

SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

Materialien

Februar 2016

Windkraftanlagen

Technologiesteckbrief zur Analyse
„Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“

Andreas Reuter | Peter Elsner (Hrsg.)

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Impressum

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Andreas Reuter
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)
Appelstr. 9a
30167 Hannover
E-Mail: andreas.reuter@iwes.fraunhofer.de

Prof. Dr. Peter Elsner
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal
E-Mail: peter.elsner@ict.fraunhofer.de

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Koordinierungsstelle

Dr. Ulrich Glotzbach
Leiter der Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft
Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a, 10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 206 79 57 - 32
E-Mail: glotzbach@acatech.de

Koordination / Redaktion

Dr. Berit Erlach, acatech
Benedikt Lunz, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
Dr. Matthias Merzkirch, Karlsruher Institut für Technologie

Gestaltung und Satz

Annett Eichstaedt, Karlsruhe
unicommunication.de, Berlin

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Inhalt

Inhalt	3
Abkürzungen und Einheiten	4
Methodik und Arbeitsweise.....	5
1 Beschreibung	8
2 Technische und ökonomische Daten	11
3 Interdisziplinäre Beurteilung.....	13
4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit.....	18
5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf.....	27
Literatur.....	32
Über das Akademienprojekt	35

Abkürzungen

APAC	Asiatisch-Pazifischer Wirtschaftsraum
BWE	Bundesverband WindEnergie
CO₂	Kohlenstoffdioxid
D	Rotordurchmesser
EAWWE	European Academy of Wind Energy
EE	Erneuerbare Energien
EVU	Energieversorgungsunternehmen
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
LCOE	Levelized cost of electricity, Stromgestehungskosten
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
PTC	Production TaxCredit
PV	Photovoltaik
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TPWind	Technologieplattform Wind
WEA	Windenergieanlage

Einheiten

A	Rotorfläche
a	Jahr
c_p	Wirkungsgrad, Leistungskoeffizient der Windkraftanlage
€	Euro
GW	Gigawatt
GW h	Gigawattstunde
h	Stunde
kW	Kilowatt
kW h	Kilowattstunde
kW_e	Kilowatt elektrisch
m	Meter
m²	Quadratmeter
MW	Megawatt
MW h	Megawattstunde
p	Luftdichte
s	Sekunde
TW h	Terawattstunde
v	Windgeschwindigkeit
W	Watt

Methodik und Arbeitsweise

Dieser Steckbrief entstand im Rahmen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe *Flexibilitätskonzepte* des Akademienprojektes *Energiesysteme der Zukunft (ESYS)*. Er dokumentiert die Ergebnisse der Fachgruppe *Windkraftanlagen*.

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe *Flexibilitätskonzepte* hat analysiert, wie die Stromversorgung im Jahr 2050 mit einer CO₂-Einsparung gegenüber 1990 von 80 bis 100 Prozent gestaltet werden könnte. Dabei lag der Fokus darauf, wie die Versorgungssicherheit in der Stromversorgung bei einem wachsenden Anteil volatil einspeisender erneuerbarer Energien sichergestellt werden kann. Für verschiedene Szenarien wurde untersucht, wie die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik sinnvoll durch sogenannte Flexibilitätstechnologien – flexible Stromerzeuger, Demand-Side-Management, Speicher und Netzausbau – ergänzt werden kann. Hierbei war es das Ziel, sämtliche Möglichkeiten zur Bereitstellung von Flexibilität zu erfassen und zu charakterisieren, um deren Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlich ausgeprägten Stromsystemen im Jahr 2050 zu identifizieren.

Um eine valide und aussagekräftige Datenbasis zu erhalten, wurde ein breiter Konsultationsprozess mit Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft durchgeführt. In zehn Fachgruppen wurden die verschiedenen Technologien zur Bereitstellung von Flexibilität analysiert und einer einheitlichen interdisziplinären Bewertung unterzogen.

Die Fachgruppen bearbeiteten folgende Themenkomplexe:

- Windkraftanlagen
- Photovoltaik
- Bioenergie
- Solarthermische Kraftwerke
- Geothermische Kraftwerke
- Konventionelle Kraftwerke
- Energiespeicher
- Demand-Side-Management im Strommarkt
- Demand-Side-Management im Wärmemarkt
- Stromnetze

Der Stand der Technik und die Entwicklungspotenziale für die Zeithorizonte 2023 und 2050 sowie der Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurden soweit wie möglich erfasst. Als Basis für die Modellrechnungen, die für die anschließende Analyse *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge*¹ durchgeführt wurden, wurden Technologieparameter wie zum Beispiel Kostendaten und Wirkungsgrade geschätzt. Außerdem wurden Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz, der Materialverfügbarkeit und relevante Aspekte des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bau- und Emissionsschutzrechts zur Umsetzung der verschiedenen Technologien diskutiert und mithilfe einer Ampelsystematik bewertet. Das Bewertungsschema ist in Tabelle 1

¹ Elsner et al. 2015.

dargestellt. Die Ergebnisse der interdisziplinären Bewertung wurden als Diskussionsgrundlage verwendet, um die Parametersätze für die Modellrechnungen zu definieren.

	Materialverfügbarkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Energiewirtschaftsrecht inkl. Regulierung	Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht	Technologie
	Verfügbarkeit so hoch, dass Einsatz nicht limitiert ist. Keine Maßnahmen zur Sicherung der Ressourcen erforderlich	Hohe Akzeptanz: Weder lokal noch national sind Einwände zu erwarten	Kein Handlungsbedarf, entwickelt sich im bestehenden Rechtsrahmen gut	Keine Konflikte erkennbar	Die Technologie ist bereits heute weit entwickelt und großtechnisch einsetzbar. Es besteht ausreichend Betriebserfahrung.
	Verfügbarkeit vorhanden, aber Maßnahmen zur langfristigen Sicherung erforderlich (zum Beispiel kontinuierliche Innovationsanstrengungen wie Exploration, Verbesserung der Akzeptanz, politische Maßnahmen)	Generell hohe Akzeptanz: Geringe Einflussfaktoren sind möglich, die bei der Umsetzung der Technik Beachtung finden sollten.	Probleme durch leichte Anpassung des bestehenden Rechts möglich (Verordnungen)	Probleme durch leichte Anpassung des bestehenden Rechts möglich (Verordnungen)	Die Technologie ist weit entwickelt. Mehrjährige erfolgreiche Betriebserfahrung mit Demonstrationsanlagen unter realistischen Bedingungen
	Unter bestimmten Umständen könnte die Verfügbarkeit kritisch werden, erhebliche Maßnahmen zur Sicherung der Ressourcen erforderlich. Recycling jenseits des Energieoptimums notwendig	Akzeptanz regional/lokal fraglich. Umfangreiche Aufklärung erforderlich. Verantwortliche müssen Akzeptanzprobleme beachten	Umfangreiche Änderungen und neue Gesetze notwendig	Umfangreiche Änderungen und neue Gesetze ohne Absenkung von Standards notwendig	Keine Erfahrung mit großtechnischen Anlagen, Erhebliche F&E-Anstrengungen sind bis zur großtechnischen Umsetzbarkeit erforderlich
	Verfügbarkeit kritisch, so dass Alternativtechnologien in Erwägung gezogen werden müssen, wenn es nicht gelingt, die Verfügbarkeit erheblich zu verbessern	Akzeptanz gering. Um Technik in relevantem Umfang einzusetzen, sollte Bevölkerung in Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden	Umfangreiche Änderungen erforderlich, die möglicherweise nicht umsetzbar sind	Umsetzung der Technologie bei umfassender Überarbeitung des Bau-, Umwelt- oder Immissionsschutzrechts in Europa möglich, Absenkungen von Standards notwendig	Technologie in frühem Entwicklungsstadium. Auch mit größeren F&E-Anstrengungen ist die großtechnische Umsetzbarkeit 2050 ungewiss
	Verfügbarkeit so gering, dass Technologie nicht in relevantem Umfang einsetzbar ist	In Deutschland nicht (mehr) durchsetzbar	Für einen Betrieb der Technologie notwendiger Rechtsrahmen aus heutiger Sicht nicht möglich oder sinnvoll	Für einen Betrieb der Technologie notwendige Veränderungen des Rechtsrahmens aus heutiger Sicht nicht möglich	Großtechnische Umsetzbarkeit bis 2050 unwahrscheinlich

Tabelle 1: Bewertungsschema für die interdisziplinäre Betrachtung jenseits der technisch-ökonomischen Bewertung in einem Ampelschema mit fünf Abstufungen von grün bis rot²

Die gleichnamigen *Steckbriefe* stellen das Ergebnis der Datenerhebung und Technologiebewertung durch die Fachgruppen von Mai bis November 2014 dar. Im Rahmen einer dreitägigen Klausurtagung vom 02. bis 04. Dezember 2014, an der die Leiter der Fachgruppen teilnahmen, wurden die Ergebnisse der Fachgruppen vorgestellt und diskutiert. Darauf basierend wurde der Satz an Flexibilitätstechnologien, die in den Modellrechnungen berücksichtigt werden, ausgewählt und die Modellierungsannahmen (zum Beispiel Wirkungsgrade, Kosten) wurden festgelegt. Im Sinne der Konsistenz wurde dabei für die Modellrechnungen teilweise von den in den Steckbriefen dargestellten Zahlenwerten abgewichen. Der vollständige Satz an Modellierungsparametern ist im Anhang der Analyse³ dokumentiert.

Die Steckbriefe stellen eine von Expertinnen und Experten erstellte Datensammlung für Technologien im Energiesystem dar. Diese richtet sich unter anderem an Energiesystem-Modellierer, denen sie als

² Auch bei hoher Materialverfügbarkeit (dunkelgrün, hellgrün) ist das Recycling von Metallen sinnvoll, da es energetisch günstiger ist als die Primärgewinnung, außer wenn die Metalle in höchst komplexen Materialien mit anderen Metallen vermischt sind. Bei schlechterer Verfügbarkeit (gelb, orange) ist Recycling auch bei niedrigen Konzentrationen und komplexer Vermischung sinnvoll (vgl. Wellmer/Herzig 2015).

³ Elsner et al. 2015.

Grundlage für die Darstellung verschiedener Technologien im Modell dienen kann. Außerdem stellen sie dem Fachpublikum Hintergrundinformationen zur Herleitung der Parameter für die in der Ad-hoc-Gruppe durchgeführten Modellrechnungen zur Verfügung, um diese nachvollziehbar zu machen.⁴

⁴ Damit möchte die Arbeitsgruppe die verwendete Datengrundlage transparent machen – im Sinne der im Projekt ESYS definierten Anforderungen an Energiesystemmodelle für die wissenschaftliche Politikberatung (vgl. Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015).

1 Beschreibung

Grundlegende Zusammenhänge

Abbildung 1 stellt die prinzipielle Wirkungsweise einer Windenergieanlage (WEA) dar. Dabei wird die Bewegungsenergie (kinetische Energie) des Windes in elektrische Energie umgewandelt. Hierfür wird die Kraft des Windes zunächst in ein Drehmoment (drehende Kraft, mechanische Energie) an den Rotorblättern umgewandelt und dann von einem Generator in elektrische Energie übersetzt.

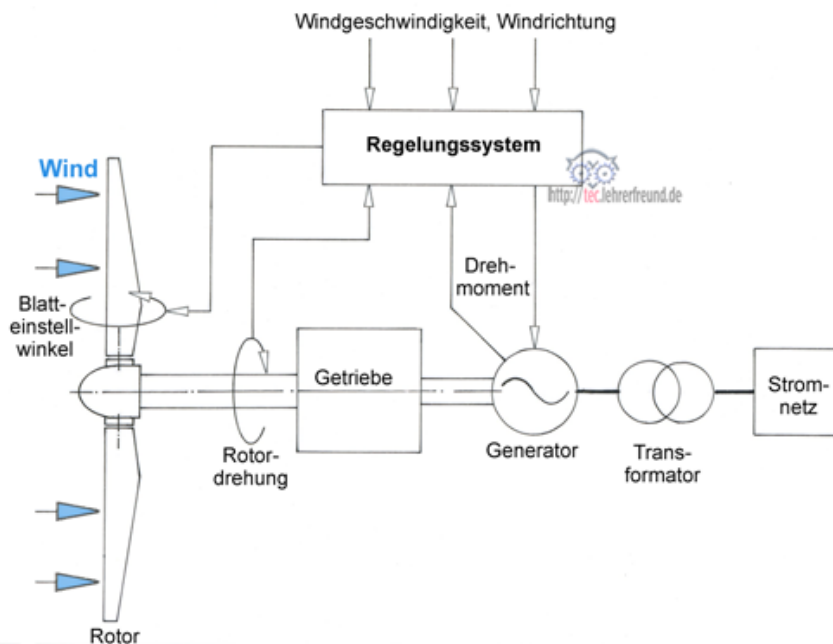


Abbildung 1: Prinzip der Energiewandlung in einer WEA⁵

Die Energiemenge (Leistung P), die der Wind auf den Rotor überträgt, hängt im Wesentlichen von den vier Faktoren Luftdichte ρ , Rotorfläche A , Windgeschwindigkeit v und einem anlagenspezifischen Wirkungsgrad c_p ab:

$$P = \frac{\rho}{2} A v^3 c_p$$

Insbesondere der kubische Zusammenhang der Windgeschwindigkeit mit der Leistung und damit auch mit dem Ertrag ist wesentlich, da so geringe Variationen im Windangebot erheblichen Einfluss auf die erzeugbare Energie haben. Der Zusammenhang der windbedingten möglichen Leistung und der installierten Kapazität wird in Volllaststunden ausgedrückt. Volllaststunden sind ein Maß für den Nutzungsgrad einer technischen Anlage. Volllaststunden bezeichnen die Zeit, während der eine Anlage bei Nennleistung betrieben werden müsste, um die gleiche elektrische Arbeit umzusetzen, wie die Anlage innerhalb eines festgelegten Zeitraumes, in dem auch Betriebspausen oder Teillastbetrieb vorkommen können, tatsächlich umgesetzt hat. Die Angabe bezieht sich auf einen Zeitraum von einem Kalenderjahr. Übliche Werte für Volllaststunden für bereits installierte Windenergieanlagen im Binnenland sind 1.600 Stunden, für Offshore-Anlagen sind 4.000 Stunden üblich. Die Anzahl der Voll-

⁵ Hermann Metz/tec.Lehrerfreund 2011.

laststunden kann durch das Verhältnis von Rotordurchmesser zu Generatorgröße beeinflusst werden. Ein sehr großer Rotor in Kombination mit einem kleinen Generator führt zu einer hohen Volllaststundenzahl. Dieses Konzept wird im Binnenland eingesetzt, um auch windschwächere Standorte wirtschaftlich nutzen zu können.

Der Wirkungsgrad c_p einer Windenergieanlage berechnet sich aus dem Verhältnis der dem Netz zugeführten Energie bezogen auf die im Wind vorhandene kinetische Energie. Aus physikalischen Gründen liegt der theoretisch maximal mögliche Wert bei 59 Prozent. Moderne Windenergieanlagen erreichen bereits aerodynamische Wirkungsgrade von 52 bis 53 Prozent. Der Gesamtwirkungsgrad inklusive aller Wandlungsverluste im Triebstrang liegt bei etwa 42 bis 45 Prozent.

Komponenten einer Windenergieanlage

Die Kernstücke einer „klassischen“ Windkraftanlage (siehe Abbildung 1) sind der Rotor (bestehend aus Rotorblättern und Nabe), die Rotorwelle, ein Getriebe und ein Generator. Das Getriebe, der Generator und oft auch der Frequenzumrichter befinden sich in der Gondel. Die Rotationsenergie des Rotors wird durch die Rotorwelle auf das Getriebe übertragen. Dieses hat die Funktion, auf eine Drehzahl zu übersetzen, die dem Generator angepasst ist. Je nach Bauart gibt es verschiedene Übersetzungsstufen. Der Generator wandelt dann die mechanische Energie in elektrische Energie um.

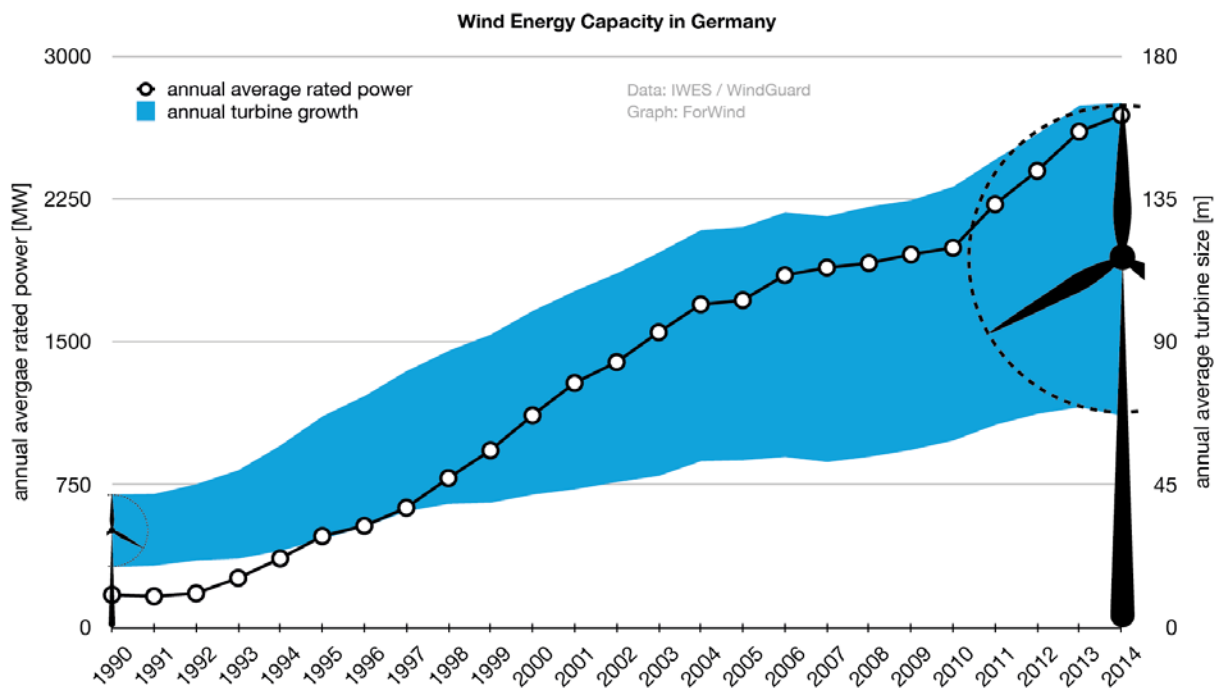


Abbildung 2: Wachstum der WEA-Größe 1990 bis 2014⁶

Weitere Basiskomponenten sind die elektrische Ausrüstung zur Netzeinspeisung sowie die Steuer- und Überwachungssysteme für den gesamten Anlagenbetrieb. Zur Leistungsbegrenzung bei Starkwind und zum Abbremsen der Anlage werden Pitch-Systeme verwendet, die die Rotorblätter aus dem Wind drehen. Jedes Blatt verfügt über eine eigene Verstellung, wodurch sich eine Redundanz ergibt. Bremsen werden nur zur Arretierung des Triebstranges für Wartungszwecke eingesetzt. Die

⁶ ForWind – Zentrum für Windenergieforschung 2014.

Rotorblätter von Windenergieanlagen werden aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt, teilweise wird bei großen Blättern auch zusätzlich Kohlefaser verwendet. Bei Blattlängen von bis zu 65 Metern ist insbesondere im Binnenland der Transport dieser Komponente an die jeweiligen Standorte eine erhebliche logistische Herausforderung. In den letzten Jahren wurden vermehrt Anlagen ohne Getriebe errichtet. Diese Anlagen sind mit Synchrongeneratoren und Vollumrichtern ausgestattet. Einer der Gründe, warum diese Technologieentwicklung besonders forciert wurde, ist, dass Anlagen mit Getriebe – vor allem Offshore-Anlagen – wartungsintensiver als Anlagen ohne Getriebe sind. Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass die durchschnittliche Generatorleistung der Windenergieanlagen kontinuierlich ansteigt. Dieser Anstieg korreliert mit dem stetig zunehmenden Generatordurchmesser.

Kraftwerkseigenschaften von Windparks

Windenergieanlagen werden oft in Gruppen in Windparks aufgestellt und gemeinsam an ein Mittelspannungsnetz angeschlossen. Technische Innovationen der letzten Jahre verleihen diesen Windparks kraftwerksähnliche Eigenschaften. Netze können gezielt durch Blindleistungssteuerung stabilisiert werden. Die Anlagen verfügen über Ride-Through-Eigenschaften⁷ und werden meistens von einer zentralen Leitwarte aus gesteuert. Weitere Regeleigenschaften werden kontinuierlich entwickelt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit den Kraftwerkseigenschaften von Windparks ist die Planbarkeit der Einspeiseleistung. Hier wurden Prognosemethoden entwickelt, die mehrere Tage im Voraus stundengenau das Windangebot berechnen können und somit eine Anpassung der konventionellen Kraftwerkskapazitäten ermöglichen.

Planung von Windparks

Die Planung und Realisierung eines Windparks geht mit einem aufwendigen Genehmigungsprozess einher. Bis zu zwanzig Einzelgenehmigungen müssen eingeholt werden; Schwerpunkte der Genehmigungsprozesse sind bau- und umweltrechtliche Fragestellungen. Insbesondere Schallemissionen sind eine wesentliche Hürde, da sich aus den Grenzwerten Mindestabstände zu Wohnbebauungen ergeben. Der Schallleistungspegel einer Windenergieanlage wird durch aerodynamische Geräusche dominiert, die wiederum maßgeblich von der Blattspitzengeschwindigkeit abhängen. Weitere Schallquellen sind zum Beispiel die Verzahnung des Getriebes oder die Lüftergeräusche, die im dünnwandigen Stahlurm einen Resonanzboden finden.

⁷ Erzeugungsanlagen bleiben bei einer kurzzeitigen Spannungsabsenkung am Netz und werden nicht abgeschaltet.

2 Technische und ökonomische Daten

Technisch

	2013	2023	2050
Versiegelte Fläche inklusive Zuwegung			
Variante 1: gesamte Parkfläche, Abstand der Anlagen 4 D in m ² /kW h	0,1	0,1	0,1
Variante 2: tatsächlich genutzte und nicht für andere Nutzung verfügbare Fläche (Fundament) in m ² /kW h	0,00002	0,00002	0,00002
Energy-Payback-Time in Monaten	5	4	4
Onshore-Anlagen			
Volllaststunden onshore (Basis 6,2 m/s in Nabenhöhe)	2.950	2.950	3.500
Generatorleistung in kW	2.500	3.000	3.000
Rotordurchmesser in m	115	130	150
Offshore-Anlagen			
Volllaststunden offshore (Basis 10 m/s in Nabenhöhe)	4.950	5.050	5.500
Generatorleistung in kW	4.000	6.000	8.000
Rotordurchmesser in m	120	150	200

Tabelle 2: Tabellarische Zusammenfassung der technischen Daten

Ökonomisch

Anlagentyp	Onshore		Offshore	
Technische Daten	Minimal	Maximal	Minimal	Maximal
Generatorleistung in kW _e	3.000	3.000	8.000	8.000
Vollbenutzungsstunden in h/a	2.500	3.500	5.500	5.500
Mittlerer Stromertrag in MW h/a	7.500	10.500	44.000	44.000
Kostendaten				
Anlage inklusive Installation in €/kW	800	1.100	1.500	4.000
Netzanschluss (bei Offshore-Anlagen inklusive Leitung bis zur Küste) in €/kW	30	120	170	800
Pacht in €/kW	5	9	0	0
Fixe Betriebs- und Wartungskosten in % der Investition	0	0	0	0
Variable Betriebs- und Wartungskosten in €/MW h	10	15	10	20
Lebensdauer				
Anlage in a	20	25	20	25
Netzanschluss in a	20	25	20	25
Zinssatz in % p. a.	8	8	8	8
Annuität				
Modul und Installation in €/kW/a	75	112	141	407
Netzanschluss in €/kW/a	3	12	16	81
Summe in €/kW/a	78	124	156	489

Anlagentyp	Onshore		Offshore	
Stromgestehungskosten				
Kapitalgebundene Kosten in €/MW h	49,7	22,2	88,9	28,4
Fixe Betriebs- und Wartungskosten in €/MW h	2,0	4,0	4,0	6,0
Variable Betriebs- und Wartungskosten in €/MW h	10,0	15,0	10,0	20,0
Pacht in €/MW h	5,0	9,0	0,0	0,0
Summe der Stromgestehungskosten in €/MW h	39,2	77,7	42,4	114,9

Tabelle 3: Tabellarische Zusammenfassung der ökonomischen Daten für 2050

Technische Potenziale

Eine grundsätzliche Beschränkung für die Ausnutzung der Windenergie resultiert aus der Verfügbarkeit der nutzbaren Flächen.

Für die Bestimmung des Platzbedarfs von WEA sind folgende Gesichtspunkte zu unterscheiden:

- Kernflächen: Welche Fläche belegt eine WEA, sodass sie von keinem anderen mehr genutzt werden kann? Das sind die Flächen, die durch die Fundamente, Zuwegung und gegebenenfalls weitere Sicherheitsbereiche belegt werden.
- Innere Abstandsflächen: Welche Fläche beansprucht ein Windpark mit mehreren WEA, die aufgrund von Sicherheits- und Abschattungseffekten gewisse Abstände untereinander einhalten müssen?
- Äußere Abstandsflächen: Welche Flächen sind als Abstandsflächen zu Wohngebieten, Straßen, Schutzgebieten oder anderen geografischen Elementen notwendig?

Je nach Anlagentyp (insbesondere Turmhöhe und Rotordurchmesser), Geländeart, lokalen Bestimmungen und Windverhältnissen variieren diese Flächenbedarfe durchaus signifikant.

Die Studie des Bundesverbandes für WindEnergie (BWE) von 2012 zum Thema „Potenzial der Windenergienutzung an Land“⁸ ermittelt bei einer als realistisch angenommenen Ausnutzung von zwei Prozent der Landesfläche ein Leistungspotenzial von 189 GW. Bei einer Annahme von 2.071 Volllaststunden würde dies einem Ertrag von 390 TW h entsprechen.

Von besonderer Bedeutung für eine Potenzialabschätzung sind die äußeren Abstandsflächen. Die Studie des Umweltbundesamtes⁹ zeigt auf, dass bei einer Abstandsvorgabe von 600 Metern bundesweit ein Leistungspotenzial von 1.188 GW abgeschätzt werden könnte, während bei einer Abstandsvorgabe von 2.000 Metern lediglich etwa 36 GW möglich sind.

Aufgrund der dichten Besiedelung Deutschlands ist es eine große Herausforderung, geeignete Flächen für die Aufstellung von WEA zu identifizieren. Hier besteht auch eine direkte Abhängigkeit zur Akzeptanzfrage. Letztendlich ist jede Fläche nur durch einen intensiven Interessenabgleich mit den lokalen Anliegern (Eigentümer, Gemeinde, Betreiber etc.) für die Nutzung mit WEA erschließbar.

⁸ BWE 2012.

⁹ Salecker/Lütkehus 2014.

3 Interdisziplinäre Beurteilung

Ampelbewertung

Materialverfügbarkeit		X			
Gesellschaftliche Akzeptanz		N	L		
Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung		X			
Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht		X			
Technologie	X				

Tabelle 4: Ampelbewertung Wind onshore/offshore (nearshore), N: national, gesamtgesellschaftlich, L: lokal

Materialverfügbarkeit		X			
Gesellschaftliche Akzeptanz		X			
Energiewirtschaftsrecht inklusive Regulierung		X			
Bau-, Umwelt- und Immissionsschutzrecht		X			
Technologie	X				

Tabelle 5: Ampelbewertung Wind offshore (farshore)

SWOT-Analyse

	Stärken	Schwächen
intern	- Niedrige LCOE unter den Erneuerbaren (insbesondere bei Onshore-Anlagen) - Hohe technische Zuverlässigkeit, auch offshore - Hoher industrieller Reifegrad (Turbinen) - Hohe Volllaststunden (offshore) - Ausdifferenziertes Produktangebot - Niedrige Betriebskosten - Starke netzstützende Eigenschaften - Hoher Energieertrag pro Fläche - Doppelte Nutzung der belegten Fläche - Nutzung lokaler Ressourcen - Nationale Wertschöpfung aus einer mittelständig geprägten Industrie - Kurze Energy-Payback-Time (< 6 Monate) - Keine Klimaauswirkungen und CO₂-Emissionen im Betrieb - Keine Altlasten, komplett recycelbar - Gut planbare Kosten - Vielfalt an Betreibermodellen, teilwei-	- Beeinträchtigung der Nachbarschaft (Sichtbarkeit, Geräuschpegel) - Ungleichmäßiges Wind-/Stromangebot - Geringe aktive Steuerbarkeit der Erzeugung - Hohe Investitions-/Kapitalkosten - Offshore immer noch in der Lernkurve - Heute nicht wettbewerbsfähig zu Marktpreisen - Lokal gegebenenfalls nachteilige Wirkung auf die Fauna

	Chancen	Risiken
	• Stärkere Nutzung von Strom in anderen Sektoren (Wärme, Verkehr, Stoffe) • Effiziente Speichertechnologien • Steigende Preise konventioneller Energieträger • Höhere Prognosezuverlässigkeit • Stärkere Reflexion der totalen Kosten verschiedener Primärenergieressourcen • Beschleunigte Kostenreduktion offshore (stabile Rahmenbedingungen → Lernkurve) • Export aus Deutschland in starken globalen Markt • Entwicklung einer Forschungslandschaft • Zügiger Netzausbau (auch offshore) • Bessere Balance zwischen Netzstützung im Windpark und Netzinfrastruktur • Kostensenkung durch hochspezialisierte Zulieferer (Innovation, Standards, Qualität) • Europäische einheitliche Richtlinien • Ersatzbedarf alter, konventioneller Kraftwerke • Zunehmende Bedeutung der Unabhängigkeit von instabilen Exportländern • Neue Geschäftsmodelle der EVUs • Öffnung des Strommarktes für neue Akteure • Verteuerung von CO₂-Zertifikaten • Nachhaltige Verankerung der Energiewende durch Partizipation • Beteiligungsmöglichkeiten • Lokaler Nutzen, gerechte Verteilung von Nutzen und Lasten • Vielfalt von Akteuren und Betreibermodellen • Kohärenz der politisch-administrativen Ebenen	• Steigende Rohstoffpreise (insbesondere für Stahl und Kupfer) • Hohes Zinsniveau • „Umkippen“ der öffentlichen Akzeptanz • Sinkende Investitionsbereitschaft der Energieversorgungsunternehmen (EVU) • Sinkende Attraktivität im privaten Kapitalmarkt (zum Beispiel Bürgerwindparks) • Keine langfristig stabilen Rahmenbedingungen • Rigidere Genehmigungsrichtlinien: Abstand, Höhenbegrenzung, Bundes-Immissionsschutzgesetz, Zertifizierung, Netzanschluss • Starke Asymmetrien in der finanziellen Lastverteilung (auf allen Verwaltungsebenen sowie unter verschiedenen Verbrauchern) • Abhängigkeit von politischer Unterstützung (wie bei allen Energieformen) • Starke Fokussierung der Debatte auf den Strompreis • Stresswirkung auf Anwohner • Gefahren für Vögel und Fledermäuse • Ungleiche Nutzen-Lasten-Verteilung zuungunsten der lokalen Ebene oder einkommensschwacher Gruppen • Bevorzugung bestimmter Akteure durch Ausschreibungsmodell • Inkohärenzen und Widersprüchlichkeiten im Mehrebenen-System

Tabelle 6: SWOT-Analyse Windkraft

Kritische Materialien

Materialengpässe, Fertigungsrestriktionen oder Entsorgungsprobleme bestehen nicht.

Rechtliche Hindernisse*Räumliche Steuerung des Ausbaus der Windenergie*

Windenergieanlagen befinden sich gegenwärtig in den zwar windgünstigen, aber auch dünn besiedelten Regionen des Nordens, zudem werden künftig große Windkraftkapazitäten offshore in Nord- und Ostsee entstehen. Die Einspeisung des Stroms aus Windkraft (onshore) erfolgt in der Regel auf der Verteilnetzebene. Dennoch stehen alle Spannungsebenen des Stromnetzes (Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene) vor neuen Anforderungen. Es gibt einen Bedarf an zusätzlichen Kapazitäten im Hochspannungsnetz, um Strom über weite Wege in die Verbrauchszentren in südlichen Landesteilen zu transportieren. Um eine gleichmäßigere räumliche Streuung der Anlagen zu erreichen und damit gegebenenfalls auch die Netzausbauerfordernisse zu senken, sind politische Anreizmechanismen denkbar, die dazu führen, dass Anlagen verstärkt in der Nähe der Verbrauchszentren errichtet und betrieben werden, auch wenn die natürlichen Gegebenheiten dort weniger optimal sind als in den verbrauchsfernen, aber standortgünstigen Regionen.

Gesellschaftliche Akzeptanzprobleme

Eine zentrale Herausforderung an die Gestaltung der Energiewende besteht darin, deren gesellschaftliche Akzeptanz zu gewährleisten. Im Folgenden wird auf die drei Akzeptanzebenen¹⁰ soziopolitische, lokale und Marktakzeptanz der Windenergie eingegangen.

Die Windenergie – wie auch andere EE – genießt in Deutschland ein ungebrochen hohes Maß an sozialer Akzeptanz, wie Meinungsumfragen zeigen.¹¹ Auch Anwohner bestehender WEA haben durchschnittlich positiv ausgeprägte Einstellungen nicht nur zur Windenergie allgemein, sondern auch zum lokalen Park.¹² Dies drückt sich auch auf kommunaler Ebene aus, wie etwa die Aktivitäten der 100-Prozent-Erneuerbare-Energie-Regionen belegen.

Auf lokaler Ebene stoßen verschiedene Windenergieprojekte zwar auf teilweise erheblichen Widerstand; übereinstimmend sprechen allerdings unterschiedliche Studien auf lokaler Ebene nur von einer Minderheit von Gegnern¹³, die jedoch überproportional häufiger aktiv werden als Befürworter. Welchen Einfluss die Gegner auf die Projektentwicklung haben, hängt von deren sozialer Vernetzung ab. Der Einfluss der Gegner auf die Errichtung von WEA wurde bisher nicht quantifiziert. Zudem dürfte er je nach lokaler Konstellation schwanken. Um eine Liste gescheiterter Projekte bewerten zu können, müssten zudem die Rolle der Genehmigungsbehörden sowie das Vorgehen der Projektentwickler berücksichtigt werden. Denn deren Verhalten beeinflusst die Akzeptanz. Verfügbar hierzu ist unter anderem eine Hemmnis-Analyse von Repowering-Projekten.¹⁴

Mit dem Widerstand gegen WEA dürften die wachsende Größe der Windparks und entsprechend hohe Investitionssummen im Zusammenhang stehen, die zu zunehmender Anonymisierung der In-

¹⁰ Vgl. Wüstenhagen et al. 2007.

¹¹ Vgl. AEE 2012-1; AEE 2012-2.

¹² Hübner/Pohl 2015.

¹³ Vgl. Hübner/Löffler 2013; Hübner/Pohl 2015; Pohl et al. 2015.

¹⁴ Böhnisch/Bahrenberg 2012.

vestoren und Veränderung des Landschaftsbildes führen.¹⁵ Oftmals befürchten die Kritiker negative Auswirkungen auf Mensch (Gesundheit, Immobilienwerte, Tourismus) und Natur durch WEA-Emissionen. Hinterfragt wird auch die Notwendigkeit der Projekte hinsichtlich ihres Beitrags zur Energiewende. Die Diskussion um die deutsche Energiewende – und damit die Windenergie – wird von der Debatte um Kosten und Nutzen und um Verteilungsgerechtigkeit begleitet.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Partizipation von Bürgerinnen und Bürgern die Akzeptanz von WEA stabilisieren beziehungsweise erhöhen kann. In Bezug auf die Koordinierung der Energiewende ist zum einen nach den Grundsätzen der Koordination zu fragen, zum anderen nach der Art und Weise, wie diese an die Bürger kommuniziert werden.

Partizipation

Die Akzeptanz von Windenergieanlagen ist unter anderem davon abhängig, ob die Bürger den Planungs- und Umsetzungsprozess als gerecht, fair und transparent empfinden und sich beteiligen können – im gesamten Prozess vom Planungsvorlauf bis zur Inbetriebnahme. Frühzeitige, umfassende und verständliche Informationen, die Benennung von Ansprechpartnern durch den Projektbetreiber und die Genehmigungsbehörde (nicht erst durch die Medien) sowie Beteiligungsmöglichkeiten sind daher zentral für das Vertrauen. Dies gilt ebenfalls für andere Projekte zur Transformation der Energieversorgung.

Stresswirkungen von WEA auf Anwohner

Anders als zu Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse liegen zu den Stresswirkungen von in Betrieb stehenden WEA auf Anwohner nur wenige Studien vor. Dieser Mangel an empirischem Anwohner-Monitoring begünstigt Unsicherheiten und Interpretationsspielräume, die von einigen Gegnergruppen und Medien argumentativ gegen den Ausbau der WEA eingesetzt werden.

Zur Wirkung des Schattenwurfs wurde 1999 eine Studie veröffentlicht, die eine erhebliche Belästigung durch den periodischen Schattenwurf von WEA belegte.¹⁶ Nachdem diese Ergebnisse Eingang in die Genehmigungsrichtlinien fand, weisen aktuelle Studien nur noch minimale Belästigungen durch Schattenwurf aus.¹⁷

Eine weitere – und wie beim Schattenwurf die weltweit einzige – Studie erfasste die Stresswirkung der Hinderniskennzeichnung von WEA.¹⁸ Eine erhebliche Belästigung durch die Hinderniskennzeichnung wurde nicht gefunden, wenngleich 16 Prozent der befragten Anwohner (13 Windparks, über 400 Befragte) Stresssymptome im Zusammenhang mit der Hinderniskennzeichnung erlebten. Insbesondere die nächtliche Hinderniskennzeichnung von WEA wird als relativ störend empfunden und als Argument gegen höhere WEA angeführt. Um eine geringere Lichtbelastung zu ermöglichen, hat im Juli 2015 der Bundesrat einer entsprechenden Änderung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen zugestimmt: Die Nachtkennzeichnung sämtlicher Windparks ist nun zu synchronisieren, um ein gleichzeitiges Blinken der Feuer zu erreichen. Und auch im Regelfall können nun in einem Windpark nur die äußeren WEA gekennzeichnet werden. Zudem ist

¹⁵ Ohlhorst 2009.

¹⁶ Pohl et al. 1999.

¹⁷ Hübner/Pohl 2015; Pohl et al. 2015.

¹⁸ Hübner/Pohl 2010; Pohl et al. 2012.

erstmals die bedarfsgerechte Befeuerung zulässig, bei der die Nachtkennzeichnung nur angeschaltet wird, wenn sich ein Luftfahrzeug nähert.

Im Vordergrund von Anwohnerbeschwerden stehen nach aktuellen Untersuchungen auf lokaler Ebene neben der Veränderung des Landschaftsbildes Klagen über Geräuschemissionen von WEA, obwohl die durch die TA Lärm vorgegebenen Grenzwerte für Geräuschemissionen eingehalten werden^{17,19}. Dieser Befund ist nicht auf verletzte Bestimmungen zum Mindestabstand und Schallpegel zurückzuführen. Vielmehr zeigte eine genauere Analyse, dass die Periodizität der Geräusche das stärkste belästigende Geräuschmerkmal war – nicht die Geräuschquantität, sondern die Geräuschqualität belästigt. Eine aktuelle Studie¹⁹ weist als Ursache der Belästigung die sogenannte Amplitudenmodulation aus. Deren Behebung stellt Anforderungen an die technische Weiterentwicklung der WEA und ihrer Rotorblätter. Positive Erfahrungen liegen mit „federartigen“ Profilen vor. Insgesamt geht für die Mehrheit der Anwohner von Windparks keine starke Geräuschbelästigung aus, Windparkgeräusche wurden als vergleichbar mit Verkehrslärm und als weniger lästig empfunden als die Geräusche landwirtschaftlicher Fahrzeuge.²⁰ Im Durchschnitt wurden sowohl der Windpark als auch der Straßenverkehr zwischen wenig und mittelmäßig belästigend eingeschätzt. Die Prävalenz stark durch WEA-Geräusche belästigter Anwohner lag bei der am Windpark Wilstedt, Niedersachsen, durchgeführten Studie bei zehn Prozent²¹, in einer schweizweiten Untersuchung waren es fünf Prozent.²² Stresswirkungen durch das veränderte Landschaftsbild konnten bisher in keiner Studie festgestellt werden. Werden die geltenden Immissionsschutzrichtlinien umgesetzt, findet sich zudem kein bedeutsamer Zusammenhang zwischen der Nähe zum Windpark und Belästigungen.²³ Nur hinsichtlich der Anzahl sichtbarer WEA zeigt sich ein bedeutsamer Zusammenhang: Mit der Anzahl gesehener WEA stieg die Belästigung an. Zudem korrelierten die Belastungen während der Planungs- und Bauphase positiv mit der Geräuschbelästigung. Je größer die erlebte Belastung und je weniger die Planung als den eigenen beziehungsweise Gemeindeinteressen entgegenkommend empfunden wurde, desto stärker war die spätere Geräuschbelästigung.

¹⁹ Pohl et al. 2015.

²⁰ Hübner/Löffler 2013; Pohl et al. 2015.

²¹ Pohl et al. 2015.

²² Hübner/Löffler 2013.

²³ Bakker et al. 2012; Hübner/Pohl 2015; Pedersen et al. 2009.

4 Relevanz / State of the Art / Marktverfügbarkeit

Globale Situation

Um die Situation in Deutschland besser einordnen zu können, macht ein Blick auf den Status der Windenergienutzung und -technologie weltweit sowie in Europa Sinn. Die weltweit installierte Gesamtleistung an Windenergieanlagen hat 2013 die Marke von 300 GW überschritten, derzeit werden jährlich etwa 45 GW neu installiert. Es wird davon ausgegangen, dass der Markt auf diesem Niveau für die nächsten Jahre stabil bleibt. Einzelne Märkte, zum Beispiel die USA, sind teilweise starken Schwankungen unterworfen, wenn lokale Fördermechanismen auslaufen, meistens wird dies aber von anderen Regionen aufgefangen.

Abbildung 3 zeigt die jährlichen Aufstellzahlen nach Regionen. Asien (insbesondere China) hat sich in den letzten fünf Jahren zum größten Markt für WEA entwickelt. Das sehr starke Wachstum in China ist seit 2010 allerdings durch Engpässe im Netzausbau eingebremst.

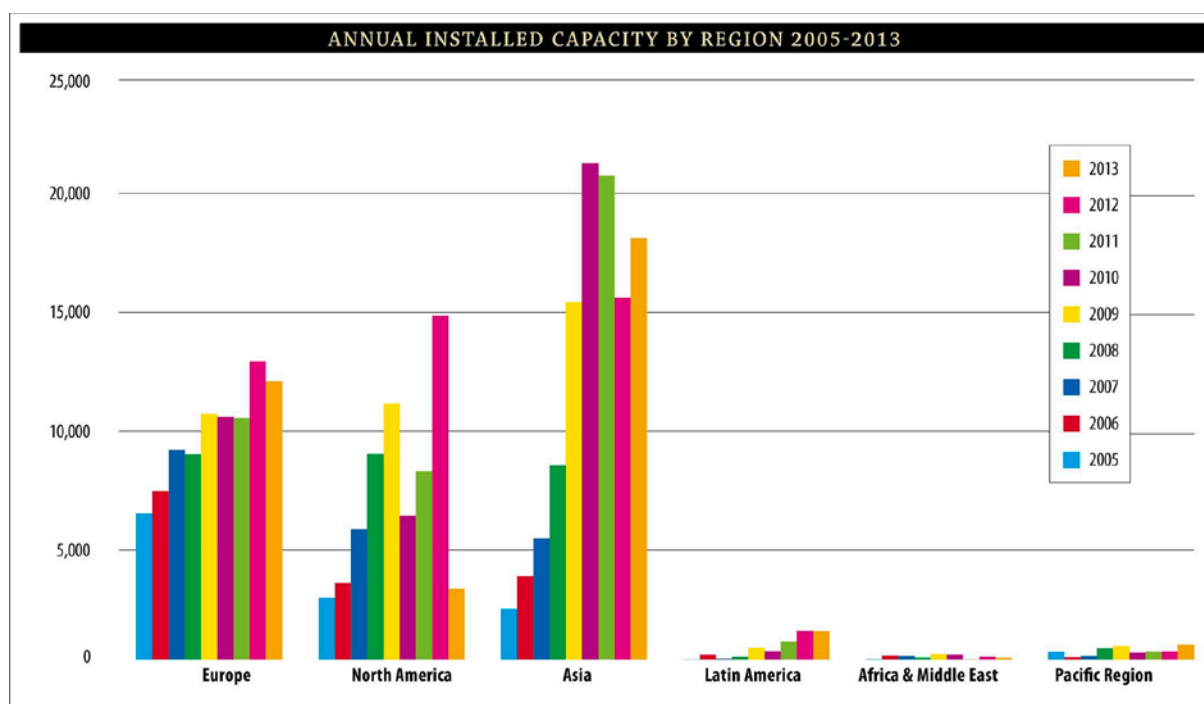


Abbildung 3: Jährliche Aufbaukapazität nach Regionen²⁴

Nach mehreren Jahren stabilen Wachstums gab es 2013 erstmalig einen Rückgang bei den Aufstellzahlen in Europa, getrieben durch starke Einbrüche in den südeuropäischen Märkten Spanien, Italien und Frankreich, wo die Regime für Vergütung beziehungsweise Genehmigung wechselten.

²⁴ GWEC 2013.

Unter den Top-10-Märkten für installierte Gesamtleistung (Abbildung 4) hat China den USA 2012 den ersten Rang abgelaufen. Deutschland hält unverändert die dritte Position. Die Top-10-Märkte machen rund 84,8 Prozent des Gesamtmarktes aus.²⁴

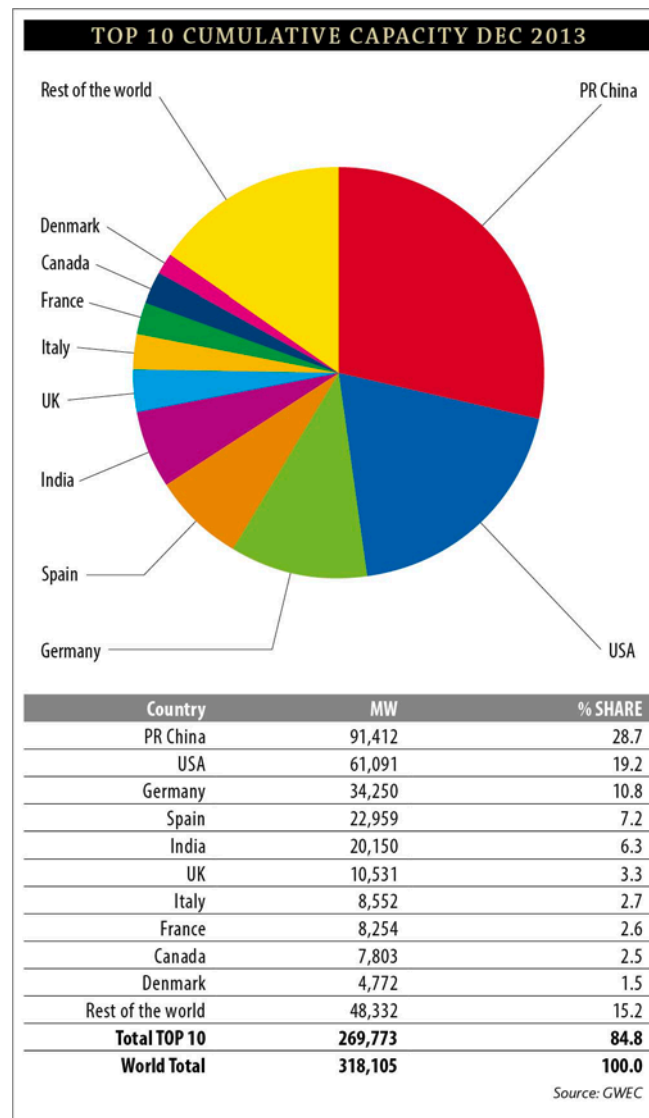


Abbildung 4: Top-10-Märkte bezüglich der Gesamtleistung²⁵

²⁵ GWEC 2013.

Abbildung 5 zeigt die Marktanteile unter den Herstellern. Der Markt ist seit dem Wachstum in China stärker segmentiert. Die Top-10-Hersteller (darunter vier chinesische Hersteller) beliefern nur knapp 70 Prozent des Marktes, mit zusammen 22,4 Prozent Marktanteil. Die deutschen Hersteller Enercon, Siemens und Senvion haben 2013 zusammen etwa 22 Prozent des Weltmarktes beliefert.

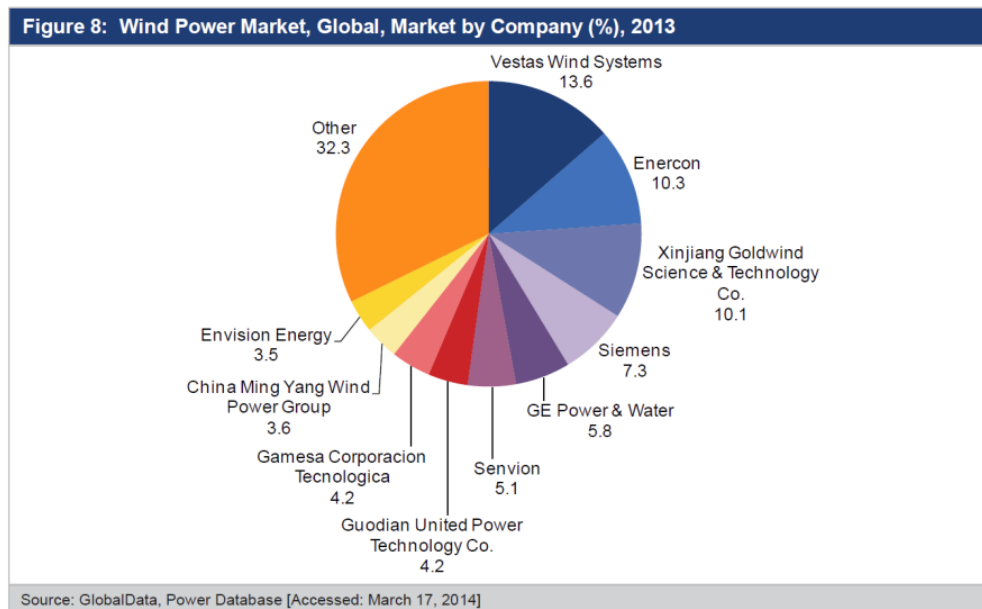


Abbildung 5: Marktanteile der Windenergie im Jahr 2013²⁶

²⁶ GlobalData 2014.

Abbildung 6 zeigt die installierte Gesamtleistung von Offshore-WEA nach Märkten in den Jahren 2012 und 2013. Großbritannien ist der mit Abstand führende Offshore-Markt. Dänemark hält als Pionierland Position 2 mit signifikantem Zubau im Jahr 2013. China hat bereits stark in Offshore investiert, allerdings ohne nennenswerten Zubau 2013.

Im europäischen Vergleich zeichnen sich die realisierten Offshore-Projekte in Deutschland durch Standorte fernab von der Küste in relativ großen Wassertiefen aus. Auch für die zukünftigen Projekte ist ein klarer Trend in Richtung größerer Projekte mit anspruchsvolleren Standortbedingungen erkennbar. Deutschland hat seine Kapazitäten 2013 nahezu verdoppelt, liegt damit aber noch auf Rang 5. Aufgrund der aktuellen Bauaktivitäten in der Nord- und Ostsee wird Deutschland ab 2015 absehbar den zweiten Platz belegen.

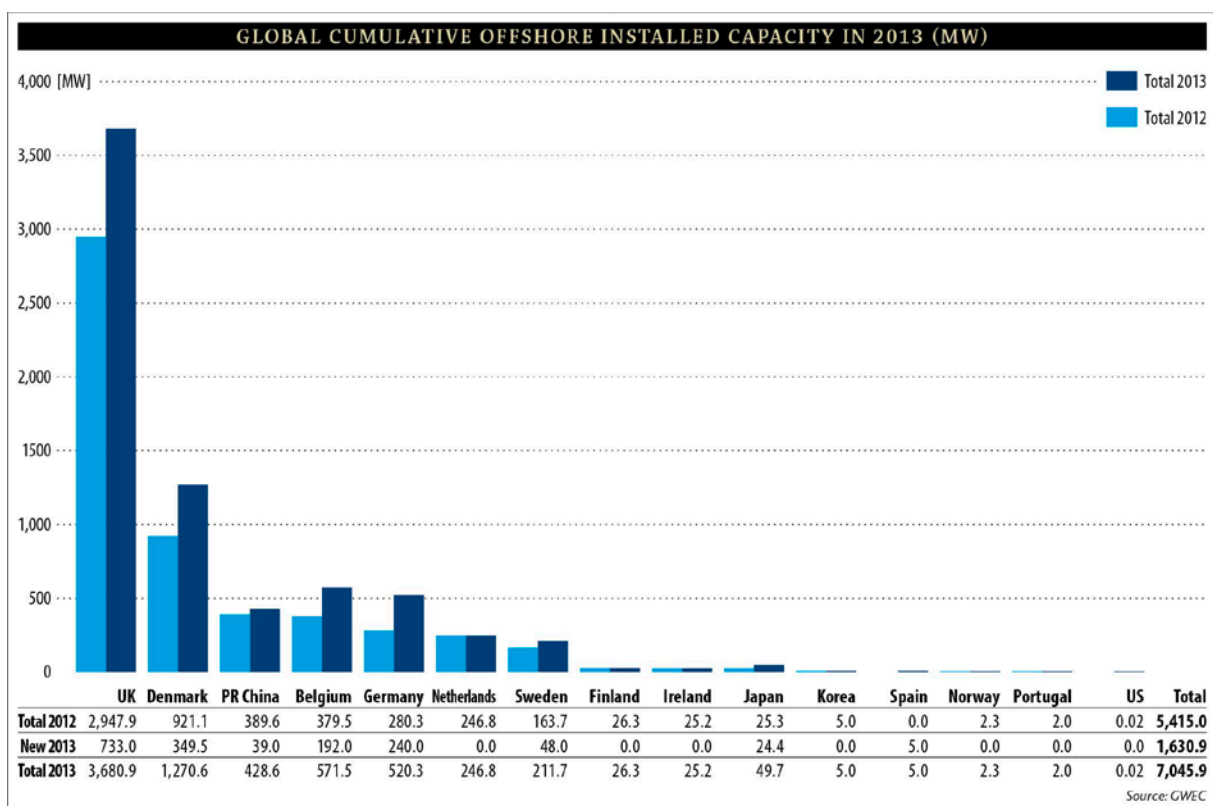


Abbildung 6: Weltweit installierte Gesamtleistung offshore²⁷

Die Marktprognosen für Offshore weltweit zeigt Abbildung 7. Kurz- bis mittelfristig wird Europa seine führende Rolle beim Offshore-Ausbau halten. Die Prognosen mussten in den letzten Jahren jedoch kontinuierlich reduziert werden. Regulative Hemmnisse, Engpässe und Verzögerungen im Netzausbau sowie Zurückhaltung in der Investitionsbereitschaft großer Entwickler (EVUs) haben das Tempo gedrosselt.

²⁷ GWEC 2013.

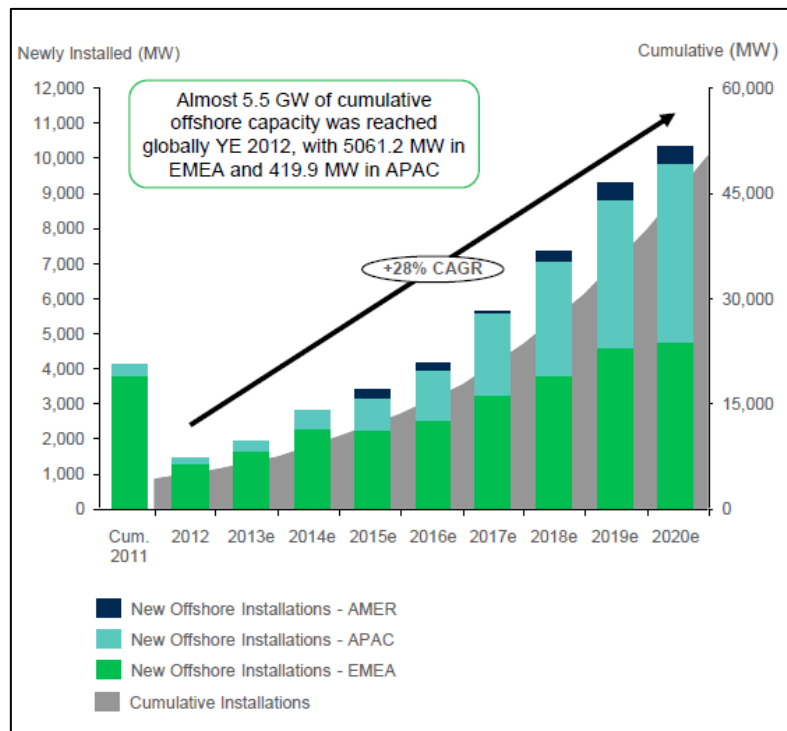


Abbildung 7: Marktprognose offshore weltweit²⁸

Nach der Lösung administrativer Probleme in China entwickelte sich 2014 zu einem Rekordjahr mit knapp 230 MW neu installierter Leistung auf See, auch für 2015 wird eine weitere Zunahme der Neuinstallationen prognostiziert. Ab 2020 wird das größte jährliche Installationsvolumen in der APAC-Region erwartet (> 5 GW p. a.).

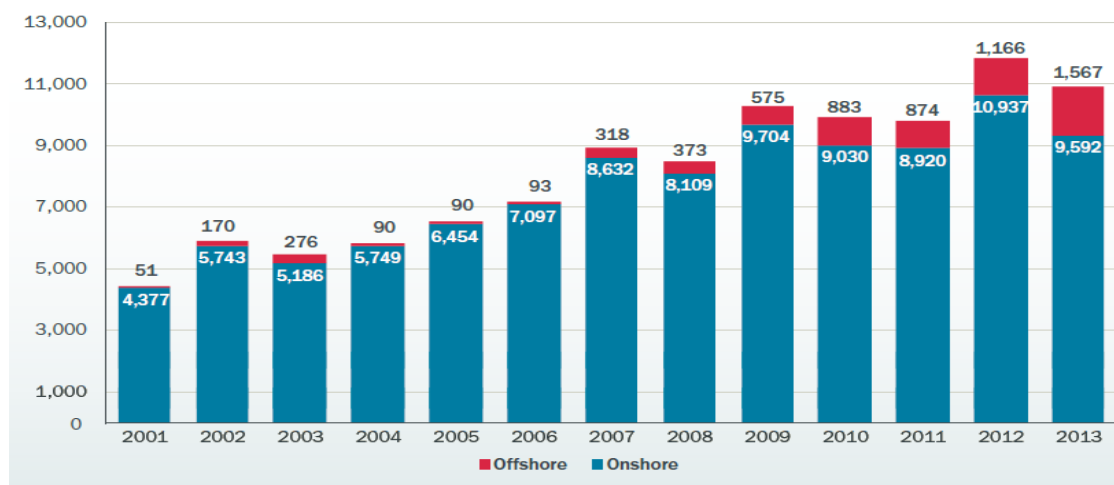
In Nordamerika wurde im Sommer 2015 mit der Installation des ersten Windparks an der Ostküste begonnen.

Aufseiten der Hersteller wird das Offshore-Marktgeschehen durch Siemens dominiert, das 56 Prozent des globalen Marktes beliefert hat. Vestas und REpower/Senvion ergänzen die Top 3 mit zusammen weiteren 30 Prozent.

Europäische Situation

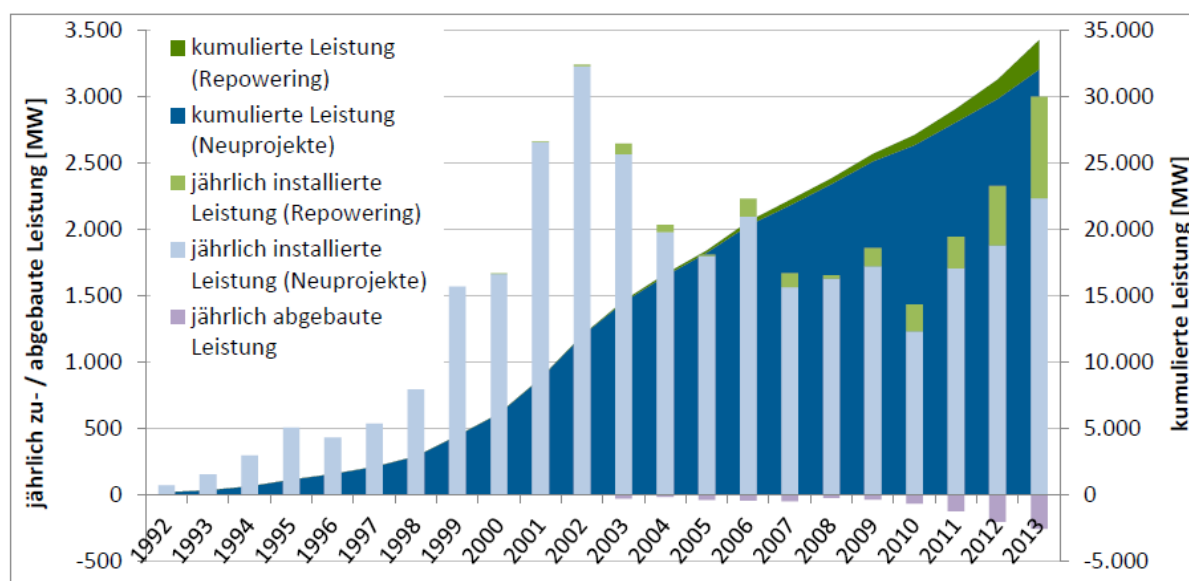
Europa hatte von 2009 bis 2013 ein jährlich installiertes Marktvolumen von 9 GW $\pm$ 1 GW (Abbildung 8). Marktprognosen gehen davon aus, dass das jährlich installierte Marktvolumen in Zukunft auf diesem Niveau bleibt. Noch bis 2009 wurde ein stetiger Anstieg von jährlichen Installationen mit ein paar Ausnahmen verzeichnet.

²⁸ MAKE 2013.

Abbildung 8: Jährliche Installationen in Europa ²⁹

Deutschland hatte 2013 mit 3,24 GW einen wesentlichen Anteil an der neu aufgestellten Leistung in Europa. Auch bei der installierten Gesamtleistung ist Deutschland mit 29 Prozent führend.

Status Deutschland

Abbildung 9: Entwicklung der jährlich installierten und kumulierten Leistung [MW] aus Windenergie an Land in Deutschland ³⁰

Der deutsche Markt ist geprägt von einem seit 2010 stark gewachsenen Zubau (siehe Abbildung 9). 2014 wurden 4.750 MW errichtet und damit das beste Aufstellergesamtjahr seit 2002 erreicht.

Onshore wurden überwiegend 3 MW-WEA errichtet und der Zubau mit nur 1.093 neuen Anlagen erreicht (im Vergleich zu 2.268 Neuanlagen im Rekordjahr 2002). Insgesamt war in Deutschland Ende 2013 eine Gesamtleistung von 34,2 GW in Betrieb. Das Repowering von alten Windenergieanlagen

²⁹ EWEA 2014.

³⁰ WindGuard 2013.

nimmt stetig zu, der Anteil betrug 2013 ca. 25 Prozent, wobei der Kapazitätsabbau/-zubau in Repowering-Projekten durchschnittlich ein Verhältnis von 1:3 hat.

Aus der Aufschlüsselung der regionalen Verteilung von neu installierter Windleistung 2013 ergibt sich eine zunehmende Bedeutung des Binnenlandes (Bayern und Rheinland-Pfalz). Die durchschnittliche Nabenhöhe beträgt in diesen Ländern 134 beziehungsweise 136 Meter. Die Leistung pro Rotorfläche der Turbinen variiert zwischen 296 W/m^2 (Bayern) und 424 W/m^2 (Schleswig-Holstein).

In diesem Zusammenhang gibt es bezüglich der WEA einen klaren Trend zu größeren Anlagen. Ende 2013 betrug die durchschnittliche Leistung aller Offshore-WEA weltweit 3,1 MW. 183 dieser WEA hatten bereits eine Leistung von mindestens 5 MW. In Deutschland machte diese Anlagenklasse Ende 2013 94 Prozent der installierten Anlagen aus.

Status Technologie

Die Verfügbarkeit von sehr guten Windstandorten nimmt weltweit ab. Der Anteil von IEC-III³¹-Standorten mit weniger Wind im Jahresmittel ($< 7,5 \text{ m/s}$ in Nabenhöhe) wird in Zukunft mehr als 50 Prozent des Marktes ausmachen. Einige Hersteller sprechen inzwischen von Windklasse „IEC IV“ als spezifische Schwachwindauslegung.

Hersteller reagieren auf diesen Trend mit einer geringeren Leistungsdichte ihrer Rotoren, also größeren Rotorflächen bezogen auf die installierte Generatorleistung. Daraus ergeben sich unmittelbar höhere Volllaststunden beziehungsweise ein höherer Kapazitätsfaktor und damit eine geringere Netzanschlusskapazität bezogen auf den Jahresertrag. Extreme Auslegungen haben eine Leistungsdichte unter 200 W/m^2 . Großbritannien spielt hier die führende Rolle, gefolgt von Deutschland.

Die zunehmende Knappheit guter Standorte führte auch zu einem Trend von größeren Anlagen mit höherem Ertrag an einem gegebenen Standort – insbesondere in den dicht besiedelten europäischen Regionen. Es wird erwartet, dass bereits 2016 etwa 50 Prozent der neu aufgestellten Anlagen 3 MW und mehr Leistung haben. Die 2 MW-WEA wird damit als Standardmaschine der letzten Dekade abgelöst.

Deutschland ist in dieser Entwicklung ein treibender Motor. Die Anlagengröße hat sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich vergrößert und lag 2013 bei etwa 2,6 MW beziehungsweise 95 Metern Durchmesser (Abbildung 10). Neben Generatorleistung und Rotordurchmesser hat sich auch die Nabenhöhe kontinuierlich erhöht und lag 2013 bei durchschnittlich 117 Metern.

³¹ Mit IEC (International Electrotechnical Commission) werden unterschiedliche Windklassen bezeichnet. Jeder Windklasse wird eine bestimmte durchschnittliche Windgeschwindigkeit zugeordnet (IEC I: 10 m/s , IEC II: $8,5 \text{ m/s}$ und IEC III: $7,5 \text{ m/s}$, IEC IV: 6 m/s).

Durchschnittliche Anlagenkonfiguration an Land, Errichtung 2013		
2013	durchschnittliche Anlagenleistung	2.598 kW
	durchschnittlicher Rotordurchmesser	95 m
	durchschnittliche Nabenhöhe	117 m

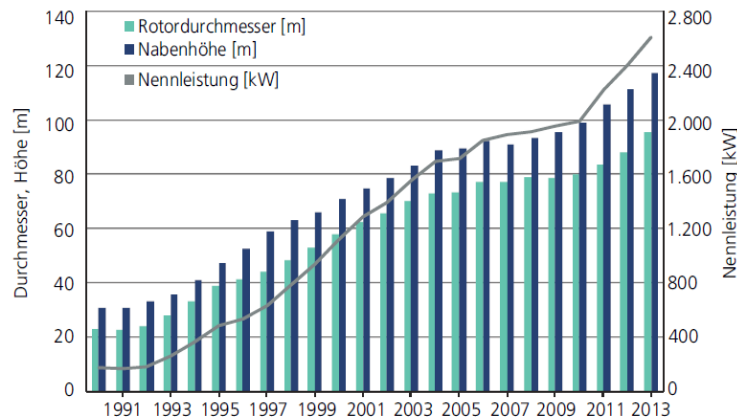


Abbildung 10: Entwicklung der durchschnittlichen Hauptdaten von WEA in Deutschland³²

In Deutschland werden aktuell 73 verschiedene Anlagenvarianten von den verschiedenen Herstellern angeboten. Dabei gibt es für jede Leistungsklasse ein breites Spektrum an Möglichkeiten, um die Anlage bezüglich Rotordurchmesser und Nabenhöhe optimal an die Bedingungen des jeweiligen Standortes beziehungsweise Projektes anzupassen.

Um diese Variantenvielfalt zu effizienten Kosten anbieten zu können, arbeiten die Hersteller heute mit modularen Plattformen, das heißt, zu einem standardisierten Maschinenhaus können verschiedene Rotorblatt- und Turmtypen angeboten werden.

Aus einer Vielzahl von Turbinenkonzepten in den frühen Jahren der Windenergienutzung haben sich heute zwei Varianten für den Triebstrang etabliert, die auf dem deutschen Markt in etwa gleich stark vertreten sind: Anlagen mit Getriebe und schnell laufendem Generator sowie sogenannte Direktantriebsanlagen ohne Getriebe, bei denen der Rotor direkt einen langsam laufenden Generator antreibt.

WEA erzielen heute eine technische Verfügbarkeit von über 99 Prozent, das heißt, mehr als 99 Prozent der Zeit, in der die Anlagen bezüglich Windbedingungen und Netzverfügbarkeit Strom produzieren könnten, tun sie dies auch. Für Maschinen, die trotz ihrer extrem hohen jährlichen Betriebsstunden nur zweimal routinemäßig gewartet werden, ist das ein sehr hoher Wert. Solche Standards werden inzwischen auch offshore erreicht, obwohl dort auch kleine Schäden wegen der schlechteren Erreichbarkeit der Anlagen umgehend zu deutlich höheren Ausfallzeiten führen als onshore. Offshore-WEA dürften damit zu den größten in Serie gebauten Maschinen gehören, die an schlecht erreichbaren Standorten mit extrem hohen Betriebsstunden bei geringster manueller Betreuung sehr zuverlässig laufen.

³² WindGuard 2013; Fraunhofer IWES 2013-1.

Abbildung 11 illustriert den wesentlichen Vorteil der Windenergienutzung offshore aus energiewirtschaftlicher Sicht. Die Leistungsdauerkennlinie hat im Vergleich zu typischen Onshore-Windfarmen oder gar PV-Anlagen deutlich kraftwerksähnlichere Charakteristika. Etwa 1.500 Stunden pro Jahr läuft ein Windpark offshore mit voller Leistung und knapp 50 Prozent der Zeit noch mit 50 Prozent der installierten Leistung.

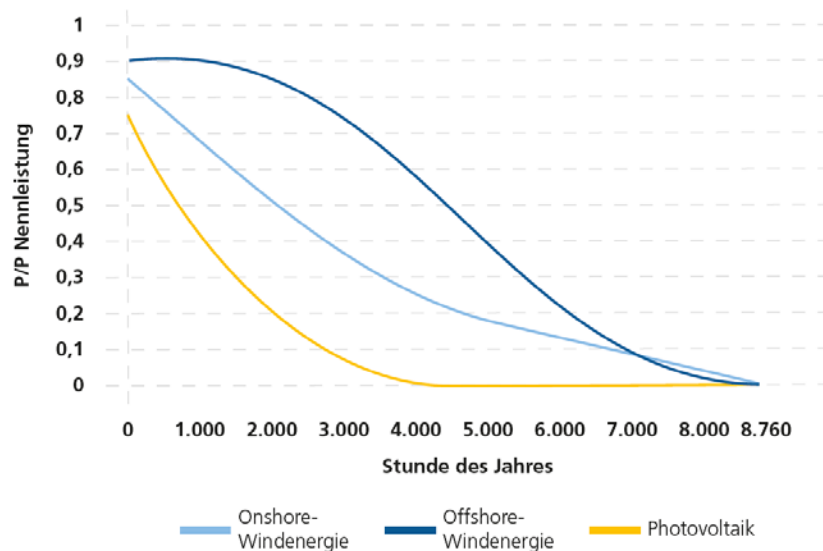


Abbildung 11: Vergleich der Leistungsdauerkennlinie vom Offshore-Windpark Baltic 1 mit einem typischen Onshore- und PV-Kraftwerk³³

So kommen gute Offshore-Standorte auf über 4.000 Volllaststunden im Jahr; die meisten Offshore-Parks liegen im Bereich zwischen 2.500 und 3.500 Volllaststunden. Bezogen auf aktuell im Jahr 2015 aufgestellte Onshore-Windenergieanlagen (2,5 MW, 128 m Rotor) betragen die Volllaststunden ca. 2.300.

³³ Fraunhofer IWES 2013-2.

5 Forschungs-, Entwicklungs- und Standardisierungsbedarf

Der sehr starke inter- und transdisziplinäre Charakter der Windenergie vereint nicht nur zahlreiche technische und nicht technische Fachrichtungen, sondern bietet auch Aufgabenfelder für Hochschulen, Universitäten und außeruniversitäre Großforschungseinrichtungen gleichermaßen. Bestehende Allianzen und Kooperationen zeigen bereits, dass die fach- und institutionsübergreifende Zusammenarbeit in der Windenergie besonders ausgeprägt ist und so das gesamte Spektrum des deutschen Wissenschaftssystems genutzt wird. Dadurch können auch solche Forschungsfragestellungen bearbeitet werden, die für den weiteren Umbau des gesamten Energiesystems zwar wesentlich sind, aufgrund ihres vorwettbewerblichen und risikobehafteten Charakters aber von industrieller Seite nicht oder nur sehr stark eingeschränkt bearbeitet werden.

Windenergieunternehmen entscheiden über eine Partizipation an Forschungsaktivitäten sehr häufig anhand von Renditekriterien (kurzfristiges Return on Investment), die auf Basis von betriebswirtschaftlichen Betrachtungen bewertet werden. Damit findet eine Optimierung von Partikularinteressen statt, deren Summe in der Regel nicht zum Optimum der übergeordneten Gesamtbetrachtung führt. Zudem weisen die Entwicklungsaktivitäten der Unternehmen aufgrund der betriebswirtschaftlichen Fokussierung starke Parallelitäten auf, ohne dass jedoch der Schritt zur Gemeinschaftsforschung gewagt wird. Das Verlassen ausgetretener Pfade und die Möglichkeit der Erforschung gänzlich neuer Konzepte werden so stark erschwert und die Innovationsmöglichkeiten dadurch gebremst.

Es ist jedoch erforderlich, technische, wirtschaftliche, ökologische, gesellschaftliche und energiepolitische Bedingungen miteinander in Einklang zu bringen. Mit dem Fokus auf eine integrierende Systemforschung wird in einem intensiven Austausch zwischen den Teildisziplinen Grundlagenwissen generiert werden, das für die anwendungsorientierte Energieforschung zur Verfügung gestellt wird. Dabei ist der Praxisbezug stets der leitende Gedanke, sodass mit den Forschungsergebnissen die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Windenergiebranche gestärkt wird und die Windenergie in Deutschland wesentliche Anteile und Aufgaben des zukünftigen Energiesystems übernehmen kann. Dazu sind auch Sprunginnovationen erforderlich. Diese bergen jedoch aufgrund eines Technologiewechsels erhebliche Risiken, die nur durch eine effiziente begleitende Forschung aufgefangen werden können.

Entsprechend der großen Bedeutung auch für das europäische Energiesystem wurden verschiedene Expertenkreise zusammengerufen, um die zukünftigen Herausforderungen in der Windenergieforschung und -entwicklung zu identifizieren. Für die kurz- bis mittelfristigen Entwicklungen ist die europäische Technologieplattform Windenergie³⁴ (TPWind) – ein Zusammenschluss von ca. 180 Expertinnen und Experten aus der Windenergieindustrie und -forschung – sicherlich das bedeutendste Gremium, welches in der gemeinsam erarbeiteten „Strategic Research Agenda / Market Deployment Strategy (SRA/MDS)“³⁵ die zu unternehmenden Anstrengungen identifiziert und Handlungsempfehlungen aufzeigt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Zuordnung der TPWind-Forschungsprioritäten zu den Themenbereichen:

³⁴ www.windplatform.eu.

³⁵ TPWind 2014.

- Externe Bedingungen
- Windenergieanlagensysteme
- Netzintegration
- Offshore-Technologie
- Markteinführungsstrategien

Research Priorities	External conditions, climate, waves, and soil	Wind turbine systems	Grid integration	Offshore technology	Market deployment strategy
Measurement systems	x			x	
Interaction climate-wind turbines	x				
Multi-scale modelling	x				
Wakes	x			x	
Forecasting	x		x		
Condition monitoring	x			x	
Standardization	x			x	x
Wind turbine as a flow device	x	x		x	
Wind turbines as a mechanical structure/material		x		x	
Wind turbine as a grid connected electricity plant		x		x	
Wind turbine as a control system	x	x	x	x	
Concepts and integration		x			
Operation and maintenance	x	x		x	x
Standards	x	x			x
Wind power capabilities for ancillary services provision			x		x
Grid connection, transmission, operation	x		x		x
Wind energy in grid management and power markets			x	x	x
Sub-structures				x	
Logistics, assembly and de-commissioning	x			x	x
Electrical infrastructure			x	x	x
Wind turbines and farms	x			x	
Operations and maintenance	x			x	x
External conditions	x			x	
Safety, environment and education	x				
Enabling market deployment					x
Adapting policies					x
Optimising administrative					
Integrating wind to the natural environment	x				x

Research Priorities	External conditions, climate, waves, and soil	Wind turbine systems	Grid integration	Offshore technology	Market deployment strategy
Ensuring public acceptance to wind power					x
Human resources					x

Tabelle 7: Forschungsprioritäten laut TPWind³⁶

Zur Identifizierung der mittel- bis langfristigen Herausforderungen haben international anerkannte Experten der European Academy of Wind Energy³⁷ (EAWC) die Themenbereiche herausgearbeitet, deren Bearbeitung für den weiteren Umbau des Energiesystems auf Basis eines starken Windenergieanteils vonnöten ist:

Windströmungen und Turbulenzen

Eine optimale Installation von Windenergieanlagen und -parks erfordert ein tiefes Verständnis der vorherrschenden Windbedingungen für alle potenziellen Areale und Flächen, das heißt flaches Terrain, komplexes sowie bewaldetes Gelände, urbanisierte Regionen und Flächen auf See. Die zugrunde liegenden Gleichungen, welche die atmosphärischen Strömungen beschreiben, sind zwar hinreichend bekannt, lassen sich jedoch nicht analytisch lösen. Daher können sie nur durch Näherungsansätze gelöst werden, die kontinuierliche experimentelle Validierungen erfordern.

Aerodynamik

Windenergieanlagen und -parks sind unbeständigen dreidimensionalen aerodynamischen Phänomenen ausgesetzt, welche in Wechselwirkung mit der Struktur stehen. Diese reichen von Effekten im Sub-Millimeter-Bereich in der Grenzschicht an Rotorblättern bis hin zu einigen hundert Kilometern bei Windpark-Clustern. Eine große Herausforderung ist es daher, das Zusammenspiel dieser aerodynamischen Phänomene über einen so großen Skalenbereich zu verstehen, zu modellieren und mithilfe des Verständnisses von Aeroelastizität, Systemdynamik und Regelungsstrategien die strukturelle Lebenserwartung der Turbinen mit der Windparkperformanz zu koppeln.

Entwurfstechniken und Bemessungsverfahren

Aktuelle Auslegungen von Windenergieanlagen beruhen häufig auf Iterationsprozessen zwischen disziplinenorientierten Expertengruppen, in denen eine akzeptable Kompromisslösung erarbeitet wurde. Ein integraler Entwurfsansatz fehlt bis heute. Echte ganzheitliche Bemessungs- und Entwurfsverfahren, die auf validierten numerischen Verfahren mit adaptiven Genauigkeiten und automatisierten Algorithmen basieren, würden zu besseren und effizienteren Anlagen führen.

Materialien und Struktur

Rotorblätter aus Kompositmaterialien und Tragstrukturen aus Stahl sollten in der Lage sein, stark fluktuierende Wechsellasten größtenteils wartungsfrei und über einen Zeitraum von 25 bis 30 Jahren zu überstehen. Die Auslegung der strukturellen Komponenten und der Windenergiesysteme insgesamt auf diesen langzeitlichen Betrieb stellt eine enorme Herausforderung dar und erfordert ein fundiertes Verständnis von Gesamtdynamik, neuen Materialien und Strukturkonzepten sowie deren

³⁶ TPWind 2014, S. 18.

³⁷ EAWC 2014.

Anwendungen. Verbesserte, innovative Methoden und Verfahren, um die neuen Materialien und Strukturen zuverlässig anwenden sowie die Lebensdauer und das Tragverhalten dieser neuen Materialien und Strukturen genau und effizient bewerten zu können, sind dabei unerlässlich.

Modellierungen von Zuverlässigkeit und Unsicherheiten

Für die Optimierung von Wartungs- und Betriebsprozessen sind sowohl ein tiefgehendes Verständnis der externen Bedingungen als auch Anstrengungen in den Bereichen Monitoring, Diagnose und Datenanalyse notwendig. Hier bedarf es wesentlicher Fortschritte in der Schadens- und Zustandsüberwachung, um probabilistische Wartungskonzepte und Entscheidungshilfen wesentlich voranzubringen.

Hydrodynamik, Bodeneigenschaften und schwimmende Turbinen

Im Vergleich zur Öl- und Gasindustrie sind in der Windenergie im Meeresboden verankerte oder schwimmende Strukturen kleiner und operieren unter unterschiedlichen Bedingungen. Daher sind die Simulationswerkzeuge, die heute den Stand der Technik darstellen, in ihrer Anwendbarkeit und Übertragbarkeit eingeschränkt. Die Herausforderung besteht darin, alle für die Windenergie auf See relevanten hydrodynamischen und geotechnischen Effekte in einer effizienten, präzisen und betriebssicheren Weise zu beschreiben und zu kombinieren.

Umformung elektrischer Energie

Die Umformung elektrischer Energie umfasst alle Schritte, von der Rotornabe bis zum mechanischen und elektrischen System, inklusive Frequenzumrichter und Stromwandler sowie elektrischer Infrastrukturen in Offshore-Windparks. Die wissenschaftliche Herausforderung besteht darin, kritische technische Hindernisse durch die Nutzung bestehender und neuer Umwandlungslösungen auszuräumen und so die Gestehungskosten – insbesondere im Bereich großer zukünftiger Offshore-Windenergieanlagen – deutlich zu senken.

Regelungs- und Systemidentifikation

Das Zusammenspiel von Leistungsumrichtern und den Anforderungen aus der Netzintegration hat den drehzahlvariablen Betrieb mit Blattverstellungen zum heutigen Industriestandard gemacht. Neue Herausforderungen ergeben sich jedoch in den Bereichen Systemkomplexität, schwimmende Strukturen oder sehr großer Windparks.

Windparks als Kraftwerke

Der stetige Ausbau der Windenergie bringt es mit sich, dass Windparks ähnlich wie konventionelle Kraftwerke agieren sollen, um auf diese Weise eine zuverlässige Energieinfrastruktur und einen stabilen Netzbetrieb sicherzustellen. Neben der Spannungs- und Frequenzerhaltung als Basis-Systemdienstleistungen sind weitere Anstrengungen notwendig, um die Leistungsbilanz zum Beispiel durch windparkscharfe Kurzfristvorhersagen der Windleistung zu verbessern.

Ökologische Aspekte der Windenergie auf See

Durch das rasche Wachstum der Windenergie auf See kumulieren sich ökologische Einflüsse wie Rammschall, die Einbringung von Hartsubstraten als Kolkenschutz, die drehenden Anlagen an sich und die Installations- und Wartungsarbeiten der Menschen in den Windparks. Die Effekte auf Benthos, Fische, Meeressäuger und Vögel reichen von negativen über neutrale bis hin zu positiven Auswirkungen. Vorbeugende Maßnahmen und Gewässerbewirtschaftung bieten die Möglichkeiten eines zusätzlichen Nutzens neben der reinen Energiewandlung.

Effiziente Logistik für die Installation, den Betrieb und den Rückbau

Bei der Betrachtung gesamter Lebenszyklen einer Windenergieanlage sind in vielen Phasen bedarfsgerechte und anwendungsspezifische logistische Konzepte vorzusehen. Die Planungsunsicherheiten durch Wind und Wetter, knappe Ressourcen und das technische Risiko beim Betrieb haben insbesondere offshore direkte Auswirkungen auf das Management logistischer Prozesse. Exemplarische Aspekte, die zukünftig Gestaltungs- und Innovationsspielraum und damit auch ein enormes Optimierungspotenzial bieten, umfassen die Modularisierung von Anlagenkomponenten, die Standardisierung von Ladungsträgern, die Früherkennung und den Prozessanstoß im Fehlerfall sowie die transparente Überwachung von Supply Chains. Vielfach ermöglichen dezentral eingesetzte Informations- und Kommunikationsanwendungen (RFID, Telematik, eingebettete Systeme, Condition Monitoring etc.) die prozessualen Innovationen. Auch die durchgehende Einbeziehung logistischer Fragestellungen beispielsweise bei der Konstruktion und Entwicklung neuer Anlagen oder Gründungsstrukturen wird zukünftig zu einem Ausbau der Windenergie führen.

Fertigung und Produktion von Großanlagen in Serie

Die Fertigung von Großanlagen in Kleinserie ist hinsichtlich der einsetzbaren Fertigungs- und Produktionstechnologien ein herausforderndes Themengebiet, um Anlagenkosten zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität der Produkte zu verbessern. Hinsichtlich der Materialflüsse von Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffen sowie vormontierten Baugruppen in der Produktion sind einerseits Konzepte der kundenindividuellen Massenproduktion (wie in der Automobilindustrie), aber andererseits auch der sogenannten Baustellenfertigung (wie zum Beispiel beim Bau großer Schiffe) nicht unmittelbar anwendbar. Ersteres ist bedingt durch die vergleichsweise kleinen Serien, bei denen sich investitionsintensive Handhabungs- und Automatisierungstechnologien in vielen Fällen nicht lohnen, Letzteres lässt Potenziale durch optimierte Materialversorgung der Produktion und Teilautomatisierungen ungenutzt. Am Beispiel der Fertigung von Rotorblättern wird derzeit bereits die vollständige Automatisierung des Legeprozesses textiler Halbzeuge erforscht, ähnliche Automatisierungskonzepte sind auch für weitere Teilprozesse erforderlich.

Rotorblattentwicklungen

Rotorblätter sind nicht nur hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz zu bewerten und weiterzuentwickeln, sondern auch hinsichtlich der Qualität der von ihnen verursachten Geräusche. Dies ist im Hinblick auf die soziale Akzeptanz von WEA eine wesentliche Herausforderung, der mit interdisziplinären Ansätzen begegnet werden kann. So können etwa bei der technischen Optimierung von Rotorblättern oder Tragkonstruktionen von WEA bereits in der Entwicklung deren Auswirkungen auf die Akzeptanz erfasst und bereits in der Konstruktion berücksichtigt werden.

Gesamtsystem

Aufgrund der bereits erwähnten Vielzahl an involvierten Fachgebieten und Disziplinen besteht das Bestreben, auf Gesamtebene von Schnittstellen und Wissensaustausch zu profitieren. Material, Struktur, Regelung, Umwelt und elektrische Systeme sind in einer bis dato nicht gekannten Art und Weise bei Windenergieanlagen verflochten und bedürfen ganzheitlicher Ansätze, um Wissensgewinne optimal zu nutzen.

Literatur

Alle Daten ohne weitere Literaturangaben basieren auf Erfahrungswerten der Mitwirkenden der Fachgruppe sowie eigenen Berechnungen und Abschätzungen der Autoren. Die Urheber räumen ein Nutzungsrecht für die Verwendung der Abbildungen in diesem Technologiesteckbrief im Rahmen der Online-Publikation ein.

AEE 2012-1

Agentur für Erneuerbare Energien: *Bürger stehen weiterhin hinter dem Ausbau der Erneuerbaren Energien*, Repräsentative Umfrage des Meinungsforschungsinstituts TNS Infratest im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien von August bis Oktober 2012. URL: www.unendlich-viel-energie.de/de/detailansicht/article/4/buerger-stehen-weiterhin-hinter-dem-ausbau-der-erneuerbaren-energien [Stand: 05.11.2015].

AEE 2012-2

Agentur für Erneuerbare Energien: *Unterstützung für Erneuerbare Energien von der Küste bis zu den Alpen ungebrochen*, 2012. URL: www.unendlich-viel-energie.de/de/detailansicht/article/4/unterstuetzung-fuer-erneuerbare-energien-von-der-kueste-bis-zu-den-alpen-ungebrochen [Stand: 05.11.2015].

Bakker et al. 2012

Bakker, R./Pedersen, E./van den Berg, G./Stewart, R./Lok, W./Bouma, J.: „Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress“. In: *Science of the Total Environment*, 425, 2012, S. 42–51.

Böhnisch/Bahrenberg 2012

Böhnisch, B./Bahrenberg, M.: *Qualitative Analyse der Hemmnisse des Repowering von Windenergieanlagen*, Studienbericht 2012. URL: http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/Hemmnisanalyse_Webversion.pdf [Stand: 04.11.2015].

BWE 2012

Bundesverband WindEnergie: *Potenzial der Windenergienutzung an Land*, 2012. URL: https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/studie-zum-potenzial-der-windenergienutzung-land/bwe_potenzialstudie_kurzfassung_2012-03.pdf [Stand: 02.11.2015].

EAWA 2014

European Academy of Wind Energy: *Wind in power*, 2013 European statistics, February 2014. URL: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf [Stand: 02.11.2015].

Elsner et al. 2015

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Analyse: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

ForWind – Zentrum für Windenergieforschung 2014

ForWind – Zentrum für Windenergieforschung: Windenergie-Statistik, Jahr 2014. URL:
<http://www.windguard.de/service/knowledge-center/windstatistik/jahr-2014.html>
<http://windmonitor.de> [Stand: 02.11.2015].

GlobalData 2014

GlobalData: Power Database, 2014. URL: www.globaldata.com [Stand: 17.03.2014].

GWEC 2013

Global Wind Energy Council: Global Wind Report Annual Market Update, 2013. URL:
http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf [Stand: 25.09.2015].

Hübner/Löffler 2013

Hübner, G./Löffler, E.: *Wirkungen von Windkraftanlagen auf Anwohner in der Schweiz: Einflussfaktoren und Empfehlungen*, Forschungsbericht, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2013.

Hübner/Pohl 2010

Hübner, G./Pohl, J.: *Akzeptanz und Umweltverträglichkeit der Hinderniskennzeichnung von Windenergieanlagen*, Forschungsbericht, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2010.

Hübner/Pohl 2015

Hübner, G./Pohl, J.: *Mehr Abstand – mehr Akzeptanz? Ein umweltpsychologischer Studienvergleich*, Berlin: Fachagentur Windenergie an Land 2015.

Fraunhofer IWES 2013-1

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik: Windenergiereport Deutschland 2013. URL: http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windenergie_Report_2013.pdf [Stand: 02.11.2015].

Fraunhofer IWES 2013-2

Rohrig, K./Richs, Ch./Bofinger, S./Jansen, M./Siefert, M./Pfaffel, S./Durstew, M.: *Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende Kurzfassung*, 2013. URL:
<https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Energiewirtschaftliche-Bedeutung-von-Offshore-Windenergie.pdf> [Stand: 02.11.2015]

Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015

Leopoldina/acatech/Akademienunion (Hrsg.): *Stellungnahme: Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015.

MAKE 2013

MAKE: Data 2013. URL: <http://www.consultmake.com/> [Stand: 02.11.2015].

Metz/tec.Lehrerfreund 2011

Metz, H.: Strom aus Wind, 22.11.2011. URL: <http://www.lehrerfreund.de/technik/1s/stromerzeugung-mit-windenergieanlagen1/4042> [Stand: 04.11.2015].

Ohlhorst 2009

Ohlhorst, D.: *Windenergie in Deutschland. Konstellationen, Dynamiken und Regulierungspotenziale im Innovationsprozess*, Reihe Energiepolitik und Klimaschutz, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2009.

Pedersen et al. 2009

Pedersen, E./van den Berg, F./Bakker, R./Bouma, J.: „Response to noise from modern wind farms in the Netherlands“. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 126, 2009, S. 636–643.

Pohl et al. 1999

Pohl, J./Faul, F./Mausfeld, R.: *Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen*, Kiel: Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel 1999.

Pohl et al. 2012

Pohl, J./Hübner, G./Mohs, A.: „Acceptance and stress effects of aircraft obstruction markings of wind turbines“. In: *Energy Policy*, 50, 2012, S. 592–600.

Pohl et al. 2015

Pohl, J./Gabriel, A./Hübner, G.: „Geräuschwirkungen von Windenergieanlagen auf Anwohner – eine interdisziplinäre Analyse“. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 10 (3): 133, 2015, S. 1863–4672.

Salecker/Lütkehus 2014

Salecker H./Lütkehus I.: *Einfluss des Abstands zwischen Windenergieanlagen und Wohnbauflächen auf das Potenzial der Windenergie an Land*, Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse auf Grundlage der UBA-Studie Potenzial der Windenergie an Land, 2014.

TPWind 2014

TPWind: Strategic Research Agenda / Market Deployment Strategy (SRA/MDS), 2014. URL: http://www.windplatform.eu/fileadmin/ewetp_docs/Documents/reports/TPWind_SRA.pdf [Stand: 26.02.2015].

Wellmer/Herzig

Wellmer, Friedrich-Wilhelm/Herzig, Peter: *Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016.

WindGuard 2013

Deutsche WindGuard GmbH: Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Jahr 2013, URL: <https://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/statistiken/fact-sheet-onshore-statistik-jahr-2013-final.pdf> [Stand: 01.11.2015].

Wüstenhagen et al. 2007

Wüstenhagen, R./Wolsink, M./Bürer, M. J.: „Social acceptance of renewable energy innovation: an introduction to the concept“. In: *Energy Policy*, 35, 2007, S. 2683–2691.

Über das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Acht Arbeitsgruppen bündeln fachliche Kompetenzen und identifizieren relevante Problemstellungen. Interdisziplinär zusammengesetzte Ad-hoc-Gruppen erarbeiten Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energiewende.

Die Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“

Die Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“ hat sich mit der Frage beschäftigt, wie die Versorgungssicherheit in der Stromversorgung bei einem wachsenden Anteil volatil einspeisender erneuerbarer Energien sichergestellt werden kann. Sie hat untersucht, wie die fluktuierende Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik sinnvoll durch flexible Stromerzeuger, Demand-Side-Management, Speicher und Netzausbau ergänzt werden kann. Als Zeithorizont wurde das Jahr 2050 betrachtet. Neben dem Technologiebedarf und den Kosten wurden auch die gesellschaftlichen Implikationen sowie der Ressourcenbedarf unterschiedlicher Gestaltungsoptionen für das Energiesystem beleuchtet.

Zur Ad-hoc-Gruppe gehören elf Fachgruppen mit Experten aus Wissenschaft und Industrie. Die Ergebnisse wurden in drei Formaten aufbereitet.

Die **Technologiesteckbriefe** dokumentieren Details zu den einzelnen Technologien und stellen den Stand der Technik ausführlich dar, zeigen Entwicklungspotenziale auf und beschreiben den Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Anhand einer interdisziplinären Matrix wurden alle Technologien im Hinblick auf Ressourcenverfügbarkeit, gesellschaftliche Akzeptanz, technischen Reifegrad und relevante Aspekte des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bau- und Emissionsschutzrechts bewertet. Die Steckbriefe richten sich in erster Linie an Energiesystem-Modellierer, denen hiermit eine aktuelle, von Experten erstellte Datenbasis zur Verfügung gestellt wird.

Weitere Formate von der Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“:

- Die **Analyse** „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge“ dokumentiert die Methodik und die Ergebnisse der Ad-hoc-Gruppe in umfassender Form und setzt diese in Bezug zu energiepolitischen Fragen.
- Die **Stellungnahme** „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien“ stellt die Synthese der Ergebnisse in kompakter, allgemein verständlicher Form dar und zeigt Handlungsoptionen zur Gestaltung der zukünftigen Stromversorgung auf.

Mitwirkende der Ad-hoc-Gruppe

In der Ad-hoc-Gruppe arbeiteten rund 100 Experten aus Wissenschaft und Industrie mit. Neben Naturwissenschaftlern und Ingenieuren waren auch Wirtschaftswissenschaftler, Psychologen, Politik- und Sozialwissenschaftler vertreten.

Leitung

Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer	RWTH Aachen

Mitwirkende der Fachgruppe Windkraftwerke

Fachgruppenmitglieder

Prof. Dr. Andreas Reuter (Leitung)	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Bremerhaven
Dr. Stephan Barth	ForWind – Zentrum für Windenergieforschung
Dr. Jörg Hermsmeier	EWE AG
Prof. Dr. Gundula Hübner	Institut für Psychologie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg & MSH Medical Hamburg
Ronny Meyer	WAB e.V.
Dr. Dörte Ohlhorst	Zentrum Technik und Gesellschaft
Prof. Dr. Po Wen Cheng	Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Windenergie
Matthias Schubert	Wyncon GmbH
Dr. Jan Tessmer	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Prof. Dr. Jochen Twele	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Wissenschaftliche Referenten

Dr. Berit Erlach	acatech
Benedikt Lunz	RWTH Aachen
Dr. Matthias Merzkirch	Karlsruher Institut für Technologie

Institutionen und Gremien des Akademienprojekts

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Steuerkreis

Der Steuerkreis koordiniert die Arbeit in acht interdisziplinären, thematischen Arbeitsgruppen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie

Prof. Dr. Armin Grunwald	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
Prof. Dr. Peter Herzig	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Ortwin Renn	Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Ferdi Schüth	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
em. Prof. Dr. Rüdiger Wolfrum	Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (seit September 2015), Präsident Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste
Prof. Dr. Günter Stock	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (bis August 2015), Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (bis September 2015)
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Vizepräsidentin Leopoldina
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring- Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Klaus Töpfer	Ehemaliger Exekutivdirektor Institute for Advanced Sustainability Studies
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Bildung und Forschung
Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr. Ingrid Wüning Tschol (Gast)	Bereichsdirektorin „Gesundheit und Wissenschaft“ Robert-Bosch-Stiftung

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach	Leiter der Koordinierungsstelle, acatech
----------------------	--

Rahmendaten

Projektlaufzeit

04/2013 bis 02/2016

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2013) und der Robert-Bosch-Stiftung gefördert.