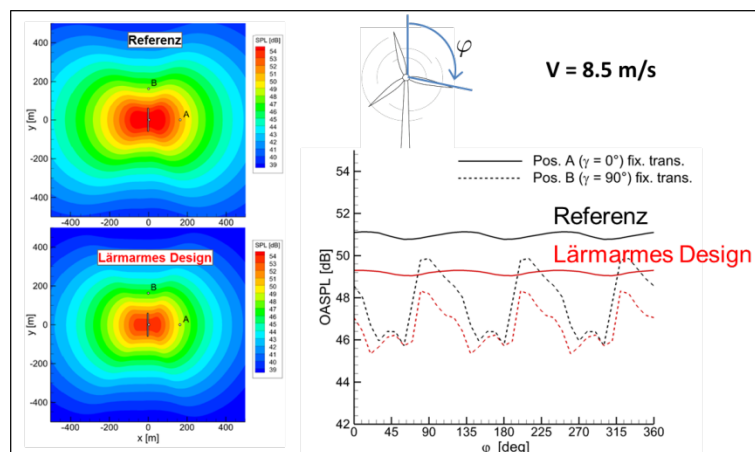


Kommunikationswege zwischen den Rollen in Betrieb und Instandhaltung [Quelle: Fraunhofer IWES, Kassel]

Dieser Entwicklung kann zielgerichtet entgegengewirkt werden, indem die Erfahrungen aus Betrieb und Instandhaltung systematisch analysiert und für zukünftige Generationen von WEA verfügbar gemacht werden. Für eine situationsabhängige, präventive Instandhaltung sind zukünftig eine systematische und in Teilen automatisierte Datenerfassung sowie eine umfassende Analyse notwendig. Zur Identifizierung von initialen Schäden und der Beobachtung ihrer Weiterentwicklung sind sogenannte Condition-Monitoring-Systeme für alle relevanten Komponenten mit einer typischen, ausgeprägt zeitabhängigen Fehlerentwicklung zu entwickeln.

Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltauswirkungen und Erhalt der Akzeptanz

Im Zeichen des immer stärker werdenden Interesses der Bevölkerung und der Regulierrungsbehörden an einer umweltverträglichen Nutzung der Windenergie kommt auch der Schallemission, der Schallausbreitung und letztlich der Schallimmission rund um die WEA eine wichtige Rolle zu. Neben Maßnahmen am Blatt gilt es auch zu untersuchen, wann und in welcher Stärke die Geräusche der WEA in der Umgebung nachweisbar sind und wie stark sie vom Gelände, dem Wetter und den Windverhältnissen abhängen (Bedarf nach präziser Lärmvorhersage).



Simulierte Geräuschsignaturen am Boden mit Auswertung der Amplitudenmodulation für 2 Beobachterpositionen über einen Blattumlauf [Quelle: Rautmann, DLR/Nordex]

Eine Herausforderung stellt das Phänomen der Amplitudenmodulation dar, wofür derzeit weder validierte Vorhersagemethoden noch geeignete Bewertungsmetriken vorliegen. Weitere Herausforderungen sind die Erweiterung der 3D-Akustikvorhersagefähigkeiten zur gezielten Designunterstützung die Nutzung von simulierten Schallfeldern für die Anlagenregelung und die Berücksichtigung komplexer Topografien bei der Schallimmissionsberechnung.

Detaillierte naturschutzfachliche Untersuchungen beschränken sich heute im Wesentlichen auf die erforderlichen Begleituntersuchungen im Rahmen der Genehmigung der Einzelprojekte.

Um Fehler beim weiteren Ausbau zu vermeiden, müssen Auswirkungen wie die Zielkonflikte mit Naturschutz und Landschaftspflege, Beeinträchtigung der Funktionen des Naturhaushalts oder Einfluss auf die Erholungsfunktion eigentlich umfassend untersucht und aufgearbeitet werden. Dazu sind bereits konsistente naturschutzfachliche Monitoringsysteme im Aufbau, mit denen die Auswirkungen der Windenergienutzung und der Stromtransportinfrastruktur auf Naturschutzgüter erfasst und bewertet werden. Ziel ist es dabei, Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu identifizieren und Optionen zur Gegensteuerung bereit zu stellen.

Literatur

- [1] Hrsg. AG Energiebilanzen e. V., Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 – 2016, online verfügbar unter <https://duckduckgo.com/?q=Stromerzeugung+nach+Energietr%C3%A4gern+1990+%E2%80%93+2016&t=ffab&ia=webzuletzt+gepruft+am:14.02.2017>
- [2] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Windenergie Report Deutschland 2016, Kassel, 2017
- [3] Hrsg. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Energiesystem Deutschland 2050, online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf, zuletzt geprüft am 09.06.2017.
- [4] Hrsg. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, online verfügbar unter http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2017
- [5] Hrsg. World Energy Council, World Energy Scenarios 2016. The grand transition, online verfügbar unter https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2017
- [6] Hrsg. Greenpeace International, energy [r]evolution. A sustainable world energy outlook 2015, Amsterdam 2015