

**Protokoll**  
**des Workshops "Möglichkeiten und Grenzen der Solarenergie.**  
**Technik - Ökonomie - Umwelt - Gesellschaft"**  
**am 18./19. Dezember 2012 in Weinheim**

---

**Anwesende:**

Prof. (em.) Dr. Hartmut Graßl, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Eva Hauser

Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Bereich Energiemärkte, Saarbrücken

Dr. Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, stellvertretender Institutsdirektor und Leiter des Fachbereichs Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik, Freiburg

Dr. Jürgen Hüpkes

Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, IEK-5 Photovoltaik, Jülich

Prof. (em.) Dr. Wolfgang Jacoby

Johannes Gutenberg Universität Mainz, Institut für Geowissenschaften, Mainz

Hermann Kerler

Vorstandsvorsitzender der Raiffeisenbank Pfaffenhausen eG, Vorsitzender des Vereins ProNah e.V., Vorstandsmitglied des Bundesverbands der Regionalbewegung und Leiter des Energieteams des Landkreises Unterallgäu, Eppishausen

Dr. Axel Kleidon

Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Prof. (em.) Dr. Reiner Kümmel

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, em. Professor und Lehrbeauftragter für Thermodynamik und Ökonomie, Würzburg

Jörg Schindler

Gründungs- und Vorstandsmitglied von ASPO-Deutschland e.V., Fachbeirat der Ludwig-Bölkow-Stiftung, Ottobrunn

Dipl.-Phys. Wolfgang Schölkopf

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Abteilungsleiter  
Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien i.R., Garching

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Schwarz

Universität Siegen, Professor für Didaktik der Physik, Siegen

PD Dr. Dirk Solte

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung, Stellvertreter  
des Vorstands, Ulm

Dr. Franz Trieb

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische  
Thermodynamik, Stuttgart

Denkwerk Zukunft - Stiftung kulturelle Erneuerung

Meinhard Miegel, Vorstandsvorsitzender

Stefanie Wahl, Geschäftsführerin

Karsten Gödderz, Wissenschaftler (Protokoll)

## 1. Einführungen von Meinhard Miegel und Wolfgang Jacoby

*Meinhard Miegel:*

Die Bevölkerungen früh industrialisierter Länder blicken auf Jahrzehnte außergewöhnlich dynamischen Wirtschaftswachstums zurück. In Deutschland beispielsweise hat sich die pro Kopf erwirtschaftete Gütermenge, das BIP, seit 1950 reichlich verfünffacht. In anderen Ländern war die Entwicklung ähnlich.

Allerdings haben sowohl die Wachstumsraten als auch die absoluten Zuwächse im Laufe der Zeit kontinuierlich abgenommen. Obwohl die Politik diesen Trend zu wenden suchte, sank das Wachstum der Kern-EU von jahresdurchschnittlich mehr als vier Prozent in den 1960er über drei Prozent in den 1970er auf rund zwei Prozent in den 1980er Jahren. In den zurückliegenden zwei Jahrzehnten verminderte es sich weiter auf ein bzw. 0,5 Prozent mit anhaltend rückläufigem Trend.

Diese Entwicklung hat mehrere Ursachen. Deren wesentlichste jedoch ist: Schubkräfte verwandelten sich nach und nach zu Bremskräften. Zu nennen sind insbesondere:

- die Demographie

Aus jungen, zahlenmäßig zunehmenden Bevölkerungen wurden in vielen früh industrialisierten Ländern rasch alternde, schrumpfende Bevölkerungen.

- Mentalitäten

Aus hungrigen, risikobereiten Bevölkerungen wurden satte, sicherheitsorientierte Bevölkerungen.

- Ver- und Entsorgung

Die Versorgung mit Rohstoffen und mehr noch die Entsorgung von Schadstoffen verteuern sich.

- Verlust der Monopolstellung

Der hoch privilegierte Zugriff der früh industrialisierten Länder auf die globalen Ressourcen und Senkenkapazitäten wird durch neu hinzutretende Wettbewerber erheblich relativiert.

- Schuldenbremse

Die Ankurbelung der Wirtschaft durch schuldenfinanzierte Maßnahmen hat sich weitgehend erschöpft.

Von diesen fünf Faktoren ist am ehesten die Ver- und Entsorgung veränderbar, konkret: Was kann technisch und wirtschaftlich im Energiebereich geschehen?

*Wolfgang Jacoby:*<sup>1</sup>

Die direkte Sonnenenergie ist nur zu einem kleinen Teil technisch nutzbar, da verschiedene Faktoren wie die planetare Albedo<sup>2</sup>, Erdkrümmung, Sonnenscheindauer sowie die zur Verfügung stehende Fläche die Energiegewinnung begrenzen. Werden diese Faktoren berücksichtigt, steht zur energetischen Nutzung weniger als ein Prozent der Solarenergie zur Verfügung.

Trotzdem ist die direkte Solarenergie die ergiebigste Energiequelle des postfossilen Zeitalters. Für sie spricht vor allem der gegenüber Windenergie und Biomasse deutlich geringere Flächenbedarf.

Rein rechnerisch könnte der heutige Energiebedarf in 100 Jahren bei einem jährlichen Ausbau der Solarenergie um vier Prozent ausschließlich aus direkter Solarenergie gedeckt werden.

Allerdings müsste hierzu eine Reihe von Fragen geklärt werden:

- Soll die Solarenergie großtechnisch oder regional/lokal gewonnen werden?
- Können sich Sonne und Wind regional problemlos ergänzen?
- Können ausreichend Speicherkapazitäten bereitgestellt werden?
- Wie kann Strom über große Entfernungen hinweg transportiert werden?
- Hat eine massive Umverteilung des Eintrags und Umsatzes von Solarenergie klimatische Folgen und falls ja, welche?
- Wie ist Desertec zu bewerten und gibt es überzeugende Alternativen?
- Kann und muss die Öffentlichkeit auf die Energiewende eingestimmt werden?

---

<sup>1</sup> Vgl. [http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/presentation\\_wolfgang\\_jacoby.pdf](http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/presentation_wolfgang_jacoby.pdf)

<sup>2</sup> Die Albedo ist das Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche. Sie wird bestimmt durch den Quotienten aus reflektierter zu einfallender Lichtmenge. Der Wert liegt zwischen null und eins, wobei eine Albedo von null einer vollständigen Absorption und von eins einer vollständigen Reflexion entspricht. Wüstensand hat in etwa eine Albedo von 0,3.

## **2. Die Ersetzung von fossilen Energieträgern und Kernenergie durch erneuerbare Energiequellen ist unverzichtbare Voraussetzung für nachhaltige Wirtschafts- und Lebensweisen**

Die Teilnehmer sind sich einig, dass die gegenwärtige Energieversorgung keine nachhaltigen Lebens- und Wirtschaftsweisen zulässt. Erstens ist sie durch die Endlichkeit der Vorräte fossiler Energieträger nur auf wenige Generationen begrenzt. Zweitens widerspricht der endgültige Verbrauch wertvoller Ressourcen dem Grundgedanken der Nachhaltigkeit, die Lebensgrundlagen der Erde nicht zu zerstören. Drittens verstärken Abbau, Verarbeitung und Nutzung von Öl, Kohle und Gas durch die dabei entstehenden Emissionen den globalen Klimawandel. Dieser führt zu globaler Erwärmung und Zunahme von extremen Wetterereignissen, die mit Zerstörung und wirtschaftlichen Folgeschäden einhergehen. Der Anstieg der mittleren Temperatur der Erde seit 1900 um 0,8 Grad Celsius beeinträchtigt die Bewohnbarkeit und Fruchtbarkeit vieler Regionen der Erde und bewirkt durch das Abschmelzen von Gletschern und Polkappen einen Anstieg des Meeresspiegels. Schließlich ist auch die Kernenergie aufgrund ihres hohen Verbrauchs endlicher Ressourcen und der ungeklärten Entsorgungsfrage nicht nachhaltig.

Folglich ist die Ersetzung von fossilen Energieträgern und Kernenergie durch erneuerbare Energiequellen unverzichtbare Voraussetzung für nachhaltige Wirtschafts- und Lebensweisen. Zwar weisen die Teilnehmer darauf hin, dass auch die Nutzung von Wasser-, Wind- und Sonnenenergie sowie Erdwärme und nachwachsende Rohstoffe die Umwelt beeinträchtigt, allerdings in sehr viel geringerem Maße als konventionelle Energieträger.

So werden Solarmodule oder Windräder auf absehbare Zeit zumindest teilweise mit fossilen Energien produziert werden müssen und dadurch den Klimawandel zunächst verstärken. Mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieerzeugung werden die Emissionen dieser Energiequellen jedoch sinken. Bereits heute betragen beispielsweise die Lebenszyklusemissionen einer Photovoltaik-Anlage etwa 90 Gramm CO<sub>2</sub> je Kilowattstunde und damit nur etwa zehn Prozent der Emissionen, die bei einer Kilowattstunde Kohlestrom anfallen.

### **3. Um den Übergang zu einem Versorgungssystem aus erneuerbaren Energien erfolgreich zu gestalten, müssen soziale Härten binnengesellschaftlich wie global vermieden werden**

Ob und wie ein Übergang von konventionellen zu erneuerbaren Energien gelingt, hängt neben der Lösung technischer Probleme entscheidend von den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Belastungen ab, die mit ihm einhergehen. Voraussagen hierzu sind schwierig. Sicher ist nur, dass im Zuge der Energiewende erhebliche natürliche Ressourcen sowie öffentliche und private finanzielle Mittel benötigt werden, die an anderer Stelle, beispielsweise für sonstige Investitionen oder Konsum, nicht zur Verfügung stehen. Klärungsbedürftig ist zum einen, wie viele Ressourcen, insbesondere Energie, für die Energiewende benötigt und ob Bevölkerungsgruppen durch sie besonders belastet werden.

Sollte in den früh industrialisierten Ländern das Wachstum der Wirtschaft weiter gegen null tendieren, kann die Energiewende nicht aus Wachstumsüberschüssen finanziert werden. Erschwerend kommt zumindest in Deutschland hinzu, dass die stark alternde Bevölkerung darauf bedacht sein dürfte, ihr Wohlstandsniveau zu halten und Risiken möglichst zu vermeiden. Deshalb steht sie zusätzlichen Investitionen vermutlich skeptisch gegenüber. Ohne finanzielle Beteiligung der Bevölkerung ist der Umstieg von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energien jedoch selbst dann nicht zu bewältigen, wenn vorhandene Effizienz- und Einsparpotenziale genutzt werden.

In Deutschland wächst derzeit der Widerstand gegen den erforderlichen Netz- und/oder Anlagenausbau. Kommen finanzielle Belastungen hinzu, wird die Akzeptanz weiter sinken. So stehen heute nicht so sehr Vermieter einer energetischen Sanierung ihrer Häuser kritisch gegenüber als vielmehr Mieter, die Mietanstiege fürchten.

*Wie kann der erforderliche Bewusstseins- und Verhaltenswandel in der Bevölkerung bewirkt werden?*

Bislang war Energie zumindest in den früh industrialisierten Ländern billig und reichlich verfügbar. Billige und reichlich verfügbare Energie war wesentliche Grundlage wirtschaftlichen Erfolgs und materieller Wohlstandsmehrung breiter Bevölkerungsschichten. Sie prägte die Strukturen des Energie- und Verkehrssystems, die Infrastruktur der Städte und die Wirtschafts- und Lebensweisen der Bevölkerung. Entsprechend konnte beispielsweise der natürliche Widerstand von

Raum und Zeit bequem überwunden werden. Alles dies wird auch von den erneuerbaren Energien erwartet.

Allerdings steht der materielle Wohlstand der Bevölkerung auf tönernen Füßen. Denn die vordergründig billige fossile Energie verursacht hohe externe Kosten wie Luftverschmutzung und Erderwärmung, die bisher nur unzureichend eingepreist sind. Zudem wird der Energiepreis durch Subventionen für konventionelle Energieträger weltweit in Höhe von jährlich 750 Milliarden Euro und in Deutschland in Höhe von 5,4 Milliarden Euro künstlich niedrig gehalten. Vor diesem Hintergrund stellen sich die Kosten der Energiewende in anderem Licht dar.

Dennoch ist es schwer, das "fossile Bewusstsein" der Bevölkerung zu ändern. Den Teilnehmern zufolge gelingt dies nur, wenn die Menschen begreifen, dass Verfügbarkeit und Preis von Energie bisher auf einmaligen historischen Bedingungen beruhen, auch erneuerbare Energien nur begrenzt verfügbar sind sowie Energie grundsätzlich eine kostbare Ressource ist, die möglichst sparsam eingesetzt werden sollte.

Der Bewusstseinswandel bietet die Chance von einer Verschwendungswirtschaft zu einer Kombination aus Effizienzwirtschaft und suffizienten Lebensweisen<sup>3</sup> zu gelangen. Ob dies zumindest für Teile der Bevölkerung ein Anreiz ist, ihre Sicht- und Verhaltensweisen zu ändern, bleibt offen. Ebenso bleibt offen, ob eher die massiven ökologischen und finanziellen Probleme fossiler Energieträger oder eher die Folgen des Klimawandels instrumentalisiert werden sollten, um in der Bevölkerung ein Bewusstsein für die Notwendigkeit einer Energiewende zu erzeugen.

### *Wie viel Zeit erfordert die Umstellung?*

Als Zeitraum für eine erfolgreiche Energiewende werden von Teilnehmern etwa 50 Jahre genannt. Da dieser Zeitraum die Lebensdauer von Photovoltaikanlagen übersteigt, gewinnen Recyclingmöglichkeiten an Bedeutung. Ob die Zeitspanne der Umstellung verkürzt werden kann, bleibt offen. Zwar könnte der Beschluss der Bundesregierung, bis 2050 in Deutschland 80 Prozent des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien zu decken und Engpässe oder reduzierte Fördermengen fossiler Rohstoffe aufgrund geringer werdender Lagerstätten den Umstellungsprozess beschleunigen. Dem stehen jedoch die erheblichen Widerstände

---

<sup>3</sup> Die Notwendigkeit suffizienter Wirtschafts- und Lebensweisen findet an verschiedenen Punkten Erwähnung, steht jedoch nicht im Mittelpunkt der Diskussion.

der Bevölkerung gegen den Ausbau erneuerbarer Energien gegenüber. Bremsend wirkt auch die Tatsache, dass die Probleme, die im Zuge der Energiewende gelöst werden müssen, zu selten interdisziplinär angegangen werden.

#### **4. Die vollständige Deckung des Energiebedarfs durch erneuerbare Energien ist technisch wahrscheinlich möglich, jedoch sollte sie zumindest europaweit erfolgen**

*Ist eine Energieversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland möglich?*

Unter dem Titel "100% Erneuerbare Energien für Deutschland" hat das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) ein Szenario für ein funktionierendes Energiesystem aus erneuerbaren Energien in Deutschland erarbeitet, das von Dr. Hans-Martin Henning präsentiert wird.<sup>4</sup> Darin spielt die Solarenergie eine herausragende Rolle. Ohne zusätzlichen Flächenverbrauch stehen für diese auf Dächern, an Lärmschutzwänden sowie entlang des Schienen- und Autobahnnetzes etwa 2.800 Quadratkilometer Fläche zur Verfügung. Für die Betriebskosten der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien werden etwa 120 Milliarden Euro pro Jahr veranschlagt. Dies entspricht den Kosten, die heute für die Strom- und Wärmeversorgung durch fossile Energieträger aufgewendet werden. Für die fossilen Energieträger sind dabei externe Kosten sowie die künftig zu erwartenden Preissteigerungen noch nicht eingerechnet.

Damit wird deutlich: Nicht die Kosten für die Energieversorgung aus erneuerbaren Energien sind der kritische Punkt, sondern die Umstellung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energiequellen. Hierfür sind erhebliche Investitionen in Speicher wie power-to-gas, den Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen sowie die energetische Gebäudesanierung erforderlich. Da keine Energieform allein in der Lage ist, die Versorgung sicherzustellen, muss die Solarenergie allerdings durch andere erneuerbare Energien ergänzt werden. Sonne und Wind sind beispielsweise nicht überall in gleichem Maße und im benötigten Umfang verfügbar.

Den Teilnehmern zufolge könnte die Energieversorgung aus erneuerbaren Energien effizienter gestaltet werden, wenn die Lösungen europaweit erfolgten und beispielsweise bereits vorhandene Pumpspeicherkraftwerke in Österreich und Norwegen mit einbezogen würden. In diesem Fall könnte auf einige der im ISE-

---

<sup>4</sup> Vgl. [http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/praesentation\\_Hans\\_Martin\\_Henning.pdf](http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/praesentation_Hans_Martin_Henning.pdf)



Szenario benötigten Strukturen verzichtet werden. Überlegungen zur Energieautarkie einzelner Regionen oder Bundesländer lehnen die Teilnehmer dagegen ab. Energie sollte dort gewonnen werden, wo sie anfällt.

Würde die Stromversorgung in Europa auf einen klugen Energiemix aus erneuerbaren Energien umgestellt, würde lediglich ein Prozent der europäischen Fläche benötigt. Dies entspricht der gesamten Verkehrsfläche in Europa.

*Welche Rolle können und sollen Großprojekte wie Desertec beim Umbau des Energiesystems spielen?*

Würden beispielsweise im Rahmen des Desertec-Projekts die Regionen Mittlerer Osten und Nordafrika (MENA-Region) in die Energieversorgung Europas einbezogen, könnten Dr. Franz Trieb vom Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)<sup>5</sup> zufolge weitere Strukturen und Ressourcen eingespart werden, da die Gewinnung von Solarenergie dort wesentlich effektiver ist. Während in Europa etwa 110 Watt pro Quadratmeter den Boden erreichen, sind es in der Sahara 250 bis 300 Watt pro Quadratmeter. Darüber hinaus ist die geometrische Ausrichtung der solarthermischen Anlagen zur Sonne durch die größere Nähe zum Äquator deutlich günstiger. Zudem kann im Norden Afrikas vor allem in solarthermischen Kraftwerken das ganze Jahr über verlässlich Strom produziert werden. Selbst in Spanien, das im Vergleich zu Deutschland für Solarthermie besser geeignet ist, sinkt der Energieertrag in den Wintermonaten deutlich.

Vor allem aber kann in der Sahara in den Nachtstunden der Wärmeüberschuss des Tages genutzt und Strom rund um die Uhr produziert werden. Damit könnte die Solarenergie aus der Sahara zu einer regelbaren, d. h. jederzeit abrufbaren, erneuerbaren Energie werden. Regelbare erneuerbare Energien gibt es zwar heute bereits mit Wasserkraft und Biomasse, jedoch haben beide nur begrenztes Potenzial. Regelbare Sonnenenergie könnte nicht nur die in Deutschland und Europa bestehenden Fluktuationen der Wind- und Solarenergie ausgleichen, sondern auch eine größere Unabhängigkeit von russischem Gas ermöglichen.

---

<sup>5</sup> Vgl. [http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/praesentation\\_franz\\_trieb.pdf](http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Solarenergie/praesentation_franz_trieb.pdf)

Die Mehrheit der Teilnehmer ist weitgehend optimistisch, dass der in allen Szenarien erwartete Anstieg des Stromanteils am Endenergieverbrauch - u.a. aufgrund steigenden Stromverbrauchs in den Sektoren Mobilität und Industrie - durch Desertec gedeckt werden kann. Allerdings dürften selbst dann die Stromkosten nicht auf heutigem Niveau gehalten werden können.

*Welche Fragen beim Desertec-Projekt sind klärungsbedürftig?*

Allerdings sind beim Desertec-Projekt noch einige Fragen offen:

- Ist die MENA-Region für das Desertec-Projekt geeignet oder sollten die solarthermischen Anlagen am nördlichen Wendekreis errichtet werden, da dort die besten Bedingungen für Solarthermie herrschen?
- Wie viel Strom steht für den Export nach Europa zur Verfügung, wenn sich die MENA-Region wirtschaftlich entwickelt?
- Was geschieht mit Strom, der von Europa nicht abgenommen wird?

Folglich wird gegenwärtig darüber nachgedacht, die Desertec-Kraftwerke getrennt vom Energieversorgungsnetz für Nordafrika und den Mittleren Osten zu bauen und mit der MENA-Region langfristig feste Stromliefermengen für Europa zu vereinbaren. Wird diese Menge von Europa nicht vollständig abgerufen, könnte sie Europa in Rechnung und den ärmeren nordafrikanischen Regionen zur Verfügung gestellt werden.

Voraussetzung für Investitionen in der MENA-Region ist jedoch deren politische Stabilität, die derzeit nur bedingt gegeben ist. Außerdem müssen Kooperationsstrukturen zwischen Europa und MENA entwickelt werden. Nach den derzeitigen Vorstellungen soll Europa im Gegenzug für Energielieferungen die MENA-Region beim Bau einer leistungsfähigen Energie- und Wasserversorgung unterstützen. Durch die Ersetzung von Öl- durch Solarkraftwerke könnten dort natürliche und finanzielle Ressourcen erheblich effizienter eingesetzt werden.

Trotz möglicher Vorzüge ist die Akzeptanz des Desertec-Projektes vor Ort gering. Viele Menschen sind nicht bereit, dem Stromexport nach Europa zuzustimmen, bevor nicht der Energiebedarf der eigenen Bevölkerung gedeckt ist sowie alle Regionen über eine ausreichende Energieversorgung verfügen.

## 5. Auch ein Versorgungssystem, das vollständig auf erneuerbaren Energien beruht, stößt an ökologische und physikalische Grenzen

*Welche ökologische Grenzen erneuerbarer Energien existieren und wie beeinträchtigt deren Nutzung die Umwelt?*

### - *Tierschutz*

Zwar beeinträchtigen beispielsweise Windkraftwerke den Lebensraum vieler Vögel, Fledermäuse und Insekten, doch erscheinen diese Beeinträchtigungen im Vergleich zum Verlust der Biodiversität, der durch die Nutzung von Kohle, Öl und Gas entsteht, relativ gering.

### - *Flächenverbrauch*

Während die Gewinnung direkter Solarenergie (Photovoltaik, Solarthermie) relativ kompakt organisiert werden kann, beansprucht die Gewinnung abgeleiteter Sonnenergie wie Wind, Wasser oder Biomasse, deutlich mehr Fläche. Würden die etwa 4030 Terawattstunden Primärenergie in Deutschland im Jahr 2005 mit Photovoltaik-Kraftwerken erzeugt, würden rein rechnerisch etwa 41.000 Quadratkilometer benötigt. Dies entspricht in etwa der Fläche von Hessen und Rheinland-Pfalz zusammen. Um denselben Energiebedarf durch Biomasse zu decken, müssten 517.000 Quadratkilometer, d.h. das 12,6fache, mit Energiepflanzen bedeckt werden.

### - *Ökologische Grenzen der Biomasse*

Aufgrund ihrer Bedeutung für die Biosphäre verursacht Biomasse weitere ökologische Probleme. Werden Bioabfälle verfeuert, stehen sie zur Regeneration von Böden nicht mehr zur Verfügung. Diese werden weiter abgetragen, ihre Degradation schreitet voran. Darüber hinaus können Böden ohne Humusneubildung weder ausreichend CO<sub>2</sub> speichern noch ausreichend Nahrungsmittel produzieren. Folglich wird die Landwirtschaft extensiver. Zusätzliche Böden sind heute allerdings häufig mit Bauten, Straßen oder Einkaufszentren belegt. Deshalb plädieren die Teilnehmer dafür, im Rahmen eines Mixes aus erneuerbaren Energien Biomasse möglichst sparsam einzusetzen.

### - *Begrenzte Verfügbarkeit von Mineralien*

Vor allem Solarmodule benötigen Mineralien, deren Vorräte teilweise knapp sind. So sind beispielsweise heute bereits 50 Prozent der globalen Kupfervorräte verbraucht. Deshalb müssen die Recyclinganstrengungen verstärkt werden.

## Welche physikalischen Grenzen bestehen für die Nutzung erneuerbarer Energien?

Physikalische Grenzen der Energieerzeugung werden u.a. durch die Hauptsätze der Thermodynamik<sup>6</sup> gezogen. So entsteht am Ende jeder Energienutzung Abwärme, die in großen Mengen Klimaveränderungen bewirken kann.

Die Teilnehmer sind sich einig, dass die direkte Gewinnung der Sonnenenergie der indirekten, wo möglich, vorzuziehen ist. Bei Nutzung von heute angebotenen Solarzellen liegt die Strahlungsflussdichte bei 10 bis 16 Watt je Quadratmeter. Sie ist damit deutlich höher als bei Bioenergie, deren Strahlungsflussdichte unter einem Watt je Quadratmeter liegt. Auch das Angebot an Windenergie ist bei einer Energieflussdichte von zwei bis drei Watt pro Quadratmeter um mindestens den Faktor 50 geringer als das der Sonne (siehe auch Tabelle).

Tabelle: Mittelwert der Energieflussdichten erneuerbarer Energiequellen in Watt pro Quadratmeter

<b>Energiequelle</b>	<b>Globaler Mittelwert</b>	<b>Deutschland</b>	<b>Angebotstyp</b>
<b>Sonne</b>	~ 165	~ 110	<b>stark schwankend, nur tagsüber</b>
<b>Wind</b>	~ 3	~ 3	<b>unregelmäßig, Tag und Nacht</b>
<b>Biomasse</b>	~ 0,1	< 0,3 <b>Gedüngter Maisacker</b> < 0,5 <b>(Zuckerrohr)</b>	<b>steuerbar, jedoch großer Flächenverbrauch, Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung</b>
<b>Tiefe Geothermie</b>	~ 0,1	~ 0,08	<b>kontinuierlich, risikohafte Erkundung</b>
<b>Wasserkraft</b>	< 0,01	0,02	<b>intermittierend, speicherbar,</b>
<b>Gezeiten</b>	<< 0,1		<b>regelmäßig, jedoch alternierend, nur wenige Küstenabschnitte</b>
<b>Ozeanwellen</b>	< 0,1		<b>unregelmäßig, fast wie Wind, küstennah</b>
<b>Energieflussdichte heute</b>	< 0,03	~ 1,5	
<b>Energieflussdichte in 2050</b>	< 0,06	< 1,5	

Quelle: Hartmut Graßl (2011), Wie schaffen wir die Energiewende? (<http://www.dbu.de/media/3105111020379698.pdf>)

<sup>6</sup> Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energie in einem geschlossenen System konstant ist. Sie kann weder aus dem Nichts erzeugt noch vernichtet werden. Der zweite Hauptsatz schränkt die Umwandelbarkeit von Wärme in Arbeit ein und bedingt Emissionen bei jeder Energieumwandlung. Das bedeutet, dass am Ende eines jeden Prozesses zumindest Abwärme entsteht.

Erneuerbare Energien weisen folgende physikalische Grenzen auf:

- *Geothermie*

Bei der Gewinnung von Elektrizität erreicht die Geothermie derzeit Wirkungsgrade von unter zehn Prozent und damit deutlich weniger als andere erneuerbare Energiequellen. Die Nutzung der Geothermie zur Wärmegewinnung dürfte dagegen effizienter sein, da keine Wandlungsverluste auftreten.

- *Bioenergie*

Die Bioenergie verursacht neben den oben diskutierten Problemen weitere Verwerfungen, da der Anbau von Energiepflanzen die Kultivierung von Nahrungsmitteln beeinträchtigt und oft zum Abholzen von Regenwäldern führt.

- *Windenergie*

Durch Gewinnung von Windenergie wird die kinetische Energie des Windes vermindert. Sie wird aus der planetarischen Zirkulation herausgenommen und nicht schnell genug aus der oberen planetaren Grenzschicht ersetzt. Auf Satellitenbildern des Terrasat-X konnte nachgewiesen werden, dass der Wind hinter einem Off-Shore Windpark signifikant schwächer ist. Dieser Effekt wirkt bis in den nächsten benachbarten Windpark hinein, der weniger Wind zum Antrieb seiner Turbinen zur Verfügung hat. Einige Teilnehmer erwarten, dass bereits ab einer Erhöhung der Windkraftanlagen um den Faktor zwei bis drei, klimaverändernde und leistungsreduzierende Effekte zu beobachten sein werden. Dies könnte beispielsweise Auswirkungen auf den vorgeschlagenen Energiemix in der Studie des ISE haben.

- *Solarenergie*

Auch bei der direkten Sonneneinstrahlung ist fraglich, ob deren übermäßige Nutzung Klimaveränderungen bewirken wird. Klärungsbedürftig ist insbesondere, wie viel von der Sonneneinstrahlung genutzt werden kann, ohne globale Klimaprozesse zu verändern. Hierzu werden zwei Auffassungen vertreten:

(1) Die Mehrheit der Teilnehmer erwartet keine starken negativen Effekte. Der verursachte Wärmestrom durch Solarenergie oder die Verlagerung von Energie aus der Sahara nach Europa scheint angesichts der äußerst geringen Energieflussdichten des globalen Energieversorgungssystems vernachlässigbar. Lokal könnte es allerdings durchaus zur Bildung von Wärmeinseln kommen. Durch dezentrale Organisation eines erneuerbaren

- (2) Energiesystems blieben Wärmeeffekte allerdings lokal begrenzt. Auch von großflächigeren Projekten wie Desertec wird nicht erwartet, dass sie das Klima kippen lassen könnten. Ein solarthermisches Kraftwerk hat etwa die gleiche Albedo wie Sand, die Albedo der Wüste verändert sich also nicht.
- (3) Ein Teilnehmer ist skeptisch, ob ein solcher massiver Eingriff in die planetaren Systeme lediglich einen vernachlässigbaren Wärmestrom verursacht. Ab einer gewissen Größenordnung habe auch die Nutzung von regenerativen Energieformen Einfluss auf die natürlichen Stoff- und Energieströme. Ein hoher Energieumsatz sei auch mit erneuerbaren Energien nicht umwelt- und klimaschonend möglich. Hier bestehe Forschungsbedarf beispielsweise bezüglich der Einflüsse auf die Wolkenbildung oder mögliche Rückkopplungen im Klimasystem.

Trotzdem sind sich alle Teilnehmer einig, dass es aus naturwissenschaftlicher Sicht zur Deckung des Energiebedarfs langfristig keine Alternative zur vorrangigen Nutzung der Solarenergie gibt.

## **6. Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaft**

### *Empfehlungen für die Politik*

#### *- Visionen entwickeln*

Um die erforderliche Akzeptanz für die Energiewende zu erreichen, muss die Politik der Bevölkerung überzeugend und sachlich deutlich machen, dass eine Energiewende notwendig und richtig ist.

#### *- Pfadgesteuert handeln*

Politik handelt bisher nicht pfadgesteuert. Ursächlich hierfür sind u.a. gegensätzliche Interessen aller Beteiligten sowie sich widersprechende Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft.

#### *- Wirtschaft und Bürger an der Finanzierung beteiligen*

Zugleich muss Wirtschaft und Bürgern die Möglichkeit eröffnet werden, sich an der Finanzierung zu beteiligen und ggf. auch finanzielle Profite zu erzielen. Dazu ist allerdings ein klarer Rahmen ohne zahlreiche Ausnahmeregelungen oder plötzliche Veränderungen erforderlich.

- *Bevölkerung beteiligen*

Durch die Schaffung von Beteiligungsmöglichkeiten der Bevölkerung auf allen Ebenen ist die Energiewende auch eine Chance für mehr Bürgerbeteiligung und damit mehr Demokratie. Um diese Chancen nutzen zu können, muss die Beteiligung von der Politik aktiv angestrebt werden.

- *Negative Folgen des fossil geprägten Energiemixes verdeutlichen*

Den Bevölkerungen in früh industrialisierten Ländern muss deutlich gemacht werden, dass ihr derzeitiges Verhalten Klimawandel, Hunger oder Migrationsströme in anderen Teilen der Welt auslöst. Allerdings sind Menschen in der Regel nicht bereit, ihr Verhalten zu ändern, wenn dessen Auswirkungen nicht hier und jetzt sichtbar werden.

- *Suffizienz stärken*

Der Bewusstseinswandel sollte mit einer Stärkung der Suffizienz einhergehen. Da auch die erneuerbaren Energien Umweltprobleme verursachen und begrenzt sind, ist Konsumverzicht für das Gelingen der Energiewende erforderlich.

- *Finanzielle Belastungen auf alle angemessen verteilen*

Bei der Verteilung der Lasten der Energiewende müssen alle einbezogen werden, da die Energiewende alle betrifft. Geschieht dies nicht, führt dies zu offener Ablehnung und möglicherweise radikalen Reaktionen.

- *Frühzeitig Bewusstsein für effizienten und sparsamen Umgang mit Energie bilden*

Vor allem Schüler und Studenten sollten über die Notwendigkeit der Umstellung von fossilen Energieträgern und Kernenergie auf erneuerbare Energien, die Gründe dafür und die zu bewältigenden Probleme aufgeklärt werden.

- *Resilienz erhöhen*

Infrastrukturen zur Energieproduktion und zum -verbrauch müssen flexibel gestaltet werden, um die Widerstandsfähigkeit des Systems zu erhöhen. Nur mit flexiblen Strukturen kann auf veränderte Bedingungen in der Zukunft reagiert werden.

## *Empfehlungen für die Wirtschaft*

### *- Nachhaltige Geschäftsmodelle entwickeln*

Unternehmen sollten sich im eigenen Interesse von Strukturen und Geschäftsmodellen lösen, die nicht nachhaltig sind. Diese sind langfristig zum Scheitern verurteilt. Nachhaltigkeit liegt hingegen in ihrem Interesse, da nur ein darauf basierendes Geschäftsmodell langfristig erfolgreich sein kann.

### *- Globale Finanz-, Umwelt- und Sozialstandards einführen*

Das Fehlen einer langfristigen Perspektive in der Wirtschaft wird vor allem durch das Finanzsystem verstärkt. Die Einführung vorausschauender globaler Umwelt- und Sozialstandards kann dazu beitragen, in längeren Zeiträumen zu denken und die Verengung auf Renditeerzielung zu überwinden.

### *- Stärkeres Engagement der großen Energieversorger*

Die großen Energieversorger sollten sich im Rahmen der Energiewende verstärkt engagieren. So können beispielsweise durch einen günstigeren Strompreis zu Off-Peak Zeiten ein Anreiz zum Stromverbrauch in der Nacht geboten und derzeit benötigte Puffer und redundante Strukturen abgebaut werden. Dies würde auch die Kosten der Energieerzeuger senken.