

TRANSFORMATION DER ENERGIESYSTEME

EIN BEITRAG ZU NACHHALTIGER ENERGIE FÜR ALLE

Eine moderne und effiziente Energieversorgung ist eine Grundvoraussetzung für Entwicklung. Die gegenwärtig auf fossile Brennstoffe basierende Energieversorgung verursacht zwei Drittel aller CO₂-Emissionen. Zudem ist sie unwirtschaftlich, teuer und macht Energie nicht für alle Menschen überall auf der Welt zugänglich. Wie können wir den nachhaltigen Umbau des Energiesystems voranbringen und Pfadabhängigkeiten beenden? Welche technologischen Optionen stehen bereit, wie sehen die politischen und sozialen Voraussetzungen dafür aus? Wie können wir Innovationen und Erkenntnisse auf internationaler Ebene nutzbar machen?



ie Bewohner der nordfriesischen Küstengemeinde Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog verstehen sich darauf, die Natur zu ihren Gunsten zu nutzen. Anfang der 1990er-Jahre gründeten diese "Energiepioniere" den ersten Bürgerwindpark Deutschlands. In den vergangenen Jahren spielte die Gemeinde auch beim Pro-Kopf-Ertrag für Solarenergie immer wieder deutschlandweit in der Spitzenliga der erneuerbaren Energien mit. Erfolg ist ansteckend: Inzwischen ist ganz Nordfriesland zur Modellregion der deutschen Energiewende geworden. An der Küste im Nordwesten gibt es Sonne und Wind in Hülle und Fülle, die Nordfriesen haben sie genutzt, um aus ihrer Region innerhalb weniger Jahrzehnte einen Wirtschaftsstandort für erneuerbare Energien mit einem Umsatz in Millionenhöhe zu machen. Heute drehen sich 679 Windturbinen in der weiten, flachen Landschaft.

Was bei dieser Entwicklung besonders

95%

der erneuerbaren Energiequellen sind in Bürgerhand im Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog.

Damit das funktioniert, wurden die Einwohner von Anfang an in die Energiewende einbezogen. Und sie beteiligen sich kontinuierlich und intensiv. Bei der Finanzierung, Planung und Durchführung des Projekts wirken Einheimische aktiv mit und engagieren sich auch bei der stehen dabei im Mittelpunkt. Betriebsführung.

Diese von der Gemeinde gesteuerte Initiative ist beispielhaft für die Energiewende: Bundesweit sind fast 87 Prozent der 53 Gigawatt (GW) liefernden Anlagen für erneuerbare Energien nicht etwa im Besitz großer Energieversorger, sondern in der Hand kleinerer Akteure. Fast die Hälfte der Kapazität entfällt auf private Haushalte, Landwirte und Kooperativen. Der Rest verteilt sich auf kleine Unternehmen, unabhängige Projektentwickler sowie Investmentfonds und Banken.

Die starke Diversifizierung der Akteure und Energiequellen im deutschen Energiesystem ist weltweit einzigartig und wirft knifflige Fragen auf.

Wie können wir den Energiemarkt der Zukunft mit so vielen unterschiedlichen Akteuren und hoher Bürgerbeteiligung steuern? Wie lösen wir die vielfältigen technischen Probleme, die sich stellen, wenn der Strommix eines Landes weitgehend von dezentralen, schwankenden Energiequellen wie Wind und Sonne gespeist wird? Wie kann technischer Fortschritt beitragen, unser heutiges höchst ineffizientes und auf fossilen Brennstoffen basierendes Energiesystem nachhaltiger zu machen? Wie muss ein Strommarkt aussehen, der auf erneuerbare Energien setzt?

Mit unserer Forschung begleiten wir diesen Wandel und tragen zu diesem Prozess bei. Fragen und Lösungen zur politischen, ökologischen und sozialen Planung von Energiesystemen sowie zu technischen Innovationen für eine Zukunft mit erneuerbaren Energien

TRANSFORMATION ALS **GEMEINSCHAFTSWERK: DIE ENERGIEWENDE**

Der Aufbau nachhaltiger Energiesysteme ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Im September 2011 forderte der Generalsekretär der Vereinten Nation (VN), Ban Ki-moon, Maßnahmen, die bis 2030 eine Welt mit nachhaltiger Energie für alle ermöglichen: Zugang zu modernen Energiedienstleistungen für alle Menschen, die Verdoppelung der globalen Effizienzsteigerungsrate sowie die Verdoppelung des Anteils erneuerbarer Energien am weltweiten Energiemix. Inspiriert von dieser Vision, gründeten wir im März 2012 die Plattform Energiewende (TPEC) im Cluster Globaler Gesellschaftsvertrag für Nachhaltigkeit (GCS) unter Leitung von Klaus Töpfer, um die nationale und internationale Energiewende wissenschaftlich zu begleiten.

Eine wesentliche Prämisse der Arbeit von TPEC wurde durch die Ethikkommission "Sichere Energieversorgung" angeregt. Diese 2011 von Kanzlerin Angela Merkel einberufene Kommission unter der Koleitung unseres eine sozial verträgliche, nachhaltige Energie-Exekutivdirektors Klaus Töpfer bestimmte den Kurs für die deutsche Energiewende. Sie betonte, dass eine profunde Umgestaltung der Weltenergieversorgung hin zur Nachhaltigkeit nur als Gemeinschaftswerk gelingen könne. Schließlich sind Energiesysteme mehr als nur technische Gebilde: Die Energiewende ist zugleich ein sozialer, wirtschaftlicher und ökonomischer Transformationsprozess, der auch den technologischen Wandel umfasst und in allen Bereichen Innovationen erfordert.

Deshalb wurde TPEC bewusst als Plattform angelegt, die Experten aus Wissenschaft, Politik, Industrie und Gesellschaft zusammenführt. Dem IASS-typischen transdisziplinären Forschungsansatz folgend, beziehen wir die unterschiedlichen

Akteure in verschiedene Phasen unserer Projekte ein. Gemeinsam mit Politikern, Energiefachleuten, der Wirtschaft und Organisationen der Zivilgesellschaft wählen wir Forschungsfragen aus, entwickeln Empfehlungen und veröffentlichen Ergebnisse. Überdies beziehen wir öffentliche Anliegen schon zu Beginn des Forschungsprozesses ein und nicht erst im Nachhinein. So hoffen wir, Wissen und Vorschläge für eine Energiewende zu generieren, die bezogen auf Umweltauswirkungen, Wirtschaftlichkeit und Bürgerbeteiligung nachhaltig ist.

Unser interdisziplinäres Team prüft aktuelle Daten und Trends in der Entwicklung erneuerbarer und konventioneller Energien. Auf dieser Basis erarbeiten wir technische und sozioökonomische Alternativen zum heutigen Energiesystem. Wir tragen zur wissenschaftlichen Diskussion bei und wollen zudem eine breite öffentliche Debatte zu folgenden Fragen anstoßen: Welche Finanzierungsmechanismen sind künftig für erneuerbare Energien möglich? Wie tragen wir als Gesellschaft die Kosten der Energiewende? Wie stellen wir uns ein nachhaltiges Energiesvstem vor? Und: Wie können wir wende erreichen, die als Modell für andere Gesellschaften dienen kann?

Debatten über die Zukunft der Energie sind häufig kontrovers, da sich zahlreiche Akteure mit gegensätzlichen Ansichten und Interessen gegenüberstehen.

Um diese in den Dialog zu bringen, haben wir Workshops und andere Veranstaltungsformate zur Energiewende in Deutschland mit Energiewendeexperten aus Europa und anderen Kontinenten organisiert. Die Ergebnisse flossen

Der Weg zur deutschen Energiewende

1970e

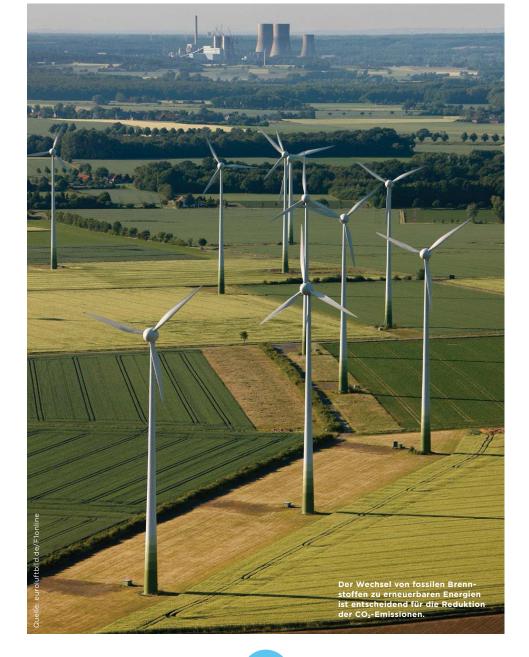
Die Ölkrise führt zur Suche nach alternativen Energiequellen. Die Bundesregierung sieht in der Atomkraft eine Lösung. In der Gesellschaft formieren sich Anti-AKW- und Bürgerbewegungen für alternative Energien.

980€

Anti-Atom-Proteste nehmen zu. Die Grünen ziehen erstmals in den Bundestag ein und setzen Umweltthemen auf die nationale Agenda.

1982

Das Freiburger Öko-Institut veröffentlicht einen Fahrplan, mit dem erneuerbare Energien Kernkraft und fossile Brennstoffe ersetzen könnten. Diese Vision nennt es "Energiewende"



in Bücher, IASS Studien und IASS Policy Briefs am Lastmanagement und bindet dazu das mit Empfehlungen für Entscheidungsträger, die alle auf unserer Website veröffentlicht werden. Auf der politischen Ebene haben wir z. B. über verschiedene Implikationen der Energiewende mit der Landesregierung von Brandenburg und dem polnischen Präsidialamt diskutiert.

Strommärkte neu denken

Die Frage der Gestaltung des Strommarkts beherrscht seit zwei Jahren die deutsche Energiedebatte. Mit der Energiewende wächst der Anteil schwankender Energiequellen wie Wind und Sonne, die nur begrenzt auf Preissignale aus dem Strommarkt reagieren können. Für diese Erneuerbaren entstehen im Vorfeld der Stromerzeugung zwar hohe Kosten (Kapitalkosten), danach aber buchstäblich keine Produktions- oder Grenzkosten. Deshalb müssen wir die Grundprämissen des heutigen Strommarkts überdenken. Gemeinsam mit der TPEC-Arbeitsgruppe Das Marktsystem für erneuerbare Energien, in der Vertreter aus Universitäten, Verbraucherverbänden, Energieunternehmen, Stiftungen und Behörden mitwirken, entwickelten wir ein Marktdesign für die Energiewende (erschienen als IASS-Studie im April 2014). Dieses erleichtert den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien durch hohe Flexibilität im Energiesystem, indem schwankende Energiequellen wie Wind und Sonne bevorzugt werden. Schon heute erzeugen diese Strom zu Kosten, die dem Vergleich mit neuen konventionellen Kraftwerken standhalten.

Für die Flexibilisierung des Energiesystems ist die Frage des Lastmanagements maßgeblich, also der Prozess, der das Stromangebot im Netz mit der Nachfrage in Einklang bringt. Je höher der Prozentsatz an schwankenden erneuerbaren Energiequellen im Gesamtmix, umso dringlicher wird dieses Problem. Das IASS arbeitet intensiv

Wissen verschiedener nationaler und internationaler Akteure ein. Finanziert durch die Transatlantic Climate Bridge, sind wir mit Experten aus den USA, die über ihre Erfahrungen mit dem Lastmanagement berichteten, in den Dialog getreten. Die Ergebnisse erschienen als IASS Working Paper.

In den vergangenen Jahren löste die Debatte um "Energiearmut" in Deutschland Kontroversen aus: Wegen steigender Strompreise infolge der EEG-Umlage müssen auch Haushalte mit niedrigen Einkommen einen wachsenden Anteil ihres Geldes für Strom ausgeben. Gemeinsam mit Experten vom Wuppertal Institut, dem European Institute for Energy Research und dem Umweltbundesamt haben wir die Analysen "Beiträge zur sozialen Bilanzierung der Energiewende" veröffentlicht. Wir hatten hierzu Vertreter gesellschaftlicher Gruppen wie etwa den Mieterbund aktiv einbezogen, da insbesondere Mieter die Last der Energiewende tragen.

Unser Vorschlag zur Finanzierung der erneuerbaren Energien

Als mögliches Finanzierungsmodell für langlebige Wirtschaftsgüter und Infrastrukturen hat der von IASS-Exekutivdirektor Klaus Töpfer und TPEC vorgeschlagene Innovationsfonds erhebliches Interesse geweckt. Welche Vorteile hätte ein solcher Fonds, und wie würde er praktisch funktionieren? Bisher wurden die Entwicklungskosten für erneuerbare Energien in Deutschland über die EEG-Umlage weitgehend von den Stromkunden bezahlt. Diese Umlage ist für einen Zeitraum von 20 Jahren von dem Tag an vorgesehen, an dem die Anlage zur Erzeugung erneuerbarer Energie ans Netz geht. Seit ihrer Einführung wurden technische Innovationen möglich, die zu einer erheblichen Kostensenkung für Strom aus Sonne und Wind

1986

In einem von vier Kernreaktoren in Tschernobyl (Ukraine) kommt es zur Kernschmelze. Wenige Wochen später wird das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gegründet.

1990

Deutschland verpflichtet sich zu einer nationalen CO2-Reduktion um 25 Prozent bis 2005 (im Veraleich zu 1990).

1991

Das Stromeinspeisegesetz tritt in Kraft. Es legt Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien fest und schreibt vor, dass Öko-Energie gegenüber konventionellen Quellen Vorrang genießt.

IASS Aktivitäten IASS Aktivitäten 4

führten. Dies hat sich jedoch nicht in niedrigeren Stromrechnungen für Privatkunden niedergeschlagen. Daher entsteht der Eindruck, Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sei wesentlich teurer als aus konventioneller Energie. Der von uns vorgeschlagene Fonds könnte die Kosten technologischer Innovationen vom Verbraucher auf einen dafür vorgeschenen Fonds verlagern. Auf diese Weise würden die Kosten der Energiewende gerechter verteilt. Noch wichtiger: Dies würde auch anderen Ländern signalisieren, dass Solar- und Windkraftanlagen heute vom Preis her mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren können

Je mehr erneuerbare Energien, desto mehr CO₂-Emissionen?

Der stetig wachsende Anteil der erneuerbaren Energien geht mit einem Paradox einher: Jährlich werden zwar mehr als 1.000 neue Windturbinen gebaut, dennoch war der CO₂-Ausstoß des deutschen Energiesektors in den vergangenen beiden Jahren nicht rückläufig. Im Gegenteil: die deutschen Treibhausgasemissionen sind 2013 um 1,2 Prozent gestiegen. Das hängt mit der billigen Kohle zusammen, aber auch mit den zu niedrigen Preisen für Emissionszertifikate.

Ohne zusätzliche Maßnahmen wird Deutschland sein Ziel verfehlen, die Emissionen im Vergleich zu 1990 bis 2020 um 40 Prozent zu senken.

Wir haben deshalb die mögliche Einführung eines international erprobten Instruments – Obergrenzen für CO₃-Emissionen von Kraftwerken – in Deutschland sowie die politischen und rechtlichen Auswirkungen analysiert. Gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) und der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) haben wir für Vertreter aus Politik, Energiebranche, Fertigungsindustrie, Umweltschutzgruppen und Forschungsinstituten einen entsprechenden Vorschlag vorgelegt. Das hat der öffentlichen Debatte zum Umbau des Energiesystems und zur Zukunft von Kohlekraftwerken neuen Schwung gegeben.

Ein Wissensnetzwerk

Die Zusammenarbeit mit anderen nationalen Forschungsplattformen ist für uns unverzichtbar. So haben wir mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und der Max-Planck-Gesellschaft das Forschungsforum Energiewende gegründet. Professor Klaus Töpfer gehört dem Kuratorium des von den deutschen Wissenschaftsakademien initiierten Projekts Energiesysteme der Zukunft an und leitet zudem den Rat der Agora Energiewende, einer Initiative der Stiftung Mercator und der Europäischen Klimastiftung. Als Teil dieses Netzwerks können wir die maßgeblichen praktischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Energiewende zusammenführen.



In den Kommunen ergreifen Bürger die Initiative und dezentralisieren die Energieversorgung: Im Norden geht der erste "Bürgerwindpark" ans Netz, die Einwohner von Schönau im Schwarzwald kaufen das lokale Stromnetz und werden zum ersten Öko-Stromanbieter des Landes.

1997

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichtet sich Deutschland, seine Emissionen bis 2012 um 21 Prozent zu reduzieren (im Vergleich zu 1990).

STROMTRANSPORT ÜBER GROSSE DISTANZEN

äufig sind die Orte mit dem höchsten Energieverbrauch Hunderte oder gar Tausende Kilometer von den Orten entfernt, wo erneuerbare Energie am wirtschaftlichsten erzeugt wird; den sonnenreichen Wüsten für Solarenergie oder dem offenen Meer für Offshore-Wind. Bei solchen Distanzen fordert der elektrische Widerstand einen hohen Preis: Zwei bis fünf Prozent des Stroms bleiben aufgrund des Widerstands bei einer HGÜ-Überlandleitung von 1.000 Kilometern auf der Strecke. Bei den üblichen unterirdisch verlegten HGÜ-Kabeln sind die ohmschen Verluste noch höher (bis zu zehn Prozent). Überdies stößt der Bau neuer Stromtrassen oft auf heftigen öffentlichen Widerstand. Und konventionelle Erdkabel sind zwar nicht zu sehen, dafür aber sehr teuer.

Unter Leitung von Professor Carlo Rubbia arbeiten Forscher in unserem E³ Cluster an der Entwicklung einer Alternativlösung: supraleitende Kabel, die Strom ohne Leistungsverlust übertragen. In einer Testanlage am CERN in Genf führten wir Experimente mit zunehmend längeren Kabeln bei unterschiedlichen Temperaturen und Strombereichen durch, Anfang 2014 gelang der Durchbruch, als unser 20 Meter langer Kabelprototyp eine Stromstärke von 20.000 Ampere transportierte - Weltrekord für Supraleiter. Die Dimensionen des Kabels mit Kühlmantel -16 Zentimeter im Durchmesser - waren ebenso beeindruckend wie die transportierte Stromstärke. Supraleiter nutzen die fundamentale Veränderung unterhalb einer gewissen Temperaturschwelle in einigen Leitern. Das Phänomen wurde vor über 100 Jahren entdeckt, als sich zeigte, das Quecksilber bei 4,2 Kelvin (-268 °C) zum Supraleiter wird. Seither gab es zahlreiche Anwendungen, vom Teilchenbeschleuniger bis zur medizinischen Bildgebung.

In den letzten 30 Jahren haben neue Entdeckungen den Weg zur Nutzung der Supraleitfähigkeit für den Stromtransport geebnet. Man fand Materialien mit höheren "kritischen Temperaturen", mit denen Nullwiderstand leichter und billiger zu erreichen ist. Zum Beispiel können sogenannte Hochtemperatursupraleiter (HTS) mit Flüssigstickstoff auf 77 Kelvin (–197 °C) gekühlt werden. Allerdings sind HTS relativ teure Keramikmaterialien, die sich nicht zu flexiblen Drähten verarbeiten lassen. Zusammen mit dem CERN und dem Karlsruher Institut

für Technologie (KIT) untersucht das IASS den Einsatz eines unlängst entdeckten Supraleiters: Magnesiumdiborid, MgB2. Die Betriebstemperatur für MgB2 liegt bei niedrigen 15 bis 20 Kelvin (–253 bis –258 °C), das heißt, statt – oder neben – Flüssigsticksoff ist Flüssighelium oder Flüssigwasserstoff für eine ausreichende Kühlung nötig. Als einfache chemische Verbindung aus Rohstoffen, die in der Natur reichlich vorkommen, ist MgB2 dennoch ein starker Kandidat für den Stromtransport über lange Strecken: Es ist leicht und kostengünstig in großen Mengen herzustellen und eignet sich für die Produktion runder Drähte. MgB2 könnte also der Durchbruch beim Stromtransport sein.

Um die Betriebstemperatur zu halten, werden Supraleiter in eine mit kryogener Flüssigkeit gefüllte Isolierhülle gepackt. Deshalb sollte man sie unterirdisch verlegen. Im Vergleich zu Überlandleitungen hätten Supraleiter also kaum Einfluss auf das Landschaftsbild. Erdkabel sind überdies vor Extremwetterereignissen geschützt, erzeugen keinen Lärm und verbrauchen weniger Fläche.

Zudem bieten Supraleiter Vorteile gegenüber heute üblichen Stromleitungen. Sie vermindern nicht nur Widerstandsverluste, sondern erzeugen auch sehr wenig Wärme. Damit haben sie einen klaren Vorsprung gegenüber Standard-HGÜ-Kabeln, die durch die Abgabe von Wärme die Böden beeinträchtigen. Ihre vergleichsweise kompakte Größe ist ebenfalls ein Plus: Wir nehmen an, dass für die Verlegung eines 800 Kilometer langen 4-GW-MgB2-Kabels nur ein Kanal von 30 Zentimetern Durchmesser notwendig wäre, viel weniger also als bei konventionellen HGÜ-Kabeln ähnlicher Leistung.

Unser Supraleiter ist auch wirtschaftlich attraktiv. Im jetzigen Entwicklungsstadium lassen sich die Kosten zwar nicht präzise beziffern. Erste Schätzungen zeigen, dass MgB₂-Kabel um ein Mehrfaches billiger wären als Standard-HGÜ-Kabel und möglicherweise mit HGÜ-Überlandleitungen konkurrieren könnten. Unsere Forschung kann Supraleiter nun aus der Phase der Prototypen herausführen. Wir haben Kontakte zu Industrie und Netzbetreibern aufgebaut, die an unserer Entwicklung Interesse zeigen. Unsere Vision: Im kommenden Jahrzehnt den verlustlosen Stromtransport über lange Entfernungen durch Supraleiter Alltag werden zu lassen.

IASS Aktivitäten 5

TECHNOLOGISCHE OPTIONEN FÜR DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

Die Erfolgsgeschichte der erneuerbaren Energien in Deutschland, illustriert etwa durch das Beispiel Nordfrieslands, hat zu neuen Herausforderungen geführt: Um Energie aus dem windreichen Norden in den energiehungrigen Süden zu bringen, muss das Stromnetz im nächsten Jahrzehnt erheblich ausgebaut werden: Bis 2023 müssen 4.900 Kilometer an neuen Leitungen entstehen und die Kapazität um 16 Gigawatt (GW) wachsen. Vier neue Nord-Süd-"Stromautobahnen" sind derzeit geplant. Die Gesamtkosten dürften bei 20 Milliarden Euro liegen.

Der Bau neuer Überlandleitungen stößt auf wachsenden öffentlichen Widerstand, getrieben von der Sorge um die Auswirkungen auf Landschaft und Umwelt.

Diese Stromleitungen sind massive Bauwerke mit großem Landverbrauch bei hohen Grundstückskosten, sie verändern die Landschaft dauerhaft und hinterlassen einen massiven ökologischen Fußabdruck. Die geplanten Leitungen werden durch Biosphärenresservate und Wohngebiete führen. Hochspannungsmasten unweit von Wohnhäusern wecken Bedenken wegen des Lärms und elektromagnetischer Felder. Überall im Land fordern besorgte Bürger, Gemeinden und Umweltgruppen Alternativen.

Überdies wachsen bei konventionellen Hochspannungsgleichstromleitungen (HGÜ) die Widerstandsverluste mit ihrer Länge. Sie sind als neue 'Stromautobahn' kaum geeignet.

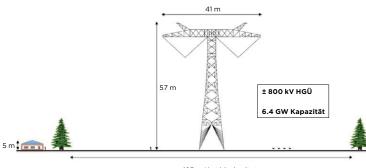
Ab in den Untergrund mit großen Strommengen

Eine solche Lösung wird derzeit von unserem Forscherteam im Cluster *Erdsystem, Energie und Umwelt* (E⁵) unter Leitung des Wissenschaftlichen Direktors und Nobelpreisträgers Prof. Carlo Rubbia entwickelt. Im Forschungsprogramm *Entwicklung von Supraleitern für den Langstreckenenergietransport* prüfen wir die Möglichkeit, Standard-HGÜ-Überlandleitungen und -kabel durch DC-Supraleitkabel auf der Basis von Magnesiumdiborid (MgB₂) zu ersetzen. (siehe Textbox S. 29)

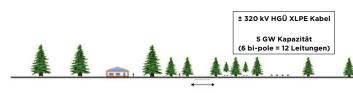
Der Hauptvorteil liegt auf der Hand: Supraleitfähigkeit ermöglicht den Transport großer Strommengen ohne Widerstandsverlust. Überdies wäre der ökologische Fußabdruck einer Supraleitung sehr viel kleiner als bei der klassischen Technik. In Zusammenarbeit mit der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde der Prototyp unseres Supraleiters unter Laborbedingungen mit vielversprechenden Resultaten konstruiert und getestet. Wir erwarten, dass Supraleitkabel problemlos eine Kapazität von zwei bis zehn GW oder mehr erreichen können. Zum Vergleich: Ein typisches Kernkraftwerk hat eine Erzeugungskapazität von einem GW.

Nach intensiven Kontakten mit der Industrie und Netzbetreibern reichte eine Arbeitsgruppe 2013 im siebten Forschungsrahmenprogramm der EU (FP7-ENERGY-2013-2) einen Vorschlag zur Entwicklung des Prototyps einer Supraleitung in Zusammenarbeit mit europäischen Herstellern und Netzbetreibern ein. Das Projekt sieht eine Demonstration der Technologie unter realistischen Betriebsbedingungen vor, wurde von der Europäischen Kommission 2013 offiziell angenommen und startete im Herbst 2014.

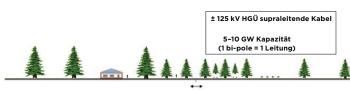
Visuelle und ökologische Auswirkungen verschiedener Energieübertragungsmöglichkeiten



125 m Korridorbreite



10,5 m Flurbreite im Waldgebiet (5,5 m Kabel + 2 x 2,5 m Sicherheit)



5,5 m Korridorbreite im Waldgebiet (0,5 m Kabel + 2 x 2,5 m Sicherheit) Die Abbildung zeigt die notwendigen Installationen und visuellen Auswirkungen der unterschiedlichen Hochspannungsleitungstypen.

Für die Standardoberleitungen (Abbildung oben) sind 50 bis 90 m hohe Mäste auf Intervallen von 400 m und einer Korridorbreite von bis zu 250 m vorgesehen.

Die Standarderdkabel (Abbildung Mitte) benötigen i.d. R. 12 einzelne Kabel und eine Grabenbreite von mindestens 5,5 m, d. h. deutlich mehr als die wenigen Dezimeter, die für die supraleitenden Kabel (Abbildung unten) benötigt werden. In beiden Fällen sind zusätzliche Schutzstreifen (2,5 m) auf jeder Seite im Waldbereich erforderlich.

Supraleitende Übertragungskabel erzeugen keine elektrischen Streufelder und möglicherweise keine Magnetfeldstreuungen.

(2000)

Die rot-grüne Koalition erlässt das Erneuerbare-Energien-Gesetz als Nachfolger des Stromeinspeisegesetzes: Investitionssicherheit aufgrund fester Einspeisevergütungen, Einspeisevorrang und Abnahmeverpflichtungen erhöhen den Anteil des Öko-Stroms. Die Regierung handelt mit AKW-Betreibern in Deutschland einen Vertrag aus, die Kernkraft auslaufen zu lassen. 2002 wird dieses Abkommen im Gesetz verankert und markiert den organisierten Ausstieg aus der Kernkraft bis 2021. 2005

Die Europäische Union etabliert ein System für den Emissionshandel, es betrifft Gas- und Kohlekraftwerke und große Teile der energieintensiven Branchen in allen EU-Mitgliedsstaaten 2007

Die Europäische Union setzt sich für 2020 das "20-20-20"-Ziel: 20 Prozent weniger Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990; 20 Prozent der Energieversorgung aus Erneuerbaren; Steigerung der Effizienz um 20 Prozent. Deutschland verpflichtet sich, seine Emissionen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 40 Prozent zu senken.

IASS Aktivitäten 7 IASS Aktivitäten 8

DIE ENERGIE DER SONNE **SPEICHERN**

ährend in immer mehr Ländern Solarmodule die Dächer schmücken, entsteht in den Wüsten eine andere beliebte Methode. Sonnenstrahlen zu nutzen: Concentrated Solar Power (CSP), also konzentrierte Solarenergie. In Anlagen so groß wie konventionelle Kraftwerke wird Sonnenlicht durch Spiegel gebündelt und die so erzeugte Wärme über eine Dampfturbine in Elektrizität umgewandelt. Ein großer Vorteil dieses Systems ist seine Flexibilität. Anders als Photovoltaik kann CSP direkt für Anwendungen genutzt werden, die thermische Energie oder eine Kombination von Wärme und Strom erfordern, zum Beispiel für Meerwasserentsalzung, Noch wichtiger ist, dass CSP ermöglicht, einen Teil der gewonnenen Wärme zu speichern, um später daraus Strom zu produzieren. Bei Photovoltaik kann nur bei Sonnenschein Strom fließen. Die Speichermethoden sind teuer und ineffizient. Dass mit CSP Schwankungen bei der Energieerzeugung minimiert werden können, zählt zum Hauptvorteil. Damit dürften erneuerbare Energien gegenüber fossilen Brennstoffen die attraktivere Option werden.

Die verschiedenen CSP-Techniken unterscheiden sich je nach Typ und Konfiguration des Solarfelds. Sehr verbreitet ist der Einsatz von Parabolspiegeln. In unserer Forschung konzentrieren wir uns jedoch auf lineare Fresnel-Reflektoren. Hier wird derselbe Effekt durch eine Reihe kleinerer flacher Spiegel erzielt, die dank ihrer Positionierung die Strahlen auf den richtigen Fleck (ein Receiver-Rohr mit Wärmeträgerflüssigkeit) lenken. Dank der flachen Spiegel sind große Fresnel-Systeme sehr flexibel, viel leichter und billiger zu fertigen, zu installieren und zu warten als große Parabolspiegel. Damit könnten sie als Sieger aus dem Effizienzwettbewerb der erneuerbaren Energien

Bislang konzentrieren wir uns darauf, Fresnel-Reflektoren - und CSP insgesamt - wirtschaftlicher und zuverlässiger zu machen. 2013 haben wir in Zusammenarbeit mit der Polytechnischen Universität Madrid eine Studie über die verschiedenen Optionen zur Optimierung von Fresnel-Reflektoren mit Multiröhren-Receivern sowie Wärmespeichersystemen vorgelegt. Darin werden Analyseergebnisse zu verschiedenen Wärmeträgerflüssigkeiten wie Wasser/Dampf, Inertgas und Flüssigsalz genannt und verschiedene thermodynamische Prozesse verglichen, die in der Turbine Wärme in mechanische Arbeit umwandeln können. Überdies wird ein Modell vorgestellt, das Betreibern hilft, die für ihre Zwecke beste Ausführung auszuwählen. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Investition für eine Fresnel-Anlage auf 2 Euro/kW gesenkt werden kann; dem entsprechen Stromkosten von 0,07 bis 0,09 Euro/kWh. Bezahlbare CSP-Anlagen, die kontinuierlich Energie liefern, könnten sich als bahnbrechend für die Erneuerbaren erweisen.



KAPITEL 01: TRANSFORMATION DER ENERGIESYSTEME

Wir sind überzeugt, dass diese Kabel einen wichtigen Beitrag zum Netzausbau leisten können, sind uns aber bewusst, dass eine technische Innovation allein nicht komplexe Energiefragen lösen kann.

Deshalb widmen wir uns nicht nur der Entwicklung von Technologien, sondern untersuchen mit einem interdisziplinären Team das weitere Umfeld für die Einführung unseres Supraleitkabels auf dem Energiesektor. Damit geben wir einen sozioökonomischen Überblick zu offenen Fragen und bieten konkrete Vorschläge für Politiker und führende Unternehmen der Branche.

Die Netze an die zunehmende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen anzupassen binieren wir hier die Entwicklung neuer ist nur ein Aspekt der Förderung von erneuerbaren Energien im In- und Ausland. Die Aktivitäten von TPEC zu Finanzierungsmechanismen, Strommarktdesign, Lastmanagement und rechtlichen Rahmenbedingungen sind dabei von großer Bedeutung. Wir glauben gleichwohl, dass es Spielraum für die technische Optimierung einiger erneuerbarer Energien gibt, um ihre Kosten- und Energieeffizienz und damit ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Brennstoffen zu steigern. Und was wäre, wenn wir zudem ihren größten, durch schwankende Energieeinspeisungen bedingten Nachteil gar überwinden könnten?

Sonne im Spiegel: Solarenergie für Lateinamerika

Am IASS legen wir unseren Schwerpunkt auf Solarenergie, genauer Concentrated Solar Power (CSP) - derzeit die am schnellsten wachsende

erneuerbare Energie. Eine Technologie, deren Potenzial, wie wir meinen, nicht ausgeschöpft ist. Sie beruht auf einem einfachen Grundprinzip: Spiegel werden so ausgerichtet, dass sie Sonnenlicht auf einen Receiver reflektieren und bündeln und somit große Hitze erzeugen. Diese thermische Energie kann direkt genutzt oder, etwa mittels einer konventionellen Dampfturbine, in Strom umgewandelt werden. Wärme ist viel leichter zu speichern als Strom, deshalb würden zusätzliche thermische Speicher in CSP-Kraftwerken eine kontinuierliche Energieproduktion

In vielen Teilen der Welt werden bereits CSP-Technologien wie Parabolspiegel eingesetzt. Aber diese Anlagen sind recht teuer und aufwendiger zu warten. Deshalb erforscht das E3 Cluster lineare Fresnel-Reflektoren, eine vielversprechende CSP-Technologie, die erheblich günstiger und effizienter wäre (siehe S. 32).

Wie bei anderen Forschungsprojekten kom-Technologien mit der Analyse der Voraussetzungen ihrer Einführung, um Akteuren konkrete Vorschläge zu unterbreiten. Damit ist unser Institut in der einzigartigen Lage, Vorschläge zu liefern, die in die Praxis umsetzbar sind. So haben wir zusammen mit der VN-Wirtschaftskommission für Lateinamerika und die Karibik (UN ECLAC) sowie der Regierung Chiles eine lateinamerikanische Solar-Task Force (LASTF) mit Wissenschaftlern und Experten aus Chile und Brasilien eingesetzt. In einer Präsentation für ECLAC und das chilenische Energieministerium konnte die Task Force das enorme Potenzial von CSP in Lateinamerika demonstrieren und bei der Entwicklung einer Solarenergiestrategie mitwirken. Insbesondere regte sie an, ein lateinamerikanisches Solarenergie-Forschungszentrum (CELES) zu schaffen, das inzwischen anvisiert wird. Überdies hat die chilenische Agentur für Wirtschaftsförderung ein

2010

Mit ihrem Energiekonzept 2010 setzt die neue Regierung unter Angela Merkel langfristige Ziele für den Umbau des Energiesystems: mit einem Anteil erneuerbarer Energien von 80 Prozent und Treibhausgassenkungen von 80 bis 95 Prozent bis 2050 (im Vergleich zu 1990)

Die Regierung plant den Ausstieg aus dem Ausstieg: Sie verlängert die Laufzeit der 17 deutschen Kernkraftwerke bis 2038. Die Kernkraft soll Brückentechnologie sein

Programm zur Installierung von CSP-Systemen mit einer Leistung von mindestens zehn MW in Nordchile aufgelegt, finanziell unterstützt durch die Interamerikanische Entwicklungsbank, die deutsche KfW-Bank und die Europäische Kommission.

Auf dem Weg zur kohlenstofffreien **Energieversorgung**

Die Klimaprobleme der Welt zu lösen gleicht einem Staffellauf. Ieder kennt das Ziel: auf erneuerbare Energien umsteigen, die sehr viel weniger Treibhausgase ausstoßen und den globalen Energieverbrauch reduzieren. Unsere Arbeit zu CSP und Supraleitern beruht auf dieser Vision. Es ist ein langfristiges Ziel: Zumindest für die nächsten Jahrzehnte werden fossile Brennstoffe in vielen Sektoren im Einsatz bleiben. Geschieht dies ungehindert, werden Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger unsere globalen Klimaschutzziele gefährden. Es sei denn, wir finden Wege, wie wir fossile Brennstoffe weniger umweltschädlich nutzen oder - noch besser - uns auf die neuen Energiesysteme, die kommen werden, vorbereiten können. Dazu trägt eines unserer E3-Projekte bei. Dabei geht es um einen Brennstoff, der Kohle und Öl Konkurrenz macht: Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas. Weltweit steigt die Erdgasförderung rapide, auch wegen der wachsenden Ausbeutung unkonventioneller Lagerstätten in den USA.

Der globale Gasverbrauch liegt bei 3,4 Billionen Kubikmeter pro Jahr. Er soll in den nächsten zwanzig Jahren um

30%

laut Internationaler Energieagentur steigen.

Konventionell genutztes Methan ist eine "sauberere' Energiequelle als Kohle oder Öl, welche aus langen Kohlenstoffketten plus Wasserstoff bestehen. Methan hingegen hat nur je ein Kohlenstoffatom auf vier Wasserstoffatome. Bei der Verbrennung setzt es daher weniger CO2 pro Energieeinheit frei. Was wäre, wenn das Energiepotenzial von Erdgas ganz ohne CO2-Emissionen erschlossen werden könnte?

Statt Methan zu verbrennen, können seine atomaren Komponenten, Wasserstoff und Kohlenstoff, durch sogenannte Methanspaltung getrennt werden. Wasserstoff, das erste Produkt dieser Reaktion, setzt als sauberer Brennstoff keine schädlichen Emissionen frei. Er gilt an sich als Schlüssel zur Dekarbonisierung unseres Energiesystems. In einer 'Wasserstoffwirtschaft' wäre er der Hauptenergieträger und würde fossile Brennstoffe in Stromerzeugung und Transport ersetzen. Inwieweit Wasserstoff in unserem künftigen Energiesystem eingesetzt wird, hängt unter anderem davon ab, wie wir die wirtschaftlichen und technischen Fragen des Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur lösen. Schon heute würde die Entwicklung einer CO2freien Wasserstoffquelle die Emissionen aus Industrieprozessen wie der Ammoniakproduktion senken (derzeit 0,3 Gigatonnen CO₂ pro Jahr).

Das zweite Produkt der Methanspaltung ist reiner Kohlenstoff in fester Form, der sicher und problemlos gelagert werden kann. Ein klarer Vorteil gegenüber anderen Strategien zur Minderung von CO₂-Emissionen wie etwa der Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS). Denn die Speicherung von CO2 unter der Erde oder in submarinen geologischen Formationen ist keineswegs risikofrei. Überdies kann der durch Methanspaltung gewonnene chen. Kohlenstoff für die Fertigung von Autoreifen, Baumaterial usw. genutzt werden und erhöht so Gas, Kohle und Öl bei der Energieversorgung zu die Rentabilität dieser Technologie.

Theoretisch ist Methanspaltung leicht durchführbar. Die Bindung zwischen Kohlen- und Wasserstoff bricht bei einer Temperatur von über 550 °C. Unsere Forschungsgruppe arbeitet an der Verbesserung dieser Technik, aufbauend auf bisheriger Forschung experimentieren wir mit einem innovativen Design, das Probleme wie das Verstopfen des Systems verhindern könnte. Wir haben einen Säulenreaktor entwickelt, der Fossile Brennstoffe im bei 800 bis 1.000 °C mit Flüssigmetall (Zinn) befüllt ist: Von unten wird Methan in Form von Blasen injiziert, die nach oben wandern und sich schrittweise in Kohlenstoff und Wasserstoff spalten. Dank unterschiedlicher Dichte sammelt sich Kohlenstoff eher an der Oberfläche des Flüssigmetalls, ist leichter entfernbar und lässt den Reaktor stabil arbeiten.

Gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie produzieren wir auf diese Weise seit Ende 2012 erfolgreich Wasserstoff und haben bei mehreren Experimenten wertvolle Einsichten gewonnen. Zurzeit arbeiten wir an der Optimierung - von der Auswahl der Materialien bis zur Blasendynamik über Systeme zur Entfernung des Kohlenstoffs. Das Ziel: einen wirtschaftlichen und effizienten Reaktor für den industriellen Einsatz zu entwickeln.

Unsere Forschung zur Methanspaltung steht für unseren Ansatz bei der Energiewende: innovative und umsetzbare Lösungen zu entwickeln, um eine Energieversorgung ohne CO₂-Emissionen zu ermögli-

ersetzen bleibt das Ziel, löst aber nicht die Probleme in anderen Sektoren wie im Transportbereich. Dort besteht ein klarer Bedarf an alternativen Energieträgern, die verschiedene Anforderungen einer modernen Wirtschaft erfüllen, dabei Treibhausgasemissionen vermeiden und Hand in Hand mit Erneuerbaren funktionieren.

Transport ersetzen

Das beschreibt den Ausgangspunkt für unser Projekt Rückgewinnung von CO, für die Produktion von Methanol. Durch Katalyse kann CO, bei der Herstellung von Methanol und anderen synthetischen Kraftstoffen, zum Beispiel synthetischem Methan, eingesetzt werden. In vielen Sektoren besitzt Methanol als Ersatz für fossile Brennstoffe das größte Potenzial. Als Erster setzte sich Nobelpreisträger George Olah für Methanol ein - von ihm stammt das Konzept der 'Methanolwirtschaft'. Aufgrund seiner Eigenschaften ist Methanol ein hervorragender Kraftstoff für konventionelle Verbrennungsmotoren und erfordert nur minimale Modifikationen der Autos. In China und anderen Ländern wird es bereits dem Benzin beigemischt. Methanol kann darüber hinaus in sämtliche Ausgangsstoffe der chemischen Industrie umgewandelt werden, die man aus fossilen Rohstoffen gewinnt, auch in neuen Anwendungen

2011

Im März führen ein Erdbeben und ein Tsunami in der japanischen Fukushima-Daiichi-Atomanlage in drei Reaktoren zur Kernschmelze. Die Bundesregierung ordnet eine Sicherheitsprüfung für alle 17 deutschen AKWs und die sofortige Stilllegung der acht ältesten an.

Die Ethikkommission für sichere Energieversorgung betont, dass nachhaltige Energieversorgung nur als Gemeinschaftswerk gelingen kann. Am 30. Juni beschließen alle Parteien den Atomausstieg in Deutschland bis 2022.

2013

Der Anteil des Ökostroms ist von 6.4 Prozent im Jahr 2000 auf 25.2 Prozent 2013 gestiegen. Bürger treiben die Energiewende voran: 46 Prozent der Kapazitäten aus erneuerbaren Quellen sind im Besitz von Privatleuten, Landwirten und Kooperativen, nur 12 Prozent in der Hand von Energieversorgern. Der Rest gehört Kleinunternehmern, unabhängigen Projektentwicklern sowie Investmentfonds und Banken.

wie Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC). Wasserstoff sowie die nötige Energie für die ermöglichen überdies die Speicherung von "grü-Produktion von Methanol und anderen synthetischen Brennstoffen aus abgeschiedenem CO2 könnten direkt oder indirekt aus erneuerbaren Energiequellen (zum Beispiel durch Wasserelektrolyse) gewonnen werden. Die Kombination von CO2 mit erneuerbaren Energien zur Kraftstoffproduktion bietet große Chancen. Zuallererst könnte sie zu erheblichen Senkungen der Emissionen führen. Die Verbrennung synthetischer Kraftstoffe setzt CO, frei, da bei der Synthese die gleiche Menge verbraucht wird, kann der ganze Zyklus kohlenstoffneutral werden. Dieses CO, könnte etwa aus konventionellen Kraftwerken oder künftig durch Abscheidung aus der Atmosphäre gewonnen werden. CO2 als Wertstoff zu nutzen, statt es als Belastung zu sehen, fügt sich am IASS nahtlos in unsere weiteren Aktivitäten zur Kohlenstoffabscheidung und -nutzung (CCU) ein. >

Derart produzierte synthetische Kraftstoffe nem Strom' als Flüssigkeit oder Gas. Als Lösungen für das Problem der Periodizität wecken neuerdings "power-to-liquid"- (PtL) und "power-to-gas"-Optionen wachsendes Interesse.

Wir erforschen das Potenzial vorhandener und neuester Technologien zur Kraftstoffsynthese, um die besten Wege zur erneuerbaren Methanolproduktion zu zeigen. Zugleich prüfen wir die technischen, wirtschaftlichen und politischen Bedingungen für den Erfolg von Methanol und synthetischen Kraftstoffen. Dazu fördern wir den Austausch zwischen verschiedenen Akteuren zu Fragen der Forschung, industrieller Prototypen und des Rechts. So zeigen Frachtreeder Interesse an Methanol als Kraftstoffalternative, da in der Nordsee die Emissionen von Schiffsdieselmotoren derzeit strenger reguliert werden. Ein Erfolg könnte hier Fortschritte in anderen Bereichen wie dem Straßenverkehr anstoßen.

>> siehe S. 55

AUSBLICK

Mit unseren profunden Kenntnissen der Energiewende und unserem technischen Know-how sind wir in der Position, echte Alternativen und Visionen für die Transformation der Energieversorgung zu entwickeln, die global erfolgen muss. In einer Welt, in der immer noch 1.6 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität haben, gibt es Bedarf an der für das IASS charakteristischen Kombination von technischer Expertise und gesellschaftlicher Analyse. Deshalb wird sich zukünftig unser Schwerpunkt bei der Energiewende zunehmend vom nationalen auf den globalen Kontext verlagern.

Wie stehen die Chancen, erneuerbare Energien "Made in Germany" zu globalisieren? Wie können andere Länder von unserer Erfahrung mit der Energiewende profitieren? Welche Folgen haben sinkende Kosten für erneuerbare Energien auf dem Weltenergiemarkt? An welchen Modellprojekten für die Energiewende in Entwicklungsländern können wir mitwirken? Wir wollen zu der massiven Transformation beitragen, die eingesetzt hat, und damit zum Ziel "erneuerbare Energie für alle".

2014

Blick in die Zukunft: Die Energiewende tritt in eine neue Phase ein, da erneuerbare Energien systemrelevant werden. Eine Reform des Strommarktdesigns und die Marktintegration hoher Anteile schwankender erneuerbarer Energien stehen oben auf der politischen Agenda. Da diese nun die Nischenförderung verlassen, müssen die wirtschaftlichen Anreize angepasst werden, damit erneuerbare Energien im Energiesystem von morgen eine führende Rolle spielen.

ÜBERBLICK IASS-PROJEKTE ZUR TRANSFORMATION DER ENERGIESYSTEME

Entwicklung von Supraleitern für den Langstreckenenergietransport

Seit 2011

Methanverbrennung ohne CO₂-Emissionen

Seit 2011

TransGov: Transgovernance -Steuerung für eine nachhaltige Entwicklung

Juli 2010 - Dezember 2011

DEMOENERGIE

Juni 2013 - Mai 2016

Bevölkerungsrückgang und Infrastrukturen: Technische und soziale Versorgungssysteme der Zukunft

Februar 2011 - September 2013

Die Rolle von Narrativen und Modellen für **Transformationsprozesse**

Seit 2012

Fortschrittliche Konzente für Concentrated-Solar-Power-Systeme

2011-2013

CO₂-Rückgewinnung für die Erzeugung von Methanol

Seit 2011

Plattform Energiewende/ Transdisciplinary Panel on Energy Change (TPEC)

Seit Oktober 2011

Die Energiewende in Deutschland - das NIMBY-Phänomen

Oktober 2011 - September 2012

Geschlossene Kreisläufe, offene Stadt

November 2011 - Dezember 2013

Optionen für die Rehabilitierung von Fukushima

2011-2012

IASS Aktivitäten 13 IASS Aktivitäten 14



IMPRESSUM

Herausgeber

Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) e.V. Berliner Straße 130 14467 Potsdam Germany www.iass-potsdam.de

Konzept

Corina Weber

Redaktion

Corina Weber (V.i.S.d.P.) und Anne Boden

Autoren

Jeff Ardron, Michele Ferrari, Dr. David Jacobs, Achim Maas, Dr. Sybe Izaak Rispens, Dr. Maheswar Rupakheti, Stefan Schäfer, Dr. Stefan Stückrad, Sebastian Unger, Dr. Jes Weigelt

Übersetzung

Gabriele Gockel und Sonja Schuhmacher

Layout und Grafik

Rethink GmbH, Berlin www.rethink-everything.net

Der Beitrag *Transformation der Energiesysteme* ist ein Auszug aus dem IASS Forschungsbericht 2012-2013

Potsdam, Dezember 2014



Die erstaunlichen Satellitenaufnahmen in diesem Forschungsbericht sind dem Bildband one earth – Limitierte Ausgabe entnommen (ISBN 978-3-902834-16-4), erschienen bei eo/lision (www.eovision.at), one earth zeigt die Schönheit und Vielfalt unserer Welt, aber auch ihre Verwundbarkeit. Die Herausgeber möchten mit diesem Buch das Bewusstsein für die Notwendigkeit eines verantwortlichen Umgangs mit unserer Umwelt erhöhen und die nachhaltige Nutzung von Ressourcen fördern.





GEFÖRDERT VOM



