

Siegfried Heier

# Nutzung der Windenergie

7., vollständig überarbeitete Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

<https://doi.org/10.51202/9783816795865-1>

Generiert durch IP '18.217.200.173', am 06.05.2024, 16:23:32.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

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**



<https://doi.org/10.51202/9783816795865-1>

Generiert durch IP '18.217.200.173', am 06.05.2024, 16:23:32.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

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](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de), [www.bine.info](http://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](http://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 Kirchheimingen, © 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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	8
<b>1 Stand und Perspektiven der Windenergienutzung</b> .....	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
<b>2 Windenergie international</b> .....	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
<b>3 Der Wind – seit 3000 Jahren im Dienste der Menschheit</b> .....	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
<b>4 Meteorologische und physikalische Grundlagen</b> .....	41
4.1 Bewegungsabläufe in der Erdatmosphäre .....	41
4.2 Gebiete zur Windenergienutzung .....	44
4.3 Energie aus dem Wind .....	47
<b>5 Bauformen von Windkraftanlagen und Systemen am Markt</b> .....	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

<b>6</b>	<b>Komponenten und Technik von marktgängigen Anlagen</b> . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Windparks</b> . . . . .	90
7.1	Parkeffekte . . . . .	90
7.2	Parkausführungen . . . . .	90
<b>8</b>	<b>Netzintegration</b> . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Inselsysteme</b> . . . . .	102
9.1	Besonderheiten von Inselsystemen . . . . .	103
9.2	Einsatz in Deutschland . . . . .	103
9.3	Einsatz in netzfernen Gebieten . . . . .	104
<b>10</b>	<b>Planung, Aufbau und Repowering von Windkraftanlagen Potenziale in Deutschland</b> . . . . .	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
<b>11</b>	<b>Betrieb von Windkraftanlagen</b> . . . . .	118
11.1	Organisationsmodelle . . . . .	118
11.2	Finanzierung . . . . .	119
11.3	Kosten . . . . .	120
11.4	Erträge von Windkraftanlagen . . . . .	123
<b>12</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen</b> . . . . .	124
12.1	Entwicklung und Trends der Einspeisevergütung . . . . .	124
12.2	Stromgestehungskosten . . . . .	124
12.3	Betriebswirtschaftliche Berechnungsmethoden . . . . .	125

---

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