



Universität Stuttgart



**10 Jahre
Stiftungslehrstuhl
Windenergie**

**Rückblick
und
Ausblick**



University of Stuttgart
Germany





Inhalt

Vorwort	5 - 8
Einleitung	9 - 10
Wiege der Windkraft – wie alles begann	12 - 19
Renaissance der Windkraft – die 1990er-Jahre	20 - 23
Stiftungsjahre – Errungenschaften des SWE zwischen 2004 und 2014:	24
• LiDAR	25 - 28
• Floating Wind	29 - 32
• WindForS	33 - 36
• InVentus	37 - 40
• AlphaVentus RAVE	41 - 44
Lehre und Alumni – Erinnerungen an das Studium am SWE	45 - 48
Windkraft im bergig-komplexen Gelände – das neue Testfeld	49 - 52
Ausblick – Zukunft der Windkraft und der erneuerbaren Energien:	53
• Offshore-Windkraft	54 - 57
• Airborne-Windkraft	58 - 60
• Speicher	61 - 63
• Grundlastfähigkeit der Erneuerbaren	64 - 65
• Windparks als Kraftwerke	67
• Stromübertragung	68 - 70
Schlusswort - der SWE blickt in die Zukunft der Windenergie	72 - 81
Impressum	82

Vorwort von Karl Schlecht



”

Die Kraft des Windes
fasziniert mich schon
immer.

1957, als junger Maschinenbaustudent an der Technischen Hochschule Stuttgart, nahm ich an einer Exkursion teil. Wir besuchten Ulrich Hütter, den damals schon recht berühmten Ingenieur und Hochschullehrer, in seiner Werkstatt am Rande eines Segelfluggeländes in Nabern an der Teck. Dort, in einer Holzbaracke, die übrigens noch heute steht, laminierte er gerade die Flügel für eine Windenergieanlage aus Glasfaserkunststoffen. Damals war das ein revolutionärer Werkstoff, der erstmals beim Bau von Segelflugzeugen zum Einsatz kam. Das Material faszinierte mich ungemein, ich war schließlich selbst Segelflieger, später Segler und Windsurfer. Überhaupt: Alles, was mit dem Wind zu tun



hat, fand und finde ich überaus spannend. Die Komplexität der Arbeiten, die Hütter dort ausführte, war beeindruckend. In dieser Stunde hatte mich Hütter mit dem Windkraftvirus infiziert.

Nach dem Studium widmete ich mich dem Bau einer Mörtelpumpe und wurde Unternehmer. Aus meiner kleinen Firma wuchs ein weltweiter Konzern namens Putzmeister, mit 4000 Firmenangehörigen und Milliardenumsatz. Wir exportierten Maschinen in alle Welt und bauten zahlreiche Werke im Ausland. Die bei uns praktizierte wissenschaftlich orientierte Ingenieurskunst ermöglichte Rekordbauwerke, etwa den ikonischen über 800 Meter hohen Burj Kalifa in Dubai.

1998 brachte ich mein Unternehmen ganz in die gemeinnützige Karl Schlecht Stiftung (KSG) ein. Alle dortigen Putzmeisteranteile wurden auch im Interesse der KSG an SANY veräußert, einen privaten Baumaschinenhersteller aus China, der sich den gleichen humanen und unternehmerischen Werten wie die KSG verpflichtet hat. Heute ist die selbstständige Firma – die ehemalige Garagenfirma Putzmeister – weiterhin globaler Markt- und Technologieführer im Segment der Betonpumpen und Verputzmaschinen. Keine Frage: Ich hatte viel Glück im Leben. Aber es war auch immer ein harter Kampf.

Einmal, ich glaube, es war im Jahr 1997, ich war zum Wandern auf der Schwäbischen Alb, sah ich eine Windkraftanlage in den Himmel ragen. Sie stand auf dem ehrwürdigen Windkraft-Testfeld „Ulrich. W. Hütter“. Beim Anblick der weißen Flügel, die im Wind kreisten, erinnerte ich mich an die Begegnung mit Ulrich Hütter. In diesem Moment wuchs in mir der Wunsch, mich selbst in der Windenergie zu engagieren. Schließlich sah ich in der Nutzung der Windkraft eine große Zukunft. Ich kaufte drei Windräder im Südschwarzwald. Doch schnell erkannte ich, dass die Technik noch unausgereift ist, dass noch eine Menge Forschungsbedarf besteht.

Ich beschloss, einen Lehrstuhl für Windenergie an „meiner Hochschule“ in Stuttgart zu stiften, um der noch jungen Windenergie eine wissenschaftlich-akademische Heimat zu geben. Das war anfangs gar nicht so leicht: Baden-Württemberg war in der Zeit CDU-regiert, und damit nicht gerade windkraftfreundlich gesinnt. Doch der unermüdliche Einsatz und die Überzeugungsarbeit von Heiner Dörner, lange Zeit Begleiter und Stellvertreter von Ulrich Hütter an der Universität Stuttgart, verlieh meinem Vorhaben Rückenwind und überzeugte letztendlich



Vorwort
von Karl Schlecht

alle Kritiker. Dörner hatte nach Hütters Ausscheiden von 1980 bis 2004 etliche Studenten am Institut für Flugzeugbau in Windenergie unterrichtet und zahlreiche Prüfungen abgenommen. Er hatte etliche Diplomarbeiten zur Windenergie betreut. Dörner war es, der die Windfahne an der Universität Stuttgart die ganze Zeit über hochhielt. Perfekt wurde der Plan, den Lehrstuhl zu gründen, als wir Professor Dr. Martin Kühn, einen ausgewiesenen Windkraftspezialisten, als Inhaber für den ersten Windenergie-Lehrstuhl in Deutschland gewinnen konnten. Und so startete 2004 das erste Semester am SWE. Der Lehrstuhl und die Lehrangebote fanden schnell großen Anklang unter den Studenten.

Heute werten die Universität Stuttgart und die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik den Windenergie-Lehrstuhl nicht nur als eine Bereicherung und eine Fortsetzung ihrer Windenergie-tradition, sondern der Forschung und Lehre zur Energiewende allgemein. Mittlerweile wurden über tausend Studenten am SWE ausgebildet. Über hundert Diplomarbeiten wurden geschrieben. Zahlreiche Absolventen haben ausgezeichnete Jobs in der Industrie oder in der Forschung gefunden und geholfen, die Windkraft zu dem zu machen, was sie heute ist: eine globale Branche, die den Energiemarkt umkrempelt. Viele Absolventen sind namhafte Persönlichkeiten in der Windkraftwelt und erinnern sich gerne an die Zeit in Stuttgart zurück. Im Bereich Forschung konnte der Lehrstuhl ein eigenes Profil aufbauen und ist inzwischen eine feste Größe in der Windenergieworld, sowohl bei den internationalen Forschungseinrichtungen als auch in der Industrie. Kurzum: Der SWE genießt weltweit einen exzellenten Ruf.

Heute erfüllt es mich mit Stolz, dass Windturbinen in aller Welt mehr und mehr Strom produzieren und zunehmend fossile Energieträger ersetzen. Am SWE geht es inzwischen nicht mehr darum, ob die Windenergie eine Zukunft hat, sondern um technische Details, darum, wie das Gesamtobjekt Windkraftanlage noch effizienter werden und immer größere Teile unserer Stromversorgung übernehmen kann.

Doch ich bin auch kritisch. Ich glaube nicht an 100 Prozent erneuerbare Energien. Ich bin mir bewusst, dass noch viele Details zu lösen sind – sowohl technisch als auch in Sachen Kosten, Umweltschutz und Ästhetik. Eine zwangsläufige Folge des Ausbaus der Erneuerbaren Energien ist, dass sie unseren Strom verteuern. Das fördert das Interesse, Energie einzusparen. Doch

es gibt ja nicht nur die Windkraft: Energiequellen gibt es heutzutage im Überfluss. Inzwischen fördert die KSG Lehrstühle in verschiedenen Bereichen der Erneuerbaren Energien, sowohl an der Universität Stuttgart als auch an der Hochschule Reutlingen.



Ich bin sicher, dass die heutigen, wunderbaren und hoch effektiven Windkraftwerke mithilfe von Forschungsarbeiten – wie denen vom Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie – einen noch größeren Anteil am globalen Energiemix einnehmen werden. Dazu braucht es Forschung und Lehre. Diese Aufgabe weiß ich bei Herrn Professor Po Wen Cheng, der den SWE seit 2011 leitet, in guten Händen.

Gestatten Sie mir abschließend noch eine Bemerkung: Ich bin dem „Windpapst“ Ulrich Hütter ja nur wenige Male begegnet. Aber dieses eine Mal, in jener Holzbaracke in Nabern an der Teck, ist mir besonders in Erinnerung geblieben. Wenn ich heute an Ulrich Hütter denke, denke ich noch immer an den typischen Geruch von GFK, den ich mit meiner Begeisterung für die Windenergie verbinde. Hütter bleibt als beharrlich und wissenschaftlich gründlich vorgehender Ingenieur eines meiner bereichernden Vorbilder. Er hat die aerodynamische Blattgestaltung vom Segelflug auf den Rotorblattbau übertragen und die bisherigen Blech- oder Flachflügel ersetzt. Diese entscheidenden Merkmale und die Dreiblattausführung sind heute Industriestandard. So gesehen darf man Stuttgart mit Fug und Recht als die Wiege der modernen Windkraft bezeichnen. Darüber freue ich mich sehr.

Ich danke allen, die geholfen haben, den Lehrstuhl zu dem zu machen, was er heute ist, und wünsche mir, dass er auch künftig für begabte und begeisternde Studierende beispielgebend bleibt.

Karl Schlecht, 31. August 2017

Einleitung

Da ging
ein Traum in
Erfüllung.

”



Professor Cheng,
Professor h.c. Schlecht,
Professor Kühn

Liebe Leserinnen und Leser,

„Da ging ein Traum in Erfüllung.“ Mit diesem Satz antwortete Martin Kühn, der erste Lehrstuhlinhaber des Stuttgarter Lehrstuhls für Windenergie, als er erfuhr, dass er als bundesweit erster Windkraftprofessor antreten werde. Martin Kühn leitete den Lehrstuhl vom Beginn im Jahr 2004 bis zum Jahr 2010 und prägte ihn maßgeblich.

Manch einen mag es verwundern, dass ausgerechnet Stuttgart, die Automobilstadt, auf der internationalen Landkarte der Windkraftenergie eine Topadresse sein soll. Aber seien Sie versichert: Stuttgart ist tatsächlich ein Hotspot der Windkraftentwicklung. Und zwar von den Anfängen der modernen Windenergienutzung bis zum heutigen Tag.

Deshalb wollen wir mit diesem Buch zum einen die Geschichte der Windkraft generell nachzeichnen, zum anderen aber auch ganz speziell auf den Beitrag der Stuttgarter eingehen. Wir wollen Ihnen ein Gefühl dafür geben, welchen Anteil die Stuttgarter am globalen Erfolg der Windenergie haben, und aufzeigen, was die Zukunft noch so bringen wird.

Dass die Windenergie überhaupt an der Universität Stuttgart ankam, ist in erster Linie dem Wirken des österreichisch-deutschen Ingenieurs und Hochschullehrers Ulrich W. Hütter zu verdanken. 1944 erhielt er einen Lehrauftrag für Strömungslehre und Flugmechanik an der Technischen Hochschule Stuttgart – und hatte die Nutzung der Windenergie im Gepäck. Hütter brachte zahlreiche Windkraftinnovationen hervor, die bis heute weltweiter Standard sind, etwa die Herstellung von Rotorblättern

mit glasfaserverstärkten Kunststoffen oder der Blattschlaufenanschluss. Eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Windkraftanlagen spielte schon in den 1970er-Jahren das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das bis heute in direkter Nachbarschaft zur Universität in Stuttgart-Vaihingen beheimatet ist. Zu diesem Forschungszentrum, damals hieß es noch DVL, pflegte Hütter enge Beziehungen.

Als Hütter Ende der 1980er-Jahre altersbedingt aus dem Dienst an der Universität Stuttgart ausschied, wurde es recht still um die Windenergieforschung in Vaihingen. Heiner Dörner, ein enger Vertrauter Hütters, der ihn rund um den Globus zu Konferenzen und Reden begleitete und oftmals vertrat, hielt die Windkraftfahne aber weiterhin hoch – auch im harschen Gegenwind der CDU-Regierung. Herrn Dörner ist es letztlich zu verdanken, dass der Lehrstuhl für Windenergie heute existiert: „Ab 1968, und verstärkt ab der ersten Energiekrise 1972, wurde am Institut Hütters Wissen über die Windenergie als neue zusätzliche Abteilung etabliert. Das ‚neue‘ Arbeitsgebiet lief am IFB (Institut für Flugzeugbau) von nun an parallel zur Flugzeugbau-Konstruktionsausbildung mit Vorlesungen und Forschungsarbeiten. Hütter adoptierte mich quasi für das Gebiet der Windenergie als seinen Begleiter und Stellvertreter“, erinnert sich Heiner Dörner.

Und noch eine weitere Person spielt eine Schlüsselrolle innerhalb des SWE: Karl Schlecht. Ohne das Engagement des Gründers der Putzmeister AG und seiner Liebe zum Wind wäre es wohl nie zur Gründung des SWE gekommen. Er hat den Lehrstuhl zehn Jahre lang gestiftet. Zudem hat sich Karl Schlecht mit seiner Stiftung in zahlreichen Einzelprojekten engagiert und tut das bis heute.

Inzwischen kann der SWE zahlreiche Welterfolge vorweisen. So sind biegetorsions-optimierte Rotorblätter ein Kind der Stuttgarter Windkraftspezialisten. Genauso ist das Lasermessverfahren LiDAR und die (sogenannte prädiktive) Regelung von Windkraftanlagen mit selbigem inzwischen eine global anerkannte und beachtete Technologie. Kurioserweise ist ausgerechnet Stuttgart ein Synonym für schwimmende Windkraftträder, die im Ozean treiben. Ganz ohne Mobilität geht es aber selbst am SWE nicht: Im Projekt InVentus feiern Stuttgarter Studentinnen und Studenten seit Jahren Erfolge, ja sogar Weltrekorde – eigenständig entwickeln sie ein ausschließlich vom Wind angetriebenes Fahrzeug und nehmen an Rennen teil.

Der Erfolg spricht für sich: Ehemalige Stuttgarter Windkraftstudentinnen und -studenten arbeiten heute in führenden Positionen daran, die Windkraftbranche immer weiter voranzubringen – damit führen sie eine alte Stuttgarter Tradition fort.

Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine spannende Wanderung durch die Vergangenheit, die Gegenwart und die Zukunft der Windenergie.



**Wenn der Wind der
Veränderung weht,
bauen die einen Mauern
und die anderen
Windmühlen.**

Chinesisches Sprichwort

Wiege der Windkraft - wie alles begann Technik ist Evolution

Die Geschichte der Windkraft



Die Geschichte der Windkraft reicht tausende Jahre zurück. Seit Windmühlen nicht nur Korn mahlen, Wasser pumpen oder sonst wie mechanische Arbeit erledigen, sondern auch Strom liefern, ist ihr Erfolg kaum mehr zu stoppen.

Wann und wo genau sich das erste Windrad der Menschheit drehte, ist nicht überliefert. Es gilt aber als ziemlich sicher, dass die Perser schon vor über 2000 Jahren den Wind für sich arbeiten ließen, um sich schweißtreibende Arbeit zu ersparen. Ihre Anlagen bestanden vermutlich aus kaum mehr als Holz und Stoff. Heutige Turbinen hingegen sind hochkomplexe, computergesteuerte und gigantisch große Maschinen aus Hightech-Werkstoffen. Auch ihre Aufgabe hat sich markant gewandelt: Die direkte mechanische Arbeit ist weitgehend passé, stattdessen ist die Produktion von elektrischem Strom das oberste Ziel. Und das können die Anlagen immer besser. Das beweist ihr Erfolg: Sie dringen in die letzten Winkel dieser Erde vor – von polaren Regionen über Wüsten und Gebirge bis hin zu den Weiten der Meere.

Weltweit sind heute Windkraftanlagen mit zusammen rund 500 Gigawatt Nennleistung in Betrieb. Das entspricht der Leistung von rund 500 Kernkraftwerksblöcken. In manchen Regionen ist die Windkraft bereits heute die günstigste aller Stromquellen. Wieso sollte da jemand fossile Treibstoffe verbrennen und den Klimawandel anfeuern? In Kombination mit Speichern oder als gigantische Offshore-Windfarmen können Windturbinen die Menschheit sogar mit Grundlaststrom versorgen und somit fossile und nukleare Kraftwerke ganz ersetzen. Die Evolution der Windkraft verlief bislang also überaus erfolgreich. Doch sie ist noch lange nicht abgeschlossen.

Der Reihe nach. Jeder kennt Gemälde von holländischen

Windmühlen. Zu Tausenden drehten sich ihre Flügel ab dem 16. Jahrhundert, hauptsächlich um Wasser zu pumpen. Die Holländermühle lieferte in gewisser Weise die Blaupause für unsere heutigen Windkraftwerke. Drehten sich die Rotoren der persischen Mühlen noch in der Vertikalen, so holten die Niederländer sie in die Horizontale. Dieser scheinbar kleine Unterschied ist entscheidend für die Effizienz der Anlagen. Denn die alte persische Windmühle nutzt den Widerstand des Segels, um die Rotation zu erzeugen. Das ist jedoch ineffizient, wie die Strömungslehre später beweisen konnte. Die holländische Windmühle dagegen nutzt den Auftrieb des Segels. Das verdoppelte die Effizienz gegenüber den persischen Mühlen. Doch gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde es still um die Windfänger: Mithilfe der Dampfmaschine und später des Verbrennungsmotors eroberten die fossilen Energieträger Kohle und Öl die Welt – und verdrängten die beflügelten Kraftwerke.

Doch die Windkraft war nicht eingeschlafen, sie schlummerte lediglich. Etwa 100 Jahre später tauchte sie wieder aus der Versenkung auf. Die Öffentlichkeit allerdings bemerkte das kaum. Es war die Zeit des elektrischen Stroms: Erste Glühbirnen eroberten die Straßen. Der Elektromagnetismus beschäftigte die Wissenschaft. In dieser Zeit entwickelte der schottische Erfinder James Blyth ein Strom erzeugendes Windrad, das als das weltweit erste gilt. Im Juli 1887 soll seine Anlage erstmals Wind in Strom gewandelt haben. Blyth speiste damit Bleiakkumulatoren – so saß er selbst abends bei Flaute nicht im Dunkeln, sondern konnte bis spät in die Nacht arbeiten. Insgesamt zehn 25-Volt-Glühlampen leuchteten bei „moderater Brise“ auf, schrieb der Erfinder.

Wie genau sein Windrad aussah, ist strittig. In einem Brief vom 2. Mai 1888, den Blyth an die Philosophische Gesellschaft Glasgow verfasst hatte, beschrieb er sie so: „Ein Dreibein, mit einem rund zehn Meter großen Rotor, vier je vier Meter langen Streben mit Baumwollseglern daran und einem Bürgin-Dynamo, der vom Schwungrad über ein Seil angetrieben wird.“ Für die damalige Zeit fraglos eine Hightech-Maschine. An diesem technologischen Fortschritt wollte er auch die Bürger teilhaben lassen: Waren seine Akkus geladen, spendierte Blyth den Strom dem nahe gelegenen Städtchen Marykirk, um dort nachts die Straßen zu beleuchten. Die Drähte wurden aber schon bald wieder entfernt: Elektrischen Strom hielt man für Teufelszeug. Für die Vertreter der „fossilen Branche“, die sich in der Glasgow Philosophical Society vereinten, darunter Dampfmaschinen-

Miterfinder James Watt und andere Größen, war die Elektrizität ganz einfach Konkurrenz. Man sieht: Schon damals hatten gewisse Branchenvertreter Angst vor den Erneuerbaren Energien. Heute, 130 Jahre später, ist Blyths Heimat Schottland einer der globalen Hotspots der Windenergie.

James Blyth hat früh erkannt, wo die Herausforderungen der Windenergienutzung liegen – nämlich die gewaltigen Kräfte des Windes zu zähmen. Von ihm stammt das Zitat: „Any fool can make a wind turbine go round to generate electricity, but the challenge is to make one that can be left unattended without over-speeding to destruction.“ Die wirkliche Kunst ist also, eine Turbine zu bauen, die sich automatisch den Windbedingungen anpasst, ohne Schaden zu nehmen, wenn die Windgeschwindigkeit steigt.

1891 erreichte die „Stromwindkraft“ das europäische Festland. Der dänische Physiker Poul la Cour errichtete auf dem Schulgelände von Askov eine Versuchsanlage. Er war es, der den Flügeln erstmals eine annähernd aerodynamische Form gab und ihre Anzahl auf sechs Flügel reduzierte, um die Umdrehungsgeschwindigkeit der Welle zu beschleunigen – mehr Umdrehungen sind gut für die Stromausbeute.

Natürlich sind all die Übergänge fließend. Entwicklungen wachsen selten auf dem Mist einzelner Erfinder, sondern vielmehr aus den Gedanken und Versuchen vieler – Technik ist Evolution. Dennoch lassen sich gewisse Epochen und Entwicklungen einzelnen Personen zuordnen.

Eine dieser Personen ist Albert Betz. Der Leiter der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen war maßgeblich daran beteiligt, die theoretischen Grundlagen für die Windenergienutzung zu formulieren. Betz formulierte 1919 ein Gesetz, das besagt, dass maximal 59,3 Prozent der kinetischen Energie des Windes genutzt werden können. Das „Betz'sche Gesetz“ gilt bis heute – auch wenn kreative Erfinder immer wieder behaupten, mehr als das Betz'sche Maximum aus dem Wind holen zu können.

Von der Technik im Aufwind inspiriert und unterstützt durch die NS-Industriepolitik, setzte der deutsche Erfinder und Windenergiepionier Hermann Honnef zu Höhenflügen an. Er entwarf in den 1930er-Jahren Windturbinen mit einem megalomanischen Maßstab: Turbinen mit einer Leistung von bis zu 20 Megawatt, die bis zu 500 Meter hoch sind und drei Rotoren mit je 160 Meter



Allgaier WE 10
auf einer Ausstellung

Durchmesser tragen sollten. Allerdings existierten seine Riesenräder nur auf dem Papier. Selbst die heutigen Megamaschinen sind mit rund zehn Megawatt nur halb so groß.

Eine für die damalige Zeit wahre Monsteranlage wurde 1941 in den USA gebaut: Die „Smith Putnam“ war die weltweite Turbine der Megawattklasse. Sie hatte einen Rotordurchmesser von 53,3 Metern und einen Generator mit 1,25 Megawatt Nennleistung. Ihre Flügel waren allerdings von den heute profilierten noch meilenweit entfernt – sie erinnerten eher an Bretter. Überhaupt sollte das Monstrum nicht lange leben: 1945, nachdem ein Blatt abgerissen war, wurde die Anlage stillgelegt.

Ungefähr zur gleichen Zeit formierte sich in Dänemark um den Ingenieur Johannes Juul das, was zur heute bekannten Windkraftindustrie heranwuchs. Damals tüftelten dort etliche engagierte Bastler an Windrädern und tauschten sich rege aus. Viele von ihnen waren Bauern, die sich angesichts steigender Energiepreise selbst mit Strom versorgen wollten. So entstand das weltberühmte „Dänische Konzept“: drei Flügel, Getriebe, Asynchrongenerator, der direkt ins Netz speist. Die Rotorblätter waren zudem erstmals mit einer Stallregelung ausgestattet – einem System, dass die Blätter bei zu viel Wind durch Strömungsabriss abbremst und die Anlage somit vor der Zerstörung schützt.

In Deutschland war es vor allem der österreichisch-deutsche Ingenieur und Hochschullehrer Ulrich W. Hütter, der der Windkraft ihr heutiges Aussehen gab. Ab 1939 war er Leiter der aerodynamischen Abteilung der Weimarer Ingenieursschule und zeitgleich bei Ventimotor beschäftigt, einem SS-nahen Unternehmen, das für den even-



tuellen Endsieg dezentrale Windräder für Osteuropa fertigten sollte. Doch daraus wurde nichts. 1943 wurden die Aktivitäten von Ventimotor eingestellt.

Für Hütter lief es dennoch gut. 1944 erhielt er einen Lehrauftrag für Strömungslehre und Flugmechanik an der Technischen Hochschule Stuttgart. Hütter war selbst Segelflieger und auch in Sachen Flugzeugentwicklung eng mit dem Einsatz der Kompositwerkstoffe verbunden. So lässt sich auch das weltweit erste, voll aus Glasfaserkunststoff (GFK) gebaute Segelflugzeug, die „fs 24 Phönix“ der Akaflieg Stuttgart, mit Ulrich Hütter in Verbindung bringen. Das Segelflugzeug läutete 1957 ein neues Zeitalter im Flugzeugbau ein. Mit dem neuen Wunderwerkstoff konnten die Flügelprofile endlich so dünn, aber dennoch stabil gebaut werden, wie es die Entwürfe der Aerodynamiker forderten – mit Holz war das unmöglich. Das Resultat waren ungekannte Flugleistungen. Heute steckt der Werkstoff in den neusten Generationen von Verkehrsflugzeugen wie Boeings 787 Dreamliner und Airbus' A350 – und natürlich in jedem Windrad.

Auch in Sachen Windenergie war Ulrich Hütter umtriebiger als kaum ein Zweiter. Hütter wandte als weltweit Erster die Grundsätze der Flugzeug-Aerodynamik auf Rotorblätter von Windenergieanlagen an. Hütter war es auch, der die Universität Stuttgart prominent auf der Landkarte der internationalen Windkraftforschung platzierte. Seine größte Errungenschaft war es, den Kunststoffbau zu etablieren. Die legendäre Windkraftanlage StGW-34 der Allgaier Werke aus Uhingen bei Stuttgart stammt aus seiner Feder. Von 1946 bis 1959 war Hütter dort Konstruktionsleiter. Die StGW-34 gilt als Meilenstein der Geschichte der Windenergienutzung und als Urmuster moderner „Freifahrender Turbinen“. Als weltweit erstes Windrad hatte die Anlage Flügel aus Faserverbundwerkstoff und erreichte damit aerodynamische Traumwerte. Die 17 Meter langen, freitragenden Rotorblätter waren für die damalige

Zeit eine absolute Innovation – und ein Wagnis: war der Werkstoff doch weitgehend unbekannt. Details wie der sogenannte „Schlaufenanschluss“, der den Übergang vom Kunststoff zum stählernen Gewindebolzen darstellt (mit dem der Flügel an die Nabe geflanscht wird), sind bis heute wegweisend. Die zwei-flügelige 100-Kilowatt-Anlage wurde weltweit rund 200 Mal aufgestellt. Noch heute schmückt ein ausrangierter Flügel die Universität in Stuttgart-Vaihingen – und erinnert an die Legende Ulrich W. Hütter.

Wir kommen in den 1970er-Jahren an. Allmählich sehen die Windräder den heutigen schon sehr ähnlich, nur eine Nummer kleiner. Anfang der 1970er-Jahre, initiiert durch den Ölpreisschock, begannen sich Politik und Wirtschaft Gedanken über eine Energieversorgung jenseits des Öls, der Kohle und des Urans zu machen. Unter „erneuerbare Energien“ kann sich damals noch niemand etwas vorstellen. Man spricht höchstens von „nichtfossilen und nichtnuklearen Energien“. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hatte bereits 1969 begonnen, seine Kompetenzen auch auf dem Gebiet der Energieforschung anzuwenden. Das Institut ist vom Campus der Universität in Stuttgart-Vaihingen nicht weit entfernt. So entstanden Parallelen, vor allem in der Windkraftforschung. 1976 wurde die Energieforschung als fester und dauerhafter Forschungsbereich im DLR eingerichtet.

In den USA erforschte unterdessen die Raumfahrtbehörde NASA Multimegawatt-Windkraftanlagen – und konsultierte den „Windpapst“ Ulrich Hütter. Es entstanden die sogenannten MOD-Windräder mit bis zu 2,5 Megawatt Nennleistung. Und auch in Deutschland ließ sich 1983 ein Riese blicken: GroWian, die „Große Windkraftanlage“, stand auf einem 100 Meter hohen Turm, hatte 100 Meter Rotordurchmesser und sagenhafte drei MW Nennleistung. Die Idee zu diesem Gigant hatte Ulrich Hütter. Bereits 1974 lud man ihn nach Bonn ins Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT). Man wollte wissen, was der Wind für Deutschland tun könne. Hütters Prognose: Die Windkraft könne bis zu 73 Prozent des Strombedarfs decken – die Schätzung klingt heute sicherlich weniger spinnert als damals.

GroWian wurde dann bekanntlich ohne Hütter gebaut. Ein fataler Fehler, wie viele meinen. Leichtbau war quasi kein Thema. Die Flügel lieferte der Schwermaschinenbauer MAN. Es kam zu massiven Problemen. An der Stelle der Kraffeinleitung in die

Nabe gab es Defekte. Kurzum: Der Riese war wenig erfolgreich. Meist stand GroWian bewegungslos in der norddeutschen Landschaft rum. 1988 wurde die Anlage schließlich abgebaut – ein 90 Millionen D-Mark teures Forschungsfiasco. Es heißt, die beteiligten Energieunternehmen wollten mit der Maschine beweisen, dass die Windkraft keine Zukunft habe. Das Gegenteil sollte eintreten, wie man heute nur allzu gut weiß.

Ungefähr zur selben Zeit wurden in Kalifornien Tausende kleine Windkraftanlagen aufgebaut. Ölpreiskrisen und das wachsende Umweltbewusstsein trieben den Ausbau voran. Die Steuer-gesetzgebung in Kalifornien erzeugte eine regelrechte Wind-rauschstimmung für die Investoren und Anlagenhersteller. Insgesamt wurden in den 1980er-Jahren rund 16.000 Windräder errichtet – profitiert haben vor allem die dänischen Hersteller von Windenergieanlagen, etwa die Hälfte der Anlagen waren Importe aus Dänemark. In Deutschland war damals windkraft-technisch gesehen wenig los. Ulrich Hütter hingegen kam zu Ehren: 1986 wurde das „Windenergie-Testfeld Ulrich Hütter“ im baden-württembergischen Schnittlingen nach ihm benannt.

Damals wie heute spielte und spielt der politische Wille eine wesentliche Rolle in der Windkraftbranche. Ohne das Stromein-speisungsgesetz vom 7. Dezember 1990, dem vermutlich welt-weit ersten Ökostrom-Einspeisungsgesetz und Vorläufer des weltweit bekannten und zigfach kopierten Erneuerbare-Energi-en-Gesetz (EEG) aus dem Jahr 2000, wäre die globale Windkraft sicherlich nicht dort, wo sie heute steht: Eine Energiequelle mit herausstechenden Vorteilen.

Mittlerweile gibt es weltweit Hunderttausende Windturbinen. Eine globale Industrie ist entstanden. Eine einzige große An-lage an einem windreichen Standort kann Tausende Menschen mit Ökostrom versorgen. Die Emissionen, die bei der Produk-tion und beim Bau der Anlagen entstehen, werden durch die Produktion von emissionsfreiem Strom binnen weniger Monate wieder ausgeglichen. Danach produzieren die Windkraft-räder, praktisch ohne jegliche Form von Schadstoffen freizusetzen. Geht's noch grüner?

Keine Frage: Die heutigen Anlagen sind technische Wunderwerke – vollgestopft mit Hightech. Manches Detail hat Ulrich Hütter ersonnen. Vieles davon stammt aus den Federn der Studentin-nen und Studenten aus Stuttgart, die entweder bei Hütter selbst lernten oder in seinem Windschatten studierten. Ganz klar:

Allgaier WE 10
zwei Turmtypen



Stuttgart spielt bei der Entstehung der modernen Windkraft eine zentrale Rolle.

Und so ist es auch kaum ein Wunder, dass der bundesweit erste universitäre Lehrstuhl für Windenergie in Stuttgart (SWE) gegründet wurde. Im Jahr 2004 war das. Und mit Martin Kühn, einem ausgewiesenen Fachmann in Sachen Windenergie, trat ein würdiger Nachfolger in Ulrich Hütters Fußstapfen, um den Lehrstuhl aufzubauen und zu leiten: „Es war total spannend, so etwas Neues zu entwickeln und mitaufzubauen“, erinnert sich Kühn.

Mit den Jahren sind die Anlagen enorm gewachsen und zu wahren Hightech-Maschinen avanciert: von wenigen Kilowatt Leistung und 15 Metern Rotordurchmesser im 1980 auf aktuell fast zehn Megawatt und bis zu 180 Meter Rotorgröße. Dagegen ist GroWian ein Winzling! Zu diesem Erfolg hat die Universität Stuttgart ohne Frage ihren Teil beigetragen.

Viele Erfindungen und unablässige Tüftelei haben es möglich gemacht, dass die Windenergie heute ein globaler Erfolg ist. Eine einzelne Innovation herauszupicken, die den Durchbruch brachte, fällt schwer. Was die Windturbine grundlegend verändert hat, ist sicherlich die Halbleitertechnik, sagt Po Wen Cheng, seit 2011 Lehrstuhlinhaber am SWE. Erst mit dem Umrichter war es möglich, das variable Drehzahlkonzept kostengünstig umzusetzen. Das wiederum erlaubte es, das aerodynamische Optimum auch bei schwankender Windgeschwindigkeit zu erreichen und die Schwankungen von eingespeistem Strom ins elektrische Netz zu reduzieren. Diese Technologie hat die Wirtschaftlichkeit der Windenergie signifikant verbessert – und den Gegnern den Wind aus den Flügeln genommen.

Trotz des Erfolgs: Noch ist die Windkraft ein winzig kleines Licht. Nur etwa vier Prozent des globalen Stromverbrauchs werden von Windstrom gedeckt. Dafür sind die Aussichten umso heller: Beim Global Wind Energy Council in Brüssel heißt es, bis 2050 könne der Wind bis zu 30 Prozent liefern. Vor allem offshore ist noch reichlich Luft: Das Potenzial durch die vorhandene Meeresoberfläche ist um ein Vielfaches größer als der globale Energiebedarf. Natürlich sind die Stuttgarter auch in Sachen Offshore-Wind ganz vorne mit dabei.

Renaissance der Windkraft Die 1990er-Jahre Geburt des Stuttgarter Lehrstuhls für Windenergie

Alte Forschungs-
Windenergieanlage
auf dem
Hütter-Testfeld



Nach Ulrich Hütters Ausscheiden aus dem Lehrdienst an der Universität Stuttgart im Jahr 1980 war es lange still um die Windkraft im Süden der Republik. Erst in den 1990er-Jahren frischte der Wind wieder auf. Es ist die Zeit, in der sich in Deutschland die Grünen formieren, die Atomkraftgegner mobil machen und das Interesse an ökologisch erzeugter Energie steigt. Kurz gesagt: Das Umweltbewusstsein der Deutschen entsteht. Im Fahrtwind dieses Geistes entsteht auch die visionäre Idee zum Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie – dem ersten in der Bundesrepublik.

Das Jahr 1986 markiert auf diesem Weg ebenso eine Tragödie wie einen Wendepunkt: Es ist das Jahr in dem in Tschernobyl die Zukunftsträume der Atomindustrie in die Luft fliegen. Die Energiegewinnung per Windkraft spielt zu dieser Zeit praktisch keine Rolle – in Deutschland sind schätzungsweise 50 kommerzielle Windräder in Betrieb. Im benachbarten Dänemark dagegen gibt es bereits über 1000 Drehflügler. Die Dänen exportieren ihre Windräder sogar bis nach Kalifornien, wo riesige Windparks entstehen und der vermeintlich neuen Energiezeugungsart eine Bühne geben.

In Deutschland verschläft man die energetische Technikwende zunächst. Während die Atomenergie in den 1980er-Jahren mit Milliarden Euro an Forschungsgeldern hofiert wird, ist die Windkraft kaum von Belang. Und damit nicht genug: Die Politik stellt den wenigen gewillten Windmüllern Hürden in den Weg: Zulassungen sind extrem schwer zu bekommen.

Doch dann bringen ausgerechnet zwei Politiker Bewegung in die Sache und drehen das ganz große Rad: Die Bundestagsabgeordneten Matthias Engelsberger (CSU) und Wolfgang Daniels (Grüne) erkennen die Lage der modernen Windmüller. Sie entwickeln einen Gesetzentwurf, der am 7. Dezember 1990 im Bundestag verabschiedet wird: Das „Stromeinspeisungsgesetz“. Es garantiert den Windmüllern, dass die Energieversorger ihnen

den Windstrom abkaufen müssen: für garantierte 16,61 Pfennig je Kilowattstunde. Ein Erfolg, der einer Revolution gleichkommt. Allerdings gibt es 1991 noch nicht allzu viel Windstrom, der eingespeist werden will: Gerade mal 1000 Windräder gibt es damals in Deutschland. Doch die Energieriesen scheinen schon zu ahnen, was da auf sie zukommt – sie laufen Sturm gegen das Einspeisungsgesetz.

Fraglos setzte das Stromeinspeisungsgesetz, das später zum EEG – Erneuerbare-Energie Gesetz – avancierte, den Startschuss in ein neues Windkraft-Zeitalter. Der Knall hallte durch die gesamte Republik. Überall hörten findige Tüftler, Ingenieure und Wissenschaftler an Forschungseinrichtungen sein Echo und fingen an, Windkraftanlagen zu entwickeln.

All die Tüftler knüpften auch an Wissen an, das Jahre zuvor in Stuttgart entstand. Dort gab es eine Forschungsabteilung für erneuerbare Energien beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), in der man sich intensiv mit der Solar- und Windkraft beschäftigte. Manche sagen gar, dass von hier sämtliche Windkraft- und Photovoltaikbemühungen in der Bundesrepublik ausgingen. Einer der Mitarbeiter damals: Jens Peter Molly – ein ehemaliger Schüler Ulrich W. Hütters. Molly arbeitete damals mit an der Riesenwindkraftanlage GroWian und weiteren Forschungswindrädern. Später wanderte Molly nach Norddeutschland aus, baute das Deutsche Windenergie-Institut (DEWI) in Cuxhaven mit auf und leitete es. Weggefährten Jens Peter Mollys waren Erich Hau und Henry Seifert. Beide Namen sind in der Windkraftwelt einschlägig bekannt. Auch sie begannen in Stuttgart.

Während im hohen Norden das DEWI an Renommee gewinnt, herrscht an der Universität Stuttgart weitgehend Windkraftflaute. Der Windpapst Ulrich Hütter ist längst weg, einzig sein Kompagnon Heiner Dörner hält die Windfahne hoch. Doch die Begeisterung für die Kraft des Windes ist stets in den verschiedenen Instituten an der Universität erhalten geblieben. „Im Anschluss an die Ära Hütter wurden an den Instituten ISD (Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen), dem ICA (Institut für Computeranwendungen), das die windbezogenen Arbeiten des ISD weiterführte und dem IAG (Institut für Aerodynamik und Gasdynamik) spezielle Gebiete bearbeitet“, erinnert sich Kurt Braun, der lange an der Universität war und über die Jahre ein treuer Windkraftfan geblieben ist.

Ein weiterer Anstoß, die Windkraft zu forcieren, kommt 1992 aus Brasilien: Der Erdgipfel in Rio macht den Klimawandel zum globalen Thema. Fossile Brennstoffe stehen am Pranger, erneuerbare rücken in den Fokus. Bis zum Ende des Jahrzehnts verzehnfacht sich die Zahl der Windräder in Deutschland auf rund 6000 Megawatt Nennleistung. Erste Windparks und neue Finanzierungsmodelle entstehen. Schnell wird das deutsche EEG zum internationalen Renner und zur Blaupause für zahlreiche weitere Regierungen. Bis heute kopierten es 61 Länder!

Doch die Anlagen, die es gibt, empfinden viele als störend. Es ist die Rede von der Verspargelung der Landschaft. Zudem sind die frühen Windkonverter ohrenbetäubend laut. Kurz gesagt: Die Akzeptanz in der Bevölkerung ist damals eher gering. Klar ist: Soll die Windkraft groß rauskommen, muss sie besser werden. Die Stuttgarter erkennen das und widmen sich dem Thema Akustik. Dazu entwickeln sie eine Forschungsturbine namens UNIWEX, die auf dem Testfeld in Schnittlingen installiert wird. Ihre Ergebnisse sind bahnbrechend, erinnert sich Kurt Braun: „Da wurde Pionierarbeit geleistet. Der Lärmpegel konnte halbiert werden.“ Es waren vor allem die Arbeiten der Forscher am IAG, die den Durchbruch brachten.

Während die Windkraft Fahrt aufnimmt, beginnt die Geschichte des deutschen Atomausstiegs. Wir schreiben das Jahr 1998. Nach dem Wahlsieg macht sich die rot-grüne Koalition unter Gerhard Schröder daran, den im Wahlkampf versprochenen Ausstieg aus der Atomenergie umzusetzen. Im Jahr 2000 wird die stufenweise Stilllegung der Kernkraftwerke in Deutschland beschlossen: 2022 soll der letzte Meiler runterfahren.

Seinerzeit ganz vorne mit dabei war ein Mann, den man auch als den Deutschen Daniel Düsentrieb oder Bill Gates kennt: Aloys Wobben. Der bastelt im ostfriesischen Aurich an der Zukunft der Deutschen Windkraft. In einem Schuppen baut der Tüftler bereits 1984 seine erste Anlage. Schnell wächst seine Firma Enercon zum mittelständischen Betrieb heran. 1992 gelingt dem Ostfriesen dann der Durchbruch: die getriebelose Windenergieanlage. Die neuen Maschinen laufen besser und zuverlässiger und gelten bald als Mercedes der Branche. Wobbens Firma zählt schnell zu den Großen am Markt.

In den 1990er- und 2000er-Jahren wurden dann zahlreiche technische Neuerungen in der Windkraft eingeführt. Vor allem der Übergang von Stall zu Pitch-Anlagen war ein Meilenstein. Bei

den Stall-Anlagen drehen sich lediglich die Flügelspitzen aus dem Wind um die Anlagen im Notfall abzubremsen, bei der Pitch-Regelung drehen sich die gesamten Blätter, was viel präzisere Last- und Leistungseinstellungen ermöglicht. Auch hier sollte sich Ulrich Hütters Pioniergeist zeigen: Frühe Anlagen von ihm hatten bereits pitchende Blätter.

Auch wurden die Windkraftanlagen nun immer größer und leistungsfähiger. Das ermöglichten drehzahlvariable Anlagen mit Wechselrichtertechnologie. Um die Windkraft herum entstand eine Zulieferindustrie mit wohlbekannten Namen und zahlreichen Beschäftigten: ZF, FAG, Flender, Liebherr... Es sind längst nicht mehr die Tüftler, die die Windenergie vorantreiben, sondern die großen Industriekonzerne, die sich einen neuen Wirtschaftszweig erobert haben.

Auch in Stuttgart erwacht die Windkraftforschung allmählich aus ihrem Dornröschenschlaf: Heiner Dörner, seinerzeit der letzte Windkraft-Mohikaner an der Universität Stuttgart, nimmt Im Herbst 2002 ein Telefongespräch entgegen, das weitreichende Folgen für die Windkraftwelt haben sollte. Am anderen Ende ist Karl Schlecht, Gründer und Aufsichtsratsvorsitzender der Betonpumpenfirma Putzmeister, einem millionenschweren Unternehmen aus der Nähe Stuttgarts. Karl Schlecht ist Windkraftfan und hat gerade Dörners Buch über Ulrich Hütter gelesen und möchte Geld loswerden: „Ich habe vor, fünf Millionen in eine Professur zu stiften“, lässt Schlecht Dörner am Telefon wissen. Kurz darauf treffen sich die beiden und vereinbaren, den SWE zu gründen.

„Bei meiner Ankündigung der generösen Stiftung fühlte ich mich wie der ‚Geburtshelfer‘ des neuen-alten Lehr- und Forschungsgebietes Windenergie in der Fakultät: endlich mehr Personal, mehr Forschungsmittel, bessere Studentenbetreuung und Fortbildung. Es würde bald ein eigenständiges Institut der Windenergie mit einer Stiftungsprofessur geben, einfach ein Traum, nach den vielen Jahren des Alleinkampfes“, freute sich Heiner Dörner, als er die Pläne der Universitätsleitung vorstellte.

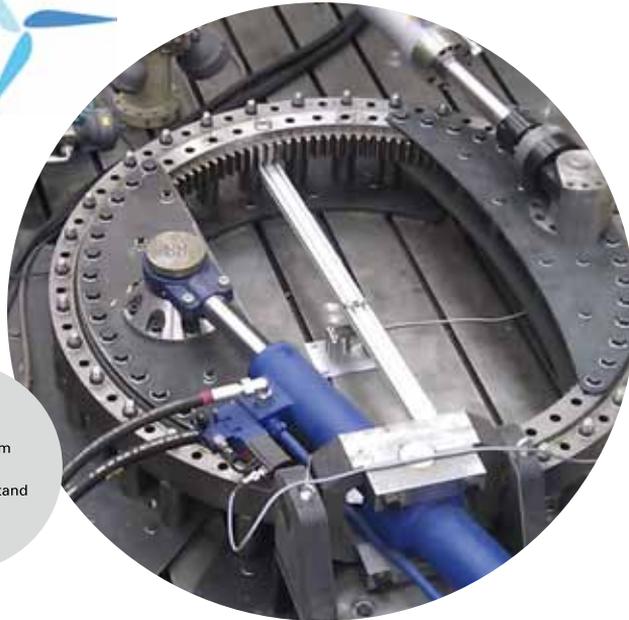
2004 war es dann so weit: Der SWE, der erste deutsche Lehrstuhl für Windenergie, wird in Stuttgart gegründet.

Stiftungsjahre

Errungenschaften des SWE zwischen 2004 und 2014



Blatt-Pitchsystem
und
Blattlager-Teststand



Nach dem Windboom, den Ulrich Hütter auslöste und den Forschungsbemühungen am DLR, wurde es ruhig um die Windkraft an der Universität Stuttgart. Ganz abgeflaut ist der Wind aber nie: ab dem Jahr 2004 blies er wieder mit voller Stärke. In den Folgejahren setzte sich die Universität Stuttgart auf die globale Landkarte für die Windenergieforschung und brachte in traditionsreicher Manier zahlreiche Innovationen und sogar Weltrekorde hervor. Es war keine leichte Aufgabe, diesen Windenergie-Lehrstuhl aufzubauen, engagiertes Personal für die Forschung und Lehre zu gewinnen, Forschungsprojekte zu initiieren, das Curriculum für die Lehre zu entwickeln und dem Lehrstuhl ein scharfes Forschungsprofil zu geben. Es war vielmehr eine ständige Herausforderung, da mehr und mehr Universitäten und Forschungseinrichtungen die Wichtigkeit und Attraktivität der Windenergieforschung für sich entdeckt hatten. Doch eines ist klar: All die Bemühungen waren nicht umsonst. Einige Highlights werden hier vorgestellt.

LiDAR

Dem Wind auf die Schliche kommen



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Wissenschaftler am SWE forschen seit dem Jahr 2008 an laser-gestützten Messverfahren. Ihr Ziel ist es, den auf die Turbine zuströmenden Wind zu analysieren und die Anlagen gezielt darauf vorzubereiten. So werden die Energieerträge erhöht und die Lasten reduziert. In dieser Technologie sind die Schwaben weltweit führend.

Moderne Windkraftanlagen beeindruckten durch ihre schiere Größe. Nicht selten sind ihre Türme weit über 100 Meter hoch, ihre Flügel bis zu 90 Meter lang – wahre Giganten. Doch solche Dimensionen machen es der Forschung schwer: Das Vermessen und Charakterisieren von Windfeldern mit herkömmlichen Messverfahren wird immer komplizierter und teurer. Bislang stellte man monströse Gittermasten auf, die dieselbe Höhe erreichen wie die Windkraftanlagen selbst. Die Messmasten sind mit allerlei Messgeräten bestückt. Oft genug reichte nicht ein einzelner Mast, vielmehr brauchte es mehrere – vor und hinter der Anlage –, um sich ein komplettes Bild machen zu können. Seit die Dreiflügler auf Rekordhöhen klettern, ist das Vermessen mit Masten schlicht zu teuer.

Was also tun? Die Antwort von David Schlipf vom Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie: berührungslos messen. Ähnlich wie Verkehrsflugzeuge, die vorne in der Flugzeugnase ein Wetterradar eingebaut haben und ständig das Wetter beobachten, können auch Windfelder in Bodennähe mit einem Laser abgetastet werden. Das macht man seit einigen Jahren – und Wissenschaftler des SWE sind an dieser Neuerung maßgeblich beteiligt.

Die Technik, die dabei zum Einsatz kommt, heißt LiDAR – Light Detection and Ranging. Die Geräte haben in etwa die Größe eines Reisekoffers, können von zwei Personen getragen werden und lassen sich bequem an verschiedenen Orten platzieren. Im Prinzip funktioniert diese Technologie wie ein Radar: LiDAR-Systeme zur Vermessung von Windfeldern senden Laserimpulse aus. Treffen diese auf Partikel in der Luft, etwa Wasser-

tröpfchen oder Staubteile, so werden die Strahlen reflektiert. Je Sekunde geschieht das Tausende Male, in einem vorab genau definierten Bereich. So erhält man ultrahoch aufgelöste Kurzfristvorhersagen.

Das gewonnene Wissen ist von unschätzbarem Wert. Um die Bedeutung nachvollziehen zu können, muss man wissen, dass die Fläche, die der Rotor eines modernen Multimegawatt-Windrads überstreicht, über 20.000 Quadratmeter groß ist. Das entspricht grob zwei Fußballfeldern. Natürlich ist in einem so riesigen Gebiet der Wind nicht überall gleich stark und weht aus derselben Richtung. Nehmen wir an, der Turm ist 130 Meter hoch und jeder Flügel 80 Meter lang. Wenn das Rotorblatt den höchsten Punkt durchfährt, erreicht es eine Höhe von 210 Metern über Grund. Das gegenüberliegende Blatt, das in etwa zur gleichen Zeit den unteren Punkt durchfährt, ist nur 50 Meter vom Boden entfernt. Jedes Kind weiß vom Drachensteigen: der Wind bläst weiter oben stärker. Für so einen Giganten wie ein Windrad bedeutet das enorm schwankende Lasten, die auf das Lager und die Antriebswelle einwirken. Hinzu kommen Scherwinde, die plötzlich aus einer ganz anderen Richtung auf die Flügel treffen. Weiß man darüber Bescheid, bevor der Wind den Rotor trifft – und damit die gesamte Struktur belastet –, ist man klar im Vorteil. Man könnte rechtzeitig die Flügel anstellen, also aus dem Wind drehen (pitchen), und die einwirkenden Lasten so reduzieren. Gleichzeitig erhöht man die Lebenszeit der Anlagen und senkt damit die Energiegestehungskosten.



SWE- und NREL-Teams
 auf der
 NREL-Forschungsanlage

Die Stuttgarter Forscher sind sogar noch einen Schritt weitergegangen: Sie haben das LiDAR-System direkt auf der Gondel der Windräder installiert und steuern mit den gewonnenen Daten die Anlage. Im Jahr 2012 erbrachten sie als weltweit erste Forscher den Nachweis der Machbarkeit. Schlipf und seine Kollegen vom SWE hatten gemeinsam mit Forschern vom renommierten National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Boulder/USA eine Windenergieanlage mithilfe eines auf der Gondel angebrachten LiDAR-Systems geregelt. Dabei schaut der Laser nicht mehr vom Boden aus nach oben, sondern blickt waagrecht in die Richtung, aus der der Wind auf die Turbine zukommt. Um das möglich zu machen, haben die Forscher um David Schlipf eine Optik entwickelt, die den Laser umlenkt und aus der Vertikalen in die Horizontale bringt. Doch allein damit war es nicht getan: „Das LiDAR war bislang viel zu langsam“, sagt Schlipf. Also haben die Wissenschaftler ihm auf die Sprünge geholfen. Jetzt kann der Laser in viel kürzerer Zeit viel größere Bereiche scannen. Der Einsatz hat sich gelohnt: Seither erhalten die Forscher ein viel genaueres Messsignal – und ein viel detailgetreueres Bild vom Windfeld.

Doch allein mit dem LiDAR ist es nicht getan. Die Datenflut, die die Laserstrahlen liefern, muss auch ausgewertet und interpretiert werden. Und umgewandelt – in konkrete Befehle für die Anlagensteuerung, so, dass sich etwa die Rotorblätter aus dem Wind drehen oder die Gondel sich den wechselnden Windrichtungen anpasst. Das macht eine Software namens „Witlis“ – die ebenfalls die Stuttgarter entwickelt haben.

Was die Arbeiten der SWE-Forscher um David Schlipf für die Windenergiewelt bedeuten, wird klar, wenn man an große Windfarmen denkt. Hier tummeln sich teils Hunderte Windturbinen, neben- und hintereinander – und nehmen sich mitunter gegenseitig den Wind aus den Segeln. „Die Turbinen beeinflussen sich gegenseitig. Hinter den Windrädern ist im Prinzip ein Loch im Wind – allerdings mit erhöhten Turbulenzen“, sagt Schlipf. Teilweise behindern sich die Turbinen auch gegenseitig durch Turbulenzen. Weiß man vorab, wie sich Windfelder durch große Windparks bewegen, so kann man das Layout, also die Anordnung der Windräder, entsprechend planen. Solche Maßnahmen können den Gesamtertrag großer Windparks enorm steigern und gleichzeitig Schäden reduzieren. Ausgesuchte Windräder in großen Parks werden mit Sicherheit in Zukunft mit solchen LiDAR-Systemen ausgerüstet – und warnen die anderen Windkraftanlagen, wenn es gefährlich wird. Das wiederum erlaubt



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014



Long Range Lidar im
Baltic I-Offshore-
Windpark

es, die Windkraftanlagen filigraner zu entwerfen: Da die Lasten reduziert werden, müssen Türme und Rotorblätter geringeren Kräften standhalten, können also mit weniger Sicherheitszuschlag gebaut werden.

Alles in allem haben David Schlipf und seine Kollegen Tausende Stunden Arbeit in das LiDAR investiert: „Ich habe mich drei Jahre lang Vollzeit mit dem Thema befasst“, so Schlipf. So viel Einsatz für die Windkraft wird natürlich belohnt: David Schlipfs Doktorarbeit wurde mit dem „Excellent Young Wind Doctors Award 2016“ ausgezeichnet. Der Preis wird jährlich für die beste europäische Doktorarbeit im Bereich der Windenergie von der Europäischen Akademie für Windenergie EAW (European Academy of Wind Energy) vergeben. In der Windbranche gilt David Schlipf seither als geistlicher Vater LiDAR-geregelter Windkraftäder. Und damit nicht genug: Zeitgleich erhielt er den Otto F. Scharr-Preis für Energietechnik.

Und dann ist da noch Schlipfs Ausgründung namens Sowento. Mit diesem Unternehmen bieten Schlipf und sein Team Dienstleistungen rund um die Steuerung von Windkraftädern an – natürlich auch LiDAR-gestützte Steuerungen. Das Spin-off soll helfen, der LiDAR-gestützten Anlagensteuerung den Weg in die Kommerzialisierung zu ebnen. Das ist ein perfektes Beispiel für das, wofür die Karl Schlecht Stiftung steht: Innovation durch Forschung stimulieren und wissenschaftliche Erkenntnisse durch Entrepreneurship verwerten.

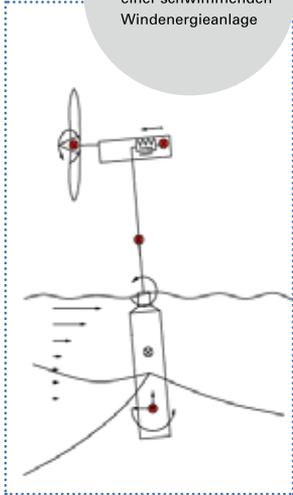
Floating Wind

Die Windkraft schwimmt sich frei



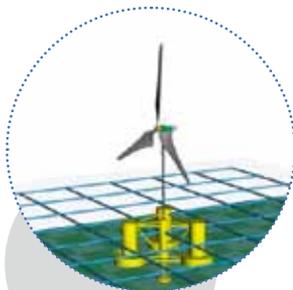
Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Reduziertes
Simulationsmodell
einer schwimmenden
Windenergieanlage



Sie treiben in der See wie überdimensionale Schwimmer einer Angel. Oder werden von dicken Stahltrossen unter Wasser gezogen und so stabil auf Position gehalten: Die Rede ist von schwimmenden Fundamenten für Windkraftträder. In den letzten Jahren tauchen immer mehr Anlagen dieser Art auf. Diese Offshore-Windräder stützen sich nicht durch feste Fundamente am Meeresgrund ab, so, wie man es aus der Nord- und Ostsee kennt, sondern halten sich mithilfe von Auftriebskörpern und Vertäuungssystemen über Wasser.

Die Technik hat einen herausstechenden Vorteil: Sie erlaubt es, auch tiefe Gewässer für die Windenergie zu erschließen. Und das sind global gesehen die allermeisten: Egal ob rund um den Atlantik, das Mittelmeer oder vor Asien – fast überall fallen die Küsten steil ab, wird das Wasser rasch Hunderte Meter tief. Aufgrund der immensen Baukosten jedenfalls zu tief für Windräder, die sich auf großen Stahlgestellen oder monströsen Rohren am Boden abstützen. Zu schade: besonders über tiefen Gewässern wehen starke Winde. Diese Ressource will man unbedingt anzapfen. Wissenschaftler sagen: Das Potenzial durch die vorhandene Meeresoberfläche sei um ein Vielfaches größer als der globale Energiebedarf.

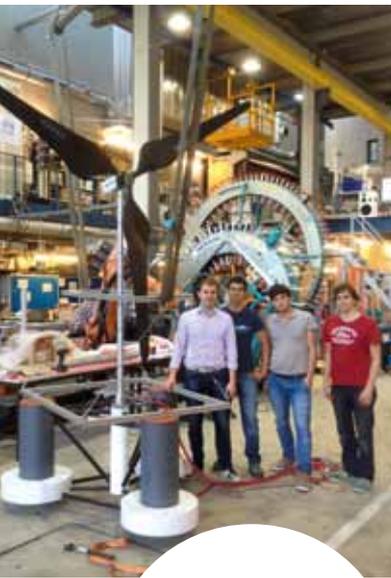


Floating-Simulation

Das alles sind keine kühnen Visionen. Längst sind Testanlagen im Wasser. Etwa vor Norwegens, Schottlands, Portugals oder Japans Küsten. Manche Maschinen werden von gewaltigen Seilen und Ketten unter Wasser gezogen und stabilisieren sich auf diese Weise, andere versuchen die Schaukelbewegungen durch die Wellen und Strömung auf dem Meer mit ausgefeilten Ballastwassersystemen auszugleichen. Welches dieser Schwimmerkonzepte das vielversprechendste ist, lässt sich noch nicht sagen, dafür ist die Schwimmwindbranche noch zu jung.



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014



Modell einer schwimmenden
Offshore-Windenergieanlage
für Wellentanktests

Was sich jedoch mit Gewissheit sagen lässt: Wissenschaftler und Studierende des Stuttgarter Lehrstuhls für Windenergie arbeiten seit Jahren eifrig an der Entwicklung der „floating wind power“ mit. In zahlreichen Projekten haben sie sich eingebracht und neue Erkenntnisse geschürft. Der Startschuss zu den Bemühungen bei der neuen Technologie der Schwimmenden Windkraft fiel im Jahr 2009. Denis Matha, inzwischen nicht mehr am SWE tätig, legte den Grundstein für die Forschung der Stuttgarter an schwimmenden Plattformen für Windkraftanlagen. Er baute den Kontakt zum National Renewable Energy Laboratory in den USA auf, das ebenfalls erste Forschungen an Schwimmerkonzepten durchführte.

In zahlreichen Projekten brachten die Stuttgarter ihr Wissen in Sachen Schwimmwind ein. Im EU-Projekt AFOSP, ein Partnerprojekt mit der Technischen Universität in Barcelona, ging es darum, einen sogenannten Spar-Schwimmer zu entwerfen. Spars sind lange zylindrische Schwimmkörper, die aufrecht im Wasser schweben. In der Regel werden diese Zylinder aus Stahl gefertigt. Doch Stahl ist teuer und kompliziert zu verarbeiten. Im Forschungsprojekt sollte deshalb eine Variante aus Beton getestet werden. Während die Spanier den Prototyp im Maßstab 1:100 bauten und im Wassertank testeten, waren die Stuttgarter für den Konzeptentwurf und die dynamische Last-Simulation verantwortlich. Mittlerweile ist das Projekt abgeschlossen. „Das Interesse der Industrie an den Ergebnissen war enorm“, sagt Friedemann Borisade. Sein Kollege Dennis Matha hat sich zwischenzeitlich bei der „Internationalen Elektrotechnischen Kommission“ (IEC) in Genf eingebracht und zusammen mit anderen führenden Experten Normen für das Design von Schwimmwindrädern erarbeitet.

Ein weiteres Projekt, an dem die Schwaben mitwirkten, ist „INNWIND.EU“. Hier ging es um den Entwurf von schwimmenden Windkraftanlagen mit zehn und mehr Megawatt Nennleistung. Die Stuttgarter Windforscher stellten erneut ihre Kompetenz unter Beweis: Sie bauten ein Plattformmodell, 150 Kilogramm schwer, zwei Meter hoch und testeten es ausgiebig im Wellenkanal im französischen Nantes. Zentrale Fragen waren hier: Wie testet man so ein runterskaliertes Konzept? Wie können bisherige Tests runterskalierter Konzepte verbessert werden?

Schwimmende
Offshore-
Windenergieanlage



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014



Welche neue Messtechnik ist vielversprechend? Schließlich gibt es bislang wenig Know-how zur Interaktion von Aero- und Hydrodynamik. Auch hier konnten die SWE-Forscher wichtige Erkenntnisse gewinnen.

Während die Industrie erste kleine schwimmende Testwindparks mit mehreren identischen Anlagen aufbaut, etwa vor der Küste Schottlands, kümmert sich die Forschung im EU-Projekt „LIFES50+“ schon darum, wie zukünftige, riesige Windfarmen schwimmend im tiefen Wasser realisiert werden können. Zentrale Fragen hier: Wie verringert man die Bau- und Betriebskosten? Welche Simulationsmethode ist bei welchem Schritt im Designprozess von Vorteil? Auch bei dieser Fragestellung bringen sich die SWE-Forscher mit ihrem Knowhow ein.

Von internationaler Bedeutung ist auch das Projekt „FLOAT-GEN“, das bereits seit 2013 läuft. Hierzu entsteht in Frankreich gerade eine 5000 Tonnen schwere Schwimmplattform der Firma Ideol, die ein Zwei-Megawatt-Windrad tragen soll. 2017 kam die Anlage ins Wasser. Die Stuttgarter bringen sich dank ihrer umfangreichen Erfahrung bei der Auswertung von Messungen beim Forschungswindpark Alpha Ventus in diese anspruchsvolle Messkampagne ein. Sie unterstützen die Ausrüstung der Anlage mit zahlreichen Sensoren und wollen so herausfinden, ob die getroffenen Annahmen zur Auslegung der Anlage richtig waren. „Solche Messdaten von Prototypen sind wichtig für die Validierung unserer Simulationstools“, sagt Friedemann Borisade. Dieses Wissen helfe dann beim Bau weiterer Anlagen, Material, Zeit und Kosten zu sparen. Schließlich setze man bislang auf Daten und Erfahrungen aus dem Bau von Öl- und Gasplattformen im Meer. „Das passt aber nicht immer, da der Rotor einen großen Einfluss auf die schwimmende Anlage hat“, sagt Borisade.



Man sieht, die Stuttgarter Windforscher haben den Blick auf die offene See gerichtet – und damit den richtigen Kurs eingeschlagen, den unsere Energieversorgung nimmt: Fachleute gehen fest davon aus, dass die Schwimmwindkraft in Zukunft eine tragende Rolle der Energieversorgung spielen wird.

Aktuell beteiligen sich die Stuttgarter Forscher an weiteren Projekten: Bei MALIBU geht es um eine schwimmende Boje, die mit einem sogenannten LiDAR-Messgerät bestückt ist. Diese Instrumente vermessen mit ihrem Laserstrahl die Windbedingungen und geben so Auskunft darüber, ob sich der Bau einer Windfarm rechnet. Allerdings müssen noch Fragen geklärt werden, ob sich die Bewegungen der Boje im Wasser auf die Windmessungen auswirken. Bei einem anderen Projekt, in dem es ebenfalls um schwimmende Anlagen mit zehn und mehr Megawatt geht, und die sich mittels eines teleskopisch ausfahrbaren Turms schnell und einfach errichten lassen sollen, arbeiten die Stuttgarter an einer speziellen Regelungssoftware, die es ermöglichen soll, die Anlage im Betrieb automatisch zu steuern. Durch die größere Bewegung auf dem Wasser ist die Regelung schwimmender Windräder komplizierter als mit festen Fundamenten.

Und dann ist da noch das Schwimmerkonzept der Stuttgarter um Frank Lemmer, Wei Yu, Kolja Müller und Friedemann Borisade, das sie zusammen mit den Spezialisten von der Technischen Universität in Dänemark und dem spanischen Centro Nacional de Energias Renovables auf den Weg gebracht haben: Der „TripleSpar“ – ein Hybrid aus Tauchplattform und Spar-Boje, für ein zehn Megawatt starkes Windrad. Ein Modell dieser Anlage haben die Stuttgarter mit einer innovativen Regelung ausgestattet und ausgiebig im Kanal getestet. Erste Ergebnisse sind vielversprechend.

Letztlich hängt der Erfolg von schwimmenden Windenergieanlagen davon ab, wie schnell, zuverlässig und wirtschaftlich schwimmende Windparks umgesetzt werden. Es bleibt ein spannendes Thema für die Stuttgarter, denn es mangelt sicherlich nicht an neuen Herausforderungen in den kommenden Jahren.

WindForS

Forschung mit vereinten Kräften



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Auch wenn der Wind hauptsächlich im Norden der Republik weht, im Süden wird eifrig an der Windkraft geforscht. Das hat einen simplen Grund: Weite Teile der Welt sind nicht flach, sondern bergig – genau wie in Süddeutschland, die Wiege der modernen Windkraft, wie manche sagen. Solche speziellen Anforderungen brauchen spezielle Forschung. Deshalb gibt es das Forschungsnetzwerk WindForS.

Keine Frage: Auch im Süden der Republik, im hügeligen Binnenland, lohnen sich Windenergieanlagen. Wollen wir die Energiewende stemmen, kommen wir um den Ausbau der Windkraft im Binnenland nicht umhin. Doch hügeliges Terrain stellt ganz andere Anforderungen an Windturbinen. Die Topografie, also die Beschaffenheit des Geländes, hat enormen Einfluss auf die Luftströmungen, mit denen es die Turbinen aufnehmen. Bei ebenem Gelände ist die Strömung wesentlich einfacher, aber eben nicht die Regel auf unserer Erde.

Windenergie in
komplexem Gelände:
ein zentrales Forschungs-
thema für WindForS





Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

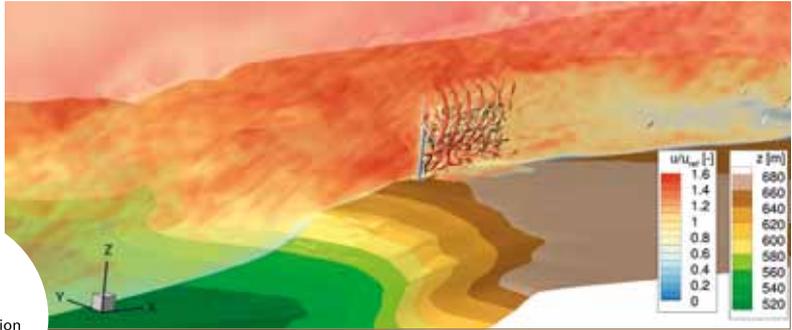
Die globale Windforschung hat dies erkannt und WindForS – das Windenergieforschungs-Cluster (das große S markiert den süddeutschen Raum) will hierzu einen großen Beitrag leisten und sich als exzellenter Partner für Fragen rund um die Windenergie im komplexen Gelände etablieren. Die Windkraftspezialisten im Netzwerk sind bemüht, die „Windkraftforschung speziell für das bergig-komplexe Gelände voranzubringen. Auf diesem Gebiet will sich WindForS global als der Ansprechpartner etablieren“, sagt Andreas Rettenmeier, der bis vor Kurzem WindForS leitete.

Initiiert wurde das Netzwerk im Jahr 2010, gegründet wurde es am 6. Juni 2011. Ziel: die Sichtbarmachung der süddeutschen Windkraftforschung in der Welt. Im Netzwerk gebündelt sind die Kompetenzen von 26 Instituten und Lehrstühlen aus Bayern und Baden-Württemberg. Sie bearbeiten die Gebiete Meteorologie, Landschaftsarchitektur, Bodenmechanik und Grundbau, Rotor-Aerodynamik und Lärmreduktion, Auslegung und Berechnung der Strukturen und Tragwerke, Werkstoffe, Bauweisen und Fertigungstechnik, Prüf- und Messtechnik, Qualitätssicherung und Wartung sowie Betriebsführung, Speichertechnologien, Netz-anbindung und -integration.

Beteiligt sind neben dem SWE und weiteren Instituten der Universität Stuttgart unter anderem die Universität Tübingen, die Technische Universität München, das Karlsruher Institut für Technologie, die Hochschulen Aalen und Esslingen sowie das Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Die Mitglieder kooperieren nicht nur in der Forschung, sondern auch in der Aus-, Fort- und Weiterbildung.

Das WindForS-Netzwerk war auch der Ideengeber für das neue Forschungs-Windtestfeld auf der Schwäbischen Alb bei Geislingen. Es soll das ehrwürdige Hütter-Testfeld beerben. Dazu wurde das Projekt KonTest ins Leben gerufen. In diesem Projekt ging es darum, wie das Testfeld aussehen soll, was es können soll und wozu es dienen soll. Inzwischen ist das Projekt abgeschlossen, der Bau des Testfelds rückt näher. Im Nachfolgeprojekt WINSENT – „Wind Science and Engineering in Complex Terrain“ geht es nun konkret darum, das Windenergie-Forschungstestfeld an einem konkreten Standort im bergig-komplexen Gelände zu realisieren.

Erwähnenswert sind auch die Forschungsprojekte VORKAST und TremAc. Bei VORKAST geht es den Wissenschaftlern des SWE und des ZSW um Kurzfristprognosen der Windleistung von einzelnen Windenergieanlagen und Windparks durch Kom-



bination von zeitlich hoch aufgelösten LiDAR-Messungen mit großer Reichweite (bis zehn Kilometer) und weiteren meteorologischen Daten. Genauso geht es um Kurzfristvorhersagen von Photovoltaikanlagen mit einer neuartigen Wolkenkamera unter der Miteinbindung neuronaler Netze. „Ziel von VORKAST ist es, sowohl die Wind- als auch die Solarleistung möglichst genau vorhersagen zu können, um beispielsweise den Betrieb und die Bewirtschaftung von Speichern (Power-To-Gas, Batterie, Schwungrad etc.) zu optimieren“, sagt Rettenmeier.

Im Projekt TremAc werden Auswirkungen des akustischen Schalls und des Körperschalls von Windenergieanlagen auf die Umgebung erforscht. Hier schauen die Wissenschaftler zum Beispiel auf den Körperschall. Wie wirkt sich ein Windrad im Betrieb auf den Untergrund aus? Übertragen die Windräder Schall auf benachbarte und bewohnte Gebiete und welche Einflüsse haben diese? Was dringt wie weit in den Boden ein und löst was aus? Wie wirkt sich die akustische Emission von Windturbinen aus und wie kann diese vermindert werden? Solche Fragen gehen die Wissenschaftler des Karlsruher Instituts für Technologie, der Universität Stuttgart und der TU München aus technischer Sicht an. Psychologische und medizinische Untersuchungen werden von Spezialisten der Universität Bielefeld und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Zuge des Forschungsvorhabens durchgeführt. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit ist dringend notwendig, denn die Wahrnehmung von Schall und Schwingungen haben starke psychosomatische Komponenten, die zusammen mit den objektiven Vermessungen betrachtet werden müssen.

Zum Netzwerk gehören auch vermeintlich fachfremde Spezialisten. Etwa die Landschaftsarchitekten. Sie erforschen, wie Wind-



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

kraftanlagen und ganze Windparks besser in die Landschaft integriert werden können – das ist wichtig für Länder mit hoher Bevölkerungsdichte, denn das Landschaftsbild könnte durch die immer größer werdenden Windenergieanlagen verändert werden. Durch die Landschaftsintegration schafft man eine Plattform für Dialog. Das erhöht wiederum die Akzeptanz der Windkraft, vor allem von den direkten Anwohnern der Windkraftanlagen, und trägt zu ihrem Erfolg bei.

Ein Projekt, das sich speziell der Offshore-Windkraft widmet, ist: „WIPAFF – Windpark-Fernfeld“. Ziel des Projekts ist es, einen Beitrag zu den Auswirkungen der geplanten und teilweise bereits im Bau befindlichen großen Offshore-Windparks in der Nordsee auf das regionale Windfeld und das regionale Klima zu liefern. So wollen die Projektteilnehmer ihren Beitrag zur Planungssicherheit für den Windparkausbau leisten. Sie erstellen etwa numerische und analytische Simulationsmodelle für das Fernfeld (zehn bis 100 km) von großen Offshore-Windparks. Genauso erkunden sie die Nachlaufeffekte im Fernfeld durch In-situ-, Flugzeug- und Satellitenbeobachtungen. Sie schaffen Grundlagen für Handlungsoptionen für den weiteren Ausbau der Offshore-Windenergie. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen dabei sowohl Auswirkungen, welche einen unmittelbaren Einfluss auf die Erträge der Windparks in der Nordsee haben, als auch die Veränderungen im regionalen Klima in den an die Nordsee angrenzenden Küstenregionen.

Letztlich geht es allen WindForS-Forschern darum, die Akzeptanz für Windturbinen zu erhöhen, die Anlagen effizienter zu machen und neue Gebiete für die Windkraft zu erschließen – indem sie eine fundierte Wissensbasis als Argumentationsgrundlage schaffen.

Um all diese Forschungsvorhaben in Gang und alle beteiligten Partner auf dem neuesten Stand zu halten, treffen sich alle WindForS-Beteiligten mehrmals jährlich. Zudem finden je nach Bedarf themenspezifische Treffen und Workshops statt. Bei diesen Zusammenkünften entstehen stets Ideen für neue Forschungsvorhaben. So drehen sich die Räder immer weiter. Denn die Zukunft der Windenergieforschung hat viele Facetten und nur durch eine enge Zusammenarbeit von WindForS-Partnern können die Herausforderungen gemeistert werden. Es bleibt also weiterhin spannend.

InVentus

Wind im Tank



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Im Studierendenprojekt InVentus bringen sich junge Männer und Frauen verschiedener Fachrichtungen mit ihrer Kompetenz ein: Sie konstruieren und bauen ein Fahrzeug, das einzig vom Wind angetrieben wird. Darin sind sie rekordverdächtig gut.

Dass dieses Auto anders ist, sieht man sofort. Statt eines knatternden Verbrennungsmotors hat es zwei Kohlefaserrotoren, die ihre Runden im Wind drehen. Eine fahrende Windturbine? Genau das ist das Ventomobil. Doch der schnittig-schwarze Wagen, der an ein Segelflugzeugcockpit erinnert, rollt nicht einfach mit dem Wind im Rücken daher, sondern fährt genau gegen den Wind. Das ist die Maxime des Aeolus Race, das seit 2008 alljährlich im niederländischen Den Helder ausgetragen wird und an dem zahlreiche Teams aus aller Welt mit ihren selbst gebauten Fahrzeugen teilnehmen. Das Ziel: schneller fahren als der Wind weht. Und zwar in die Richtung, aus der der Wind weht.

Team Inventus





Wie soll das gehen? „Ganz einfach“, erklärt Projektleiter Julian Fial vom Institut für Flugzeugbau an der Universität Stuttgart: „Die Summe aller Widerstände – angefangen beim Getriebe über die Räder bis zu den Rotorblättern und der Fahrzeugaerodynamik – muss geringer sein als die Energie, die wir dem Wind entnehmen können.“ Der Clou: Je schneller das Fahrzeug gegen den Wind fährt, desto höher wird die sogenannte relative Windgeschwindigkeit, also die Stärke, mit der der Wind in den Rotor bläst. Heißt: Je stärker der Wind weht, desto schneller fährt das Ventomobil.

Der Reihe nach: InVentus ist eine Lernplattform für Studierende der Universität Stuttgart. Das Projekt bringt Studentinnen und Studenten verschiedener Fachrichtungen zusammen: etwa aus dem Leichtbau, der Windenergie, dem Maschinenbau oder der Elektrotechnik – genau wie bei einer echten Windkraftanlage eben. Die Bachelor- und Masterarbeiten sind so angelegt, dass sie immer einen organisatorischen Teil beinhalten, um das Projekt nach vorn zu bringen. Das Projekt wird in erster Linie vom SWE und vom Institut für Flugzeugbau (IFB) unterstützt. Ferner bringen sich die Spezialisten vom Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG) und diverse Industriesponsoren mit ein. Die Karl Schlecht Stiftung hilft mit Geld aus, damit werden Anschaffung und die Reisen zu den Rennen finanziert.

Ziel von InVentus ist es, Studierende für die Windenergie zu begeistern und ihnen die Möglichkeit zu geben, in einem komplexen Projekt Erfahrungen zu sammeln – und vor allem Spaß zu haben. Für die Universität ist das Projekt ein tolles Aushängeschild, zeigt es doch in zahlreichen Publikationen und Fernsehbeiträgen in aller Welt die Kompetenz der Stuttgarter Studenten auf.

Die Idee zu InVentus kam von den Studierenden selbst. „Eigentlich wollten die Studierenden ein Snowboard bauen, das mit einem Kite vom Wind gezogen wird“, erinnert sich Martin Kühn, damaliger Lehrstuhlinhaber am SWE. „Das war uns aber ein bisschen zu abgedreht. Dann kam der Wettbewerb mit den windgetriebenen Autos und alle waren heiß drauf. Überraschenderweise haben wir direkt den ersten Platz abgeräumt.“

Das war im Jahr 2007. Damals begannen die beiden Studenten Jan Lehmann und Alexander Miller mit dem Bau des ersten Ventomobils. Es war ihre Abschlussarbeit. Das Fahrzeug

Inventus –
ein vom Wind
angetriebenes
Fahrzeug

SWE
Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014



bestand aus einem Kohlefaserchassis und einem Rotor, dessen Bewegungsenergie direkt zum Antrieb der Räder genutzt wurde. Es gab keinerlei Elektronik im Fahrzeug. Auf jeden Fall musste das dreirädrige Automobil möglichst leicht werden. Das ist gelungen, erinnert sich Professor Martin Kühn: „Ich bin ja selbst Konstrukteur und wäre oftmals viel konservativer an die Auslegung gegangen. Die Studierenden haben sich da echt viel zutraut und gezeigt, dass es geht.“ Der Einsatz hat sich gelohnt: Lehmann und Miller haben 2009 den Boysen-Preis gewonnen – für die beste Diplomarbeit im Bereich Umwelttechnik.

Im Laufe der Jahre wurden insgesamt drei Fahrzeuge entwickelt – und in den vielfältigen Werkstätten der Universität auch selbst gebaut. Die jüngste Generation ist ein wahres Wunderwerk an Technik und vereint zahlreiche Bereiche der Universität – inzwischen auch die Elektrotechnik. Denn der rund 150 Kilo schwere Renner ist ein Hybrid: Zwei Rotoren fangen den Wind ein und kommen zusammen auf eine Nennleistung von rund 4,5 Kilowatt bei maximaler Anströmung. So gingen die Stuttgarter ans Maximum dessen, was laut Rennreglement an Rotorfläche erlaubt ist. Der eine Rotor liefert sein Drehmoment direkt an die Räder, der andere treibt einen kleinen Generator an, der wiederum einen Elektromotor füttert.

Doch der aufwendige Hybridantrieb hat sich nur bedingt bezahlt gemacht. „Das System ist enorm komplex“, sagt Julian Fial. Das Problem: Die Drehmomente der beiden Eingangswellen (eine vom Wind mechanisch angetriebene und eine elektrisch



Eine alte Version
 des Inventus-Fahrzeugs

angetriebene) werden in einem verzweigten Planetengetriebe vereint. Aber: mitunter beeinflussen sie sich gegenseitig. Teilweise behindern sie sich sogar. Deshalb sind die Stuttgarter beim Aeolus Race 2016 ohne Elektroantrieb vorgefahren – wurden aber trotzdem Zweiter. Das Team InVentus übertraf sogar den bisherigen eigenen Rekord und verbesserte seine Bestleistung: 78 Prozent der Windgeschwindigkeit, an diesem Tag waren das 15 Stundenkilometer. „An Starkwindtagen schafften wir sogar 27 Stundenkilometer“, sagt Fial. Schneller waren nur die Dänen. Die heizten mit 101,76 Prozent des Windes über den Kurs. Waren also tatsächlich schneller als der Wind. In der Disziplin Beschleunigung ließen die Schwaben aber alle anderen Teams hinter sich.

Im Jahr 2017 – so viel Ehrgeiz muss sein – wollte der SWE-Rennstall dann wieder siegen. Doch es sollte anders kommen. Das kanadische Team ChinookETS war schneller und schraubte sogar den Weltrekord vom Vorjahr auf ein neues Niveau: 102,45 Prozent. Auch die Dänen von der DTU in Kopenhagen waren schneller – womit die Stuttgarter auf dem dritten Platz landeten.

Die Schwaben um Julian Fial nehmen's gelassen: „Die Kanadier und die Dänen haben dieses Jahr eine Klasse Leistung erbracht und verdient gewonnen. Das motiviert uns jetzt aber nur noch mehr, unser Fahrzeug weiter voranzutreiben und nächstes Jahr wieder um den Sieg zu fahren.“

Alpha Ventus RAVE

Begleitforschung an Deutschlands erster Offshore-Windfarm



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Als sich im August 2009 die ersten Windkraftflügel im Testfeld Alpha Ventus drehen, sehen alle nur die gigantischen Anlagen. Kaum einer ahnt, wie viele winzige Messfühler in den Flügeln, den Türmen und den stählernen Fundamenten verbaut sind, und wie viel Arbeit die Auswertung der enormen Datenmenge macht. Dabei liefern die Daten ein Meer an Erkenntnissen.

Alpha Ventus ist nicht irgendein Windpark. Es ist der weltweit erste rein der Forschung gewidmete Offshore-Windpark. Den Aufbau verfolgte die gesamte Windkraftwelt. Nie zuvor wurden so viele, so große Windkraftträder, so weit draußen im Meer errichtet. Keine Frage, hier geht es nicht um nasse Füße, wie bei jenen Anlagen, die damals im seichten Wasser standen, sondern um echte Offshore-Windräder: Alpha Ventus liegt in der Deutschen Bucht, etwa 40 Kilometer vor Borkum. Die Wetterbedingungen hier sind extrem: Der Wind peitscht regelmäßig mit Orkanstärke über die bis zu 17 Meter hohen Wellenkämme.



Windenergieanlage
im Offshore-Windpark
Alpha Ventus



An so einem Standort einen Windpark aufzubauen war eine enorme Herausforderung – so ziemlich alles war Neuland. Entsprechend viel Lehrgeld wurde bezahlt. Doch Alpha Ventus ist kein normaler, kommerzieller Windpark, sondern eine gigantische Testplattform für die Windkraft auf See, von der Logistik beim Aufbau bis zur Betriebsführung und Wartung. Genauso für die Umweltverträglichkeit. Dass der Bau und der Betrieb so einer Anlage gründlich erforscht werden will, ist klar. Genauso, dass bei so einem wichtigen Projekt die Forscher der Universität Stuttgart nicht fehlen dürfen.

Das Forschungsprojekt „RAVE – Research at Alpha Ventus“ soll zeigen, ob man mitten in der Nordsee wirtschaftlich und zuverlässig Strom erzeugen kann. Das Projekt startete vor dem Bau der Windfarm und dauert bis heute an. Es ist das umfangreichste und ehrgeizigste Offshore-Forschungsprojekt, das die Welt je sah: Über hundertfünfzig Wissenschaftler untersuchen, wie sich Wind, Wetter und Wellen auf Gondeln, Stahltürme und Rotorblätter auswirken, ob sie den Belastungen weit draußen im Meer auch zwanzig Jahre lang standhalten, welchen Einfluss die Anlagen auf das sensible Ökosystem der Nordsee haben und wie Lasersysteme auf hoher See Windmessungen optimieren und somit den Betrieb der Offshore-Parks wirtschaftlicher machen können.

An den beiden Teilprojekten OWEA – Verifikation von Offshore-Windenergieanlagen – und OWEA-Load waren die Spezialisten vom SWE und von der Universität Stuttgart maßgeblich beteiligt. Die Forscher brachten sich vor allem mit ihrem Know-how in Sachen LiDAR ein. In erster Linie ging es um physikalische Aspekte: Wie strömt der Wind in den Park ein und wie verhält er sich hinter den Anlagen? Um das herauszufinden, betreuten die Stuttgarter verschiedene Lasermesssysteme. Teils waren die Forscher selbst im Park unterwegs, mussten die gigantischen Turbinen erklimmen und die empfindlichen Messinstrumente installieren. Mitunter mussten sie wochenlang auf gutes Wetter mit wenig Wind und Wellen warten. Solche Wetterfenster sind rar, schließlich wurde der Park dort geplant, wo das Wetter eher rau ist – um viel Wind zu ernten, also viel Strom zu produzieren. Wenn das Wetter dann endlich passt, muss alles ganz schnell gehen. Doch um überhaupt im Park arbeiten zu dürfen, müssen die Wissenschaftler vorher spezielle Offshore-Trainings absolvieren. Kurz gesagt: Der Aufwand ist enorm.

Aber: Die Daten, die die Stuttgarter analysieren, sind es wert.



Lidar auf der Gondel
einer
Offshore-Windenergieanlage



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Beschleunigungs- und Biegemomentsensoren an den Rotorblättern zeichnen unablässig die Lasten auf. Genauso die Umweltbedingungen wie Wind, Wellen, Temperatur und Meeresströmung. Damit kann man die Korrelation zwischen Umweltbedingungen und Lasten entschlüsseln. Oder die Drehmomente im Triebstrang, Biegemomente im Turm und dem Fundament – insgesamt messen über 200 Sensoren kontinuierlich in jeder Anlage. Da laufen gigantische Datenberge auf, es geht um viele, viele Terabytes.

Derzeit werten die Stuttgarter Forscher die Daten aus. Besonders interessiert sind sie am sogenannten „wake“, dem Nachlauf, also jener turbulenten Luftströmung, die entsteht, wenn das Windfeld den Rotor durchlaufen hat – seit Jahrzehnten eines der Fachgebiete der Stuttgarter. Man kann es mit den Wirbelschleppen von Flugzeugen vergleichen. Diese Strömungen behindern weiter hinten stehende Windräder. Sie nehmen ihnen nicht nur den Wind aus den Flügeln, sondern belasten die Anlagen mit starken Turbulenzen. Die Stuttgarter Forscher schauen sich genau an, welche Lasten da auf die Anlagen einwirken. Ob die Windräder unter solchen Bedingungen auch lang genug arbeiten. Oder ob sie noch genug Reserve für die zu erwartende Lebensdauer haben. Das eröffnet neue Möglichkeiten für den Windparkbetreiber, hier geht es um Aspekte wie Lebensdauerverlängerung oder Leistungssteigerung.

Die Erkenntnisse helfen auch dabei, die Steuerung der einzelnen Windräder zu optimieren. Man spricht von der sogenannten prädiktiven Steuerung. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Verwendung von LiDAR-Messungen zur Vorsteuerung des kollektiven Blattwinkels. Dies konnte man mit dem am SWE entwickelten LiDAR-System, das zusammen mit dem US-amerikanischen Forschungsinstitut NREL weltweit erstmalig erfolgreich getestet wurde, realisieren. Genauso analysieren die Forscher das Layout des Windparks. Auch hier ist Spielraum für Optimierung, um letztlich den Gesamtertrag zu steigern.



Stiftungsjahre
Errungenschaften des SWE
zwischen 2004 und 2014

Oftmals ist es besser, jene Windkraftträder in der ersten Reihe etwas gedrosselt zu fahren, zum Beispiel durch eine geringe Schiefstellung der Anlage. Damit kann man den Nachlauf gezielt ablenken, sodass dieser nicht die hintere Anlage trifft. Das lässt mehr „guten“ Wind mit höheren Windgeschwindigkeiten und geringeren Turbulenzen für die hinteren Reihen übrig. Letztlich kann so die Gesamtleistung des Windparks erhöht werden. Zeitgleich haben die Messreihen gezeigt, dass es sinnvoll ist, für jedes Windrad einen maßgeschneiderten Wartungsplan zu erstellen. Schließlich werden nicht alle Anlagen gleich belastet. Turbinen an den äußeren Seiten haben es mit anderen Strömungen zu tun als Propeller in der Parkmitte. Auch die aktive Steuerung der einzelnen Windräder, über mit dem LiDAR auf der Gondel gewonnenen Daten, ist vielversprechend. Hier haben die Forscher vom SWE wichtige Pionierarbeit geleistet. Natürlich sind auch die Anlagenhersteller an den Forschungsergebnissen interessiert. Können sie mit ihrer Hilfe doch abschätzen, ob ihre Anlagen richtig dimensioniert sind.

Um all die Abläufe bei zukünftigen Windparks mit Hunderten Turbinen zu optimieren, entwickeln die Stuttgarter um ihren Professor Po Wen Cheng eine Simulationsumgebung. Sie erlaubt es, die Systemeigenschaften des gesamten Windparks für eine Optimierung abzubilden. So werden die Windparks von morgen, die irgendwann einen Großteil unserer Stromversorgung liefern sollen, noch effizienter.

FINO-Forschungs-
plattform vor dem
Alpha Ventus-
Offshore-Testfeld



Lehre und Alumni

Ehemalige Studierende erinnern sich an ihre Zeit am SWE



Windenergieexkursion
Studierende auf einer
Anlage im Schwarzwald

Der Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) ist als Lehrstuhl am Institut für Flugzeugbau der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart verankert. Die Aufgabe des Lehrstuhls ist nicht nur exzellente Forschung, sondern genauso die solide Ausbildung, um die Studierenden auf die Herausforderungen der Zukunft vorzubereiten.

Am Lehrstuhl arbeiteten zwischenzeitlich bis zu 18 Mitarbeiter. Die Windenergievorlesungen, in den Anfangsjahren von nur etwa 15 Studierenden besucht, erfreuen sich inzwischen enormer Beliebtheit. Teilweise sind sie bis auf den letzten Platz belegt. Dann lauschen bis zu 200 Studierende den Ausführungen der hochkarätigen Dozenten. Kein Wunder: Das Studium am SWE hat einen exzellenten Ruf – und Windkraftstudierende aus Stuttgart werden von der Industrie mit offenen Armen empfangen.

Die Philosophie des Windenergie-Lehrstuhls ist eine Kombination aus soliden theoretischen Kenntnissen, gepaart mit praxisrelevanter Anwendung, wobei die Studierenden die Möglichkeit haben, mit Simulationsprogrammen das Verhalten der Windenergieanlage und des Windparks zu modellieren. Zusätzlich gibt es die Option, durch Projektarbeit und Laborübungen die Theorie in die Praxis umzusetzen.

Professor Po Wen Cheng, seit 2011 Lehrstuhlinhaber, kennt den Grund des SWE-Erfolgs: „Die Windkraft reduziert unsere Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten, vermeidet CO₂-Ausstoß, schafft neue Arbeitsplätze, und das ohne radioaktives Risiko.“

Hier ein kleiner Auszug von ehemaligen Studierenden am SWE:

Sebastian Kaus begann im Jahr 2009 erneuerbare Energien im Bachelor zu studieren: „Gleich im ersten Semester habe ich vom InVentus-Projekt erfahren, da mein Mitbewohner im Team war. In den ersten Semestern habe ich Rotorblätter gebaut und so meine ersten praktischen Erfahrungen mit der Windenergie gemacht.“ Über die Jahre hat Sebastian Kaus weitere Baugruppen am Fahrzeug übernommen und war zum Schluss drei Jahre lang Teamleiter. Während dieser Zeit hat er zwei neue Fahrzeuge entwickelt und viele Podiumsplätze sowie den Innovationspreis für Windenergieautos beim jährlichen Rennen in Den Helder gewonnen. „Der SWE hat uns dabei immer unterstützt und uns vieles ermöglicht. Gerade die Messtechnikgruppe um Jan Anger und Martin Hofsäß haben wir oft beansprucht, um Windkanaltests am IAG durchzuführen oder den Generatorteststand für eigene Versuche zu benutzen. Professor Cheng hat uns stets Freiraum gelassen und es uns so ermöglicht, neue Dinge zu wagen.“

Auch dank der Erfahrung bei InVentus hat Sebastian Kaus nach dem Studium zur Senvion GmbH in Hamburg gefunden. Dort beschäftigt er sich seit mittlerweile zwei Jahren mit der Analyse von Windkraftanlagen-Daten, um diese leistungsoptimiert und fehlerfrei in Betrieb zu halten. „Das theoretische und praktische Wissen aus meiner Zeit am SWE, wo ich unter anderem auch studentische Hilfskraft war und meine Bachelorarbeit geschrieben habe, helfen mir sehr, meinen Job effizient und gut zu machen“, sagt Kaus.

Matthias Arnold kam 2006 als Student an den SWE, wo er insgesamt rund zehn Jahre verbrachte. Auch Matthias Arnold mischte kräftig bei InVentus mit: „Die Herausforderung, ein windbetriebenes Fahrzeug zu entwickeln, klang äußerst spannend, auch wenn ich damals noch keinerlei Ahnung von Windenergie hatte.“ Im ersten InVentus-Jahr war Arnold für die Entwicklung der Rotornabe und die Bordelektrik/-sensorik verantwortlich. So musste er sich zwangsläufig mit der Windenergie beschäftigen. Arnolds Faszination für die Windenergie führte dazu, dass er sich im 5. Semester im Industriepraktikum beim Maschinenbauunternehmen Voith mit Wellen- und Gezeitenströmungsenergie beschäftigte. Sein Beispiel zeigt gut, wie sich verschiedene Technologien der Erneuerbaren Energien verbinden lassen und welche Vielfalt das SWE-Studium bietet. In seiner Studienarbeit, die Arnold für das InVentus-Projekt am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik schrieb, widmete er sich einer aerodynamischen Verkleidung für das Windmobil.

Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Doktoranden-Seminars der European Academy of Wind Energy (EAWE)

SWE
 Lehre und Alumni
 Ehemalige Studierende
 erinnern sich an ihre Zeit
 am SWE



Ähnlich wie bei der Studienarbeit lief es dann auch bei seiner Diplomarbeit: „Mit dieser Arbeit sind für mich die bis dahin parallel laufenden Stränge von Gezeitenströmungsenergie und Windenergie zusammengekommen, da es darum ging, Strömungssimulationen und -phänomene direkt zwischen den beiden Technologien hin und her zu übertragen.“

Dann kam der Seitenwechsel: „Nach dem Studium am SWE stellte mich Professor Cheng als Wissenschaftlichen Mitarbeiter und Doktorand an. Dort habe ich mich mit der Hydroelastizität an Gezeitenströmungsturbinen beschäftigt. Parallel dazu wurde ich in die Lehre am Institut eingebunden. Besonders gut in Erinnerung geblieben ist mir die Wertschätzung, die es für gute Arbeit gab. Schön war auch, dass man als Doktorand bei entsprechender Qualität der Veröffentlichung diese auch auf internationalen Konferenzen vorstellen durfte. So kam ich bis nach Alaska und Hawaii.“

Mittlerweile ist Matthias Arnold in Deutschlands hohem Norden gelandet: beim Windenergieanlagenhersteller Enercon in Aurich. Dort beschäftigt er sich mit hochdetaillierten aerodynamischen und aeroelastischen Simulationen. Die Verbindung zum SWE ist alles andere als abgerissen: „In mehreren Forschungsprojekten arbeite ich jetzt von industrieller Seite aus mit Professor Cheng und den akademischen Kollegen am SWE zusammen. Erstaunlich dabei ist immer wieder, dass mir hier in der Industrie eine ganze Reihe von früheren Studenten, deren Ausbildung ich miterlebt habe, jetzt als Kollegen gegenüber sitzen – ein tolles Gefühl und ein schöner Beweis für die Qualität des SWE, der die Studenten so vorbereitet, dass sie im weiteren beruflichen Leben erfolgreich sind.“



SWE-Team
mit Kleinwindanlage

Denis Matha, ehemaliger Doktorand, hat den SWE ebenfalls in guter Erinnerung: „Insbesondere die Zusammenarbeit mit intrinsisch hochmotivierten und sehr fähigen Kollegen und eine Atmosphäre, in der jeder einzelne Mitarbeiter für den Erfolg des SWE bereit ist, über das übliche Maß hinaus Kraft und Zeit zu investieren, ist meiner Ansicht nach etwas Einzigartiges für ein Uni-Institut.“

Die Zeit am SWE war eine hervorragende Vorbereitung auf Führungspositionen in der Industrie, sagt Matha: „Die hohe Eigenverantwortung und Bandbreite von Aufgaben, die uns zuteil wurden, war zwar herausfordernd, aber definitiv eine sehr gute Vorbereitung auf zukünftige Herausforderungen und Führungsaufgaben in der Industrie, verglichen mit vielen anderen Doktorandenprogrammen, die oftmals deutlich verschulter sind.“

Denis Matha hat im Jahr 2009, nach einem Aufenthalt am National Renewable Energy Laboratory in den USA, das Thema Floating Wind erfolgreich am SWE initiiert. Mittlerweile ist er Koordinator des Bereichs „Floating Wind“ beim international tätigen Beratungsunternehmen Ramboll.

Das neue Testfeld auf der Schwäbischen Alb

Windenergie im bergig-komplexen Gelände



WindForS
altes Testfeld

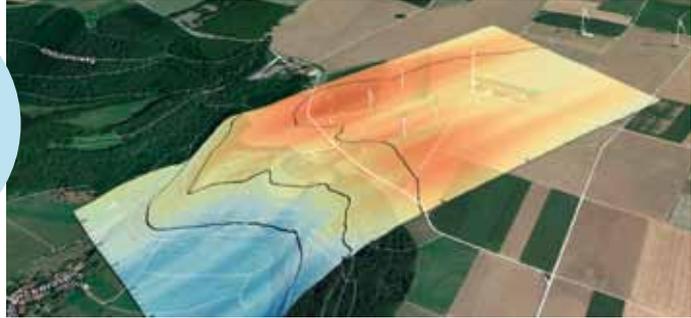
Gute Forschung braucht gute Forschungsbedingungen. Das wusste schon Ulrich Hütter, einer der Väter der modernen Windkraft und Urvater des SWE, als er 1956 auf dem 734 Meter hohen Stöttener Berg am Rande der Schwäbischen Alb bei Schnittlingen Deutschlands erstes Windkraft-Forschungsgelände eröffnete. Über 60 Jahre ist das inzwischen her.

Der österreichisch-deutsche Windkraftpionier stellte auf dem Testgelände bei Schnittlingen den von ihm konstruierten Prototyp der legendären Windkraftanlage StGW-34 auf. Die zweiflügelige Windturbine gilt als Urahn moderner Freifahrender Windkraftanlagen. Später kamen weitere Maschinen hinzu. Hütter zu Ehren wurde das Testfeld im Jahr 1986 in „Ulrich W. Hütter Testfeld“ umbenannt. In den Folgejahren geriet die Windenergieforschung allerdings mehr und mehr ins Stocken. Seit dem Jahr 1997 wird der Standort in erster Linie für die kommerzielle Windenergiegewinnung genutzt.

Seit 2004, also seit der SWE besteht, wird auch der Ruf nach der Wiederbelebung eines Windenergie-Testfelds auf der Alb lauter. Die Forscher sehnten sich nach einer innovativen und modernen Anlage, die Forschungszwecken speziell im bergig-komplexen Gelände dient. Denn eines ist klar: Um die Energiewende umsetzen zu können, spielt der Ausbau der Windenergie im Binnenland eine zentrale Rolle. Und um den Ausbau voranzutreiben, müssen auch anspruchsvolle Standorte erschlossen werden, etwa im Wald oder auf Hoch- und Kammlagen. Doch dafür fehlt es noch an Wissen.

Visualisierung des zukünftigen WindFors-Windenergiefelds

Windenergie im bergig-komplexen Gelände



Diese Wissenslücke soll nun geschlossen werden. Das Vorhaben, ein spezielles Testfeld für bergig-komplexes Gelände, nimmt nun endlich Gestalt an. Das Jahr 2017 markiert dabei eine Wende in Sachen Windkraftforschung im Süden der Republik: Im Herbst ging der erste Abschnitt des neuen Testfelds in Betrieb. Unweit des altehrwürdigen Ulrich-Hütter-Testgeländes entsteht bei Geislingen an der Steige eine hochmoderne Plattform für die Windenergieforschung in Süddeutschland.

Das neue Testfeld ist ein Baby des Forschungsclusters WindForS, dem zahlreiche süddeutsche Universitäten und Hochschulen angehören. Koordiniert wird das vom BMWi und vom Land Baden-Württemberg finanzierte Vorhaben WINSENT vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, welches auch den späteren Betrieb übernehmen wird.

Die technische Ausstattung des Testfelds wurde im Vorgängerprojekt KonTest so konzipiert, dass diese der Vorbereitung, Erprobung und Validierung neuer Technologien hinsichtlich Materialien, Konstruktionsweisen, Aerodynamik, Lastenkontrolle, Lärmreduktion, Fertigungstechnik, Betriebsführung, Messtechnik und Monitoring von Windenergieanlagen in idealer Weise dient. Das Testfeld soll sowohl der Forschung als auch den Herstellern von Windenergieanlagen und deren Zulieferern dienen. Genauso sind landschaftsästhetische, akzeptanzbezogene und ökologische Fragen Teil der Forschung. Ferner berücksichtigt das Konzept eine mögliche Erweiterung des Testfelds zur Untersuchung von Speicherung und Netzintegration weiterer elektrischer, erneuerbarer Energiequellen.

Die Lage

Das Testfeld liegt auf einem Hochplateau nahe dem sogenannten Albtrauf, einer steil abfallenden Bergkante. Hier herrschen besondere Windbedingungen vor, die durch die lokale Topografie und die zur Hauptwindrichtung ausgerichtete Steilstufe von hohen Turbulenzintensitäten, Beschleunigungen und raschen Richtungswechseln geprägt sind. Diese, für komplexes Gelände typischen Windbedingungen, stellen ganz besondere Anforderungen an die Struktur, Auslegung und die Betriebsführung von Windenergieanlagen. Ein solches Testgelände mit den genannten Möglichkeiten und Ausstattungsmerkmalen ist in dieser Form weltweit einzigartig und steht für die Region Süddeutschland als Leuchtturmprojekt mit globaler Strahlkraft.

Die Messinfrastruktur

Insgesamt werden vier je 100 Meter hohe meteorologische Messmasten aufgebaut. Sie rahmen die beiden Forschungswindenergieanlagen ein. Zudem werden LiDAR-Systeme, sowohl am Boden als auch auf den Windturbinen, installiert. Sie messen die Windfelder in ungekannter Auflösung. Die vermessenen Windfelder können sogar dazu dienen, prädiktive Anlagensteuerungen zu ermöglichen oder Windparkregelungen mit aktiver Nachlaufablenkung zu implementieren. Ferner sind Messdrohnen als Schwarm im Einsatz. Sie können an jeden beliebigen Punkt im Messfeld fliegen und liefern zeitlich hoch aufgelöste Daten, die der Turbulenzforschung dienen. Dabei kommen sowohl Quadrocopter als auch Flugzeuge zum Einsatz. Mit dem Einsatz von verschiedenen Messtechniken können neue Erkenntnisse für die turbulente Windströmung in komplexem Gelände gewonnen werden.

Die Forschungs-Windkraftanlagen

Die beiden Windturbinen werden sogenannte gläserne Anlagen sein. Das heißt, die Forscher haben Zugriff auf sämtliche Anlagendetails, inklusive der Regelung. Sie können jede Komponente abändern oder ersetzen und analysieren dann, wie sich die Maschine verhält. Zum Einsatz kommen relativ kleine Anlagen, mit einer Nennleistung von 750 Kilowatt und einem Rotordurchmesser von 55 Metern. Die Größe der Anlage wurde so gewählt, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse auf größere Windenergieanlagen übertragen lassen. Die Windkraftanlagengröße erlaubt es, auch größere Komponenten wie etwa Rotorblätter einfach und kostengünstig zu wechseln und zu testen. So können die Wissenschaftler erkunden, wie sich spezielle Anlagen für Mittelgebirgsstandorte entwerfen lassen. Resultat könnten bei-



spielsweise leichte, teilbare Rotorblätter sein, die den Transport und die Logistik im komplexen Gebiet vereinfachen. Genauso Türme, die für die besonderen Lasten ausgelegt sind.

Der Zugriff auf die Regelungsalgorithmen erlaubt die Entwicklung neuer Regelungsstrategien zur Leistungs- und Ertragssteigerung sowie die Verlängerung der strukturellen Lebensdauer von Windenergieanlagen. Die Offenheit der Forschungsanlagen bietet den Zulieferern von Komponenten eine herstellerunabhängige Testplattform, die es erlaubt, neue Technologien zu erproben. Damit können die Zulieferer die Produktentwicklung beschleunigen, und der Markteinstieg speziell für mittelständische Firmen wird erleichtert. Unterm Strich soll das Forschungsgelände dabei helfen, die Windernnte in bergig-komplexen Regionen effizienter zu machen, und so die Windkraft allgemein voranbringen.

Ausblick

Zukunft der Windkraft und der Erneuerbaren Energien

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Stuttgart ist ein Synonym für innovative Technologien – auch in Sachen Energie. Traditionsgemäß ruhen sich auch die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen vom SWE nicht auf ihren Lorbeeren aus, sondern haben den Blick stets in die Zukunft gerichtet. Denn fraglos wird sich auf dem Energiesektor in den kommenden Jahren vieles verändern. Die Erneuerbaren nehmen eine Schlüsselrolle ein und ersetzen zunehmend fossile Kraftwerke. Damit der Umbau des Kraftwerksparks weitgehend ohne Reibungsverluste abläuft, kümmern sich die SWE-Forscher schon heute um Morgen.

Windmessmast und Lidar
für Leistungskurvenvermessung





Windkraft ahoi!



Offshore-Windmessung
mit schwimmendem
Lidargerät

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Die Windenergie auf hoher See wird immer populärer. Ist ja klar: Offshore locken Auslastungen von 3500 bis 5000 Volllaststunden pro Jahr – deutlich mehr als an gewöhnlichen Standorten an Land. Der weltweit erste Windpark ging vor dem dänischen Vindeby bereits 1991 in Betrieb. Heute sind weltweit über 12.000 Megawatt Offshore-Windkraftleistung am Netz. Die meisten Anlagen (88 Prozent) drehen sich vor Europas Küsten. Die restlichen zwölf Prozent finden sich hauptsächlich vor China, Japan, Südkorea und den USA.

Es ist eine echte Erfolgsstory: Die Kosten für Offshore-Windstrom fallen viel schneller, als es die meisten Experten erwartet haben. Das Ziel der Industrie 100 Euro je Megawattstunde bis zum Jahr 2020 hat man inzwischen erreicht. Das liegt hauptsächlich daran, dass die Offshore-Windindustrie inzwischen die Risiken beherrscht und die gesamte Wertschöpfungskette stark optimiert hat. Nicht zu vergessen sind die stabilen politischen und finanziellen Rahmenbedingungen, die essenziell für eine langfristige Projektplanung sind.

Die Offshore-Anlagen haben inzwischen meist Nennleistungen von fünf bis sechs Megawatt. Prototypen erreichen bereits annähernd Leistungen von zehn Megawatt. Für weitere Kosten-

senkungen und sogar Offshore-Windstrom ohne jegliche Subvention werden Anlagegrößen von bis zu 15 Megawatt ab 2023 erwartet. Je größer die Anlagen, desto eher lohnt der Aufwand. Denn der Aufbau von Offshore-Windparks bedarf einer aufwendigen Logistik. Riesige Kran- und Versorgungsschiffe braucht es genauso wie das richtige Wetterfenster. Hinzu kommen unzählige hoch ausgebildete Fachkräfte. Auch die Netzanbindung ist immens aufwendig und lohnt umso mehr, wenn die Windkraftanlagen mehr Strom liefern – und das gelingt mit leistungsstarken Windturbinen besser.

Ein enormer logistischer Aufwand ist auch die Wartung der Anlagen auf hoher See. Mal eben hinfahren, um etwas zu reparieren, geht meist nicht: Die Windparks liegen weit draußen und oft lässt das Wetter es einfach nicht zu, per Boot hinauszu-fahren und auf die Anlagen zu steigen. Zu groß ist die Verletzungsgefahr. Hinzu kommt der Zeitfaktor: Die meisten Offshore-Windparks in der Deutschen Nordsee liegen weit entfernt von der Küste, sodass der Transportweg über Schiffe lang ist. Für schnelle und dringende Reparatur werden oft Hubschrauber eingesetzt, die die Erreichbarkeit eines Offshore-Windparks signifikant erhöhen. Für sehr große Offshore-Windparks lohnt es sich für den Parkbetreiber sogar, spezielle Wohnplattformen für das Servicepersonal zu installieren.

Auch die Frage, wie die Anlagen im Meeresgrund verankert werden, ist alles andere als trivial. Sie stehen entweder auf gigantischen Monopiles, überdimensionalen Stahlrohren, die in den Boden gehämmert werden, sogenannten Jackets, oder Schwerkraftfundamenten, die allein ihre schiere Masse an Ort und Stelle hält. Doch all diese Gründungsvarianten haben ein Manko: Sie benötigen seichte Gewässer, tiefer als 50 Meter darf das Wasser nicht sein, sonst wird der Aufwand zu hoch und damit der Kostenrahmen gesprengt. Doch flache Küstenstreifen mit guten Windbedingungen sind rar. Sie sind eigentlich nur vor Europas Küsten zu finden. Das erklärt, weshalb die meisten Offshore-Windräder in Europa stehen.

Aus diesem Grund richtete sich der Fokus der Offshore-Windkraft mehr und mehr auf schwimmende Anlagen. Die weltweit erste schwimmende Windkraftanlage treibt seit 2009 vor der Küste Norwegens im Meer, hier ist das Wasser 220 Meter tief. Der Schwimmkörper ist als sogenannte Spar-Boje ausgelegt – ein gigantisches Stahlrohr, das dem Schwimmer einer Angel ähnelt. Stahlseile halten es auf Position.

Der Pionier Statoil, der auch das oben beschriebene weltweit erste Schwimmwindrad aufbaute, errichtet vor der Küste Schottlands gerade einen Windpark mit 30 Megawatt. Die fünf je sechs Megawatt starken Windturbinen liefert Siemens. Der Konzern sieht sich als Vorreiter in Sachen Schwimmwindkraft: „Unsere Technologie kann man bereits als vorkommerziell bezeichnen. Wir erwarten im Bereich der schwimmenden Windkraftanlagen weitere Kostensenkungen, die den Ausbau vorantreiben“, sagt Michael Hannibal, Geschäftsführer Offshore Wind bei Siemens.

Forscher des SWE arbeiten gemeinsam mit Spezialisten anderer Universitäten daran, die Kosten für die Schwimmwindkraft zu senken. Eine Option, die sie prüfen: Statt aus teurem Stahl fertigen sie einen Schwimmer aus Beton. Das Credo: Beton ist nicht nur billiger, sondern auch ökologischer und haltbarer. Außerdem wird die Herstellung von Betonstrukturen lokal umgesetzt und bringt positive Effekte für die Wirtschaft vor Ort.

Auch forschen die Stuttgarter an neuronalen Netzen, die die Belastungen an der Struktur von Windenergieanlagen erfassen. Die Idee dahinter: Eine Überwachung der Anlage durch eine Lastenabschätzung mithilfe von Sensoren, die ohnehin auf der Anlage installiert sind. Mit diesen neuronalen Netzen kann man die Daten sinnvoll kombinieren, um eine Aussage über den Zustand der Struktur zu liefern. Und wozu das alles? Man kann die Wartung abhängig vom Zustand der Anlage planen – und eventuell sogar einen Weiterbetrieb der Anlage ermöglichen.

Im Bereich der Regelung werden robuste sowie prädiktive Regelungsstrategien entworfen und getestet, um die Belastungen zu



reduzieren – und die Energieausbeute zu erhöhen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Verwendung von LiDAR-Messungen zur Vorsteuerung des Blattwinkels. Eine Erweiterung der prädictiven Regelung ist die Einbindung der Welleninformation. Das ist für schwimmende Windenergieanlagen besonders interessant, weil man so die Bewegungen des Schwimmkörpers reduzieren kann. Für schwimmende Windenergieanlagen gilt: Je weniger sich die Anlage bewegt, desto höher ist ihre Leistung und desto geringer sind die Lasten.

Eine weitere Anwendung des LiDAR-Systems ist die Windparkregelung. Die Strömung hinter jeder Anlage kann mit dem LiDAR-System erfasst werden. Diese Information kann dazu genutzt werden, den Nachlauf aktiv zu beeinflussen und den Wirkungsgrad des Windparks zu steigern. Die Interaktion von Nachläufen zwischen den einzelnen Anlagen ist sehr komplex, und bevor die Windparkregelung tatsächlich eingesetzt werden kann, werden weitere Forschungsarbeiten nötig sein. Eine gute Nachricht für die Forscher aus Stuttgart also.

Alles in allem bietet die Meereswindkraft enormes Potenzial. Große Parks sind in der Lage, ganze Städte zu versorgen. Die Kostensenkungen sprechen dafür, dass das Preisniveau von Offshore-Wind in absehbarer Zeit auf dem Niveau von Onshore-Wind liegt, und das sogar ohne Subvention, wird durch die letzten Ausschreibungen in Aussicht gestellt. Vor allem aber kann die Meereswindkraft im Verbund Grundlaststrom liefern und so die Versorgungssicherheit erhöhen.

Offshore-Windpark
Baltic I



Airborne Wind Energy

Die Windkraft hebt ab

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Fliegende Windkraftwerke, die in große Höhen aufsteigen und dort die stetigen und starken Winde einfangen, sind keine Hirngespinnste. Es gibt sie bereits. Noch ist der Zweig der sogenannten Airborne Wind Energy jung und überschaubar – global widmen sich rund 60 Unternehmen dem Thema. Doch die Zukunftsaussichten sind grandios.

Einige dieser Unternehmen haben bereits ansehnliche Prototypen in der Luft. So testet Google über seinen Ableger „Makani“ ein solches Flugwindkraftwerk. Makanis Entwicklung gleicht einem Motorflieger. Der Kohlefaserflügel ist stattliche 28 Meter lang, über eine Tonne schwer und 600 Kilowatt stark. Er kreist, ähnlich wie ein Flugdrachen, am Himmel, wobei seine acht Propeller und Generatoren die enorme Windströmung nutzen, um Strom zu erzeugen. Ein langes Kabel, das gleichzeitig als „Drachenschnur“ dient, leitet den Strom zum Boden.

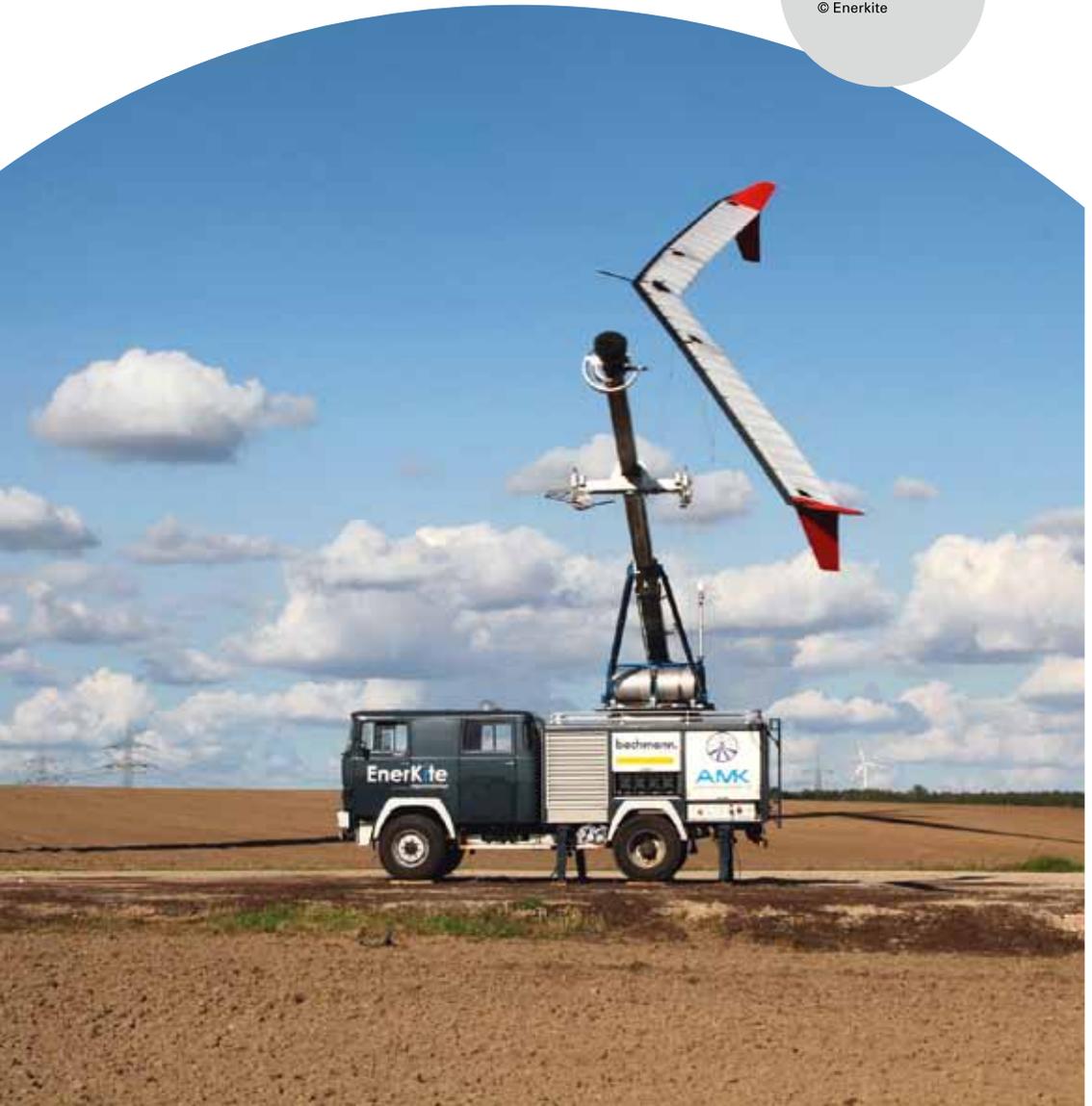
In Deutschland sind es die Unternehmen Enerkite aus Brandenburg und Skysails aus Hamburg, die hoch hinauswollen und ebenfalls erste Prototypen testen. Dass die Technologie Potenzial hat, findet man wohl auch beim Energieversorger Eon. Der hat gerade in das niederländische Flugwind-Unternehmen Ampyx Power investiert. Die beiden wollen die Fundamente und die Netzanbindung eines ehemaligen Offshore-Windparks vor Irland nutzen. „Das ist sicherlich ein sinnvoller Schritt für die Hochskalierung der Technologie“, findet Po Wen Cheng.

Der Vorteil der fliegenden Kraftwerke: Man spart den Turm und damit Unmengen an Material, gewinnt aber gleichzeitig mehr Strom als mit gewöhnlichen Windrädern. Auch die möchte man immer höher bauen. Denn auch die Windmüller in Bodennähe wissen: doppelte Windgeschwindigkeit gleich achtfache Energieausbeute. Und je höher man hinauskommt, desto stärker bläst der Wind. Die Höhen, in die Flugwindkraftwerke aufsteigen, sind für Dreiflügler auf ihren Türmen quasi unerreichbar: Bis zu 400 Meter hoch, manche wollen sogar noch höher hinaus.

Das ist letztlich aber eine Frage der Kostenoptimierung, denn größere Höhe bedeutet höhere Kosten für das Kabelsystem, das den Strom zum Boden bringt. Immerhin: Die zusätzliche Energieausbeute durch die Höhe steigt im Vergleich zu den Kosten langsamer. Wo genau das Optimum liegt, bleibt vorerst eine Aufgabe für die Forschung.

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Flugwindkraftanlage
von Enerkite
© Enerkite



Ein weiterer Vorteil der Airborne Wind Energy ist die Einsatzflexibilität. Konventionelle Windturbinen müssen für extreme Windbedingungen wie tropische Stürme ausgelegt werden. Bei fliegenden Systemen ist das kein Problem: Man kann sie einfach am Boden lassen. Das bringt materielle und finanzielle Vorteile mit sich, weil Extrembedingungen vermieden werden können.

Allerdings brauchen fliegende Windkraftwerke viel Platz und sind daher vor allem für Offshore-Einsätze oder menschenleere Gebiete geeignet. Noch ist die Technologie recht teuer, aber alles in allem, da ist sich die Fachwelt einig, bietet sie ein gigantisches Potenzial. Irgendwann könnten Flugwindkraftwerke günstiger Strom ernten als die gängigen Windräder – und die sind an guten Standorten schon verblüffend effizient.

Fort Felker, ehemaliger Direktor des National Wind Technology Center in den USA und derzeit Teamleiter von Makani bei Google X, ist ein echter Fan der Flugwindkraft: „Die Technologie ermöglicht es, mit leistungsschwächeren Anlagen mehr Energie zu ernten.“ In einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme (IWES) aus dem Jahr 2013 ist die Rede von zwei bis vier Cent je Kilowattstunde – damit wäre die Höhenwindkraft günstiger als alle bekannten Energieerzeugungsvarianten. Allerdings schläft die „Konkurrenz“ von den konventionellen Windenergieanlagen und von der Photovoltaik auch nicht. Inzwischen sind die Zahlen von zwei bis vier Cent pro Kilowattstunde für diese Technologien auch in greifbarer Nähe. Es bleibt ein spannender Wettlauf unter den erneuerbaren Energieträgern.

Am SWE sucht man daher stets nach neuen wissenschaftlichen Herausforderungen. Innerhalb der Universität Stuttgart ist die Expertise für die Entwicklung von Airborne Wind Energy vorhanden. Zusätzlich bestehen Synergien zwischen den Arbeiten am SWE mit der Flugwindkraft, wie zum Beispiel beim Thema LiDAR-Messungen, LiDAR-Regelung oder der dynamischen Simulation. Durch das Thema Airborne Wind kann zudem die Kooperation innerhalb der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik verstärkt werden. Das konkrete Ziel ist für SWE schwer vorherzusehen, aber wie schon so oft zuvor liegt der Reiz darin, neue Technologien zu entdecken und zu entwickeln.

Speicher

Windstrom für Flaudentage

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Damit die Erneuerbaren, vor allem die Windkraft, große Teile unserer Energieversorgung übernehmen können, braucht es Speicher. So ließen sich Teile der teuren Hochspannungs-Übertragungsleitungen ersetzen. Gleichzeitig würde der Ökostrom kontinuierlich ins Netz fließen.

Auf dem Weg zu einer großflächigen Versorgung mit erneuerbaren Energien führt kaum ein Pfad am Einsatz von Speichern vorbei. Wind und Sonne fluktuieren einfach zu sehr, um sich zu 100 Prozent auf sie verlassen zu können. Das heißt nicht, dass, wie oft propagiert, monströse und sündhaft teure Kapazitäten an Speichern aufgebaut werden müssen. Ganz ohne wird es aber nicht gehen. Grund genug, dass sich Wissenschaftler vom SWE auch dieser Frage widmen.

Für längere Zeiträume braucht es Großspeicher. Pumpspeicherkraftwerke sind das prominenteste Beispiel hierfür: Bei Stromüberhang wird Wasser auf ein höher gelegenes Niveau gepumpt. Bei Strombedarf strömt das Wasser bergab und treibt Turbinen an. Doch speziell in Deutschland gibt es kaum noch Gegenden, wo sich solche Speicherkraftwerke errichten lassen.

Im Gespräch sind daher neue Technologien. Etwa Betonkugelspeicher. Die Technik wurde unlängst im Bodensee getestet. Dazu wurde eine drei Meter große, hohle Betonkugel in 100 Meter Wassertiefe versenkt. Eine leere Kugel kann man sich dabei als volle Batterie vorstellen: Öffnet man ein Ventil, so strömt Wasser mit hohem Druck hinein und treibt eine Turbine an. Der Clou: Mit zunehmender Tiefe steigt der Druck. Im echten Leben sollen die Kugeln 30 Meter groß und 20.000 Tonnen schwer sein. Sie sollen eine Leistung von fünf Megawatt liefern. In einer Tiefe von 700 Metern installiert, könnten sie 20 Megawattstunden Strom speichern. Für Nord- und Ostsee sind sie damit nicht geeignet, das Wasser ist schlicht zu flach. Das Mittelmeer ist hingegen prädestiniert: Im Verbund mit Offshore-Windparks entstünden so verlässliche Großkraftwerke. Doch als Langzeit-

speicher ist diese Lösung wahrscheinlich ungeeignet, denn eine große Windkraftanlage mit zehn Megawatt Leistung hat solch einen Speicher binnen zwei Stunden aufgeladen.

Wind und Wasser bilden auch an Land eine exzellente Kombination: Das zeigt das Beispiel „Naturspeicher“ im süddeutschen Gaildorf. Dort gehen schon heute Windkraft und Pumpspeicher eine zukunftssträchtige Symbiose ein. Die Sockel vierer Windturbinen, die auf einem Bergrücken gebaut werden, sind gleichzeitig als Wasserspeicher ausgelegt. Über Rohrleitungen sind sie mit einem Kraftwerk und dazugehörigem Unterbecken 200 Meter tiefer im Tal verbunden. Der Speicher soll schnell hoch- und herunterfahren, um Regelenergie zur Stabilisierung des Stromnetzes zu liefern. Zudem denken Forscher darüber nach, wie man die zahlreichen stillgelegten Bergwerke in Deutschland nutzen kann. Ihre Idee: Die Stollen abdichten und als Unterbecken von Pumpspeichieranlagen umfunktionieren.

Eine „heiße“ Speichertechnologie testet Siemens gemeinsam mit Partnern gerade in Hamburg: Mit überschüssigem Strom soll ein Steinhaufen von einem gigantischen Föhn auf 600 Grad erhitzt werden. Bei Strombedarf saugen Lüfter die Hitze wieder heraus und leiten sie auf Turbinenschaufeln. In der kommerziellen Phase planen die Wissenschaftler dann enorme Steinhaufen aufzuschütten. Oder besser noch, bereits bestehende zu nutzen: Die Schlacke in stillgelegten Kohlekraftwerken bietet sich geradezu an. Hier ist auch die gesamte Infrastruktur bereits vorhanden.

Die Liste an potenziellen Speicherlösungen ist lang. Die Frage, welche der Technologien vielversprechend und bezahlbar ist, ist schwer zu beantworten. Bislang weiß man schlicht zu wenig über die Anforderungen und die Bedarfe. Zentraler Teil der Forschung am SWE und im WindForS-Netzwerk ist es daher, all diesen Fragen nachzugehen und sie im Verbund zu erforschen. Ziel ist es, herauszufinden, welcher Speicherbedarf überhaupt besteht. Einbezogen sind sämtliche Daten – angefangen bei den Wetter- und damit den Ertragsprognosen für den jeweiligen Standort über Smart-grid-Lösungen und die bedarfsgerechte Steuerung von Verbräuchen bis zu Lösungen, die sowohl den Wärme- als auch den Mobilitätsaspekt der Menschen miteinbinden. Fachleute sprechen hierbei von der Sektorenkopplung.

Eine der zentralen Fragen lautet: Wie verteilt man den Strom auf andere Sektoren um? Etwa in die Mobilität und in den Wärmebereich. Eine Antwort könnte lauten: Wasserstoff. Wassermole-



küle werden mit Ökostrom in einem Elektrolyseur in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, wobei der Wasserstoff gespeichert wird. In Fahrzeugen oder Gebäuden kann der Wasserstoff dann später in Brennstoffzellen in Wärme oder eben Strom für Elektromotoren umgewandelt werden.

Eine direktere Variante ist die Aerothermie. Dabei wird die Bewegungsenergie, etwa eines Windrads, direkt in Wärme gewandelt, beispielsweise über ein hydraulisches System. Vorteil einer solchen Anlage: Die Umwandlungsverluste durch den Generator und nachgeschaltete Prozesse entfallen. Das setzt allerdings voraus, dass Wärmeabnehmer vor Ort sind. Industriebetriebe, Gärtnereien oder Wohnsiedlungen bieten sich dazu an.

Um solche und weitere zukunftssträchtige Speicherszenarien grundlegend erforschen zu können, wird das WindForS-Testfeld auf der Schwäbischen Alb so angelegt, dass sich verschiedene Speicherlösungen integrieren lassen. Hier stellt die Kompetenz des WindForS-Partners ZSW, des Vorreiters der Power-to-Gas-Technologie, einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung des Energiekonzepts der Bundesregierung dar.

Denn das Ziel ist ehrgeizig: Bis 2050 sollen mindestens 80 Prozent unserer Energie aus regenerativen Quellen stammen. Das Generationenprojekt Energiewende und das hehre Ziel, dem Klimawandel Einhalt zu gebieten, ist eine Mammutaufgabe – aber eine, die die Zukunft unserer Kinder und Kindeskinde sichert.

Grundlastfähigkeit

Wie werden die Erneuerbaren verlässliche Größen?

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Ein Begriff taucht im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien immer wieder als Kritikpunkt auf: die mangelnde Grundlastfähigkeit. Sie bezeichnet in der Stromversorgung die Leistung, die konstant rund um die Uhr nachgefragt wird. In Deutschland sind das fast zwei Milliarden Kilowattstunden pro Tag. Zum Vergleich: Ein großes Windrad liefert bei guten Bedingungen rund 80.000 Kilowattstunden am Tag. Selbst ein mittleres Atomkraftwerk kommt nur auf rund 30 Millionen Kilowattstunden. Es braucht also viele Stromlieferanten.

Die Volatilität ist tatsächlich ein Manko der Erneuerbaren, allen voran der Windkraft und der Photovoltaik – scheint die Sonne oder bläst der Wind, fließt viel Strom. Und umgekehrt. Diese Fluktuation macht es schwierig, Wind und Sonne in den Strommix zu integrieren. Zwar sind die Wetterprognosen inzwischen recht verlässlich, man weiß also ziemlich präzise, wann wie viel Strom zu erwarten ist, doch kurzzeitige Schwankungen, etwa wenn ein Wolkenfeld über eine große PV-Anlage hinwegzieht, sind unvermeidbar. Genauso längere Perioden ohne Wind und Sonne.

Das heißt: Wind und Sonne sind nur begrenzt grundlastfähig. Doch gleichzeitig ist wahr: Mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung nimmt der Bedarf an klassischen Grundlastkraftwerken ab. Ferner ändert sich auch das Anforderungsprofil: Es geht schon bald nicht mehr darum, eine fixe Grundlast abzudecken, sondern Sonne und Wind flexibel und zuverlässig zu ergänzen, um den Strombedarf zu decken. Geothermie, Wasserkraft und Biogas sind da gute Gehilfen – ihre Leistung kann recht präzise eingestellt werden. Und im Verbund können die verschiedenen Öko-Kraftwerkstypen dann durchaus garantierte Mengen liefern. So gesehen sind auch die erneuerbaren Energien zu einem gewissen Anteil grundlastfähig. Aber eben nur über begrenzte Zeiträume. Insgesamt führt an Speicheranlagen also kein Weg vorbei.

Dennoch gibt es zahlreiche Lösungen, die den Speicherbedarf reduzieren. Um die Energiewende umzusetzen – die Bundesregierung hat den Kurs gesetzt: 80 Prozent Erneuerbare bis zum Jahr 2050. Gaskraftwerke können vor allem bei der Spitzenlast aushelfen, machen aber nur Sinn, wenn der Treibstoff regenerativ erzeugt wird. Fachleute sprechen von „Power to Gas“. So lässt sich mit Ökostrom über einen Elektrolyseprozess Wasserstoff erzeugen, der wiederum in Methan gewandelt werden kann. Man erhält Erdgas. Das lässt sich bekanntlich gut speichern und die gesamte Infrastruktur – Pipelines, Kraftwerke etc. – ist bereits vorhanden. Erste Testanlagen gibt es bereits. Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg widmet sich diesem Thema ausführlich und konnte schon viele Erfolge verzeichnen. In Wyhlen am Rhein soll eine Anlage entstehen, die Wasserkraft in Gas wandelt. Vorgesehen ist der Betrieb einer industriellen Ein-Megawatt-Anlage zur Herstellung von regenerativem Wasserstoff (eH₂), der als Kraftstoff für den Antrieb für Brennstoffzellenfahrzeuge zur Verfügung gestellt werden soll.

Manche Wissenschaftler wollen das Grundlastproblem mit innovativen Windturbinen lösen: mit einem sehr hohen Kapazitätsfaktor. Der beschreibt, vereinfacht gesagt, die Leistungsfähigkeit der Anlagen und berechnet sich aus dem Jahresenergieertrag in Kilowattstunden, geteilt durch das Produkt aus Nennleistung der Anlage multipliziert mit den 8.760 Stunden des Jahres. Sehr hohe Anlagen mit besonders langen Flügeln liefern besonders hohe Kapazitätsfaktoren. Solche Windturbinen fangen naturgemäß mehr Wind ein und liefern ihren Strom gleichmäßiger ins Netz

Doch um weite Teile Europas zu versorgen, reicht es nicht aus, einzelne Kraftwerke zu optimieren. Hier heißt die Devise: groß denken. Viele Ökokraftwerke, über ganz Europa verteilt, erhöhen die Versorgungssicherheit. Irgendwo scheint schließlich immer die Sonne und irgendwo bläst immer der Wind. Außerdem gibt es technische und wirtschaftliche Instrumente, die eingesetzt werden können, um den Verbraucher aktiv zu steuern. Solche Maßnahmen können Energieeffizienz sein, Demand Response, sowie tägliche oder stündliche Strompreisanpassungen, die den Verbraucher dazu bewegen, seinen Verbrauch dem Produktionsmuster von erneuerbaren Energien anzupassen. Man merkt: Auch in der Energiewelt führen viele Wege zum Ziel.



Windparks als Kraftwerk

Die Anforderungen ändern sich - eine Branche wird erwachsen

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Windparks sollen sich am besten verhalten wie fossile Kraftwerke. Sie sollen rund um die Uhr verlässlich Strom liefern. Diese Anforderung lässt sich am ehesten auf See mit gigantischen Windparks realisieren. Weit draußen, fernab der Küsten, wehen fast immer starke und beständige Winde.

Je größer die Windparks sind und je breiter sie sich geografisch verteilen, umso höher ist die Chance, dass sie uns verlässlich mit Strom versorgen. Denn großflächige Flaute, die sich vom Atlantik bis in die Ostsee ausdehnen, sind selten. Aber sie kommen vor. Die sogenannte „kalte Dunkelflaute“ ist das Schreckgespenst. Der Begriff wurde in einer Studie aus dem Jahr 2017 eingeführt. Er bezeichnet eine Situation, in welcher zum einen wegen Flaute und Dunkelheit wenig Strom aus Wind- und Solarenergie erzeugt wird, aber aufgrund kalter klimatischer Bedingungen eine besonders hohe Stromnachfrage besteht. Typischerweise tritt dieser Fall im Januar und/oder Februar ein.

Damit die Windbranche stets grundlastfähigen Strom liefern kann, müssen die Parks also maximal verzweigt und gut vernetzt sein. Dazu braucht es ein großes paneuropäisches Netz, das die Parks und die Verbraucher zusammenbringt. Eine erste Vorstellung, wie so etwas aussehen könnte, hat der Netzbetreiber TenneT: Der möchte künstliche Inseln in der Nordsee aufschütten und den Strom zahlreicher Offshore-Windparks einsammeln. So eine Insel soll sechs Quadratkilometer groß sein und als Verteil- und Drehkreuz im europäischen Stromnetz dienen. Die Niederlande, Großbritannien, Belgien, Norwegen, Deutschland und Dänemark zählen für TenneT dazu. Wann und ob dieses Vorhaben realisiert wird, ist allerdings noch offen.

Man sieht, die Windkraft wird erwachsen und muss sich den Herausforderungen stellen. Geht es nach den Energiekonzernen und den Windturbinenherstellern, dann hätten wir wohl längst deutlich mehr Windparks auf See. Doch der Netzausbau hinkt dem Vorhaben hinterher. Er ist der klassische „Bottleneck“, der viel beschworene Flaschenhals.

linke Seite:
Triple Spar-Konzept
für schwimmende
Windenergieanlagen

Stromübertragung

Wie kommt der Strom in die Steckdose?

Ausblick -
Zukunft der Windkraft und
der Erneuerbaren Energien

Um den Strom all der Windenergieanlagen, die vor allem im hohen Norden der Republik oder gar auf hoher See stehen, verlustarm zu den Verbrauchern im Süden zu transportieren, müssen dringend neue Fernleitungen gebaut werden. Gleiches gilt für die im Süden Deutschlands konzentrierte Photovoltaik. „Ohne Netzausbau kein Ausbau der Erneuerbaren“, bringt es Po Wen Cheng auf den Punkt.

Doch da Freilandleitungen aufgrund der geringen Akzeptanz, des immensen Eingriffs in die Natur und der hohen Verluste kaum noch eine Chance haben, müssen neue Lösungen her. Favorisiert wird derzeit die sogenannte Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, kurz HGÜ. Diese Leitungen werden unterirdisch verlegt. So stören sie das Landschaftsbild weniger, was die Akzeptanz erhöht. HGÜ-Leitungen arbeiten mit extrem hohen Spannungen von 500.000 und mehr Volt. Das reduziert die Verluste. In China wurden bereits Leitungen gebaut, die mit sagenhaften 1000 Kilovolt arbeiten – das sind eine Million Volt – und Distanzen von mehreren Tausend Kilometern überbrücken.

Im Projekt Südlink, einer Stromtrasse, die von Brokdorf im Norden bis in die Nähe Schweinfurts in Süddeutschland führt, kommt eine HGÜ-Leitung zum Einsatz. Der erste Abschnitt könnte 2024 fertig sein. Doch auch das Verlegen von HGÜ-Leitungen ist alles andere als minimalinvasiv: Da die einzelnen Kabel heiß werden, müssen sie mit großen Abständen im Boden verlegt werden. Auch dafür müssen breite Trassen angelegt werden – sprich Schneisen in Wälder geschlagen werden.

Eleganter sind da die sogenannten Supraleiter. Diese arbeiten quasi verlustfrei und können enorme Strommengen bei geringen Kabelquerschnitten transportieren.

Supraleitfähigkeit kommt nur bei bestimmten Materialien vor. Vielversprechend ist das erst 2001 entdeckte Magnesiumdiborid (MgB₂). Solche Materialien verlieren unterhalb einer charakte-



Windenergieausbau
und Stromnetzausbau
müssen gleichzeitig
vorangetrieben
werden

ristischen Temperatur ihren Widerstand. Dieser Effekt kommt je nach Material zwischen minus 273 und minus 143 Grad Celsius zustande. Damit die Leitungen den Effekt erreichen, müssen sie also künstlich gekühlt werden. Für Fernleitungen müssen also regelmäßig Kälteereglerstationen eingebaut werden – vergleichbar mit den Verdichterstationen bei Erdgasfernleitungen.

Ganz neu ist die Technologie dennoch nicht. Supraleitende Stromkabel sind längst im Einsatz: Etwa in der medizinischen Bildgebung (Magnetresonanztomografie, kurz MRT) oder in Generatoren und Teilchenbeschleunigern.

Die „Kabel“ lassen sich teils sogar in bestehenden Leitungsschächten verlegen. Da Supraleiter aber extrem teuer sind, eignen sie sich besonders für das Verteilen des Stroms in Stadtgebieten. Bislang gibt es allerdings nur Pilotanlagen. Immerhin: Ein ein Kilometer langes Kabel liegt bereits in Essen. In Zukunft könnte diese Technologie vermehrt zum Einsatz kommen – und den Erneuerbaren, allen voran der Windkraft, einen größeren Stellenwert zuweisen.

Der Netzausbau geschieht nicht nur auf der Hochspannungsebene, um Offshore-Windstrom von Norden nach Süden zu transportieren, sondern auch auf der Niederspannungsebene. Die meisten Photovoltaikanlagen auf Dächern werden in das Niederspannungsnetz eingespeist, und bei sonnigem Wetter entsteht auch hier ein Engpass, denn in der guten alten Energiewelt war das Verteilernetz nur für das Verteilen von Strom gedacht, nicht für das Einsammeln. Durch die Installation von Solarpanelen wird jeder Hausbesitzer nicht nur Energieverbraucher, sondern gleichzeitig auch Energieproduzent.

Letztlich macht die Anzahl der dezentralen Energieerzeuger das Energiesystem komplexer. Doch auch dieser Trend ist den Stuttgartern bewusst: Es ist ein wichtiges Thema innerhalb des Forschungsverbunds WindForS.

Helfen, die Netze in Extremsituationen zu entlasten und sich somit den Bau teurer Übertragungsleitungen zu sparen, könnte auch die Verschiebung der Lasten. Fachleute sprechen von der Sektorenkopplung. So könnten Elektroautos nachts betankt werden, Kühlhäuser könnten nachts stärker abgekühlt werden und tagsüber „auftauen“, energieintensive Industrien könnten ihre Arbeiten ausführen, wenn viel Strom vorhanden ist und in stromarmen Zeiten weniger Last abrufen. Das alles setzt allerdings das heiß diskutierte „smart grid“ voraus – ein digitales Stromnetz, das stets weiß, wie viel Energie benötigt wird und wie viel vorhanden ist. Und dann auch noch steuert, wer wie viel Strom zugewiesen bekommt.

rechte Seite:
Im EU-Projekt FLOATGEN
entwickelter Prototyp
einer schwimmenden
Windenergieanlage



Schlusswort von Lehrstuhlinhaber Po Wen Cheng



Wie geht es nach zehn erfolgreichen Jahren Stiftungslehrstuhl am SWE weiter? Und wie wird sich die Windenergie in den nächsten 20 Jahren entwickeln?

Die Geschichte hat uns gelehrt, dass der Mensch nicht besonders gut darin ist, Aussagen über die Zukunft zu treffen. Das liegt daran, dass die Unsicherheiten in komplexen Systemen sehr groß sind und die Entwicklung von sehr vielen Faktoren abhängt. Nichtsdestotrotz kann man sich anhand der Tendenzen und aktuellen Entwicklungen ein Bild von der Zukunft machen. Das will ich versuchen.

Windige und sonnige Zukunft

Um eine Aussage über die Zukunft der Windenergie treffen zu können, müssen wir uns zunächst mit der Zukunft der Energie an sich beschäftigen. Seit dem Pariser Klimaabkommen ist klar, dass unser Energiesystem nach und nach auf erneuerbare Energie umgestellt werden muss. Bis vor Kurzem noch wurden erneuerbare Energien als eine Art Spielzeug oder Luxus von industrialisierten und wirtschaftlich reichen Ländern angesehen. Das hat hauptsächlich damit zu tun, dass die Energiegestehungskosten von erneuerbaren Energien höher waren als die von konventionellen Energiesystemen. Doch das hat sich verändert. Die schnell fallenden Kosten der Windenergie und der Photovoltaik haben dazu beigetragen, dass diese wirtschaftlich immer konkurrenzfähiger geworden sind – auch ohne Subventionen des Staates. In sonnigen Ländern wird Strom aus Photovoltaik bereits für unter drei Eurocent angeboten. Auch die Kosten von Offshore-Wind fallen viel schneller als erwartet. Für das Jahr 2023 wurde unlängst Offshore-Windstrom angeboten, ohne jegliche Subvention. In diesem Fall erhält der Betreiber des Windparks lediglich den Preis, der auf dem Strommarkt angeboten wird. Wir dürfen nicht vergessen: Wir reden hier von Preisen, die bis vor wenigen Jahren undenkbar waren! Das brachte nun auch zunehmend Entwicklungsländer dazu, verstärkt auf die Windkraft und die Photovoltaik als echte

Alternativen zu Kohle und Gas zu sehen. Und das nicht nur, weil sie besser für die Umwelt sind, sondern weil die erneuerbaren Energien schlicht wirtschaftlicher sind.

Von dem weltweit wachsenden Markt der erneuerbaren Energien haben die Windenergie und die Photovoltaik am stärksten profitiert. Wegen der standardisierten Fertigung und des modularen Aufbaus kann man die Komponenten und Systeme immer kostengünstiger fertigen. Und je größer der Markt wird, desto schneller fallen die Preise. In den meisten Ländern werden die Windkraft und die Photovoltaik zusammen den Hauptanteil an erneuerbarem Strom stellen. Diese dominante Rolle wird in Zukunft umso stärker verfestigt, je schneller die Kosten fallen, was von allen Seiten als selbstverständlich angenommen wird.

Die Fragen, die wir uns stellen, lauten: Wie schnell kann der Markt wachsen und wie schnell werden die Kosten sinken? Diese beiden Fragen lassen sich nicht getrennt beantworten, da die eine die andere verstärkt. Ein moderates Wachstum wird von hoch entwickelten Märkten erwartet, da der Energiebedarf langsamer steigt oder sogar sinkt. In Entwicklungsländern hingegen wachsen die Märkte schnell. Vor allem wegen des steigenden Energieverbrauchs und des hohen Bevölkerungswachstums. Die Wachstumsrate hängt wiederum sehr stark von der Politik und von den Rahmenbedingungen des jeweiligen Marktes ab. Im Moment, nach dem Pariser Klimaabkommen, kann man von einer tendenziell positiven Entwicklung sprechen, die weiterhin für einen schnell wachsenden Markt bei der Windenergie und der Photovoltaik spricht. Ein weiterer Faktor, der zu schnellen Kostensenkungen der beiden Energiequellen geführt hat, ist die Verschiebung vom festen Einspeisungstarif zur Ausschreibung. Allgemein kann man sagen, dass die Ausschreibung als Marktinstrument ihr Ziel, die Kosten durch Wettbewerb schneller zu senken, erreicht hat. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Unsicherheiten und die Risiken für die Investoren gestiegen sind. Das kann kurzfristig zu geringerem Wachstum führen, ehe sich die Investoren mit den neuen Marktbedingungen zurechtgefunden haben.

Sektorenkopplung

Ein anderer Faktor, der das Wachstum von Wind und Photovoltaik beeinflussen kann, ist die Kopplung mit anderen Sektoren. Bis jetzt spielen die Windenergie und die Photovoltaik nur beim Strom eine wichtige Rolle. Das kann sich in den nächsten Jahrzehnten stark ändern. Die Elektrifizierung der Mobilität rollt

unaufhaltbar voran: durch den Verlust an Vertrauen, vor allem wegen der Emissionskennwerte von Verbrennungsmotoren und durch politische Überlegungen, die Verbrennungsmotoren in Zukunft ganz zu verbieten. Ein wichtiger Impulsgeber hierbei könnte China sein – der wichtigste Automarkt der Welt: Wenn China den Verbrennungsmotor verbietet, dann werden andere nachziehen. Dass diese Entscheidung politische, wirtschaftliche und genauso Facetten des Umweltschutzes in sich trägt, ist unbestreitbar. Die direkte Auswirkung ist der beschleunigte Übergang zur Elektromobilität – und zum erhöhten Strombedarf.

Die Kopplung mit der Elektromobilität bringt auch Vorteile für die Wind- und Sonnenenergie, indem die Variabilität der Stromerzeugung durch die Batterien in den Elektrofahrzeugen reduziert werden kann. Außerdem benötigen die Elektrofahrzeuge grünen Strom aus Wind und Sonne, um bei den Ökobilanzen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren besser dazustehen.

Auch die Kopplung mit anderen Sektoren ist erwünscht, wenn die erneuerbaren Energien den Energieverbrauch nachhaltiger gestalten sollen. Eine Elektrifizierung des Energieverbrauchs kann die Energieeffizienz steigern, da Umwandlung von elektrischer Energie in nützliche Arbeit gegenüber auf fossiler Energie basierten Systemen sehr effizient sein kann. Zusätzlich kommt hinzu, dass die aktive Steuerung von Energieverbrauch in Form von Wärme und Arbeit die Effekte von variabler Stromerzeugung mindern kann.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass das Wachstum der Windenergie und der Photovoltaik in den kommenden Jahrzehnten weiter voranschreiten wird. Doch wie groß die Wachstumsrate sein wird, kann niemand präzise sagen, da die beeinflussenden Faktoren vielfältig sind.

Vielfältigkeit der Windenergie

Die Onshore- und die Offshore-Windenergie wachsen mehr und mehr auseinander, da die Anforderungen sehr unterschiedlich sind. Um die Kostensenkungsziele zu erreichen, werden immer größere Anlagen gefragt sein. Zehn-Megawatt-Windturbinen stehen bereits vor der Tür und 15-MW-Anlagen werden kaum mehr als Zukunftsmusik angesehen. Die Frage ist, wie groß kann eine Offshore-Anlage werden? Den genauen Wert kann derzeit keiner klar benennen. Klar ist: Eine immer größer werdende Windkraftanlage stellt neue Herausforderungen an die



Professor h.c. Schlecht,
Professor Gasch
und Professor Kühn
beim SWE Symposium

Herstellung der Komponenten, die Logistik und die Installation. Der Kosteneinsparung durch weniger Anlagen, Fundamente, Transport- und Installationsvorgänge stehen teurere Einzelanlagen, höhere Mobilisierungskosten für leistungsfähigere Schiffe gegenüber, um nur ein paar Kriterien zu nennen. Das Kostenoptimum ist ein Kompromiss zwischen oft widersprüchlichen Kriterien, und kann sich wegen der technischen Fortschritte wie auch der gestiegenen Verfügbarkeit von Installationsschiffen verschieben.

Innerhalb der Offshore-Windenergie ist die Entwicklung von schwimmenden Windenergieanlagen für die Zukunft interessant. Es öffnet neue Standorte mit großer Wassertiefe, die für bodenfeste Fundamente zu unwirtschaftlich sind. Für die Nordsee ist das weniger relevant, da dort genügend Standorte mit geringer Wassertiefe, bis circa 50 Meter, vorhanden sind. Für viele andere Länder könnten schwimmende Fundamente aber das Potenzial der Offshore-Windenergie deutlich erhöhen. Technisch betrachtet kann man sicher sein, dass schwimmende Windenergieanlagen mit der heutigen Technologie machbar sind. Die große Herausforderung ist die notwendige Kostensenkung, um schwimmende Windparks wirtschaftlich zu betreiben. Die Forschung kann der Industrie dabei helfen, das Verhalten von schwimmenden Anlagen in unterschiedlichsten Umweltbedingungen zu verstehen, etwa lässt sich durch prädiktive Regelung das Anlagenverhalten aktiv steuern. Genauso lassen sich Methoden entwickeln, die Struktur für einzelne Standorte zu

optimieren. Eines kann man schon heute voraussagen: Die Kostensenkungseffekte können nur signifikant sein, wenn entsprechende Marktgrößen vorhanden sind. Hier ist die aktive Marktsteuerung für Floating Wind notwendig, um die Kostenreduktion in Gang zu setzen. Man kann hierbei viel von den Entwicklungen der Offshore-Windenergie lernen, wo Kostenreduktionsziele in sehr kurzer Zeit erreicht wurden. Mit kompetitiven Kosten für Floating Wind kann der gesamte Offshore-Markt noch stärker wachsen und Synergieeffekte für die Offshore-Windenergie mit bodenfester Gründung kreieren.

Auch bei den Onshore-Windenergieanlagen geht der Trend hin zu größeren Maschinen. An Land werden zurzeit relativ große Rotordurchmesser von 140 bis 150 Meter eingesetzt, bei gleichzeitig relativ kleinen Generatoren von vier bis fünf Megawatt. Das ist der höheren Energieausbeute bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten geschuldet. Dadurch kann man den Kapazitätsfaktor deutlich erhöhen. Ein höherer Kapazitätsfaktor verbessert wiederum die Wirtschaftlichkeit der Windenergienutzung an Schwachwindstandorten. Auch die Akzeptanzfrage wird immer wichtiger, da angesichts der Größe der Anlagen von über 200 Metern die Wahrnehmung in der Landschaft deutlich gesteigert wird. Letztlich ist es eine Frage der Präferenz. Denn größere Anlagen bedeuten weniger Anlagen. In Moment sind in Deutschland über 27.000 Windenergieanlagen am Netz. Würde man all diese Turbinen durch moderne Fünf-Megawatt-Maschinen ersetzen, dann hätten wir über 100 Gigawatt installierte Leistung – so haben wir nicht einmal die Hälfte davon: Ende 2016 waren bundesweit lediglich 45.910 Megawatt am Netz.

Wie also sieht die ferne Zukunft die Windenergie aus? Werden die Windenergieanlagen den heutigen Entwicklungstrend fortsetzen und einfach größer und höher werden, oder kann noch etwas wirklich Neues entstehen und die Windenergieanlage, so wie wir sie heute kennen, ersetzen?

Das kann natürlich niemand mit Sicherheit vorhersagen. Das heutige Konzept: drei Rotorblätter, die sich auf der dem Wind abgewandten Seite drehen, horizontale Drehachse, variable Drehzahl mit Pitch-Regelung, ist sehr erfolgreich, weil die Ingenieure über die Jahre das Konzept immer wieder verbessert haben. Und das sowohl hinsichtlich der Effizienz und der Skalierbarkeit als auch hinsichtlich der Herstellungsverfahren, sodass andere konkurrierende Konzepte kaum eine Chance auf Erfolg hatten. Ein bekanntes Beispiel ist der Vertikalachser. Die



Wellentanktest
im Projekt
Triple Spar

Fertigungskette für das heutige Konzept ist auf Kosteneffizienz ausgelegt und ein konkurrierendes Konzept muss sich diese Kostenreduktion erst erarbeiten. Das ist ohne hohe Stückzahlen kaum möglich.

Heißt das, dass bei Windenergie nichts Neues mehr entstehen kann? Nein, natürlich nicht. Eine ferne Möglichkeit sind fliegende Windkraftwerke, die auf großen Drachen basieren. Hier hat man es mit einem radikal neuen System zu tun. Ein System, bei dem hohe Kosteneinsparungen möglich sind. Der Materialbedarf kann wesentlich geringer sein als bei einer konventionellen Windenergieanlage. Gleichzeitig gibt es natürlich eine Menge Herausforderungen, die man noch überwinden muss, bevor man die Flugwindkraft als echte Alternative zum heute etablierten Windkraftkonzept anerkennen kann. Das wird nicht in den nächsten fünf Jahren passieren, sondern bedeutet 15 bis 25 Jahre intensiver Forschung und Entwicklungsarbeit. Man muss bedenken, dass die Messlatte bei den Energiegestehungskosten von Windturbinen sehr hoch liegt. Das bedeutet wiederum, dass jeder Herausforderer an diesem Maßstab gemessen wird. Bekanntlich ist nichts unmöglich, aber definitiv muss sich jede neue Technologie dem Beweis stellen, dass sie eine sichere und kostengünstigere Energieerzeugung anbietet als die gute alte Windturbine.

Rolle des SWE – was muss der Lehrstuhl verändern, um in 20 Jahren noch an der vordersten Front der Windenergieforschung zu sein?

Als Forscher muss man Technologietrends frühzeitig erkennen und das Potenzial durch Forschung ausschöpfen. Offshore-Windenergie, LiDAR-Technologie zur Windmessung und für die prädiktive Regelung, genauso schwimmende Windenergieanlagen sind gute Beispiele aus den vergangenen 20 Jahren am SWE. Beim LiDAR und den schwimmenden Windenergieanlagen gibt es noch viele offene Forschungsfragen, die beantwortet werden müssen. Wie kann man mit LiDAR die Turbulenz, Windscherung und die dreidimensionale Windgeschwindigkeit genauer bestimmen? Bei den schwimmenden Windenergieanlagen gibt es neue Herausforderungen bezüglich der Steuerung und Regelung der Anlage, um die Bewegung des schwimmenden Fundaments zu reduzieren. Der Nachlauf von schwimmenden Windenergieanlagen und deren Einfluss auf die Lasten der benachbarten Anlagen sind bislang wenig bekannt, da es noch keinen Windpark mit schwimmenden Anlagen gibt. Der SWE möchte sich in Zukunft weiterhin mit diesen beiden Themen intensiv beschäftigen und sich aufbauend auf den vorangegangenen Arbeiten damit international profilieren.

Eine der Stärken des Windenergie-Lehrstuhls ist die enge Kooperation mit der Industrie. Das bedeutet, dass sich die Forschungsthemen stark an der Anwendung orientieren. Das wiederum weckt Synergien zwischen Forschung und Anwendung, gleichzeitig birgt es die Gefahr, dass man schnell von der Industrie überholt werden könnte, weil der Vorsprung auf der Forschungsseite nicht ausreichend groß ist. Daher sollte man sich mit längerfristigen Zukunftsperspektiven auseinandersetzen. Etwa: Wie könnte die Windenergienutzung in 20 Jahren aussehen? Welche Technologien könnten nach vorne drängen, die heute noch als unwirtschaftlich gelten? Technologien, die zwar für bestimmte Anwendungen Potenzial bieten, sich aber aus Kostengründen bislang nicht durchsetzen konnten. Ich denke beispielsweise an Zweiblatt-Windenergieanlagen, Vertikalachser oder Gezeitenströmungsmaschinen. Mit einigen dieser Themen hat sich der SWE bereits intensiv beschäftigt. Denn die Forschung sollte sich nicht nur an der direkten wirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Rechnung orientieren, sondern auch am Erkenntnisgewinn und an dem Mut für Innovation. Ohne die notwendige wissenschaftliche Erkenntnis kann man keine Aussage über die Wirtschaftlichkeit treffen. Und ohne den Mut zur Innovation wird man nur inkrementelle Verbesserungen errei-

chen. Daher werden wir uns am SWE weiterhin auch mit Themen beschäftigen, die gemeinhin als risikoreich gelten, aber hohes technisches Potenzial bieten. Eine dieser Ideen könnte die Flugwindenergie sein. Diese Technologie könnte die Windkraft in Zukunft revolutionieren, sie kann aber genauso gut, aufgrund der technischen Entwicklungen oder der sonstigen Rahmenbedingungen in der nahen Zukunft einen jähen Absturz erleben.

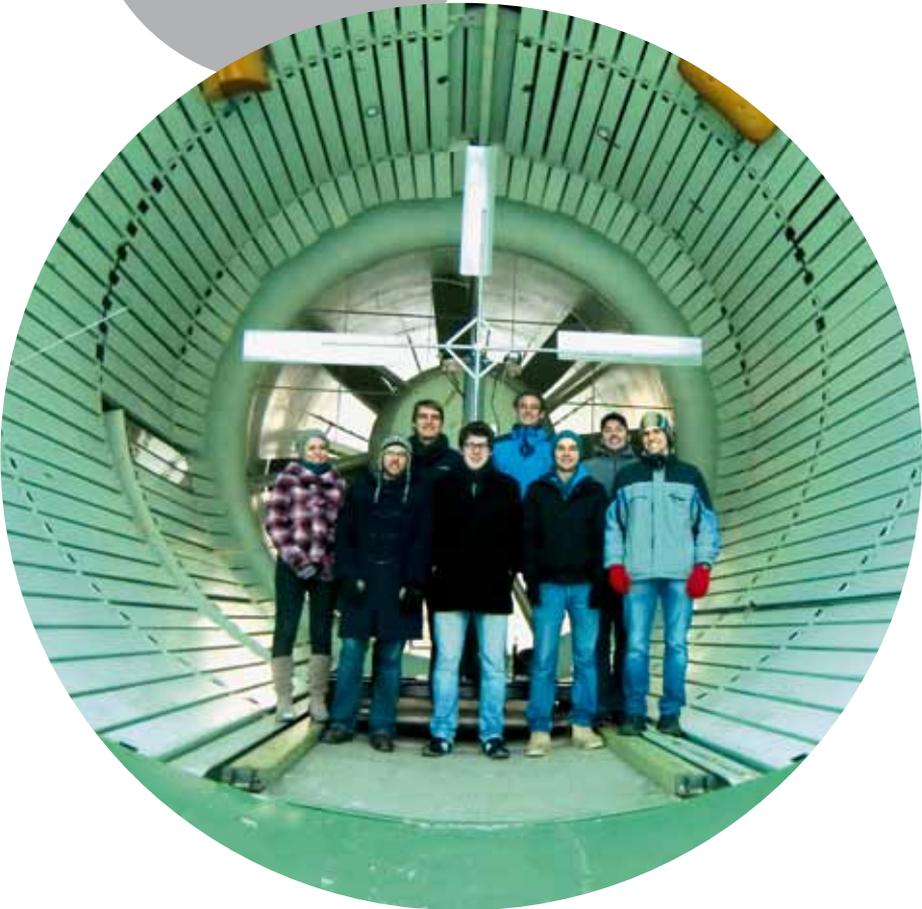
Die Aufgabe der Forschung am SWE sollte darin bestehen, Synergien mit der bestehenden Windenergieforschung zu schmieden und die Expertise aus Forschungsbereichen innerhalb des Instituts und der Fakultät der Luft- und Raumfahrttechnik einzubinden. Diese können zum Beispiel Flugzeugbau, Leichtbau, Aerodynamik und Flugregelung sein. Es wird keine einfache Aufgabe sein, eine eigene Plattform aufzubauen, aber ohne Risiko wird es keine Innovation geben.

In der Zukunft wird das Zusammenspiel von verschiedenen Bestandteilen des Energiesystems immer wichtiger. Am Anfang der Windenergieentwicklung hat man sich viel mit Bauteilen wie Turm, Generator, Blatt etc. beschäftigt. Dann fängt man an, die Windturbine als System zu betrachten, die Interaktion zwischen den verschiedenen Komponenten und der Regelung wie auch die Interaktion zwischen turbulenter Windströmung und der gesamten Anlage. Diese Systemorientierung weitet sich auch bis auf den Windpark aus. Denn es macht Sinn, einen Windpark als Ganzes zu modellieren, um die Interaktionen zwischen den einzelnen Anlagen zu erfassen.

In der Zukunft wird der Systemgedanke mehr an Bedeutung gewinnen. Denn je mehr dezentrale Energiesysteme ans Netz angeschlossen werden, desto komplexer wird das Gesamtsystem. Hinzu kommt, dass die Verbraucher mehr Flexibilität fordern und höhere Anforderungen haben, etwa durch die intelligente Steuerung von Geräten oder eine gesteigerte Leistungsanforderung für das Laden von Elektrofahrzeugen. Als Endziel könnte man sich „Dispatchable Renewable Energy“ vorstellen – eine stets abrufbare erneuerbare Energienerzeugung durch Systemintegration von verschiedenen Technologien. Das muss nicht immer mit Energiespeichern verbunden sein, sondern es geht darum, innovative Lösungen zu finden, die ein wirtschaftliches Optimum für das System darstellen und gleichzeitig die Zuverlässigkeitsanforderung für die Energieversorgung gewährleisten.

”

Das Windenergieprojekt gibt den Studenten die Möglichkeit, das theoretische Wissen in die Praxis umzusetzen.





Schlusswort
von Lehrstuhlinhaber
Po Wen Cheng

Unser Ziel ist es, ...
kritisch denkende Köpfe
mit neuen Ideen zu
fördern und so die
Zukunft der Gesellschaft
mitzugestalten.



Was also ist die Rolle des SWE?

Die Rolle eines Lehrstuhls ist nicht nur die Forschung, sondern auch die, den Studierenden eine hochwertige Ausbildung anzubieten. Es ist ein kontinuierlicher Prozess, die Qualität der Ingenieurausbildung ständig zu verbessern, durch die Einbindung von Forschungsprojekten und dabei die Praxisrelevanz der Lehrinhalte nicht aus den Augen zu verlieren. Die Anforderungen für die Absolventen ändern sich mit dem gesellschaftlichen Wandel und der Digitalisierung. Es ist Aufgabe jeder Bildungseinrichtung, die Studierenden auf die Anforderungen der digitalen Gesellschaft vorzubereiten und sie mit den notwendigen Fähigkeiten auszustatten. Dazu gehören nicht nur Fachkenntnisse, sondern auch die Fähigkeit, sich kritisch mit neuen Technologien auseinanderzusetzen. Denn neue Technologien bringen meistens auch moralische und ethische Fragen und Implikationen mit sich, die oftmals von Ingenieuren vernachlässigt werden. Unser Ziel ist es, keine Knechte für die Industrie zu schaffen, sondern kritisch denkende Köpfe mit neuen Ideen zu fördern und so die Zukunft der Gesellschaft mitzugestalten.

Durch die zehnjährige Stiftungsperiode hat die Karl Schlecht Stiftung eine nachhaltige Basis für die Windenergieforschung in Süddeutschland geschaffen. Die Anfangsjahre waren nicht immer einfach und die Herausforderungen für die Zukunft sind nach wie vor ein Thema sowohl für die Forschung als auch die Lehre. Nichtsdestotrotz blicken wir mit Zuversicht in die Zukunft.

An dieser Stelle möchten wir uns bei der Universität Stuttgart und der Karl Schlecht Stiftung für die kontinuierliche Unterstützung der Studierenden und der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bedanken. Ebenso hervorzuheben sind die Verdienste meines Vorgänger Prof. Martin Kühn und sein Einsatz während des Aufbaus des Lehrstuhls. Dankbar sind wir auch für die finanzielle Unterstützung unserer Forschungsprojekte seitens der Landes- und Bundesministerien, der Europäischen Union und unserer Industriepartner. Wir sind überzeugt, dass die Windenergie, die eine lange Tradition in Stuttgart hat, weiterhin einen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung und damit auch für eine bessere Welt für zukünftige Generationen leisten kann.

Impressum

HERAUSGEBER

Sonderdruck der Karl Schlecht Stiftung (KSG)
Gutenbergstraße 4
72631 Aichtal

AUTOR

Daniel Hautmann

GESTALTUNG

Antje Geisel
www.grafibuero-wuerzburg.de

RECHTE

Alle Rechte vorbehalten. Der auszugsweise oder teilweise Nachdruck oder eine Vervielfältigung sind untersagt und werden als Verstoß gegen das Urheberrechtsgesetz verfolgt. Alle Angaben erfolgen nach bestmöglicher Information, jedoch ohne Gewähr für die Richtigkeit.

DRUCK

Flyeralarm

STAND

November 2017

Abb. Titelseite:
Long Range Lidar
im Baltic I-Offshore-
Windpark

Abb. Rückseite:
Windmessung im
komplexen Gelände
mit unterschiedlichen
Messtechniken

BILDNACHWEIS:

- S. 9 / Professor Cheng, Professor h.c. Schlecht, Professor Kühn:
Klaus Wolter, Fotografie Klaus Wolter
- S. 41 / Windenergieanlage im Offshore-Windpark Alpha Ventus: Hans- Peter Link, DNV GL
- S. 54 / Offshore-Windmessung mit schwimmendem Lidargerät: Frieder Schuon, IREC
- S. 59 / Flugwindkraftanlage von EneKite: EneKite
- S. 63 / Kopplung Elektromobilität-Energiespeicher-Windenergie: Fotolia
- S. 66 / Triple Spar-Konzept für schwimmende Windenergieanlagen:
Fotomontage mit Hintergrundbild von EnBW Baltic I, EnBW
- S. 69 / Windenergieausbau und Stromnetzausbau: Fotolia
- S. 72 / Professor Cheng beim Symposium für die Emeritierung von Prof. van Kuik TU Delft:
Leen Vlasblom, CFD fotografie, Den Haag
- S. 75 / Professor h.c. Schlecht, Professor Gasch und Professor Kühn beim SWE Symposium:
Klaus Wolter, Fotografie Klaus Wolter
- S. 77 / Wellentanktest im Projekt Triple-Spar: Henrik Bredmose, DTU
- Bildrechte: soweit nichts anderes vermerkt ist, liegen die Bildrechte bei der Universität Stuttgart



Der Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) ist als Lehrstuhl am Institut für Flugzeugbau der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart verankert. Der SWE ist der erste universitäre Lehrstuhl für Windenergie in Deutschland, wurde 2004 gegründet und beruht auf einer Stiftung von Dipl.-Ing. Karl Schlecht, Gründer der Putzmeister AG, Aichtal. Durch die Zusammenarbeit innerhalb der Universität, mit Unternehmen, Hochschul- sowie Forschungseinrichtungen wird die Nutzung der Windenergie und anderer erneuerbarer Energiequellen aktiv gefördert. Prof. Po Wen Cheng ist seit 2011 Leiter des Lehrstuhls. In der Forschung konzentriert sich der SWE auf das Systemverständnis von Windenergieanlagen. Übergeordnete Forschungsziele sind die Erhöhung der Zuverlässigkeit und die weitere Senkung der Energieerzeugungskosten von Anlagen, die Windstrom in das internationale elektrische Verbundnetz einspeisen.



Kontakt

Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie
Allmandring 5B
70569 Stuttgart
Telefon 0711 6856-8253
Telefax 0711 6856-8293
swe@ifb.uni-stuttgart.de
www.uni-stuttgart.de/windenergie



Kontakt

Karl Schlecht Stiftung (KSG)
Gutenbergstr. 4
72631 Aichtal
Telefon 07127 599-256
Telefax 07127 599-404
info@ksfn.de
www.ksfn.de