

HANSER



Leseprobe

zu

„Windkraft neu gedacht“

von Daniel Hautmann

Print-ISBN: 978-3-446-46460-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46510-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46460-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München



Inhalt

Vorwort	VII	10 Windkraft für Selbstversorger	111
Autorenseite	IX	11 Hochspannungsleitungen kühlen	127
Einleitung von Volker Quaschnig	1	12 Segelflieger	137
1 Wie Wind entsteht	5	13 Windsurfer	149
2 Geschichte der Meteorologie	15	14 Segelnde Schiffe	157
3 Windstärken	21	15 Auf der Scholle zum Nordpol	167
4 Windwandel	33	16 Windautos	177
5 Windnutzung im Laufe der Zeit	43	17 Windige Natur	185
6 Moderne Windkraft	53	18 Ausblick	193
7 Windkraft – aktuelle Situation	69	Bildquellen	209
8 Schwimmende Windturbinen	89	Index	215
9 Fliegende Windkraftwerke	99		

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

dieses Buch ist eine Liebeserklärung an den Wind. Ich habe es geschrieben, weil ich eine persönliche Beziehung zur Luft – dem beweglichsten aller Elemente – habe. Der Wind ist in vielerlei Hinsicht mein Antrieb.

Der Wind ermöglicht mir die für mich schönste Sache der Welt, nämlich auf einem kleinen Brett irrsinnig schnell über das Meer zu gleiten, ohne dabei einen Tropfen Sprit zu verbrennen. Das Windsurfen ist das beste Beispiel von umweltfreundlicher Fortbewegung. Möglich gemacht durch clevere, moderne Werkstoffe und die Kraft der Natur. Auch habe ich den Wind in meiner journalistischen Arbeit immer wieder als unerschöpfliche Kraftquelle erlebt, die wir noch viel mehr nutzen könnten. Damit meine ich nicht, dass wir jeden Winkel dieses Planeten mit noch mehr Windrädern zubauen sollten. Wind ist, Wind kann viel mehr als das. Er liefert uns Antworten auf einige der brennendsten Fragen unserer Zeit.

Jeder, der schon einmal einen Drachen steigen ließ oder segeln war, hat instinktiv die Kraft des Windes gespürt. Eine Kraft, die wir im Industriezeitalter aus den Augen verloren haben, weil uns Dampfmaschinen und Motoren moderner, effizienter, berechenbarer erschienen. Dank Hightech-Materialien sind heute wieder windgetriebene Konstruktionen der Inbegriff von Innovation und Effizienz, zum Beispiel in der Luft- oder der Seefahrt.

Dieses Buch ist eine Liebeserklärung an eine Naturgewalt, ohne die unser Leben nicht möglich wäre: Der Wind hat die Welt geformt. Er treibt die Wolken übers Land, er verteilt die Samen und Pollen unzähliger Pflanzen über die Erde und liefert den Regen, der sie aufkeimen lässt. Der Wind trieb die Mühlenflügel an, deren Kraft ganze Landstriche urbar machte. Er ermöglichte es uns, die Welt zu erkunden und zu erobern. Und seine entfesselte Kraft kann sie auch wieder zerstören.

Als elfjähriger Junge erlebte ich die nukleare Katastrophe von Tschernobyl. Damals trieb der Wind den Fallout nach Europa und wir durften nicht mehr auf die Spiel- und Sportplätze. Wirklich begriffen habe ich all das erst Jahre später, aber dieses Erlebnis weckte mein Interesse an den Kräften der Natur. Wenn wir über die Verspargelung der Landschaft streiten, über Energiewende, Subventionen und Strompreise, dann verengen wir unseren Blick auf einen Bruchteil dessen, was der Wind für uns tun kann. Dieses Buch ist eine Einladung, nein, eine Aufforderung:

weiten auch sie ihren Blick. Denken sie darüber nach, was der Wind für uns tun kann.

Der Klimawandel zeigt uns Tag für Tag, dass wir die Kräfte, die uns die Erde schenkt, klüger und sinnvoller nutzen müssen. Für mich als Journalist, der seit rund 20 Jahren über Technik, Energie und Umwelt schreibt, ist der Wind einer der Schlüssel zu unserer Zukunft. Da ist so viel ungenutztes Potenzial. Da geht noch so viel mehr, als wir heute denken. Wer hätte vor rund 200 Jahren, als Dampfmaschinen die Windmühlen ablösten, gedacht, dass aus Windenergie gewonnener Strom einmal eine der günstigsten Energiequellen sein würde? Was ist dann erst in den nächsten 200 Jahren denkbar? Angesichts der visionären Technologien und Anwendungen, die ich Ihnen in diesem Buch vorstelle?

Zunächst möchte ich aber Danke sagen. Viele Menschen haben mich beim Schreiben dieses Buches unterstützt, moralisch wie praktisch. Niemand aber hat so viele Lasten getragen wie meine Frau. Dieses Buch ist während der Corona-Krise entstanden – für viele eine Zeit der quarantänebedingten Langeweile, für unsere Familie eine Ausnahme-situation mit Homeschooling für unsere beiden Jungs und einem Vater, der natürlich genau in dieser Zeit ein Buch schreiben musste.

Dank gilt auch meinen Eltern, insbesondere meinem Vater, der mir als Kind das Windsurfen beigebracht und mich ans Segelfliegen herangeführt hat. Er hat mich dem Wind näher gebracht. Kurz vor Vollendung dieses Buches ist er gestorben – all we are is dust in the wind.

Und noch eine Sache liegt mir am Herzen: Ich möchte niemanden benachteiligen. Was das Gendering angeht, also die respektvolle Ansprache von weiblichen, männlichen und diversen Menschen, habe ich mich entschieden, aus Gründen der leichteren Lesbarkeit auf die gewohnte männliche Sprachform zu setzen. Dies ist keine Wertung.

So, setzen wir endlich die Segel und legen ab. Haben Sie viel Spaß mit dem Wind!

Daniel Hautmann

Wir können den Wind nicht ändern, aber die Segel anders setzen.

Aristoteles

Autorenseite

Daniel Hautmann, 1975 in Stuttgart geboren, schreibt seit rund 20 Jahren als freier Journalist über Technik, Energie und Umwelt. Nach seiner Ausbildung zum Industriemechaniker arbeitete er zwei Jahre in den USA, besuchte dann die technische Oberschule in Stuttgart und absolvierte daraufhin eine Ausbildung zum Fachzeitschriftenredakteur in Hamburg.

Daniel Hautmann ist Spezialist für regenerative Energien, insbesondere Windkraft. Mit der gleichen Leidenschaft schreibt er über Schifffahrt, Umwelt, Nachhaltigkeit und alles, was mit Sport und Technik zu tun hat. Er flog in einer Transall nach Afghanistan, surfte mit einem Windsurfweltmeister um die Wette, flog mit der Kunstfliegerin kopfüber im Segelflugzeug, kletterte auf Windräder oder ging im Roten Meer auf Rebreather-Tauchgang.

Seine Texte sind unter anderem in Brand Eins, Technology Review, P.M. und der Süddeutschen Zeitung erschienen. Er war Chefreporter beim Magazin WALD, moderiert gelegentlich fürs Radio, produziert Podcasts und schreibt Bücher. Er lebt mit seiner Frau und zwei Kindern in Hamburg und immer da, wohin es die junge Familie im selbst ausgebauten Wohnmobil gerade hinzieht.



Der Autor bei seiner Lieblingsbeschäftigung in seinem Lieblingsrevier: auf der Ostseeinsel Fehmarn, Quelle: privat (www.danielhautmann.de)



8

Schwimmende Windturbinen

Die Offshore-Windkraft ist eine wahre Erfolgsgeschichte: Windräder auf See liefern im Schnitt viel mehr Strom als Anlagen an Land – die Ausbeute ist rund doppelt so hoch.

Das Epizentrum der globalen Offshore-Windindustrie ist Europa. Von den weltweit installierten 29 Gigawatt stehen über 22 vor den Küsten der EU. Davon die allermeisten in der Nordsee. Das hat einen einfachen Grund: Hier ist das Wasser mit rund 40 Metern seicht genug, um große Fundamente auf den Meeresgrund zu stellen oder in den Boden zu hämmern. Doch mit zunehmender Wassertiefe gelangen die sogenannten „bottom fixed foundations“ an ihre Grenzen. Mehr als 50 bis 60 Meter Wassertiefe lassen sich kaum kostendeckend erschließen.

Damit hat die Offshore-Technik ein Problem: Der Großteil der Weltmeere ist viel zu tief für Anlagen die sich am Meeresgrund abstützen. Egal ob vor Nordamerika, dem Vereinten Königreich, Japan, Korea, China oder rund ums Mittelmeer und vor Portugal: Fast überall stürzen die Küsten steil ins Meer hinab.

Doch es gibt Abhilfe: Floating Wind, wie die Fachwelt die schwimmende Windkraft nennt. Die Windräder treiben dabei selbst in tausend Meter tiefem Wasser und werden von Ketten oder Leinen auf Position gehalten. Das hat enorme Vorteile:

- Weit draußen auf dem Meer stört sich niemand an den Anlagen.

- Mit Schwimmwindrädern lassen sich auch jene Gewässer erschließen, die für gewöhnliche Offshore-Anlagen viel zu tief sind.
- Der Aufbau der Anlagen ist einfach, sie können im Hafen installiert werden.
- Auf hoher See weht der Wind umso stärker und verlässlicher.
- Die Maschinen können gezielt dort installiert werden, wo die Windausbeute am höchsten ist.

Obwohl weltweit bereits ein gutes Dutzend Konzepte getestet wird, steht die Technologie noch ganz am Anfang. Das liegt an den komplexen Herausforderungen, die mit ihr verbunden sind. Und die treiben die Kosten in die Höhe. Vor allem ist die Schwimmwindkraft „*noch ein teures Vergnügen*“, sagt Kimon Argyriadis, der beim Beratungsunternehmen DNV GL für Floating Wind zuständig ist.

Das Potenzial, sowohl was die Stromgewinnung als auch die Kostensenkung angeht, ist gewaltig. Laut Francisco Boshell, Analyst bei der Internationalen erneuerbare Energien Agentur (IRENA), haben schwimmende Fundamente das Zeug, die Windkraftindustrie vollkommen zu verändern: „*Indem man in tiefere Gewässer vorstößt und größere Windressourcen erschließt, könnten schwimmende Windräder eine signifikante Expansion der Windkraft erlauben – und das konkurrenzfähig.*“

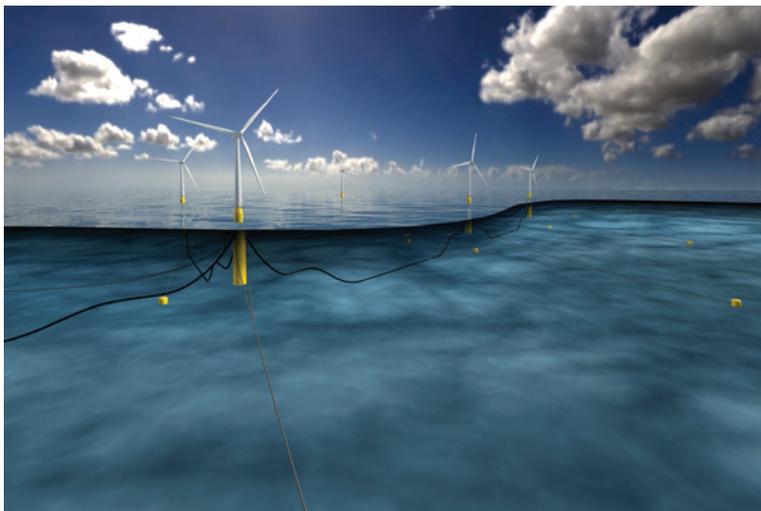


Bild 8.1

Hier noch als Illustration. Schwimmende Windparks existieren bereits in Realität. Quelle: Equinor

Grundlaststrom

John Olav Tande vom norwegischen Forschungs-Institut für Offshore-Windkraft zeigt sich beeindruckt: „*Das Potenzial durch die vorhandene Meeresoberfläche ist um ein Vielfaches größer als der globale Energiebedarf.*“ Allein in Europa sei das technische Potenzial etwa dreimal höher als der Bedarf.

Schwimmende Windkraftwerke könnten sogar Grundlaststrom liefern. So nennt man die Strommenge, die zu einer bestimmten Zeit innerhalb einer bestimmten Region verbraucht wird. In Deutschland liegt sie an einzelnen Tagen bei nur 40 Gigawatt, während ihr Maximum bis zu 80 Gigawatt erreichen kann. Dieser Bedarf wird

bislang meist durch Kohle-, Gas- und Atomkraftwerke abgedeckt.

Laut CIA Factbook beträgt der gesamte Strombedarf Europas jährlich rund 2771 Terawattstunden. Dazu passt, dass

Die Branche steht in den Startlöchern

Während die Windkraftanlagentechnik bereits einen hohen Entwicklungsgrad erreicht hat, stehen die Ingenieure bei den schwimmenden Fundamenten, den Verankerungen und Verkabelungen, die für die Schwimmwindkraft erforderlich sind, noch am Anfang. Hier greift man auf Erfahrungen aus dem Öl- und Gasbereich zurück. Dort sind schwimmende Strukturen seit Jahrzehnten im Einsatz.

Auf der Suche nach der Ideallösung für Windkraftanwendungen haben sich drei Schwimmertypen als geeignet erwiesen:

- Das Spar-Buoy Konzept sieht einen großen, hohlen Stahl- oder Betonzylinder vor, der gleichsam als Schwimmer und als Turm dient. Genau wie ein Eisberg, reicht er weiter unters Wasser als in den Himmel. An seinem tiefsten Punkt ist er mit Ballast gefüllt, so wandert der Schwerpunkt weit hinunter. Spar-Buoys liegen selbst bei starkem Wellengang stabil in der See. Horizontale Ausschläge sind gering, doch je nach Verankerungsart bewegen sie sich stark in vertikaler Richtung. Problematisch ist der immense Tiefgang. Damit sind definitiv nur Standorte mit rund 200 Meter Wassertiefe erschließbar. Auch das Installieren des Turms und der Anlage ist aufwendig. Schließlich muss der Turm liegend aufs Meer geschleppt, geflutet, gekippt und schließlich verankert werden. Dann erst wird das Windrad montiert. Die Arbeiten können zwar in geschützter Umgebung ausgeführt werden, dennoch sind spezielle Installationsschiffe nötig.

das Potenzial der Schwimmwindkraft allein in Europa bei etwa 4000 Terrawattstunden pro Jahr liegt, wie es beim Branchenverband „WindEurope“ heißt.

- Tension-Leg-Plattformen, kurz TLP, sind Auftriebskörper, die von straff gespannten Ketten oder Leinen leicht unter Wasser gezogen und so immer stabil auf gleicher Position gehalten werden. Die Ketten finden entweder an einem schweren Gegengewicht Halt oder direkt am Meeresboden. So liegt die Plattform felsenfest vor Anker. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie an Land in einem Trockendock aufgebaut werden kann. Dort wird auch das Windrad installiert und direkt getestet. Anschließend wird das Dock geflutet und die Anlage auf See geschleppt. Am Aufstellungsort angekommen, wird der Schwimmer dann an die Leine genommen. Auf diese Weise könnten defekte Maschinen auch bequem ins Dock geschleppt und dort repariert werden.
- Halbtaucher-Plattformen sind meist riesige, drei- oder viereckige Gerüste aus Stahl oder Beton, die eine besonders geringe Neigung des Windrads versprechen. Manche Systeme arbeiten mit sogenannten aktiven Dämpfungspools. In ihnen werden große Mengen Wasser hin und her gepumpt und gleichen so Bewegungen aus. Genau wie TLPs werden sie im Trockendock aufgebaut oder repariert.

Welches der Systeme die größten Vorteile bietet, ist derzeit schwer zu sagen. „Jedes Konzept hat Vor- und Nachteile“, sagt Kimon Argyriadis vom Beratungsunternehmen DNV GL.

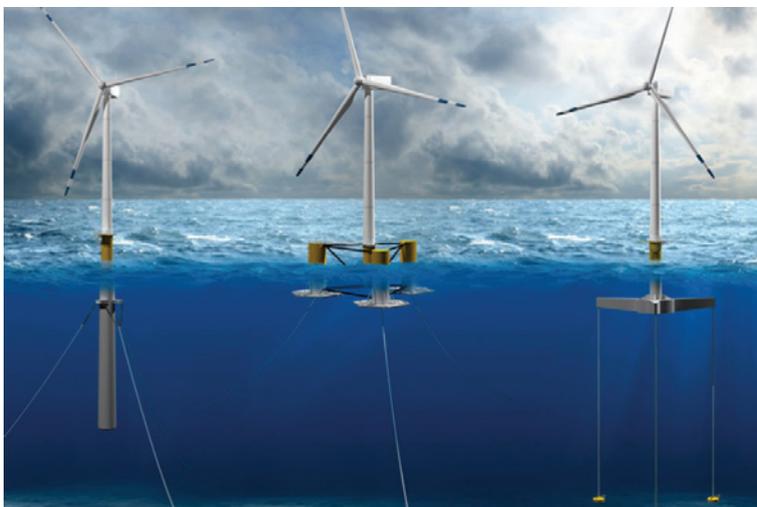


Bild 8.2

Verschiedene schwimmende Plattformen, von links: Spar, Halbtaucher, Tension Leg. Quelle: NREL

WELTWEIT ERSTER SCHWIMMWINDPARK

Dieser Windpark hat sprichwörtlich Tiefgang: Die fünf Turbinen im Projekt Hywind Scotland treiben im Meer wie die Schwimmer einer Angel.

Das norwegische Unternehmen Equinor sammelt schon seit 2009 (damals hieß es noch Statoil) gemeinsam mit Siemens Erfahrungen mit schwimmenden Turbinen und

gilt als Pionier in dieser Disziplin: In Norwegen wurde damals eine der ersten schwimmenden Anlagen überhaupt installiert. Die 2,3-Megawatt-Maschine war mit 200 Messpunkten bestückt und bewies über die Jahre, dass sie selbst Orkanen und Wellen von bis zu 19 Metern Höhe trotz.

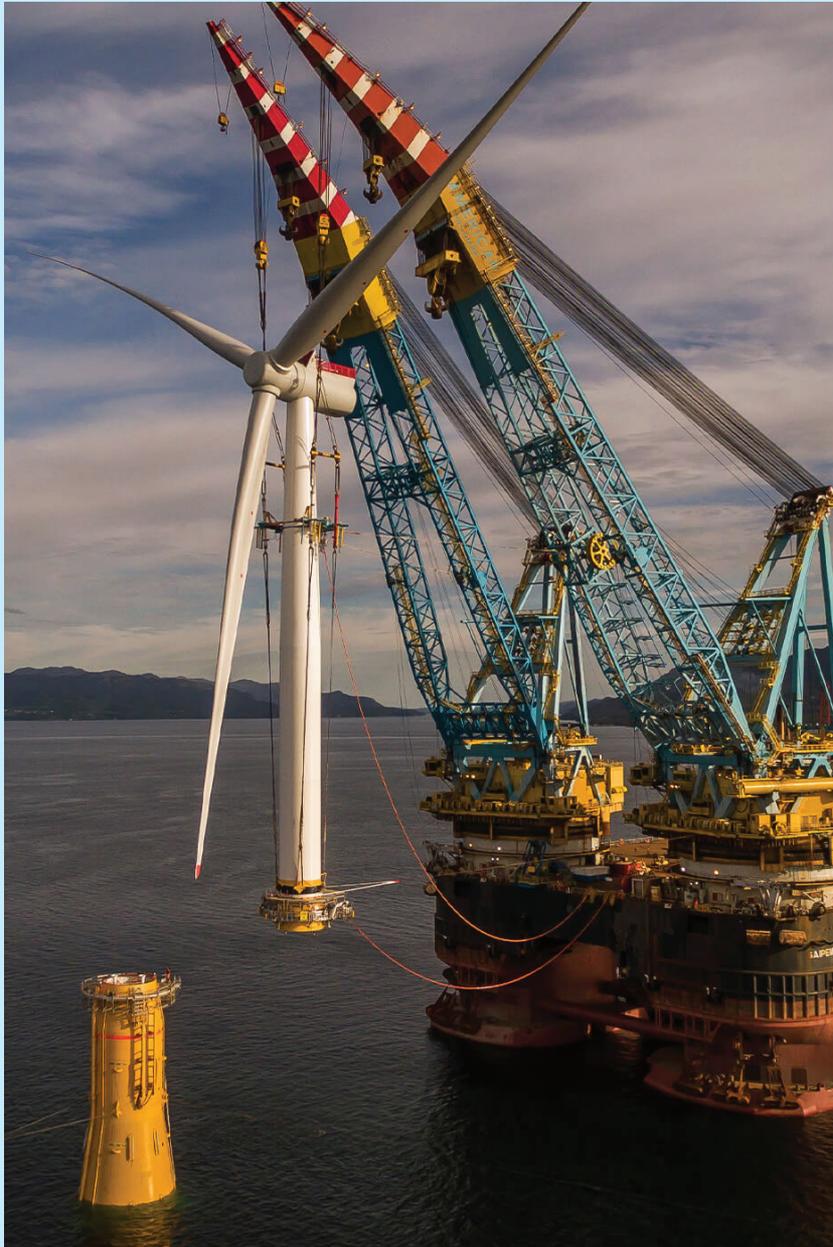


Bild 8.3

Riesenschwimmkrane. Einer der größten Schwimmkräne der Welt hilft bei der Montage einer schwimmenden Windkraftanlage. Quelle: Saipem

Hywind Scotland ist nun die Fortsetzung dieses Prototyps, nur eben ein paar Nummern größer. Auch der Windradhersteller Siemens ist wieder an Bord – und sicher, dass die Schwimmwindkraft ein Erfolg wird. Die Dimensionen und die Logistik hinter dem Windpark vor Schottland beeindruckt: Die fünf jeweils sechs Megawatt starken, getriebelosen Turbinen wurden in Norwegen montiert. Am Kai des Hafens von Stord wurden zunächst der 98 Meter hohe Turm, die 360 Tonnen schwere Gondel und die drei je 75 Meter langen Rotorblätter zusammengebaut. Draußen, im tiefen Wasser des Fjords, wurden in der Zwischenzeit die sogenannten Spar-Bojen vorbereitet. Das sind luftgefüllte, stählerne Schwimmkörper, die die Windräder tragen. Gefertigt wurden die je 91 Meter langen und 3500 Tonnen schweren Bojen in Spanien. Liegend wurden sie von einem Schlepper einzeln nach Norwegen transportiert. Dort richtete man sie auf, indem sie mit Wasser geflutet und anschließend mit Ballast gefüllt wurden. Um die Windräder vom Kai zu heben und zu den Substrukturen zu manövrieren, kreuzte eigens die Saipem 7000 auf – eines der größten Kranschiffe der Welt.

Als Substruktur und Turbine eine 253 Meter hohe und rund 12 000 Tonnen schwere Einheit bildeten, wurden die Anlagen aufrecht an ihren Aufstellungsort geschleppt. Die Reise führte sie 500 Kilometer über die Nordsee. Sie endete bei Buchan Deep, 25 Kilometer vor der schottischen Küste. Die Überfahrt dauerte je Windrad vier bis fünf Tage.

An Ort und Stelle werden die Schwimmwindräder von sogenannten Saugankern gehalten. Die ähneln überdi-

mensionierten Eimern, die verkehrt herum in den Meeresgrund gesteckt werden. Anschließend wird ein Unterdruck aufgebaut, der die Zylinder in den Grund zieht. Windrad und Anker verbinden drei je 900 Meter lange und 400 Tonnen schwere Eisenketten.

Parallel zu den Ankern wurden in Norwegen die Kabel verladen und nach Buchan Deep gebracht. Zunächst wurde die 33-Kilovolt-Übertragungsleitung zwischen dem Festland und der ersten der fünf Anlagen verlegt, anschließend alle fünf Turbinen miteinander verbunden. Seit 2017 ist der Windpark in Betrieb – und liefert Strom für bis zu 20 000 Menschen.

Der Bau der Anlagen war allerdings ein teures Vergnügen: Er kostete rund 200 Millionen Euro – das sind 66 Millionen je installiertem Megawatt und damit deutlich mehr als Offshore-Windparks mit konventioneller Technik normalerweise kosten.



Bild 8.4 Hywind Scotland schwimmt! Fünf Windturbinen, jeweils sechs Megawatt stark, bilden den weltweit ersten Schwimmwindpark. Quelle: Equinor

Prototypen weltweit

Weltweit gibt es bereits zahlreiche Schwimmwind-Projekte. Doch genau genommen sind es allesamt Prototypen:

- **Ideol:** Im Atlantik vor Frankreich arbeitet seit September 2018 eine zwei Megawatt starke Anlage namens FloatGen. Bei diesem Prototypen handelt es sich um einen quadratischen Körper aus Beton, der innen hohl ist. Das Windrad steht auf einer der vier Seiten. Der Clou an diesem Konzept: Das Windrad schaukelt kaum auf den Wellen, dafür sorgt der sogenannte „Damping-Pool“ im Innern des Schwimmers. Das Konzept wird derzeit auch in Japan getestet.
- **WindFloat:** 20 Kilometer vor der Nordküste Portugals, bei Viana do Castelo, werden drei je 8,4 Megawatt starke Anlagen auf Halbttaucher-Plattformen installiert, die erste ist bereits auf See, zwei weitere sollen bald folgen. Es sind die weltweit größten und stärksten Windr-



Bild 8.5 Schwimmende Anlage „FloatGen“ von Ideol im Atlantik vor Frankreich, Quelle: wikimedia commons, L083

der auf schwimmenden Plattformen. Eine weitere Wind-Float-Anlage steht bereits im schottischen Kincardine.

- Hywind Tampen: Auf dem Erfolg von Hywind Scotland soll nun Hywind Tampen aufbauen. Der Schwimmwindpark, bestehend aus elf je acht Megawatt starken Anlagen, soll eine Öl- und Gas-Plattform mit Strom versorgen. Die Meerestiefe beträgt hier bis zu 300 Meter, die

Entfernung zur Küste 140 Kilometer. Der Park soll ab 2022 Strom erzeugen.

- Aqua Ventus: Im US-Bundesstaat Maine sollen noch 2020 zwei je sechs Megawatt starke Anlagen auf Betonschwimmern installiert werden. Der Prototyp im Maßstab 1:8 ist bereits seit 2013 im Wasser.
- Ferner sind Projekte in Japan, Frankreich, Spanien und Norwegen in Planung.

Vorreiter Europa

Europa ist führend bei den meisten bisher in der Schwimmwindkraft verwendeten Technologien. Kein Wunder, die Bedingungen rund um Europa sind ausgezeichnet, sagt Kimon Argyriadis: *„Europas Westküste und das Mittelmeer sind tiefe Gewässer, mit guten Windbedingungen, nahe an großen Verbrauchern.“* Zudem war Europa schon bei der bodenbasierten Offshore-Windkraft der Technologietreiber –

das große Geschäft mit den schwimmenden Windrädern will man sich daher nicht nehmen lassen.

In Asien sind es Japan, Korea und China, die sich engagieren. Aber auch die USA werden eine zentrale Rolle spielen. Besonders Kalifornien ist prädestiniert: mit tiefem Wasser, fortschrittlicher Umweltgesetzgebung und vielen Einwohnern, die direkt an der Küste leben. Planungen laufen bereits.

Die Messlatte hängt hoch

Noch beschränkt sich die Schwimmwindkraft weitgehend auf Prototypen, wenn auch, wie im Fall von Hywind, schon in einem sehr fortgeschrittenen Stadium. An große Windparks, wie man sie von der am Boden stehenden Offshore-Windkraft kennt, mit hunderten Anlagen, wagt sich derzeit aber noch keiner. Letztlich auch, *„weil die Investoren der Meinung sind, dass noch nicht alle technologischen Hürden überwunden sind. Wir sind auf dem Stand der Offshore-Windenergie von vor 15 Jahren“*, erinnert Windkraft-Spezialist Po Wen Cheng von der Universität Stuttgart. Dennoch: Mittlerweile sind mit total, Shell und Euqinor finanzstarke Konzerne aus dem Öl- und Gasgeschäft eingestiegen. *„Das Kapital ist interessiert“*, bringt es Kimon Argyriadis auf den Punkt.

Aber keine Frage, die Messlatte hängt hoch: Onshore-Strom wird schon heute für weit unter zehn Cent je Kilowattstunde produziert. Schwimmwindstrom dagegen kostet noch rund das Doppelte. Noch. Denn während das Kostensenkungspotenzial an Land praktisch ausgereizt ist, ist auf See noch Luft nach oben. Zahlreiche Studien prognostizieren ein enormes Kostensenkungspotenzial.

Entsprechend macht sich die Branche bereit. Sowohl vor Schottland als auch vor Irland sollen in den nächsten Jahren weitere Schwimmwindparks entstehen. *„Wir erwarten die Kommerzialisierung der Branche in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts“*, sagt Argyriadis.

Dass die Kosten sinken, davon gehen so ziemlich alle Fachleute aus. Auch Po Wen Cheng von der Uni Stuttgart: *„Mit der Anlagengröße spielt die Schwimmwindkraft ihre Vorteile immer mehr aus, da die Lasten vereinfacht gesagt nicht alle in den Meeresgrund abgeleitet werden müssen, sondern die Plattform durch Hydrodynamik, Ballast und Vertäuungssysteme stabilisiert wird. Das macht die schwimmenden Fundamente bei wachsender Anlagengröße und Wassertiefe gegenüber festen Fundamenten immer günstiger.“*

Zehn und mehr Megawatt starke Maschinen werden bereits getestet. Und das Anlagenwachstum wird weitergehen: *„20 Megawatt sind durchaus denkbar“*, sagt Kimon Argyriadis.

REFERENZANLAGE FÜR DIE FORSCHUNG

Start-ups, Universitäten und Forschungseinrichtungen, die an den Windrädern von morgen tüfteln, sind auf verlässliche Modelle angewiesen. Wie soll ein junges Unternehmen etwa ein tragfähiges Fundament entwickeln, wenn es gar nicht weiß, welche Belastungen die Mühlen künftig darauf ausüben werden? Analog dazu können Wissenschaftler viel leichter neue Flügelgeometrien erforschen, wenn sie Daten über den Rest der Anlage haben.

Doch solche Modelle sind rar. Die Industrie behält ihre Entwicklungen in der Regel für sich. Aus diesem Grund hat das National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Colorado, eines der führenden staatlich finanzierten US-Forschungsinstitute für erneuerbare Energien, im Februar eine sogenannte Referenz-Windturbine präsentiert. Die „IEA 15-MW“ ist eine reine Offshore-Anlage und sowohl für in den Meeresboden gerammte als auch für schwimmende Fundamente gedacht. Sie hat eine Nennleistung von 15 Megawatt. Der Rotordurchmesser beträgt 240 Meter der Turm ist 150 Meter hoch.

Die Referenzanlage dringt damit in eine neue Leistungsklasse vor. Der aktuelle Rekord liegt bei zwölf Megawatt und 220 Metern Rotordurchmesser. Letzten Herbst hat der US-Konzern General Electric einen solchen Riesen im Hafen von Rotterdam installiert. Ab 2025 jedoch sollen 15 und mehr Megawatt Nennleistung das Maß der Dinge für Offshore-Windparks sein.

Neben ihren beeindruckenden Eckdaten hat die Turbine noch eine weitere Besonderheit: Sie ist Open Source. Zwar ist IEA 15-MW kein reales Konstrukt aus Beton und Stahl, das tatsächlich Strom produzieren könnte. Die Anlage existiert nur als Datensatz für Simulationen und Konstruktionstests. Aber schon das virtuelle Modell ermöglicht es, Leistungen und Kosten für die Entwicklung eines Prototyps zu bewerten.

Entworfen hat das NREL die Experimentierturbine gemeinsam mit der Technischen Universität Dänemarks,

der University of Maine und der Internationalen Energieagentur IEA. Veröffentlicht haben die Entwickler ihre Daten auf der Plattform GitHub. Gute Erfahrungen mit diesem Weg gibt es aus früheren Projekten. Datensätze für andere Referenzturbinen sind bereits seit Längerem frei zugänglich. So hatte das NREL bereits vor etwa zehn Jahren eine 5-Megawatt-Referenzturbine veröffentlicht. Auch die Technische Universität Dänemarks hatte früher schon eine 10-Megawatt-Referenzanlage in Umlauf gebracht.

„Da entsprechende Daten der Hersteller von Windrädern nicht zur Verfügung stehen, sind generische Modelle unerlässlich“ fasst Philipp Thomas, Gruppenleiter Gesamtanlagendynamik am Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme in Bremerhaven, den Nutzen des verbesserten Systems zusammen. Po Wen Cheng, Windkraftspezialist an der Universität Stuttgart, nutzt die Daten der IEA 15-MW bereits im EU-Projekt Corewind. Darin geht es um Verkabelung und verlässliche Vertäuungssysteme für schwimmende Windenergieanlagen, also die Art und Weise wie die Maschinen an Ort und Stelle gehalten werden. Die neue Referenzanlage sei „eine gute Sache“, resümiert Cheng. Denn die angewandte Forschung brauche dringend „vernünftige Modelle, um zukünftige Erträge und Lasten verlässlich bestimmen zu können“.



Bild 8.6 Windrad von morgen – die Referenzanlage des National Renewable Energy Laboratory, Quelle: NREL

Radikaler Preissturz

Neben dem klassischen Upscaling, also dem Größerbauen der Anlagen, könnten auch völlig neue Schwimmerkonzepte für gewaltige Preisstürze sorgen. Auch die sind bereits in Arbeit. So hat Windkraftikone Henrik Stiesdal vor einigen Jahren ein Projekt vorgestellt, das alles bislang Gesehene auf den Kopf stellt: einen radikal vereinfachten und industrialisierten Schwimmer, der die Kosten je Kilowattstunde auf sagenhafte fünf Cent drücken soll.

Helpen, die Kosten zu drücken, könnte auch der Verzicht auf teuren Stahl. Zahlreiche Unternehmen experimentieren bereits mit Betonschwimmern, die in der Öl- und Gasindustrie seit Jahrzehnten im Einsatz sind und sich bewährt haben.

Sprichwörtlich einen oben drauf, setzt das spanische Unternehmen Esteyco. Die Spanier haben im Frühjahr 2019 vor

Gran Canaria ein schwimmendes Windrad präsentiert, das sich selbst aufbaut. Die Basis der Anlage ist ein Floß aus Beton, das im Trockendock im Hafen gebaut wird. Anschließend werden der Teleskopturm, ebenfalls aus Beton, und das Windrad installiert. Das Gebilde wird dann von einem Schlepper aufs offene Meer gezogen. Während das Fundament ins Wasser abgesenkt wird, fährt der Teleskopturm wie von Geisterhand auf seine endgültige Höhe – dazu sind in seinem Inneren hydraulische Hubgeräte installiert.

Das prämierte Prinzip hat Vorteile: Auf See wird kein teurer Schwerlastkran benötigt, um Turm und Gondel zu errichten. Esteyco-Projektingenieur Jose Serna glaubt fest daran, dass sein „Elisa-Konzept“ die Kosten um 30 bis 40 Prozent reduziert, verglichen mit konventionellen Fundamenten.

WEGWEISENDES KONZEPT

Erinnern sie sich an den Jungen, der gerade das Abi in der Tasche hat und das Riesenwindrad der Tvind-Gemeinde bestaunt? Genau: der Däne Henrik Stiesdal. Aus ihm wurde ein wahrer Windkraftpionier und eine der versiertesten Persönlichkeiten in der globalen Wind-Industrie. Er prägt die Branche seit Jahrzehnten, rund 700 Patente tragen seinen Namen. Stiesdal war zuletzt Cheftechnologe bei Siemens Wind und machte sich 2015 mit seinem Unternehmen „Stiesdal Offshore Technologies A/S“ selbstständig. Mit seiner Firma will er die Schwimmwindkraft zum globalen Erfolg führen und gegen den Klimawandel ankämpfen – indem er die Welt mit unschlagbar günstigem Grünstrom versorgt. Um das zu erreichen, hat er einen leichtfüßigen und günstigen Schwimmer für Windkraftanlagen entwickelt. Ich hatte im Jahr 2016 das Glück, Stiesdal für ein Porträt in einem bekannten Wirtschaftsmagazin in seinem Home-Office im dänischen Odense besuchen zu dürfen. Henrik Stiesdal drückte mir zur Begrüßung einen hölzernen Propeller in die Hand, der an einem langen Griff befestigt war. Ich staunte nicht schlecht – bis er mir sagte, was ich damit machen soll: In den Wind halten und die Kraft am eigenen Leib spüren. Gesagt, getan.

Die enorme Kraft des Windes will Stiesdal auch im großen Stil nutzbar machen: Tetra-Spar nennt er sein Schwimmerkonzept. Es ist ein stählernes Gerüst, das vier gleich große Dreiecke bildet – ein sogenannter Tetraeder. Unter dem pyramidenähnlichen Gebilde hängt an Stahlseilen ein weiteres Stahldreieck: der Kiel, der

das Windrad möglichst ruhig auf Position hält. Stiesdals Tetra-Spar ist eine Kampfansage: Seine Kollegen in der Schwimmwindkraft-Szene machten, kritisiert er, alles so, wie man es immer gemacht hat – koste es, was es wolle. Man orientiere sich zu sehr an der Öl- und Gas-Industrie. Die sei das falsche Vorbild. Mit Öl und Gas verdiene man viel Geld, mit Windkraft nicht. Unterm Strich sei Windkraft auf hoher See viel zu kompliziert, viel zu aufwendig und viel zu teuer. „Windkraft muss billig sein“, ist Stiesdal überzeugt.



Bild 8.7 Henrik Stiesdals Tetra-Spar-Konzept soll deutlich weniger Stahl verbrauchen als andere Schwimmer. Quelle: Stiesdal Offshore Technologies A/S

Keep it simple

Doch wie will der Däne das machen? Stiesdal will weg von Speziallösungen, hin zu standardisierten, industrialisierten und automatisierten Abläufen. „*Keep it simple*“, lautet seine Devise. Er setzt auf eine Art Baukasten-System: Er will Standardteile verwenden. Gleich große, zylindrische Stahlröhren. Keine soll dicker als sechs und keine länger als 50 Meter sein. Diese Dimensionen erleichterten die Montage sowie die Herstellung ungenau, sagt er. Praktisch jede Fabrik könne damit umgehen. Auf diese Weise soll sein Schwimmer deutlich leichter werden als andere und viel weniger teures Material verschlingen.

Während andere Hersteller ihre kompliziert geformten und monströs schweren Stahlteile zusammenschweißen, setzt Stiesdal auf gusseiserne Verbindungsstücke, die gesteckt und verschraubt werden. Er lehnt sein Konzept an den Bau von Windradtürmen an Land an: „*Das hat sich bewährt. Seit Jahrzehnten werden Onshore-Windräder so gebaut und gehören zu den effizientesten Serienbauwerken, die der Mensch je zustande gebracht hat.*“

Mission

Stiesdal will Offshore-Windstrom unschlagbar günstig machen. Seine schwimmenden Pyramiden sollen den Kilowattstundenpreis auf fünf Cent drücken, derzeit liegt er noch bei rund neun Cent.

Dass dieses Konzept weit mehr ist als die Fantasie eines Weltverbessers, davon ist man beim Energieberatungs- und Zertifizierungsunternehmen DNV GL überzeugt. Ein Team des Unternehmens analysierte Stiesdals Pläne und erstellte eine Machbarkeitsstudie. Fazit: Das Konzept beinhaltet eine Reihe von vielversprechenden und kostensenkenden Lösungen für die schwimmende Windkraft. Der Entwurf lege einen Schwerpunkt auf die Industrialisierung, der es von allem bislang Dagewesenen unterscheidet.

Erste Tests waren bereits vielversprechend. Im Juli 2019 wurde das Konzept als 1:10-Modell auf seine Seetüchtigkeit im Wellenkanal untersucht. Inzwischen fanden sich auch zahlungskräftige Partner. So sind die RWE-Tochter Innogy und Shell an Bord. Gemeinsam mit Stiesdals Firma haben sie 18 Millionen Euro aufgebracht und bauen gerade eine Anlage in Lebensgröße. Der Schwimmer soll eine 3,6-MW-Windturbine von Siemens-Gamesa tragen. Erprobt werden soll die Anlage im norwegischen „Marine Energy Test Centre“. Wenn alles gut geht, so Stiesdal, schwimmt sie im Spätsommer 2020 im 200 Meter tiefen Wasser.

Windrad im Doppelpack

Und da ist noch eine Idee, die die Branche markant verändern und nach vorne bringen könnte. Nezy2 schlägt förmlich zwei Fliegen mit einer Klappe. Das Rendsburger Unternehmen Aerodyn plant zwei Windräder auf einem Schwimmer.

Die Windkraftanlage der Schleswig-Holsteiner ist ein Hingucker: Sie hat nur zwei Flügel, die sich auf der dem Wind abgewandten Seite drehen. Die Leistung beträgt 7,5 Megawatt und ist damit deutlich geringer als die der anderen. Doch Aerodyn will ja gleich im Doppelpack installieren – kommt also auf zusammen 15 Megawatt.

Das sogenannte Downwind-Konzept erlaubt es zudem, auf einen geneigten und mit Stahlseilen abgespannten Turm zu setzen – und da sich die Flügel hinter dem Turm drehen, können sie gar nicht mit selbigem kollidieren.

Die Türme der beiden Windräder stehen 90 Grad auseinander, was an eine Astgabel erinnert. Die beiden Rotoren rotieren gegenläufig und werden so gesteuert, dass sie sich nicht in die Quere kommen. Dieses Drehkonzept verhindert zum einen Windschatten unter den Zwillingen, zum anderen soll es den Schwimmer stabilisieren. Wann die erste Zwillinganlage in See sticht, ist allerdings noch offen.



Bild 8.8
Diesen 18 Meter hohen Prototypen des Zwillingwindrades Nezyzzy testen die EnBW und das norddeutsche Ingenieurunternehmen „aerodyn engineering“ in einem Baggersee bei Bremerhaven. Quelle: EnBW/Fotograf Jan Oelker



Bild 8.9
Windrad im Doppelpack. Noch ist es eine Fiktion ... (Quelle: SCD-Technology)

Index

A

Abstandsregelungen 71
Adaptives Sensornetzwerk 133
Aeolus 25
Aeolus Race 179
Ahornsamen 187
Airborne Wind Europe 110
Airbus 148
Airbus Perlan Mission 2 144
Albatros 191
Albeau, Antoine 150
Algenfarmen 204
alpha ventus 79
Altaeros Energies 109
Ametsreiter, Hannes 118
Amin, Adnan Z. 76
Ampair 112
Ampyx 104
Andersen, Hans Niels 165
Anemometer 24
Anemophilie 186
Antares DLR-H2 140
Antarktis 39
Antriebstechnik
– in der Luftfahrt 140
Aqua Ventus 94
Argyriadis, Kimon 90 f., 94
Arktis 38, 171
Arktische Oszillation 174
ASTROSE 134
Atomkraft 64
Aufwinde 13
Aufwindkraftwerke 202
Ausschreibungen 70
Austin, Elizabeth 146
Avontuur 162
Azorenhoch 35

B

Backwell, Ben 86
Badgire 47
Baltic-Thunder-Team 182
Batteriespeicher 197
Beaufort, Sir Francis 27
Beaufort-Skala 28
Belter, Jacob 174
Bensch, Lars 147
Berblinger, Albrecht Ludwig 50
Betonkugelspeicher 199
Betz, Albert 55
Betz'sches Gesetz 55
Blue Piling Technology 83

Blyth, James 51, 54
Bockermann, Cornelius 162
Bodeneffektflieger 190
Böe 27
Bormann, Alexander 106
Bornemann, Christian 153
Boshell, Francisco 90
Brennstoffzellenantrieb 140
Brockmann, Carsten 135
Bruttokapazitätsfaktor 66
Buffett, Warren 72
Buoyant Airborne Turbine 109
Bürgerenergiegesellschaften 200
BVentus 116

C

Caizergues, Alexandre 154
Camera, Francesco la 76
Carbon Capture and Storage 204
Cavendish, Henry 18
Cayley, George 50
CCS 204
CFK 139
Cheng, Po Wen 65, 68, 71, 88, 94 f., 121
Cloud-Computing 203
CO₂-Abscheidung 204
CO₂-Gehalt 35
coffin corner 147
Corioliskraft 11
Corona-Krise 76, 143
Corona-Pandemie 175
Cour, Poul la 54

D

Dänisches Design 56
Darwin, Charles 19
Darwin, Erasmus 18
de Saussure, Horace 19
Dickson, Giles 65
Diesel, Rudolf 165
Dotzenrath, Anja-Isabel 104
Downwind-Konzept 97
Drachen 45
Drake, Jim 152
Dunkerbeck, Björn 150
Dunlap, Andrea 104
Durchleitungskapazität 133
Dyna-Rigg 159
Dyneema 140

E

EEG 62
 e-Genius 140
 Einflügler 188
 Einheiten 26
 Eis-Albedo 40
 Eisdrift 168
 Eislastdetektion 135
 Ekman, Vagn Walfrid 170
 Ekranoplan 191
 Elektrolyse 195
 Elektromobilität 73
 Elektro-Segelflugzeug 140
 Emissionsfreie Energieerzeugung 72
 Energieverbrauch 8
 Energiewende 72, 131
 EnerKite 106
 Enevoldsen, Einar 144
 Engst, Thomas 186
 E.ON-Anlage 116
 Erdatmosphäre 10
 Erdbeobachtungssatellit 25
 Erdkabel 133
 Erneuerbare Energien 78
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 62
 E-Ship1 159
 European Green Deal 76

F

Fahrenheit, Gabriel Daniel 19
 Fallwindkraftwerk 202
 Felker, Fort 102
 Fial, Julian 178
 Fischer, Matthias 196
 Flettner-Rotoren 159
 Floating Wind 90
 Flugdrachen 102
 Flugwindkraft 100
 Flugzeug-Aerodynamik 57
 Foilen 155
 Förderprogramme 113
 Fossett, Steve 144
 Fram (Expeditionsschiff) 168
 Franklin, Benjamin 49
 Freileitungen 133
 Freileitungsmonitoring 128
 Frenz, Steffen 183
 Frey, Wolfgang 119
 Fujita-Skala 31
 Fujita, Ted 30

G

Gates, Bill 72
 Gegenwindfahrzeuge 178
 geophysical limits to global wind power 77
 Gjerde, Jon 105
 Glasfaserverstärkter Kunststoff 56
 Global Renewables Outlook 76
 Göpel, Maja 86

Greenbird 51
 Green Deal 76
 GroWiAn 57

H

Hadley, George 18
 Hadley-Zelle 34
 Halbtaucher-Plattformen 91
 Haliade-X 65
 Halley, Edmund 17, 18
 Hangaufwind 138
 Hawkins, Ed 34
 Heiße Seile 133
 Heyerdal, Thor 46
 HGÜ-Technik 134
 Hitzedrahtanemometer 24
 Hochdruck 7
 Hochsee-Windfarm 79
 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung 198
 Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen 134
 Hochtemperaturleiter 133
 Hofmann, Sven 161
 Höhenrekord 144, 146
 Höhenwind 101
 Höhenwindkraft 100
 Holighaus, Tilo 138
 Holländermühlen 54
 Honnef, Hermann 55
 HTL-Seile 133
 Hurrikan 30
 Hu, Shijian 36
 Hütter, Ulrich W. 56 f.
 Hydroptère 154
 Hywind Scotland 93
 Hywind Tampen 94

I

Ideol 93
 Innovation 75
 Innovation Award 182
 Isobaren 9

J

Jack-Up-Barge 81
 Jaiser, Ralf 38, 40
 Jenkins, Richard 51
 Jensen, Britta 58 f., 61
 Jetstream 12
 Jiuquan Wind Power Base 70
 Johnen, Robert 118
 JoJo-Prinzip 102
 Jüttemann, Patrick 113
 Juul, Johannes 56

K

Kapazitätsfaktor 78
 Kavitation 152

Kemfert, Claudia 86
 Kirchberg, Martina 141
 Kitemill 105
 Kleinwindanlagen
 – typische Fehler 124
 Kleinwindenergieanlagen 112
 Klimadaten 171
 Klimaforschung 173
 Klimapolitik 74
 Klimawandel 34
 Kohlenstoffdioxid 18
 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff 139
 Kohleverstromung 72
 Kompositwerkstoffe 56 f.
 Koschinski, Sven 83
 Kost, Christoph 75
 Kunstflugschulung 142

L

Laminarflügel 140
 Land-Seewind-Zirkulation 8
 Landyachten 51
 Lavergne, Thomas 173
 Leewellen-Wolken 145
 Leistungsbeiwert 55
 Lidar *Siehe* Light Detection and Ranging
 Lieberknecht, Markus 128
 Light Detection and Ranging 26
 Lilienthal, Otto 50
 Lins, Christine 86
 Lomborg, Bjørn 74
 Lucke, Irina 85
 Luft 22
 Luftdruckunterschiede 8
 Luftfahrt 27
 – Umweltwirkung 143
 Luftfeuchtigkeit 23
 Luftplankton 189
 Lunar Society 18
 Luther, Gerhard 199

M

Maegaard, Preben 60
 Maersk Pelican 161
 Magdeburger Halbkugeln 17
 Magnus-Effekt 159
 Magnus, Heinrich Gustav 160
 Makani 103
 Maltese Falcon 159
 Mars 207
 Matter, Juerg 205
 May, Hanne 86
 Meeresströmungen 36
 Mengelkamp, Heinz-Theo 20
 Menschenhaar-Hygrometer 19
 Meteorologie 15
 Meteorologisches Netzwerk 132
 Minigrd-Stromversorgungssystem 123
 Miniturbinen 112

Molinar, Gabriela 133
 Mömken, Julia 41
 Mond-Gesellschaft 18
 Moore, Peter 16

N

Nansen, Fridtjof 170
 National Renewable Energy Laboratory 95
 Natureingriff 67
 Naumann, Till 118
 Nehls, Georg 81, 83
 Nennlast 77
 Neoliner 163
 Netzsicherheit 131
 Newton, Isaac 17
 Nurflügler 189

O

Offshore-Windkraft 90
 – Potenzial weltweit 87
 Offshore-Windkraftfundamente 82
 Offshore-Windparks 81, 84
 Offshore-Windräder 79
 Offshore-Windturbinen 78
 Ohlmann, Klaus 141, 143, 148
 Onshore-Anlagen 78

P

Pariser Klimaabkommen 74
 parts per million 36
 Pascal, Blaise 17
 Passatwinde 18
 Payne, Fred 152
 Payne, Jim 144
 Perlan 2 144
 Permafrostboden 39
 Peter, Simone 86
 Photovoltaikanlagen 113
 Piccard, Bertram 140
 Piezoeffekt 201
 Pinto, Joaquim G. 40
 Plattformen
 – schwimmende 91
 Polarexpedition MOSAiC 170
 Polarjet 38
 Polarstern 171
 Pollenkorona 186
 Price, Trevor J. 51, 54
 Priestley, Joseph 18
 PrognoNetz 132
 Prölss, Wilhelm 159
 Prusseit, Werner 198
 Puchta, Matthias 199

Q

Quaschnig, Volker 1, 70, 197

R

Race for Water 164
 Redispatch 129
 Rekorde auf dem Wasser 154
 Rekordflüge 145
 Rex, Markus 38, 170
 Richter, Patrick 121
 Rieger, Daniel 158
 Riesenräder 55
 Riesensegler 140
 Rossby-Wellen 12
 Roy, Robert Fitz 19
 Rutherford, Ernest 18

S

Sailing Yacht A 158
 Salisbury, Bert 153
 Sandercock, Morgan 146
 Savonius-Rotor 112
 Schleppflugzeug 147
 Schmidt-Böcking, Horst 199
 Schmidt, Ralf 116
 Schweitzer, Hoyle 152
 Schwimmwindpark 92
 Segelantrieb 159
 Segelflieger 138
 Segelfloß 46
 Segelflugzeug 138
 Segelkunstflug 141
 Segelqualle 190
 Segelschiff 49, 158
 Selandia 166
 Sensornetzwerk 135
 Serna, Jose 96
 Skiba, Martin 87
 SkySails 107, 163
 Smil, Vaclav 7
 Smith Putnam 55
 Solar Impulse 140
 Solarstrahlung 7
 Spar-Buoy Konzept 91
 Speedsurfer 152
 Staudruckanemometer 24
 Stiesdal, Henrik 59, 88, 96
 Stolberg, Niels 163
 Strandsegler 178
 Stromautobahn 134
 Stromeinspeisegesetz 62
 Stromgestehungskosten 75
 Strominseln 196
 Stromwindkraft 54
 SuedLink 134
 Sullenberger, Chesley B. 141
 Supraleitender Generator 200
 Supraleiter 198
 Swift S1 142
 Systemsicherheit 131

T

Taifun 30
 Tande, John Olav 87, 90
 Temperaturunterschiede 8
 Tension-Leg-Plattformen 91
 Tetra-Spar 96
 Thermik 143
 Thermikflug 139
 Thomas, Philipp 95
 Thomson, William 51
 Tiefdruck 7
 Timmermans, Frans 76
 Tornadoliste 32
 Tornados 30
 Treibhauseffekt 18
 Tres Hombres 162
 Turbulenzen 13
 Tvind-Rad 58
 Tyndall 18

U

Ultraschallanemometer 24
 Urpassat 18

V

van Helmont, Jan 17
 Ventifoil 164
 Ventomobil 179
 Venus 207
 Verhoef, Hans 180, 182
 Vertikalläufer 120
 Vestas Sailrocket 2 154
 Vielflieger 192
 Vindskip 164
 Vogelschlag 82
 Volllaststunden 77
 von Guericke, Otto 17
 Vorhersagen 20

W

Wache, Sebastian 34, 41
 Walzensegel 160
 Warnock, Ed 146
 Watt, James 18, 54
 Wellenhöhe 37
 Wellenschwingungen 144
 Weltklimarat 34
 Weltorganisation für Meteorologie 25
 Wettervorhersagen 16
 Weyhardt, Jan Henrik 183
 Windautos 177
 Windbaum 119
 Windblütigkeit 186
 Windchill-Effekt 128
 Windcloud 203
 Windenergiemarkt 64
 WindFloat 93
 Windgeschwindigkeit 26

- Windkraftanlagen 54
 - Windkraftanlagen in Deutschland 77
 - Windkraftanlage StGW-34 57
 - Windkraft in Deutschland 71
 - Windkraftnutzung 44
 - Windkraftopfer 67
 - Windkraft-Wunderland 87
 - Windmessung 23, 114
 - Windmühlen 47
 - Windparks 82
 - Windpfeile 29
 - Wind-Punks 59
 - WindRail 116
 - Windrichtung 29
 - Windrose 29
 - Windsack 23
 - Windstärken 21
 - Windstille 13
 - Windstromproduktion 78
 - Windsurfer 41, 150, 153
 - Windthermie 203
 - Windturbine 55
 - Windwandel 34
 - Wind-Wasserrad 198
 - Wind-Wasserstoff 195
 - Windwolkenkratzer 202
 - Wing-Segel 164
 - Winkes, Jasper 83
 - Winkler, Heike 195
 - Wirbelstürme 30
 - Wobben, Aloys 68
 - Women of Wind Energy Deutschland e. V. 86
 - world wide web
 - Stromverbrauch 72
 - Wortmann, Franz Xaver 188
 - Wrage, Stephan 107f., 163
- Z**
- Zirkulation, planetarische 10
 - Zirkulationszellen 11
 - Zugdrachen 163
 - Zugvögel 191
 - Zwillingswindrad 98
 - Zyklon 30