

Siegfried Heier

Nutzung der Windenergie

7., vollständig überarbeitete Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

 **BINE**
Informationsdienst

BINE-Fachbuch

Siegfried Heier

Nutzung der Windenergie

BINE-Fachbuch

Nutzung der Windenergie

7., erweiterte und vollständig überarbeitete Auflage

Der Autor:

Siegfried Heier

Herausgeber



Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**



BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe GmbH und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Uwe Milles (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe GmbH, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 9 23 79-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9587-2 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-9586-5

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Angelika Schmid | Satz: Fotosatz Buck, Kurnhausen | Druck: BELTZ, Bad Langensalza

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelbild: Windpark Kirchheimen, © Jan Oelker

Umschlagrückseite: Prof. Siegfried Heier (links & Mitte), Deutsche Offshore-Testfeld und Infrastruktur GmbH & Co. KG (DOTI) (rechts)

© FIZ Karlsruhe – Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH, 2016

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70-25 00

Telefax +49 7 11 9 70-25 08

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	8
1 Stand und Perspektiven der Windenergienutzung	9
1.1 Technik und Rahmenbedingungen in Deutschland	10
1.2 Stand der Technik von marktbeherrschenden Anlagen	14
1.3 Giganten der 5-MW-Klasse	15
1.4 Anlagenmarkt	17
1.5 Windenergie und Stromnetze	18
1.6 Standorte	19
1.7 Wirtschaftliche Auswirkungen	21
1.8 Arbeitsplätze	21
1.9 Gute Gründe für die Windenergie	22
2 Windenergie international	25
2.1 Globale Situation	25
2.2 Nationale Vergütungs- und Förderstrategien	25
2.3 Ausbauzustand und Entwicklungsrahmen in Europa	26
2.4 Nordamerika	27
2.5 Südamerika	29
2.6 Asien	29
2.7 Afrika	30
2.8 Australien-Pazifik-Region	31
3 Der Wind – seit 3000 Jahren im Dienste der Menschheit	33
3.1 Historische Anfänge der Windkraft	33
3.2 Pumpen und Mühlen im Mittelmeerraum und in angrenzenden Gebieten	33
3.3 Bock- und Holländerwindmühlen in Nordwesteuropa	35
3.4 Massenfertigung von »Westernrädern«	37
3.5 Begründung der Aerodynamik in der Windkrafttechnik	38
3.6 Neue Windkrafttechnologie	38
4 Meteorologische und physikalische Grundlagen	41
4.1 Bewegungsabläufe in der Erdatmosphäre	41
4.2 Gebiete zur Windenergienutzung	44
4.3 Energie aus dem Wind	47
5 Bauformen von Windkraftanlagen und Systemen am Markt	53
5.1 Anlagen mit vertikaler Achse	53
5.2 Anlagen mit horizontaler Achse	54
5.3 Sonderbauformen	57
5.4 Merkmale von Standardanlagen	58
5.5 Anlagen am Markt	59

6	Komponenten und Technik von marktgängigen Anlagen	62
6.1	Turbine	62
6.2	Triebstrangausführungen	66
6.3	Generator- und Umrichtersysteme	68
6.4	Maschinenhausausführungen	73
6.5	Windrichtungsnachführung	75
6.6	Turm	76
6.7	Regelung und Betriebsführung	76
6.8	Sicherheitssysteme und Überwachungseinrichtungen	83
6.9	Betriebserfahrungen	85
6.10	Entwicklungstendenzen	88
7	Windparks	90
7.1	Parkeffekte	90
7.2	Parkausführungen	90
8	Netzintegration	94
8.1	Anforderungen der Netzbetreiber	94
8.2	Netzeinwirkungen und Abhilfemaßnahmen	94
8.3	On- und Offshore-Windparks	97
8.4	Auswirkungen eines starken Windenergieausbaus	99
9	Inselsysteme	102
9.1	Besonderheiten von Inselsystemen	103
9.2	Einsatz in Deutschland	103
9.3	Einsatz in netzfernen Gebieten	104
10	Planung, Aufbau und Repowering von Windkraftanlagen Potenziale in Deutschland	107
10.1	Standortfragen	107
10.2	Planung und Bau von Anlagen	111
10.3	Repowering	114
10.4	Potenzial und Ausbau in Deutschland	115
11	Betrieb von Windkraftanlagen	118
11.1	Organisationsmodelle	118
11.2	Finanzierung	119
11.3	Kosten	120
11.4	Erträge von Windkraftanlagen	123
12	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	124
12.1	Entwicklung und Trends der Einspeisevergütung	124
12.2	Stromgestehungskosten	124
12.3	Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden	125

13	Ökobilanz	128
14	Windenergieforschung und -entwicklung	132
14.1	Grundlagen- und Anwendungsforschung	132
14.2	Neuentwicklungen und Großanlagen	134
15	Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis	139
15.1	Zitierte Literatur	139
15.2	Abbildungsverzeichnis	149
16	Forschungsvorhaben der Bundesregierung	151
16.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben	151
16.2	Forschungsberichte	153
17	Weiterführende Literatur	156
18	Zum Autor	158

Vorwort

Die Nutzung der Windenergie in Deutschland ist eine Erfolgsgeschichte. Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht – als Beitrag zur Energiewende – einen massiven Ausbau der Windkraftkapazitäten an Land und auf See vor. In den letzten 30 Jahren verlief die Entwicklung der Technologie in dieser Branche sehr rasant. Selbst den Menschen, die die Auf- und Ausbauphase eng begleitet haben, nötigt der heute erreichte Stand bisweilen noch staunenden Respekt ab. In nüchternen Zahlen: Ende 2014 waren in Deutschland knapp 26 000 Anlagen installiert. Diese erzeugten rund 56 Mrd. Kilowattstunden Strom, was rechnerisch zur Versorgung von etwa 16 Mio. Vier-Personenhaushalten (3 500 kWh/a) ausreichen würde. Im Jahr 2013 haben knapp 140 000 Personen direkt und indirekt für die Windindustrie an Land und offshore gearbeitet.

Aktuell bestehen für die Windenergie in Deutschland weiter gute Perspektiven: Auch in den süddeutschen Bundesländern wächst die Zahl der Anlagen. Ende 2014 speisten insgesamt 258 Offshore-Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 1 049 Megawatt ein. Weitere 268 Anlagen waren errichtet, aber noch nicht ans Netz angeschlossen. Das Repowering, der Ersatz älterer Kleinanlagen durch moderne und leistungsstarke Großanlagen, kommt voran. Im Jahr 2014 wurden 544 alte Anlagen mit zusammen 365 MW Leistung durch 413 Neuanlagen mit 1 150 MW ersetzt. In den nächsten Jahren ist der Ausbau des Stromnetzes die große Herausforderung, um die stetig steigende Windstromerzeugung verlustarm und möglichst wirtschaftlich zu den Verbrauchern leiten zu können.

Dabei darf man nicht verkennen, dass gegenüber den vergangenen Jahren der Weltmarkt für deutsche Firmen mittlerweile rauer geworden ist. Durch eine wachsende Zahl von Herstellern wächst der Konkurrenzdruck auf dem Markt. Im Jahr 2014 lag die Exportquote deutscher Hersteller bei 67 %. Damit sie auch in Zukunft in dieser Größenordnung bleiben wird, müssen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Windtechnologie fortgesetzt werden. Nur ausgereifte Anlagentechnik, die möglichst optimal auf die örtlichen Anforderungen angepasst ist und durch Wirtschaftlichkeit überzeugt, wird auf dem Weltmarkt bestehen können.

Das BINE-Fachbuch »Nutzung der Windenergie« legt das Hauptgewicht auf die Technik von Komponenten und Anlagen sowie deren Planung und Ausbau. Weitere Kapitel beschäftigen sich mit der ökologischen und ökonomischen Bilanz, den Anforderungen eines Windparks und den laufenden Forschungsaktivitäten.

FIZ Karlsruhe
BINE Informationsdienst