



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

2012

Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen

Bioenergy – Chances and Limits

Kurzfassung und Empfehlungen

Executive Summary and Recommendations



Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
www.leopoldina.org

Kurzfassung und Empfehlungen

Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)

Berliner Büro:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Redaktion:

Dr. Christian Anton
Dr. Henning Steinicke

Gestaltung und Satz:

unicom Werbeagentur GmbH, Berlin

Druck:

H. Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Titelbild:

© PhotographyByMK – Fotolia.com

Auflage (08/2012): 1.500

Zitiervorschlag: Nationale Akademie der Wissenschaften
Leopoldina (2012): Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen.
Halle (Saale)

© Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

ISBN: 978-3-8047-3082-3

VORWORT

Mit dem „Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland“ hat die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina gemeinsam mit der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften bereits im Jahr 2009 die notwendige Bandbreite zukünftiger Energieforschung skizziert. Im vergangenen Jahr wurde dieses Konzept von der Leopoldina durch die „Energiepolitischen und forschungspolitischen Empfehlungen nach den Ereignissen in Fukushima“ aktualisiert.

Mit der nun vorliegenden Studie steht die Nutzung der Bioenergie im Fokus einer umfassenden Analyse.

Der Anbau von Energiepflanzen für die Produktion von Biokraftstoffen und Biogas hat in Deutschland in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. Wegen ihres breiten Einsatzspektrums und der guten Speicherefähigkeit soll die Bioenergie nach den Plänen der Bundesregierung auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

In den vergangenen eineinhalb Jahren sind Expertinnen und Experten unterschiedlicher Disziplinen für die Leopoldina der Frage nachgegangen, wie Biomasse in Deutschland energetisch sinnvoll und klimaschonend genutzt werden kann. Die Stellungnahme „Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen“ analysiert die Verfügbarkeit und Verwendbarkeit von Biomasse in Deutschland, bietet einen Überblick über Technologien der Energieumwandlung und stellt darüber hinaus vielversprechende Ansätze zur Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Ressourcen vor.

Wir möchten mit den Empfehlungen dieser Stellungnahme Parlamenten, Ministerien, Verbänden und Unternehmen eine fundierte und unabhängige Hilfestellung bei den anstehenden wichtigen Entscheidungen für eine klimaverträgliche, versorgungssichere und zukunftsfähige Nutzung der Bioenergie geben.

Juni 2012



Prof. Dr. Jörg Hacker

Präsident der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| EINLEITUNG | 3 |
| 1. VERFÜGBARKEIT UND NACHHALTIGKEIT VON PFLANZLICHER BIOMASSE ALS ENERGIEQUELLE..... | 6 |
| Schlussfolgerungen | 6 |
| Verfügbarkeit und Nutzung von Biomasse als Energiequelle | 6 |
| Biomasse Importe..... | 7 |
| Ökologische Risiken, Klima- und Umweltkosten..... | 7 |
| Biomasse und menschliche Ernährung..... | 8 |
| Phosphatreserven und Wasserbedarf | 9 |
| Wachstumserträge, Düngung und Pflanzenzüchtung..... | 10 |
| Nettoprimärproduktion in den Tropen | 10 |
| Nutzung von Algen | 11 |
| Vergleich Photosynthese, Photovoltaik, Solarthermie und Windenergie..... | 11 |
| Kapazitätskredit | 12 |
| Zukünftige Entwicklung | 12 |
| Empfehlungen | 13 |
| 2. PROZESSE DER UMWANDLUNG VON BIOMASSE IN BRENNSTOFFE UND IN VORSTUFEN FÜR CHEMISCHE SYNTHESEN | 14 |
| Schlussfolgerungen | 14 |
| Erste Generation Biofuels | 14 |
| Zweite Generation Biofuels | 15 |
| Biogas | 15 |
| Thermische Umsetzung zu Synthesegas | 16 |
| Flex-Motoren und Verbrennungsprodukte..... | 16 |
| Synthese chemischer Grundstoffe..... | 16 |
| Empfehlungen | 17 |
| 3. BIOLOGISCHE UND BIO-INSPIRIERTE LICHTGETRIEBENE PROZESSE ZUR SPALTUNG VON WASSER IN WASSERSTOFF UND SAUERSTOFF | 18 |
| Schlussfolgerungen | 18 |
| Empfehlungen | 20 |
| BETEILIGTE WISSENSCHAFTLER..... | 21 |
| INHALTSVERZEICHNIS DER SEPARAT IN ENGLISCHER SPRACHE ERSCHIEENENEN AUSFÜHRLICHEN STELLUNGNAHME | 24 |

EINLEITUNG

Definition

Bioenergie ist Energie, die aus nicht-fossiler pflanzlicher und Algen-Biomasse stammt, wozu auch Holz gehört. Energetisch genutzt werden kann Biomasse direkt durch Verbrennung oder nach vorheriger Umwandlung in Bioethanol, Biodiesel, Biogas, Wasserstoff oder Synthesegas¹. Biofuels sind flüssige oder gasförmige Brennstoffe produziert aus Biomasse für Transportzwecke.

Ziele

Ziel der Stellungnahme ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von Bioenergie als Energiequelle für Deutschland heute und in Zukunft einzuschätzen. Es gilt die Frage zu beantworten, welchen Beitrag Bioenergie zur Energiewende liefern kann. Dabei stehen neben quantitativen Aspekten auch die ökologischen und klimatischen Risiken der Verwendung von Bioenergie im Mittelpunkt. Auch wenn der Fokus der Stellungnahme auf Deutschland liegt, schließt die Diskussion Europa (EU-25) und globale Perspektiven ein.

Die Stellungnahme „Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen“ ergänzt frühere Stellungnahmen zum Thema Energie: „Biotechnologische Energie-Umwandlung“ (2008)², „Die Zukunft der Energie“ (2008)³ „Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland“ (2009)⁴ und

„Energiepolitische und forschungspolitische Empfehlungen nach den Ereignissen in Fukushima“ (2011)⁵.

Hintergrund

Ein Hauptmotiv für die Verwendung von Bioenergie ist es, die CO₂-Emissionen zu reduzieren: Fossile Brennstoffe werden durch Bioenergie ersetzt, in der Hoffnung, dadurch den anthropogenen Klimawandel zu mildern. Bioenergie wird häufig als CO₂-neutral eingestuft, da bei der Bildung von Biomasse durch Photosynthese prinzipiell genauso viel CO₂ assimiliert wie bei der Verbrennung freigesetzt wird. Dabei wird allerdings nicht berücksichtigt, dass der Kohlenstoff-Kreislauf eng verbunden ist mit den Nährstoff-Kreisläufen von Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Metallen und Wasser, die neben Kohlenstoff alle auch Bestandteile von Biomasse sind und für deren Photosynthese nötig sind. Wann immer pflanzliche Biomasse erzeugt wird, werden diese Nährstoffe gebraucht. Wann immer Biomasse wiederkehrend aus einem Ökosystem entfernt oder deren Bildung durch menschliche Eingriffe beschleunigt wird, müssen diese Nährstoffe durch Düngung nachgeliefert werden. Düngung führt allerdings zur Emission von Stickstoff-basierten Treibhausgasen (THG)⁶, die ein viel höheres Erwärmungspotenzial als CO₂ haben.

Die Annahme, Bioenergie sei CO₂-neutral, lässt zudem häufig außer Acht, dass die Biomasse in Wäldern Kohlenstoff enthält, der im Laufe von Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten assimiliert wurde. Dieser Kohlenstoff

¹ Ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff.

² Bley, T. (Hrsg.): Biotechnologische Energieumwandlung – Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf. acatech diskutiert. Springer Berlin Heidelberg, 2009

³ Gruss, P., Schüth, F.: Die Zukunft der Energie – Die Antwort der Wissenschaft, C.H. Beck München, 2008.

⁴ Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech und Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften: Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland, 2009.

⁵ Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: Ad-hoc-Stellungnahme: Energiepolitische und forschungspolitische Empfehlungen nach den Ereignissen in Fukushima. 2011.

⁶ Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O) absorbieren und emittieren Strahlungen im thermischen Infrarot-Bereich.

wird zum Teil freigesetzt, wenn mehr Holz geerntet und verbrannt wird als nachwächst.

Eine komplette Kohlenstoff-Kreislauf-Analyse muss auch die CO₂-Kosten berücksichtigen, die beim Verbrauch von fossiler Energie in der landwirtschaftlichen Produktion von Biomasse und in den Umwandlungsprozessen zu Bioethanol, Biodiesel oder Biogas entstehen. In einigen Fällen sind diese Kosten so hoch, dass sie die THG-Einsparungen aufheben, die durch eine geringere Verwendung von fossilen Brennstoffen erzielt werden.

EU-Richtlinien

Trotz dieser Einschränkungen ist es ein Ziel der Europäischen Union (EU), bis zum Jahr 2020 wenigstens 10 Prozent des Treibstoffes für Transportzwecke durch erneuerbare Energiequellen (hauptsächlich Biomasse) bereitzustellen. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass die Zumischung beispielsweise von Bioethanol zum konventionellen Kraftstoff erheblich dazu beitragen werde, die THG-Emission zu senken (35 Prozent jetzt und 60 Prozent bis 2018), und dass die ökologischen Folgen und die Auswirkungen auf die Biodiversität durch den Anbau von Energiepflanzen gering ausfallen werden und relativ zu den Vorteilen akzeptiert werden können.⁷

Leopoldina-Stellungnahme

Vor diesem Hintergrund führte eine Arbeitsgruppe der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina im Oktober 2010 am Alfred Krupp Wissenschaftskolleg Greifswald einen internationalen Workshop zum Thema „Biofuels and Bioconversion“ durch. Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen (Biologie, Biophysik, Biotechnologie, Chemie und Ökologie) diskutierten die folgenden Themen:

1. Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von pflanzlicher Biomasse als Energiequelle unter Berücksichtigung der direkten und indirekten Produktions- und Transformationskosten;

2. Prozesse der Umwandlung von Biomasse in Brennstoffe (Biogas, Bioethanol und Biodiesel) und in Vorstufen für chemische Synthesen;
3. Biologische und bio-inspirierte Licht-getriebene Produktion von Wasserstoff aus Wasser.

Ökonomische Aspekte der Bioenergie wurden erst kürzlich in anderen Abhandlungen ausführlich thematisiert.⁸ Daher werden hier Fragen nur am Rande behandelt, die sich beispielsweise mit der noch mangelnden ökonomischen Konkurrenzfähigkeit von Bioenergie gegenüber anderen Energiequellen befassen. Gleiches gilt für die Frage, welchen Einfluss die Verwendung von essbarer Biomasse als Energiequelle auf die Nahrungsmittelpreise hat. Die Stellungnahme deckt daher nicht alle Aspekte der Bioenergie ab.⁹

Stellungnahme des IPCC und des BioÖkonomieRats

Kurz vor der Fertigstellung dieser Leopoldina-Stellungnahme erschien der IPCC „Special Report 2012 on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation“ (SRREN)¹⁰. Der SRREN betrachtet in einem mehr als 100-seitigen Kapitel (Kapitel 2) die Bioenergie aus einer globalen Perspektive. In diesem Kapitel werden verschiedene Bioenergie-Einsatz-Szenarien diskutiert. Allerdings hinterlässt die Zusammenfassung den Eindruck, dass Bioenergie weder klimaschädlich noch mengenmäßig limitiert sein müsse. Auf Basis der in der Zusammenfassung gegebenen Informationen scheint es so, als zeichne der SRREN ein zu optimistisches Bild bezüglich des THG-

⁸ OECD Biofuel Support Policies: An Economic Assessment, 2008. Harvey, M., Pilgrim, S.: The new competition for land: Food, energy, and climate change. Food policy 36, 2010: S. 40-51.

⁹ Eine vollständige Abhandlung müsste auch ökonomische und sozioökonomische Aspekte berücksichtigen. Die Kriterien für eine vollständige Abhandlung wurden kürzlich formuliert von Creutzig, F. et al.: Can Bioenergy Assessments Deliver? Economics of Energy & Environmental Policy Volume 1, Number 2, 2012, (doi:10.5547/2160-5890.1.2.5).

¹⁰ Edenhofer, O., Madruga, R.P., Sokona, Y. (Hrsg.): Renewable energy sources and climate change mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge 2012: S. 214-331.

⁷ Richtlinien 2009/28/EG, 2009/29/EG und 2009/30/EG vom 23. April 2009 des Europäischen Parlaments und des Rates.

Verminderungspotenzials von Bioenergie und des technischen Potenzials von Biomasse als Energieträger. Aber der SRREN steht diesbezüglich nicht allein. Der BioÖkonomieRat der Bundesrepublik Deutschland hat kürzlich eine Stellungnahme veröffentlicht, in der ein Szenario der Bundesregierung diskutiert wird, dass im Jahr 2050 23 Prozent der in Deutschland verbrauchten Energie durch Bioenergie abgedeckt werden könnte, vornehmlich über Importe.¹¹

Die vorliegende Leopoldina-Stellungnahme ist diesbezüglich viel weniger optimistisch. Ihre Schlussfolgerung ist, dass mit Ausnahme der Nutzung von biogenen Abfällen die Verwendung von Biomasse als Energiequelle in größerem Maßstab keine wirkliche Option für Länder wie Deutschland ist.¹²

Parallel zur Leopoldina Stellungnahme, die im Wesentlichen die naturwissenschaftlichen Aspekte der Bioenergie abdeckt, hat die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) ein Positionspapier zur „Biotechnologische Energieumwandlung in Deutschland“ erarbeitet, das mehr technische Aspekte der Bioenergie zum Gegenstand hat und eine wichtige Ergänzung ist.¹³

¹¹ Nachhaltige Nutzung von Bioenergie: Empfehlungen des BioÖkonomieRats 2012.

¹² Sinn, H.W. The Green Paradox, MIT Press Cambridge, 2011.

¹³ acatech: Biotechnologische Energieumwandlung. Heidelberg u.a., Springer 2012

1. VERFÜGBARKEIT UND NACHHALTIGKEIT VON PFLANZLICHER BIOMASSE ALS ENERGIEQUELLE

In Kapitel 1 wird die Verwendung von Biomasse als Energiequelle zum Primärenergieverbrauch¹⁴ in Deutschland und in den EU-25-Ländern in Relation gesetzt. Diskutiert werden zum einen die ökologischen und klimatischen Kosten der Produktion und Umwandlung von Biomasse, zum anderen der konkurrierende Landbedarf für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie von industriellen Rohstoffen. Im Fokus steht die relativ geringe allgemeine Verfügbarkeit von Biomasse in den meisten Ländern, da diese die treibende Kraft für die Intensivierung der Landwirtschaft ist, die mit erheblichen ökologischen und klimatischen Risiken einhergeht.

Die Menge nachwachsender Biomasse in einem Land wird durch die Nettoprimärproduktion (NPP) bestimmt. Das ist die Menge an Pflanzenbiomasse, die jährlich auf einer definierten Fläche heranwächst.¹⁵ In Deutschland und in den EU-25-Ländern beträgt die NPP im Mittel etwa 600 g Kohlenstoff (C) pro Quadratmeter (m²) bewachsene Fläche pro Jahr. Die NPP von Wäldern (520 g pro m² pro Jahr) und Äckern (550 g pro m² pro Jahr) in der EU-25 ist fast gleich, während die NPP von Wiesen und Weiden um etwa 50 Prozent höher liegt (750 g pro m² pro Jahr). Die NPP erfolgt zum größten Teil oberirdisch (im Durchschnitt 60 – 70 Prozent) aber auch zu einem beträchtlichen Teil unterirdisch (30–40 Prozent).

Schlussfolgerungen bezüglich der Nutzung von Biomasse als Energiequelle

- In Deutschland bestehen ungefähr 30 Prozent des Landes aus Wald, 34 Prozent aus Feldern und 24 Prozent aus Wiesen und Weiden; die verbleibende Fläche von 12 Prozent wird für Infrastruktur genutzt.¹⁶ Die gesamte NPP auf deutschem Boden beträgt bis zu 210 Millionen metrische Tonnen pro Jahr, von denen zwischen 130 und 160 Millionen Tonnen C oberirdisch produziert werden, inklusive Blätter, Stängel und Früchte.¹⁷ Von der oberirdischen Biomasse werden vom Menschen jährlich etwa 14 Millionen Tonnen C als Holz aus Wäldern und 53 Millionen Tonnen C als Biomasse von Feldern und Wiesen geerntet, wobei zusätzlich etwa 20 Millionen Tonnen C als Stroh auf den Feldern anfallen. Etwa 20 Millionen Tonnen C als Biomasse werden jährlich von Nutztieren abgeweidet. Zusammen sind das etwa 75 Prozent der oberirdischen NPP, die direkt oder indirekt von den Menschen in Deutschland vereinnahmt werden.

Verfügbarkeit und Nutzung von Biomasse als Energiequelle

- Die in Deutschland jährlich geernteten 14 Millionen Tonnen C als Holz¹⁸ haben einen Brennwert zwischen $0,5 \times 10^{18}$ J und

¹⁴ Primärenergie ist im Falle von Biomasse, Kohle und Öl ihre Verbrennungsenergie. Im Falle von nicht brennbaren Quellen, einschließlich Nuklearenergie und aller nichtbrennbaren erneuerbaren Energien, wird Primärenergie der Sekundärenergie gleichgesetzt, die erzeugt wird, z. B. Elektrizität.

¹⁵ NPP ist die Menge pflanzlicher Biomasse (über und unter der Erde), die auf einer gegebenen Fläche innerhalb eines Jahres wächst. Sie vernachlässigt die Emission flüchtiger organischer Verbindungen und Wurzelauausscheidungen sowie innerhalb eines Jahres rezyklierte oberirdische und unterirdische pflanzliche Abfälle. NPP wird im Allgemeinen in Einheiten von Gramm (g) Kohlenstoff (C) pro Quadratmeter (m²) pro Jahr angegeben oder für Länder in Millionen metrische Tonnen C pro Jahr, wobei 1 g C etwa 2 g Biomasse (Trockengewicht) entspricht.

¹⁶ Deutschlands Fläche beträgt 357×10^9 m² (0,24 Prozent der globalen terrestrischen Fläche von 150×10^{12} m²), seine Einwohnerzahl 82 Millionen (1,17 Prozent der Weltbevölkerung von 7 Milliarden) und der Primärenergie-Verbrauch 14×10^{18} J pro Jahr (2,8 Prozent des globalen Primärenergie-Verbrauchs von 500×10^{18} J pro Jahr). Deutschlands Bevölkerungsdichte beträgt 230 Menschen pro Quadratkilometer und der Primärenergie-Verbrauch pro Person liegt bei 170×10^9 J pro Jahr.

¹⁷ Die angegebenen NPP-Werte haben eine Fehlerrate von ungefähr +/- 10 Prozent.

¹⁸ entspricht 56 Millionen Kubikmeter » 28 Millionen Tonnen Biomasse

$0,6 \times 10^{18}$ J. Dieser entspricht ungefähr 4 Prozent des jährlichen Primärenergie-Verbrauchs (Öl, Kohle, Gas, Kernkraft, Wasserkraft, Erneuerbare) in Deutschland (14×10^{18} J).¹⁹ Etwa 40 Prozent des Holzes wird direkt für Brennzwecke verwendet, die übrigen 60 Prozent für die Erzeugung holzbasierter Produkte (von denen einige später ebenfalls energetisch genutzt werden). Zurzeit besteht ein erhebliches Risiko darin, durch eine nicht-nachhaltige Holzentnahme zu Heizzwecken die Integrität von Wäldern zu gefährden, ohne dabei die THG-Emissionen zu mindern.²⁰

- Die in Deutschland jährlich geernteten 53 Millionen Tonnen Biomasse von Feldern und Wiesen werden zu über 90 Prozent für menschliche Nahrungsmittel, für Tierfutter und für industrielle Produkte verwendet. Weniger als 10 Prozent stehen als Energiequelle zur Verfügung – im Wesentlichen pflanzliche Reste, mit einem Brennwert von weniger als $0,2 \times 10^{18}$ J. Das entspricht weniger als 1,5 Prozent des deutschen Primärenergie-Verbrauchs. Energiekosten für die Produktion von Düngemitteln, Pestiziden und Maschinen sowie für Pflügen, Säen, Ernte und Transport tragen weiter dazu bei, das Bioenergie-Potenzial der gewinnbaren Biomasse zu vermindern.
- Von den jährlich etwa 20 Millionen Tonnen C als Stroh verbleiben 13 Millionen Tonnen auf den Feldern für die Humusbildung und 4 Millionen Tonnen werden als Streu in der Tierhaltung benötigt. Nur die verbleibenden 3 Millionen Tonnen mit einem Brennwert von etwa $0,1 \times 10^{18}$ J (< 1 Prozent des Primärenergieverbrauchs) stehen für Energiezwecke zur Verfügung. Und selbst die nur eingeschränkt, da Ackerböden in der EU-25 seit geraumer Zeit jährlich etwa 3 Prozent ihres Kohlenstoffs verlieren und deshalb mehr Stroh auf den Feldern bleiben müsste.
- 2010 wurde ungefähr 7 Prozent des deutschen Primärenergie-Verbrauchs durch die

energetische Nutzung von Biomasse und erneuerbaren Abfällen gedeckt.²¹ Das war nur durch erhebliche Importe von Biomasse möglich. Ohne Importe hätten weniger als 3 Prozent des Primärenergie-Verbrauchs durch in Deutschland gewachsene Biomasse nachhaltig abgedeckt werden können.

Biomasse-Importe

- Wie Deutschland sind auch die meisten anderen EU-25-Länder auf Netto-Importe von Biomasse angewiesen. Durch diese Importe beanspruchen diese Länder Pflanzenwachstum außerhalb ihrer Grenzen in einem Ausmaß von etwa 30 Prozent der heimischen NPP. Die meisten Netto-Importe stehen im Zusammenhang mit Nutztierfütterung. Wenn weniger heimische Biomasse für energetische Zwecke genutzt würde, wären weniger Importe nötig.
- Biomasse-Importe exportieren die Risiken der intensiven Landwirtschaft, solange nicht zuvor sichergestellt wird, dass (a) die importierte Biomasse aus nachhaltiger Produktion stammt, dass (b) die Importe nicht die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln und anderen Gütern im exportierenden Land gefährdet und dass (c) die Importe im exportierenden Land nicht zu Umweltkonflikten (z. B. zu Entwaldung) führen.
- Weltweit wird immer mehr Biomasse benötigt, um die wachsende Weltbevölkerung ausreichend mit Nahrung zu versorgen und den Hunger zu bekämpfen. Dies dürfte die Verfügbarkeit von Biomasse in vielen der Länder mindern, aus denen Deutschland zurzeit noch Biomasse und Biomasse-Produkte importiert. Aus der Sicht der Autoren dieser Stellungnahme ist es wenig wahrscheinlich, dass in Zukunft die Ernteerträge in gleicher Weise steigen werden, wie die Weltbevölkerung bei steigendem Lebensstandard wächst.

¹⁹ 14×10^{18} J äquivalent 370 Million Tonnen C pro Jahr.

²⁰ Schulze, E.D. et al.: Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. GCB Bioenergy 2012, (doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x).

²¹ Erneuerbare Abfälle sind alle landwirtschaftlichen Abfälle, alle Forstabfälle, Nahrungsmittelabfälle, Altpapier etc.

Ökologische Risiken, Klima- und Umweltkosten

- Die direkte oder indirekte Nutzung von etwa 75 Prozent der oberirdischen NPP durch den Menschen in Deutschland bedeutet, dass die Bevölkerung hier bereits erheblich mehr NPP vereinnahmt als alle übrigen Lebewesen zusammen (alle Nicht-Nutztiere und Mikroorganismen). Angesichts dieser Tatsache scheint eine Ausweitung der Flächen für den Anbau von Energiepflanzen²² ökologisch fragwürdig. Sie dürfte im Widerspruch zu existierenden Vorschriften zum Schutz von Biodiversität und Natur auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen (BNatSchG) stehen.²³
- Intensive Landwirtschaft ist fast immer mit der Bildung von THG als Folge von Landbearbeitung, Nutztierhaltung und Düngung verbunden, die zu direkten und indirekten Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Distickstoffoxid (N₂O) und Methan (CH₄) führen. Dabei hat N₂O ein ungefähr 300-fach und CH₄ ein ungefähr 25-fach höheres THG-Potenzial als CO₂ (bezogen auf eine Zeitspanne von 100 Jahren). Die Emissionen von Ackerland (etwa 40 Prozent relativ zum CO₂ fixiert in Biomasse) sind dabei zweimal so hoch wie die von Weideland. Nur Wälder im Gleichgewicht (es wird nicht mehr Holz geerntet als nachwächst) sind THG-neutral.
- Die aus direkten und indirekten Änderungen der Landnutzung²⁴ resultierenden Emissionen müssen bei der Abschätzung der THG-Emissionen, die mit der Produktion von Biobrennstoffen verbunden sind, berücksichtigt werden. Auch die THG-Emissionen müssen erfasst werden, die mit der energieabhängigen Umwandlung von Biomasse in eine für den Verbraucher nutzbare Energieform wie Bioethanol oder Biodiesel einhergehen.

- In Lebenszyklusanalysen von Biobrennstoffproduktion und -verbrauch müssen neben den bisher genannten Faktoren folgende weitere Umweltkosten Berücksichtigung finden: Veränderungen in der Bodenqualität und in der Biodiversität; Verunreinigung von Grundwasser, von Flüssen und von Seen mit Nitrat und Phosphat; und im Falle von Bewässerung negative Effekte auf den Grundwasserspiegel sowie die Versalzung von Böden. Unter Berücksichtigung all dieser Parameter zeigt die Lebenszyklusanalyse von z. B. Biogasbildung und -verbrauch, dass die Verwendung von Biogas als Energiequelle nur unter ganz bestimmten Bedingungen nachhaltig ist.²⁵ Das gilt insbesondere für die Produktion von flüssigen Brennstoffen wie Bioethanol und Biodiesel in der EU-25.²⁶ Die Erstellung vollständiger Lebenszyklusanalysen ist schwierig und noch Gegenstand der Forschung.²⁷

Biomasse und menschliche Ernährung

- In Deutschland nehmen Menschen im Durchschnitt etwa zwei Drittel ihrer Nahrungskalorien in Form von pflanzlichen Produkten (Kartoffeln, Früchte, Getreide, Gemüse etc.) und etwa ein Drittel in Form von tierischen Produkten (Fleisch, Eier- und Milchprodukte etc.) zu sich. Für die Herstellung pflanzlicher Nahrung werden jährlich etwa 10 Millionen Tonnen C als pflanzliche Biomasse geerntet. Zum Füttern der Tiere müssen jährlich mehr als 60 Millionen Tonnen C als pflanzliche Biomasse aufgebracht werden, wovon 20 Millionen Tonnen C geweidet werden.

²² Eine Energiepflanze ist eine Pflanze, die zum Zweck der energetischen Nutzung gezüchtet wird (z. B. Mais für die Herstellung von Bioethanol).

²³ Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1690) geändert worden ist.

²⁴ Ein Beispiel für eine direkte Landnutzungsänderung ist die Umwandlung von Grasland in Ackerland zum Zweck der Produktion von Bioenergie. Indirekte Landnutzungsänderung findet z. B. statt, wenn Ackerland, das bisher zum Wachstum von Nahrungsmittelpflanzen verwendet wurde, jetzt zum Wachstum von Energiepflanzen genutzt wird.

²⁵ Meyer-Aurich, A. et al.: Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renewable Energy* 37, 2012: S. 277-284.

²⁶ Lisboa, C.C. et al.: Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – known and unknowns. *Global Change Biology Bioenergy* 3, 2011: S. 277-292.

²⁷ Creutzig, F. et al.: Reconciling top-down and bottom-up modeling on future bioenergy deployment. *Nature Climate Change*, 2012, (doi:10.1038/nclimate1416).

- Die von der deutschen Bevölkerung jährlich durch Stoffwechsel²⁸ verbrauchte Energie beträgt 330×10^{15} J, was dem Brennwert von etwas weniger als 9 Millionen Tonnen C in Biomasse entspricht. Tatsächlich werden aber mehr als 70 Millionen Tonnen C für die Ernährung benötigt. Die energetischen Verluste in der Nahrungsmittel-Produktionskette sind daher enorm. Ein Grund dafür ist, dass der Zellulose-Anteil der Biomasse, der über die Hälfte betragen kann, nicht vom Menschen verwertet wird, und dass der Lignin-Anteil weder für Mensch noch Tier verdaulich ist. Der Hauptgrund dafür ist aber der hohe Konsum von tierischen Produkten. Die immensen Verluste entstehen durch den Stoffwechsel der Tiere und durch die jährliche Bildung von 10 Millionen Tonnen C Tierdung. Darüber hinaus werden große Mengen an Nahrungsmitteln niemals konsumiert (Schätzungen schwanken zwischen 30 Prozent und 50 Prozent), sondern landen im Müll oder verderben irgendwo in der Nahrungsmittel-Produktionskette.
 - Die Nutztierhaltung ist mit Emissionen von Methan verbunden, das ein viel höheres Erwärmungspotenzial als CO_2 hat. Eine Veränderung der menschlichen Ernährung hin zu weniger tierischer Nahrung würde weniger Biomasse für Tierfutter erfordern und es erlauben, Landwirtschaft weniger intensiv zu betreiben. Dadurch würden die mit der Landwirtschaft einhergehenden THG-Emissionen zurückgehen. Dies könnte wahrscheinlich stärker zur Milderung des Klimawandels beitragen, als es die meisten Bioenergie-Produktionen leisten können.
- halten meist ausreichend Phosphat. Es ist den Pflanzen jedoch nicht zugänglich, da es in Form von unlöslichen Verbindungen vorliegt. Diese unlöslichen Phosphate können durch Mikroben mobilisiert werden, die in Symbiose mit den Pflanzen leben (Mykorrhiza)²⁹. Eine solche Mobilisierung ist aber langsam, weshalb gute Erträge eine Düngung mit Phosphaten erfordern. Bei der Herstellung von Biogas lässt sich der Phosphatgehalt von Energiepflanzen rückgewinnen, indem der Fermentationsrückstand als Dünger verwendet wird. Das Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor im Dünger kann aber höher sein als von den Pflanzen benötigt. Dies hat zur Folge, dass mit Stickstoff überdüngt wird. Dadurch werden Grundwasser und Oberflächenwasser mit Nitrat belastet, und die Emission von N_2O wird befördert.
- Pflanzen mit hohen Erträgen benötigen für ihr Wachstum viel Wasser (> 500 ml pro g C). Die Menge hängt von der Pflanzenart, vom Klima und von der Bodenbeschaffenheit ab. Den Großteil des Wassers brauchen die Pflanzen für die Transpiration. Südliche Länder mit mehr Sonnenstunden als Deutschland, mit Ausnahme der Tropen, leiden meist unter zu niedrigen Regen-Niederschlägen, sodass hohe landwirtschaftliche Erträge nur mit künstlicher Bewässerung zu erzielen sind. In vielen Ländern der Erde sinken die unterirdischen Wasserspiegel als Folge einer nicht nachhaltigen Entnahme des Grundwassers zu Bewässerungszwecken. Die Versalzung von Böden ist ein weiteres Problem, das durch Bewässerung von ariden Gebieten³⁰ entsteht. Die langfristigen ökologischen und energetischen Kosten von künstlicher Bewässerung sind hoch.

Phosphatreserven und Wasserbedarf

- Die geologischen Reserven von mineralischem Phosphat sind endlich. Die mangelnde Verfügbarkeit von Phosphatdünger könnte daher in Zukunft die intensive Landwirtschaft limitieren. Die Böden ent-
- In den Weltmeeren gibt es nahezu unbegrenzt Wasser. Die theoretischen Energiekosten für Entsalzung sind jedoch fast halb so hoch wie der Energieertrag der Biomasse, die mit dem Wasser vermehrt gewonnen

²⁸ Der Stoffwechsel steht für die Aufnahme, den Transport und die chemische Umwandlung von Stoffen in einem Organismus sowie für die Abgabe von Stoffwechselendprodukten an die Umgebung. Im Durchschnitt (alle Altersgruppen, beide Geschlechter) beträgt der Stoffwechselumsatz von Menschen etwa 11.000 kJ pro Person pro Tag (127 W).

²⁹ Eine Mykorrhiza ist eine symbiontische Assoziation zwischen einem Pilz und den Wurzeln einer Gefäßpflanze. In der Assoziation kolonisiert der Pilz die Pflanzenwurzeln.

³⁰ Gebiete, in denen ständig oder zeitweilig die potentielle Verdunstung höher ist als der Niederschlag.

werden könnte. Dabei sind die Energiekosten für den Transport des Wassers von der Entsalzungsanlage auf die Felder und die Wasserverluste beim Transport noch nicht berücksichtigt. Ein weiteres „Wasserproblem“ tritt bei der Umwandlung von Biomasse in flüssige Brennstoffe wie Bioethanol auf, die pro Liter Bioethanol weit mehr als 10 Liter Wasser benötigt. Dieses Wasser muss nach der Fermentation und der Abtrennung von Bioethanol in einem energieabhängigen Prozess gereinigt werden, ehe es in die Umgebung abgegeben oder wiederverwendet werden kann.

Wachstumserträge, Düngung und Pflanzenzüchtung

- Seit 1965 sind die Erträge einzelner Nutzpflanzen um 70 Prozent bis 80 Prozent gestiegen. Diese Zunahme (bis zu 2 Prozent pro Jahr) fiel in den letzten Jahren jedoch immer geringer aus. Die hohen Ertragszunahmen sind nur zum Teil darauf zurückzuführen, dass Pflanzen mit dem Ziel gezüchtet wurden, mehr Früchte bei gleicher NPP zu tragen, wodurch der Ernte-Index stieg. Die Zunahme war weitgehend eine Folge intensiverer Landbearbeitung und besserer Versorgung mit Düngemitteln (allein über 800 Prozent mehr Stickstoff)³¹, Pestiziden und Wasser, also von Aktivitäten, die mit den oben geschilderten ökologischen und Klima relevanten Kosten verbunden sind.
- Eine der Hoffnungen für die Zukunft ist, dass durch Züchtung, durch genetische Modifikation und über Methoden der synthetischen Biologie verbesserte Pflanzen mit einer höheren NPP verfügbar werden, die ohne bzw. mit weniger Düngemitteln und künstlicher Bewässerung auskommen. Dadurch wäre mehr Biomasse mit geringeren ökologischen Kosten vorhanden. Allerdings gibt es eine Grenze der Produktion, die durch die Verfügbarkeit von Photonen, Nährstoffen und Wasser sowie durch die Pflanzenstruktur gesetzt wird. Diese Grenze lässt sich weder durch bessere Düngung noch mit pflanzen-

züchterischen Methoden überschreiten. Es herrscht jedoch noch kein allgemeines Einverständnis darüber, wo genau diese Grenze bei Feldpflanzen liegt.

- In Deutschland und in den meisten EU-25-Ländern sind die Feldpflanzenerträge bereits sehr hoch. In anderen Teilen der Welt, Ost-Europa eingeschlossen, klafft jedoch eine erhebliche Lücke zwischen dem tatsächlichen und dem möglichen Ertrag. Außerdem gibt es weltweit beträchtliche Flächen von verlassenem Ackerland.³² Daher besteht noch technisches Potenzial, die landwirtschaftlichen Erträge global zu erhöhen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass verlassene Ackerflächen häufig wichtige CO₂-Senken sind, indem sie sich allmählich in Wald umwandeln. Deshalb müssen bei der Nutzung dieser Flächen für die Produktion von Energiepflanzen alle THG-Konsequenzen gegeneinander abgewogen werden, ehe Programme zur Realisierung dieses Potenzials beschlossen werden.
- Ob es eines Tages möglich sein wird, den Wachstumsertrag von Nutzpflanzen zu steigern, ohne eine Erhöhung der Stickstoff-basierten THG-Emissionen hinnehmen zu müssen, ist eine viel diskutierte Frage und Gegenstand zukünftiger Forschung. Landwirtschaft mit Direkteinsaat und Agroforstwirtschaft sind Ansätze dafür. Die Herausforderungen sind erheblich, insbesondere in Regionen, in denen die Erträge bereits hoch sind.

Nettoprimärproduktion in den Tropen

- In den Tropen ist die NPP meist deutlich höher als in gemäßigten Klimazonen, in denen auch Deutschland liegt. So ist die NPP-Produktion beispielsweise in Brasilien zweimal so hoch wie in Deutschland. Dabei hat Brasilien nur ein Zehntel der Bevölkerungsdichte und verbraucht pro Kopf nur ein Drittel

³¹ Groß, M. Stickstoffkreislauf: zuviel des Guten. Nachrichten aus der Chemie 60, 2012: S. 451-453.

³² Nicht mehr genutztes Ackerland kann durch allmähliche Umwandlung in Grasland und dann in Wald über Jahrzehnte eine substanzielle CO₂-Senke sein. Diese CO₂-Senke wäre reduziert oder aufgehoben, wenn diese Flächen für die Produktion von Bioenergie genutzt werden würden (Kuemmerle, T. et al.: Post-Soviet farmland abandonment, forest recovery, and carbon sequestration in Western Ukraine. Global Change Biology 17, 2011: S. 1335-1349.

der Primärenergie. In solchen Ländern kann die Verwendung von Biomasse als Energiequelle eine temporäre Option sein, wenn die erforderlichen Randbedingungen eingehalten werden. Dazu gehören: (a) der Erhalt der Wälder, (b) die Bewahrung der Bodenqualität und (c) ein fairer Wettbewerb von Bioenergie mit anderen landwirtschaftlich basierten Produkten unter Einbeziehung sozioökonomischer Aspekte. Allerdings wird die Versorgung der wachsenden Bevölkerung mit Nahrungsmitteln und Biomasse-abhängigen industriellen Gütern wie Papier und Holzartikeln auch in diesen Ländern die Verwendung von Biomasse als Energiequelle in naher Zukunft voraussichtlich stark einschränken.

Nutzung von Algen

- Die Nutzung von Algen und Cyanobakterien³³ als alternative Biomasse Produzenten ist ein zurzeit viel diskutierter Ansatz. Detaillierte Lebenszyklusanalysen haben jedoch ergeben, dass mit den gegenwärtigen Techniken ein „Energy Return of Investment“ (EROI)³⁴ von deutlich über 1 nur schwer zu erreichen ist. Algen und Cyanobakterien gewinnen jedoch als Produzenten von komplexen Naturstoffen – wie wertvollen Ausgangsverbindungen für chemische Synthesen – zunehmend an Bedeutung.
- Obwohl die globale Bruttoprimärproduktion in den Weltmeeren ähnlich hoch ist wie die auf dem Land, gibt es einen eklatanten Unterschied der durchschnittlich vorhandenen Biomasse in den beiden Biomen.³⁵ Während etwa 650×10^9 Tonnen C derzeit in terrestrischer Vegetation gebunden sind, beträgt die gesamte marine Phytoplankton-Biomasse durchschnittlich nur etwa 3×10^9 Tonnen C. Daher sind die Weltmeere kaum geeignet, in größerem Maßstab als Quelle für Biomasse zur Erzeugung von Bioenergie zu dienen.

Vergleich Photosynthese, Photovoltaik, Solarthermie und Windenergie

- Die Strahlungsenergie der Sonne, die jährlich die terrestrische bewachsene Erdoberfläche ($100 \times 10^{12} \text{ m}^2$) erreicht, beträgt etwa $0,5 \times 10^{24} \text{ J}$ (ungefähr 170 W m^{-2}). Von dieser Energie finden sich nur etwa 0,5 Prozent ($2,2 \times 10^{21} \text{ J}$) in der jährlich durch Pflanzen gebildeten Biomasse wieder. Die Effizienz der photosynthetischen Energieumwandlung ist daher sehr gering.³⁶ Es besteht kein Zweifel, dass es Techniken gibt, Sonnenenergie effizienter einzufangen: direkt über Photovoltaik-Module³⁷ und Solarthermie-Kollektoren³⁸ oder indirekt über Wind- und Wasserturbinen³⁹, die die Erwärmung der Luft und die Verdunstung von Wasser durch Sonneneinstrahlungen ausnutzen. Photovoltaik, Solarthermie und Windturbinen haben eine meist zehnmal höhere Flächeneffizienz (W pro m^2) als die pflanzliche Photosynthese. Diese Techniken benötigen sehr viel geringere Investitionen an fossilen Brennstoffen als die landwirtschaftliche Produktion von Biomasse: der Energy Return on Investment (gewonnene Energie geteilt durch investierte fossile Energie; EROI)⁴⁰ beträgt bei Photovoltaik-Modulen bezogen auf die Elektrizität ungefähr 7 und bei Windturbinen ungefähr 18, wogegen die Nutzung von Biomasse mit einem EROI von

36 Michel, H.: Vom Unsinn der Biokraftstoffe. *Angewandte Chemie* 124, 2012: S. 2566-2568.

37 Photovoltaik ist eine Methode, unter Verwendung von Halbleitern elektrische Energie zu erzeugen, indem Sonnenstrahlung direkt in elektrischen Strom umgewandelt wird.

38 Solarthermie ist eine Methode, Sonnenstrahlung unter Verwendung von Kollektoren direkt in Wärme umzuwandeln. Der Begriff wird hauptsächlich im Zusammenhang mit Kollektoren verwendet, in denen Wasser erhitzt wird, gilt aber auch für kompliziertere Installationen wie Solartürme.

39 Windturbinen sind Maschinen, die kinetische Energie des Windes in mechanische Energie umwandeln. Wind ist die Bewegung von Luft über die Erdoberfläche. Die meisten Winde kommen über Druckunterschiede zwischen zwei Orten zustande. Diese Unterschiede werden durch die ungleiche Erwärmung auf Grund unterschiedlicher Sonneneinstrahlung in Raum und Zeit bewirkt.

40 Hier sei vermerkt, dass Technologien mit einem hohen EROI nicht notwendigerweise einen Anwendungsvorteil haben müssen, da auch die finanziellen Herstellungskosten zu berücksichtigen sind. So sind die hohen Herstellungskosten von Photovoltaik-Modulen ein Problem.

33 Algen und Cyanobakterien gewinnen ihre Energie durch Photosynthese, siehe Kapitel 3.

34 Gewonnene Energie geteilt durch investierte fossile Energie.

35 Ein Biom ist ein größerer geographischer Bereich mit distinkten Gruppen von Pflanzen und Tieren, die an die besondere Umgebung des Bereiches angepasst sind.

meist kleiner als 3 stark abfällt. Von den alternativen Energietechnologien trägt die aus Biomasse stammende Energie am wenigsten zur Reduktion von THG-Emissionen bei und hat finanziell den höchsten Preis je eingesparter Tonne CO₂.⁴¹

Kapazitätskredit

- Obwohl die NPP eine sehr viel geringere Flächeneffizienz bei der Umwandlung von Sonnenenergie zeigt als Photovoltaik oder Windturbinen, hat sie den Vorteil, dass das Produkt der NPP (Biomasse sowie daraus hergestellte Brennstoffe) sich relativ leicht in großen Mengen und mit hoher Energiedichte für eine spätere Verwendung speichern lässt. Zurzeit gibt es nur sehr begrenzte Möglichkeiten, dies mit Elektrizität zu leisten, weshalb die Versorgung mit Photovoltaik- und Windturbinen-Elektrizität für Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint oder der Wind nicht bläst, immer durch Elektrizität aus konventionellen Kraftwerken ergänzt werden muss. Das ist im Falle von Bioenergie nicht nötig, da sie sich einem fluktuierenden Verbrauch anpassen kann und damit einen wichtigen Kapazitätskredit⁴² hat.

Zukünftige Entwicklungen

- Es ist schwierig, die ökologischen und klimatischen Risiken, die mit der Produktion von Brennstoffen aus Feldpflanzen einhergehen, mit denen anderer erneuerbarer Energiequellen oder fossiler Brennstoffe zu vergleichen. Denn nur die Verwendung von Feldpflanzen als Bioenergie konkurriert mit der Verwendung als Nahrungsmittel und Tierfutter. Die derzeitige Weltbevölkerung von 7 Milliarden Menschen, von denen mehr als eine Milliarde unterernährt ist, wächst jährlich um 1 Prozent, während

der globale Verbrauch an Primärenergie zunimmt, zuletzt im Jahr 2010 um 5 Prozent. Es wird geschätzt, dass die globale Lebensmittelproduktion sich bis 2050 verdoppeln muss, um bei mittlerem europäischem Lebensstandard die wachsende Weltbevölkerung ausreichend mit Nahrungsmitteln zu versorgen. Gleichzeitig werden die Feldflächen bis 2050 wahrscheinlich nur um 5 Prozent wachsen können.⁴³

- Die derzeitige globale terrestrische NPP ist etwa 10 Prozent niedriger, als sie es ohne menschliches Einwirken wäre. Gründe hierfür sind, dass viele Agrosysteme eine niedrigere NPP haben als die Vegetation, die sie ersetzt haben. Außerdem ging NPP durch Versiegelung von Flächen und durch Bodenerosion verloren, letzteres durch exzessive Landnutzung in der Vergangenheit und heute. Die globale Abnahme der NPP konnte nicht durch eine höhere NPP der Nutzpflanzen kompensiert werden, weder durch Züchtung noch durch Düngemittel und Pestizide oder durch Bewässerung. Das heißt nicht, dass in einigen Gegenden die derzeitige NPP nicht die der natürlichen Vegetation übersteigt, was zum Beispiel in Nordwest-Europa mit seiner intensiven Landwirtschaft und im Niltal mit seinen bewässerten Flächen der Fall ist. Ob es in Zukunft möglich sein wird, die NPP global über das natürliche Potenzial hinaus langfristig und nachhaltig zu steigern, wie es häufig angenommen wird, scheint jedoch zweifelhaft.

41 Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Biofuel Support Policies, an economic assessment, 2008.

42 Der Kapazitätskredit eines Brennstoffes ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass der Brennstoff zuverlässig den fluktuierenden Bedarf an Energie abdecken kann. So kann Stromerzeugung aus Bioenergie zur Netzstabilität beitragen, was in einem Energiesystem, in dem die Anteile an fluktuierenden erneuerbaren Energien größer werden, immer wichtiger werden wird (IPCC-SRREN Report, Kapitel 8, S. 623, Tafel 8.1).

43 FAO Expert meeting 2009 on how to feed the world in 2050. Contribution by J. Bruinsma: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Siehe auch die Beiträge anderer ebenda.

Empfehlungen bezüglich der Verwendung von Biomasse als Energiequelle

- Um den Verbrauch von fossilen Brennstoffen und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren, sollte Deutschland nicht den weiteren Ausbau von Bioenergie anstreben. Zu diesem Schluss kommen die Autoren der Stellungnahme nach Abwägung aller Argumente für und wider eine Nutzung von Biomasse als Energiequelle. Insbesondere sollte darauf gedrängt werden, das EU-2020-Konzept zu überdenken, das darauf abzielt, möglichst 10 Prozent des Treibstoffes für Transportzwecke aus Biomasse bereitzustellen. Vielmehr sollte sich Deutschland auf andere erneuerbare Energieressourcen konzentrieren wie Photovoltaik, Solarthermie und Windenergie, deren Flächeneffizienz höher und deren Treibhausgas-Emissionen und andere Umweltbeeinträchtigungen niedriger sind als die von Bioenergie. Die Einsparung von Energie und Verbesserungen der Energieeffizienz sollten Vorrang haben.
- Die Förderung von Bioenergie sollte sich auf Formen beschränken, die weder zur Verknappung von Nahrungsmitteln führen noch deren Preise durch Wettbewerb um Land und Wasser in die Höhe treiben. Darüber hinaus sollten diese Formen von Bioenergie keinen größeren negativen Einfluss auf Ökosysteme und Biodiversität haben, und eine substantiell bessere Treibhausgas-Bilanz aufweisen als die fossile Energie, die sie ersetzen. Auch gilt es, die gesamte Breite der wertvollen Dienste zu respektieren, die Ökosysteme für die Öffentlichkeit leisten. Bei Importen von Biomasse oder Biomasseprodukten sind auch all diese Aspekte zu berücksichtigen, da Importe die Probleme nicht beheben, sondern nur in andere Länder verlagern.
- Ein durchaus signifikantes Bioenergiepotenzial lässt sich erschließen, indem die Nahrungsmittel- und Bioenergieproduktion kombiniert und dadurch optimiert wird. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Mist und Gülle aus der Tierhaltung und der Einsatz von Lebensmittelabfällen und pflanzlichen Reststoffen. Allerdings gilt es darauf zu achten, dass von pflanzlichen Resten wie Stroh nur ein begrenzter Anteil für Bioenergiezwecke genutzt werden kann, da genügend Biomasse auf den Feldern verbleiben sollte, um die Bodenfunktionen zu erhalten. Zurzeit verlieren Ackerböden in Europa für den Erhalt ihrer Fruchtbarkeit notwendigen Kohlenstoff in zu hohen Raten. In Zukunft ist es daher geboten, mehr pflanzliche Reste den Böden zurückzuführen.
- Bei der Bewertung von klimaschädlichen Emissionen im Zusammenhang mit der Produktion von Bioenergie müssen alle Treibhausgase (Kohlendioxid, Stickoxide und Methan) einbezogen werden, die aus der Verwendung von Düngemitteln und aus dem Verbrauch fossiler Brennstoffe bei der Produktion und Konversion von Biomasse und durch Einsatz der menschlichen Arbeitskraft resultieren. Dabei sind auch die Auswirkungen von direkten und indirekten Änderungen der Landnutzung auf die Treibhausgas-Bilanz sowie auf Ökosystemfunktionen und Biodiversität zu berücksichtigen.
- Alle Treibhausgas-Emissionen müssen umfassend unter Klima politischen Gesichtspunkten berücksichtigt werden – vorzugsweise, indem sie in ein Emissionshandel-Schema einbezogen werden. Nur so wird es genügend Anreize geben, in der Landwirtschaft auf Niedrigemissionstechnologien (z. B. auf gemischte Systeme und Präzisionsackerbau) umzusteigen und Landumwandlungen für die Produktion von Bioenergie einzuschränken.
- Um die besten Lösungen zu finden, sind weitere Untersuchungen zu Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft nötig. Insbesondere gilt es, umfassende Lebenszyklus-Analysen der unterschiedlichen Produktionssysteme für Nahrungsmittel und für Bioenergie zu erstellen. Dabei sollten die Analysen auf Modellen basieren, die es erlauben, die durch Bioenergie verursachten globalen Treibhausgas-Emissionen umfassend und verlässlich zu ermitteln.

2. PROZESSE DER UMWANDLUNG VON BIOMASSE IN BRENNSTOFFE UND IN VORSTUFEN FÜR CHEMISCHE SYNTHESSEN

Kapitel 1 der Stellungnahme zeigt, dass Biomasse als Energiequelle nur sehr begrenzt zur Verfügung steht und dass deren Produktion zum Zweck der Energiegewinnung unter ökologischen und klimarelevanten Gesichtspunkten problematisch ist. Nur wenige Prozent unseres gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs dürften sich in Deutschland nachhaltig aus Biomasse, vornehmlich aus Holz und agrarischen Abfällen, gewinnen lassen.

In Kapitel 2 der Stellungnahme stehen die Umwandlungsprozesse von Biomasse in Brennstoffe im Mittelpunkt. Nicht eingegangen wird in der Kurzfassung auf biologische Brennstoffzellen⁴⁴, Wasserstoffbildung durch Fermentation, sogenannte „advanced biofuels“⁴⁵ (z. B. „renewable jet fuels“) und die Speicherung von Wasserstoff durch mikrobielle Methanbildung. Denn in absehbarer Zeit werden sie noch keine wirtschaftliche Bedeutung für die Anwendung haben und nur für die langfristige Forschung von Interesse sein. Letzteres gilt in ähnlicher Weise für die biologischen und bio-inspirierten Prozesse, die Sonnenenergie für die Spaltung von Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) nutzen – dieses Thema wird jedoch aufgrund neuer Ansätze in Forschung und Entwicklung in der Kurzfassung in Kapitel 3 behandelt.

44 Eine Brennstoffzelle verwandelt chemische Energie aus einem Brennstoff mit Hilfe einer chemischen Reaktion mit Sauerstoff oder mit einem anderen Oxidationsmittel in elektrische Energie. Zumeist wird Wasserstoff (H_2) in diesen Zellen als Brennstoff genutzt.

45 „Advanced biofuels“ werden durch aerobe Mikroorganismen im Zuge ihres Synthese-Stoffwechsels gebildet, während gängige Bio-Brennstoffe (biofuels) wie Bioethanol im Zuge des Energiestoffwechsels von anaeroben Mikroorganismen gebildet werden. Advanced biofuels sind z. B. Isobutanol (2-methylpropanol) und Isoprene.

Schlussfolgerungen

- Unter den Energieträgern, die durch biologische oder chemische Verfahren aus Biomasse hergestellt werden, sind Bioethanol⁴⁶, Biodiesel⁴⁷ und Biogas⁴⁸ gut etabliert und auch mittelfristig die verlässlichsten Produkte für die Herstellung im technischen Maßstab. Die Herstellung von Biobutanol⁴⁹ als Energieträger durch Vergärung kann zurzeit nur schwer mit der Produktion von Ethanol oder Biogas konkurrieren. Die chemische Industrie nutzt Biobutanol hingegen bereits als Grundstoff. Er wird mit der Verknappung petrochemischer Produkte zukünftig voraussichtlich weiter an Bedeutung gewinnen.

Erste Generation Biofuels

- Die Produktion von Bioethanol aus Zuckern und Stärke sowie von Biodiesel aus Pflanzenölen konkurriert lokal und global mit der Produktion von Nahrungsmitteln. Diese Verfahren sind in dicht besiedelten Gegen-

46 Bioethanol ist ein Alkohol, der durch Mikroorganismen gewonnen wird, indem Kohlenhydrate in Biomasse oder Biomasse-Abfällen vergoren werden. Bioethanol kann als Brennstoff für Fahrzeuge entweder rein oder als Zusatz eingesetzt werden.

47 Biodiesel wird aus Pflanzenölen und tierischen Fetten durch Umesterung mit Methanol hergestellt. In reiner Form kann er als Ersatz für fossile Brennstoffe in Dieselmotoren genutzt werden, wird aber zumeist als Brennstoff-Zusatz benutzt. Bei der Umesterung wird in einer Ester-Verbindung ein Alkohol durch einen anderen ersetzt, z. B. Glycerin durch Methanol, wobei eine Säure oder eine Base als Katalysator dient.

48 Biogas ist eine Mischung aus Methan (ca. 60 Prozent) und Kohlendioxid, die durch anaerobe Vergärung (in Abwesenheit von Sauerstoff) aus organischem Material durch Mikroorganismen gebildet wird. Biogas kann als Brennstoff in Fahrzeugen oder als Ersatz für Erdgas genutzt werden.

49 Biobutanol wird durch Mikroorganismen aus den zuckerhaltigen Anteilen von Biomasse durch Gärung gewonnen. Es ähnelt herkömmlichem Benzin mehr als Ethanol.

den wie Mitteleuropa oder China ethisch schwer zu rechtfertigen, weshalb z. B. in China die Produktion von Ethanol oder Butanol aus essbaren zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen oder Pflanzenteilen bereits verboten ist. Auch der geringe „Energy Return on Investment“ (Gewonnene Energie geteilt durch investierte fossile Energie; EROI) macht unter Berücksichtigung der Umweltrisiken eine Produktion wenig sinnvoll. Selbst die Herstellung von Ethanol aus Zuckerrohr in den Tropen mit einem EROI von 8 scheint nur eine vorübergehende Lösung zu sein. Der hohe EROI-Wert wird nur erreicht, wenn die Zuckerrohrreste (Bagasse) nach Auspressen des Saftes nicht untergepflügt, sondern als Hauptenergiequelle für die Ethanol-Destillation verwendet werden. Diese Verwendung ist jedoch auf Grund der resultierenden Bodenkohlenstoff-Verarmung nicht nachhaltig.

Zweite Generation Biofuels

- Die Verfahren zur Herstellung von Bioethanol und Biobutanol aus den Pflanzenbestandteilen Zellulose⁵⁰, Hemizellulose⁵¹ und Lignozellulose⁵² (Hauptkomponenten von z. B. Holz und Stroh) befinden sich noch in der Entwicklung und haben noch keine großtechnische Bedeutung gewonnen. Große Hoffnung wird in diese sogenannte zweite Generation von Biobrennstoffen gesetzt. So machen Lignozellulosen bei Weitem den größten Pflanzenanteil aus und sind als Nahrungsmittel für den Menschen nicht direkt verwertbar.

⁵⁰ Zellulose ist ein Bestandteil pflanzlicher Zellwände. Sie ist ein Polysaccharid von einigen Hundert bis mehr als Zehntausend (β -1,4-verbundenen) D-Glucose-Einheiten. Zellulose ist kristallin und gegenüber Hydrolyse weitgehend stabil.

⁵¹ Hemizellulosen sind Bestandteile der pflanzlichen Zellwand. Sie sind Polysaccharide, die in erster Linie aus Pentosen aufgebaut und in nahezu allen Pflanzenzellen mit Zellulose vernetzt sind. Während Zellulose kristallin, fest und beständig gegen Hydrolyse ist, werden Hemizellulosen leicht durch verdünnte Säuren oder Basen hydrolysiert.

⁵² Lignozellulose ist aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin zusammengesetzt. Lignin ist nach der Zellulose das mengenmäßig wichtigste organische Polymer auf der Erde und macht 30 Prozent des nicht-fossilen organischen Kohlenstoffs bzw. ein Viertel bis ein Drittel der Trockenmasse von Holz aus.

- Die Nutzung von Zellulose- und Lignozellulose-Bestandteilen von Pflanzen für die Herstellung von Bioethanol und Biobutanol wird durch die Stabilität der Lignozellulosen begrenzt. Mechanische und thermochemische Behandlungen tragen dazu bei, diese Begrenzung zu überwinden. Doch diese Maßnahmen sind wiederum sehr energieintensiv. Die Vorbehandlung der Biomasse mit spezifischen Enzymen ist ein wichtiges Feld der biotechnischen Entwicklung.
- Die Produktion von „renewable Diesel“⁵³ aus pflanzlichen Fetten und Ölen sowie aus oxidierten Grundstoffen wie Lignozellulosen (sog. „zweite Generation“ Biodiesel) benötigt molekularen Wasserstoff als Ko-Substrat. Damit diese Konversion in größerem Maßstab durchgeführt werden kann, ist noch sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit sowie die Erschließung alternativer Wasserstoff-Produktionsprozesse erforderlich, worauf im dritten Teil der Stellungnahme eingegangen wird.

Biogas

- Pflanzenbiomasse, Hausmüll, Abwasser und landwirtschaftliche Abfälle einschließlich Gülle werden mit guter Effizienz zu Biogas fermentiert. Dabei entsteht als Nebenprodukt ein Abfallschlamm, der gut als landwirtschaftlicher Dünger genutzt werden kann, um Stickstoff- und Phosphor-Verbindungen rückzuführen (Kapitel 1). Biogas-Anlagen können effizienter in kleinem und mittlerem Maßstab in landwirtschaftlichen Gegenden dezentral betrieben werden als in Großanlagen, da der Aufwand für den Transport von Substraten und Produkten in der Regel geringer ist.
- Biogas-Reaktoren lassen sich zudem vorteilhaft mit der Produktion von Ethanol koppeln. So kann eine Ethanol-Produktion aus Weizen oder Triticale⁵⁴ ökonomisch und ökologisch vertretbar sein, wenn sie mit einer Biogas-Produktion zur Verwertung aller

⁵³ „Renewable Diesel“ wird aus Fetten und Ölen durch katalytische Hydrogenierung gewonnen. Er unterscheidet sich dadurch von Biodiesel, der aus Fetten und Ölen durch Umesterung gewonnen wird.

⁵⁴ Eine Hybridpflanze aus Weizen und Roggen.

Nebenprodukte kombiniert wird. Dies wird in der Langfassung der Stellungnahme an einem „Best practice“-Beispiel ausgeführt.

Thermische Umsetzung zu Synthesegas

- Die thermische Umsetzung von Biomasse durch Vergasung (Pyrolyse, analog der Kohlevergasung) führt zu einem Gemisch von Kohlenmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas), das ein wertvoller Ausgangsstoff für die mikrobielle Bildung von Ethanol und anderen brennbaren Verbindungen ist. Das Synthesegas kann auch für die chemische Produktion von Methanol oder von langkettigen Kohlenwasserstoffen (Fischer-Tropsch-Synthese)⁵⁵ als Ersatz für Mineralöl verwendet werden. Die Pyrolyse ist empfehlenswert, um Lignozellulose und andere vergleichsweise stabile organische Materialien mit geringem Wassergehalt energetisch zu nutzen.

Flex-Motoren und Verbrennungsprodukte

- Verbrennungsmotoren müssen umgestellt werden, um Ethanol und Biodiesel zu nutzen, was technisch bereits erfolgreich realisiert worden ist. Die sogenannten Flex-Motoren, die zum Beispiel in Brasilien standardmäßig betrieben werden, laufen mit Benzin und Ethanol in jedweder Mischung bei offensichtlich weitgehend unvermindertem Wirkungsgrad.
- Die Verbrennung von Biokraftstoffen ist ein wesentlich komplexerer Prozess als die Verbrennung von herkömmlichem Benzin oder Dieselöl, die fast ausschließlich aus homogenen gesättigten Kohlenwasserstoffen bestehen. Es ist zu erwarten, dass die Entstehung von zum Teil toxischen Nebenprodukten (Aldehyde, Schwefel- und Stickstoff-Verbindungen) bei der Verbrennung von Biokraftstoffen gegenüber konventionellen Kraftstoffen deutlich höher sein wird. Insbesondere die Verbrennung von Biodiesel mit seiner hohen strukturellen Heterogenität könnte noch nicht absehbare Probleme

aufwerfen, was die Bildung von Verbrennungsnebenprodukten betrifft, und könnte darüber hinaus die Entwicklung neuer Fahrzeug-Katalysatoren erforderlich machen.

Synthese chemischer Grundstoffe

- Die Nutzung von Biomasse als Ausgangssubstrat für die Synthese chemischer Grundstoffe (z. B. 1,3 Propandiol) und spezieller Biokraftstoffe erfordert es, neue Katalyse-Prozesse zu entwickeln, die bei geringer Substratkonzentration in wässriger Lösung ablaufen. Biomasse ist reich an funktionellen chemischen Gruppen. Ihre Nutzung unterscheidet sich daher grundsätzlich von den gängigen Konversionen von relativ homogenen Kohlenwasserstoffen als Ausgangsmaterial der synthetischen Chemie. Eine neue synthetische Chemie, die auf biologischen Ausgangsstoffen aufbaut, ist grundsätzlich möglich, erfordert jedoch noch große Anstrengungen in Forschung und Entwicklung. Die gängigen chemischen Produktionsprozesse müssten angepasst oder gar neu entwickelt werden.

⁵⁵ Die Fischer-Tropsch-Synthese ist ein im großen Maßstab verfügbarer industrieller Prozess, der vor 1925 durch Franz Fischer und Hans Tropsch in Mülheim an der Ruhr entwickelt wurde. Hierbei werden Gemische aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) zu flüssigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt.

Empfehlungen bezüglich der Umwandlung von Biomasse in Brennstoffe und in Vorstufen für chemische Synthesen

- Die Produktion von Bioethanol aus Stärke oder Zucker, die primär als Lebensmittel dienen, ist für Deutschland aufgrund der damit verbundenen Klima relevanten und ökologischen Folgen nicht zu empfehlen (siehe Kapitel 1). Gleiches gilt für den Import von Bioethanol, der aus diesen Rohstoffen hergestellt wird. Hingegen ist eine Kombination von Bioethanol- und Biogasproduktion – bevorzugt aus Rest- und Abfallstoffen – in kleineren dezentralen Anlagen begrenzt vertretbar, soweit die internen Energieflüsse optimal genutzt und alle ökologischen Aspekte Berücksichtigung finden.
- Eine Produktion von Bioethanol aus Lignozellulose ist nur dann zu empfehlen, wenn im Gesamtprozess (vom Anbau der Biomasse über Ernte und Bioenergiekonversion bis hin zur Verbrennung) netto deutlich weniger Treibhausgase emittiert werden, als dies bei der Verbrennung einer Energie-äquivalenten Menge fossiler Brennstoffe der Fall ist. Bei Importen von Biomasse sollten die mit der Produktion von Biomasse im Herkunftsland verbundenen Treibhausgas-Emissionen mit berücksichtigt werden. Für die Produktion von Biodiesel aus Raps, Sonnenblumen, Ölpalmen oder Sojabohnen gelten die gleichen Empfehlungen.
- Die Produktion von Biogas aus landwirtschaftlichen und häuslichen Abfällen sollte, auch unter dem Gesichtspunkt der Entsorgung, weiterentwickelt werden, soweit eine direkte Verbrennung oder Vergasung (Pyrolyse) nicht vorzuziehen ist. Die Abwägung zwischen diesen Techniken ist im Wesentlichen abhängig vom Wassergehalt der Abfallmaterialien: Je geringer der Wassergehalt, desto eher empfiehlt sich eine Verbrennung oder Vergasung. Die Produktion von Biogas aus „Energiepflanzen“ sollte nur insoweit erfolgen, als sie dazu beiträgt, die Biogasproduktion aus Agrarabfällen und den fluktuierenden Energiebedarf zu stabilisieren und zu optimieren.
- Bisher wurde Biomasse zum größten Teil für Heizungszwecke (das meiste Holz) und für die Erzeugung von Elektrizität (das meiste Biogas) genutzt. Das ist insofern problematisch als Biokraftstoffe für den Transport langfristig wohl am schwierigsten zu ersetzen sind. Die Umwandlung von Biomasse sollte überwiegend auf Biotreibstoffe für Schwerlastwagen, Flugzeuge und Lastschiffe ausgerichtet sein, die wahrscheinlich auch in Zukunft nicht elektrisch betrieben werden können.
- Ein vielversprechendes Forschungsgebiet ist die Entwicklung von Verfahren, welche aus Biomasse organische Bausteine gewinnen, die für chemische Synthesen benötigt werden und die bisher petrochemisch hergestellt worden sind.
- Bei der Verwendung von Biobrennstoffen ist darauf zu achten, dass die nach unvollständiger Verbrennung verbleibenden Emissionen auf Toxizität geprüft und die Schadstoffe gegebenenfalls katalytisch entgiftet werden.

3. BIOLOGISCHE UND BIO-INSPIRIERTE LICHTGETRIEBENE PROZESSE ZUR SPALTUNG VON WASSER IN WASSERSTOFF UND SAUERSTOFF

Wasserstoff gilt als ein wichtiger Energieträger in unserer zukünftigen Energieversorgung. Er kann durch Verbrennung in Wärme umgesetzt oder in Brennstoffzellen direkt in Elektrizität umgewandelt werden. Dabei entsteht kein Kohlendioxid, sondern lediglich Wasser. Wasserstoff wird darüber hinaus in großen Mengen für chemische Synthesen benötigt. Gegenwärtig wird Wasserstoff überwiegend aus fossilen Brennstoffen gewonnen; nur ein geringer Anteil entsteht durch Elektrolyse von Wasser. Eine zukünftig breitere Nutzung von Wasserstoff-basierten Technologien setzt voraus, dass erneuerbare Ressourcen für die Gewinnung von Wasserstoff erschlossen werden.

Biomasse lässt sich auf mehreren Wegen für die Produktion von Wasserstoff einsetzen. Diese umfassen thermochemische Prozesse (Pyrolyse und Vergasung von Biomasse) und biologische Verfahren (Fermentation mit phototrophen und gärenden Mikroorganismen; s. Kapitel 2). Darüber hinaus vermögen einige Mikroorganismen Wasserstoff mit Hilfe von Sonnenenergie im Zuge der Photosynthese durch Spaltung von Wasser freizusetzen. Diese Option ist besonders attraktiv, da sie auf reichlich vorhandenen Ressourcen basiert, nämlich auf Wasser und Sonnenlicht. Tiefe Einblicke in die Wirkungsweise der Photosynthese und der katalytischen Reaktionen, die mit der Wasserstoffproduktion aus Wasser verbunden sind, haben Chemiker inspiriert, das natürliche System zu imitieren und „artifizielle“ photosynthetische Einheiten, als „artificial leaves“ bezeichnet, zu konstruieren. Diese Katalysatoren sind in der Lage, Sonnenlicht durch Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff nutzbar zu machen und somit Solarenergie direkt in eine chemisch speicherbare Form zu überführen.

Der biologische und auch der photochemische Ansatz zur Spaltung von Wasser in H_2 und O_2 sind noch weit entfernt von industri-

eller Einsatzfähigkeit. Dennoch stellen sie interessante laufende Forschungsvorhaben dar, die darauf gerichtet sind, langfristig alternative erneuerbare Energiequellen zu erschließen. Vor diesem Hintergrund wurden diese neuen, vielversprechenden Ansätze in die Leopoldina-Stellungnahme aufgenommen.⁵⁶

Schlussfolgerungen

- Molekularer Wasserstoff (H_2) ist ein ausgesprochen umweltfreundlicher Energieträger, bei dessen Umwandlung in Wärme oder Elektrizität lediglich Wasser (H_2O), jedoch kein Kohlendioxid (CO_2) entsteht. In industriellen Prozessen werden derzeit weltweit 500×10^9 Normkubikmeter⁵⁷ Wasserstoff pro Jahr verbraucht; davon stammen über 90 Prozent aus fossilen Quellen, vornehmlich aus Erdgas. In einem Wasserstoff-basierten Energiekonzept müssten Wege gefunden werden, diesen Energieträger in größerem Maßstab aus erneuerbaren Ressourcen herzustellen, angemessene hoch dimensionierte Speicher- und Transportvorrichtungen zu entwickeln und eine allgemein zugängliche Infrastruktur aufzubauen.
- Keiner der Wege zur Bildung von Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen kann mit dem gegenwärtigen Marktpreis für Wasserstoff aus Erdgas (1 Euro pro kg H_2) konkurrieren. Die alkalische Elektrolyse von Wasser zur Erzeugung von Wasserstoff ist bisher die kostengünstigste Technik (3 Euro pro kg H_2). Sie erlaubt eine über 50-prozentige Ausbeute bei der Stromumwandlung, wobei die Elektrizität mit etwa der Hälfte am Herstellungspreis beteiligt ist. Die Erzeugung

⁵⁶ Reece, S.Y. et al.: Wireless solar water splitting using silicon-based semiconductors and earth-abundant catalysts. *Science* 334, 2011: S. 645-648.

⁵⁷ Bei 20°C und 1 Bar Druck.

ist aber nur dann klimafreundlich, wenn die Elektrizität nicht durch Verbrennung fossiler Energiequellen gewonnen wird. Die Pyrolyse von Biomasse zu Synthesegas (s. Kapitel 2) ist ebenfalls ein bereits gut etablierter Prozess, der Wasserstoff in einer mittelgroßen Anlage derzeit zum Preis von 7 Euro pro kg H₂ liefert.

- Noch in der Entwicklung befindlich ist die photo-elektrochemische Erzeugung von Wasserstoff, bei der die Elektrolyse von Wasser direkt mit einem photovoltaischen Modul gekoppelt ist. Dieses Verfahren benötigt unter anderem teure Platin/Iridium-Katalysatoren. Die Forschung zielt darauf ab, die Kopplung zu optimieren und die kostspieligen und knapp verfügbaren Katalysatormaterialien durch günstigere neue Werkstoffe zu ersetzen.
- Ein alternativer, ebenfalls noch in Forschung und Entwicklung befindlicher Prozess zielt auf photokatalytische Verfahren ab, bei denen Wasserstoff direkt aus Wasser ohne den Umweg über Elektrizität freigesetzt wird. Dieser natürlich vorkommende Prozess wird von einigen einzelligen Grünalgen im Zuge der „natürlichen Photosynthese“ realisiert. Der dabei bisher erzielte Ertrag von Wasserstoff müsste jedoch um einen Faktor von etwa 100 gesteigert werden, um den Prozess in die Nähe einer realistischen Anwendung zu bringen.
- In den letzten zehn Jahren hat die Wissenschaft tiefgehende Erkenntnisse über die Struktur, die Synthese und den Reaktionsmechanismus des Photosynthese-Apparates und der an der Wasserstoff-Produktion beteiligten Enzyme (Hydrogenasen) gewonnen. Die Forschung deckte komplexe Metallzentren in den Enzymen auf und zeigte, dass die natürlichen Katalysatoren sich weit verbreiteter Metalle bedienen – wie Eisen, Nickel und Mangan – und ihre Wirkung somit nicht auf teuren, nur begrenzt verfügbaren Edelmetallen – wie Platin oder Iridium – beruht. Allerdings steht einer technischen Anwendung dieser Biokatalysatoren entgegen, dass sie relativ instabil sind.
- Von der Natur lernen bedeutet nicht notwendigerweise, Katalysatoren zu synthetisieren, die die Struktur der Katalyse-Zent-

ren des Photosynthese-Apparates und der Wasserstoff-produzierenden Hydrogenasen exakt nachahmen. Eine alternative Strategie beruht darauf, funktionale Analoga herzustellen, die nach dem gleichen mechanistischen Prinzip arbeiten wie die Enzyme, aber stabiler und kostengünstiger sind. Zwei kürzlich erzielte Durchbrüche bilden vielversprechende Beispiele: ein Nickel-basiertes System zur Produktion und Oxidation von Wasserstoff⁵⁸ sowie ein Cobalt-basiertes System zur Spaltung von Wasser⁵⁹. Obgleich sich diese bio-inspirierten Ansätze, die auch als „artifizielle Photosynthese“ bezeichnet werden, noch auf der Ebene der Grundlagenforschung befinden, eröffnen sie vielversprechende Perspektiven für die Zukunft. Noch ist unklar, ob die „natürliche“ und/oder die „artifizielle“ Photosynthese jemals großtechnisch bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser Anwendung finden werden.

58 Tran, P.D., Artero, V., Fontecave, M.: Water electrolysis and photo electrolysis on electrodes engineered using biological and bio-inspired molecular systems. *Energy & Environmental Science* 3, 2010: S. 727-747.

59 Nocera, D.G.: The artificial leaf. *Acc. Chem. Res.* 45, 2012: 767-776

Empfehlungen bezüglich der lichtgetriebenen Wasserstoff-Bildung aus Wasser

- In Anbetracht der nahezu unbegrenzten Verfügbarkeit von Wasser und Sonnenlicht könnte die Produktion von Wasserstoff durch direkte photolytische Spaltung von Wasser mit Hilfe phototropher Mikroorganismen einen idealen Energieträger liefern, der sowohl erneuerbar als auch umweltfreundlich und nachhaltig ist. Ob und wann die Bildung von Wasserstoff durch natürliche Photosynthese-Systeme technisch einsatzfähig wird, ist allerdings offen und Gegenstand laufender Grundlagenforschung.
- Die Entwicklung chemisch synthetisierter Katalysatoren, die befähigt sind, in Anlehnung an die natürlichen Systeme unter milden Bedingungen Wasser photolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten (artifizielle Photosynthese) hat in letzter Zeit große Fortschritte gemacht. Diese neuen Ansätze bieten zusätzlich die Chance, aktive und ökonomisch erschwingliche Katalysatoren zu erhalten, die bei der Verbrennung von Wasserstoff in Brennstoffzellen und in chemischen Synthesen eingesetzt werden können. Das Forschungsgebiet hat ein hohes Innovationspotenzial und sollte weiter verfolgt werden.

BETEILIGTE WISSENSCHAFTLER

Koordinatoren

| | |
|-------------------------------|--|
| Prof. Dr. Bärbel Friedrich ML | <i>Institut für Biologie/Mikrobiologie, Humboldt-Universität zu Berlin</i> |
| Prof. Dr. Bernhard Schink ML | <i>Lehrstuhl für mikrobielle Ökologie, Limnologie und allgemeine Mikrobiologie, Universität Konstanz</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |

Autoren

Kapitel 1: VERFÜGBARKEIT UND NACHHALTIGKEIT VON PFLANZLICHER BIOMASSE ALS ENERGIEQUELLE

| | |
|-----------------------------------|--|
| Prof. Dr. Helmut Haberl | <i>Institut für Soziale Ökologie (SEC), Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien, Graz, Österreich</i> |
| Prof. Dr. Christian Körner ML | <i>Institut für Botanik, Universität Basel, Schweiz</i> |
| Dr. Christian Lauk | <i>Institut für Soziale Ökologie (SEC), Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien, Graz, Österreich</i> |
| Dr. Ulrike Schmid-Staiger | <i>Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Verfahrenstechnik, Stuttgart</i> |
| Prof. Dr. Ernst-Detlef Schulze ML | <i>Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena</i> |
| Prof. Dr. Victor Smetacek | <i>Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |
| Prof. Dr. Peter Weiland | <i>Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig</i> |
| Dr. Karen Wilson | <i>Cardiff School of Chemistry, Cardiff University, Wales, Great Britain</i> |

Kapitel 2: PROZESSE DER UMWANDLUNG VON BIOMASSE IN BRENNSTOFFE UND IN VORSTUFEN FÜR CHEMISCHE SYNTHESSEN

| | |
|---|--|
| PD Dr. Nicolaus Dahmen | <i>Institut für Katalyseforschung und -Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i> |
| Prof. Dr. Eckhard Dinjus | <i>Institut für Katalyseforschung und -Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i> |
| Prof. Dr. Peter Dürre | <i>Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie, Universität Ulm</i> |
| Prof. Dr. Gerd Kohlhepp | <i>Geografisches Institut, Eberhard-Karls-Universität Tübingen</i> |
| Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus ML | <i>Fakultät für Chemie, Universität Bielefeld</i> |
| Prof. Dr. Bernhard Schink ML | <i>Lehrstuhl für mikrobielle Ökologie, Limnologie und allgemeine Mikrobiologie, Universität Konstanz</i> |
| PD Dr. Thomas Senn | <i>Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Universität Hohenheim</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |
| Prof. Dr. Peter Weiland | <i>Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig</i> |
| Dr. Karen Wilson | <i>Cardiff School of Chemistry, Cardiff University, Wales, Great Britain</i> |

Kapitel 3: BIOLOGISCHE UND BIO-INSPIRIERTE LICHTGETRIEBENE PROZESSE ZUR SPALTUNG VON WASSER IN WASSERSTOFF UND SAUERSTOFF

| | |
|-------------------------------|--|
| Prof. Dr. Fraser A. Armstrong | <i>Department of Inorganic Chemistry, University of Oxford, Great Britain</i> |
| Dr. Vincent Artero | <i>Institute de Recherches en Technologies et Sciences pour le Vivant, Université Joseph Fourier, Grenoble, France</i> |
| Prof. Dr. Holger Dau | <i>Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin</i> |
| Prof. Dr. Bärbel Friedrich ML | <i>Institut für Biologie/Mikrobiologie, Humboldt-Universität zu Berlin</i> |
| Prof. Dr. Thomas Happe | <i>AG Photobiotechnologie, Ruhr-Universität Bochum</i> |
| Dr. Philipp Kurz | <i>Institut für Anorganische Chemie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel</i> |
| Prof. Dr. Wolfgang Lubitz | <i>Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, Mülheim an der Ruhr</i> |
| Prof. Dr. Matthias Rögner | <i>Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen, Ruhr-Universität Bochum</i> |

Wissenschaftler, die zu einzelnen Punkten gehört wurden

| | |
|--|---|
| Prof. Dr. Thomas Bley | <i>Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik der Technischen Universität Dresden</i> |
| Prof. Dr. Christian Barth | <i>Deutsches Institut für Ernährungsforschung, Golm</i> |
| Prof. Dr. Detlev Drenckhahn ML | <i>Institut für Anatomie und Zellbiologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg</i> |
| Prof. Dr. Ian Donnison | <i>Institute for Biological, Environmental and Rural Sciences, Aberystwyth University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Ottmar Edenhofer und Kollegen | <i>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam</i> |
| Prof. Dr. Maarten Koornneef | <i>Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtung, Köln</i> |
| Prof. Dr. Adam Powell | <i>Centre for Sustainable Aquaculture Research, Swansea University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Robin Shields | <i>Centre for Sustainable Aquaculture Research, Swansea University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Mark Stitt ML | <i>Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie, Golm</i> |

Diesen Wissenschaftlern sei dafür gedankt, dass sie sich die Zeit genommen haben, einzelne Kapitel zu lesen und kritische Fragen zu stellen, die geholfen haben, zu ausgewogenen Empfehlungen zu kommen. Der vorliegende Text liegt jedoch ausschließlich in der Verantwortung der Wissenschaftler, die den Bericht geschrieben haben.

Wissenschaftliche Referenten der Arbeitsgruppe

| | |
|-----------------------|--|
| Dr. Christian Anton | <i>Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle</i> |
| Dr. Henning Steinicke | <i>Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle</i> |

Externe Gutachter

| | |
|---|--|
| Prof. Dr. Nikolas Amrhein ML | <i>Group for Plant Biochemistry und Physiology, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz</i> |
| Prof. Dr. Georg Fuchs ML | <i>Institut für Biologie II, Mikrobiologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</i> |
| Prof. Dr. Wolfgang Junge | <i>Abteilung Biophysik, Universität Osnabrück</i> |
| Prof. Dr. Bernt Krebs ML | <i>Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster</i> |
| Prof. Dr. Hermann Sahm | <i>Institut für Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich</i> |
| Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber ML | <i>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam</i> |
| Prof. Dr. Ferdi Schüth ML | <i>Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr</i> |
| Prof. Dr. Stefan Tangermann | <i>Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen, Akademie der Wissenschaften zu Göttingen</i> |

Den Gutachtern sei für ihre zahlreichen Verbesserungsvorschläge gedankt, die nahezu alle an- und aufgenommen wurden. Der vorliegende Text liegt jedoch ausschließlich in der Verantwortung der Wissenschaftler, die den Bericht geschrieben haben.

INHALTSVERZEICHNIS DER SEPARAT IN ENGLISCHER SPRACHE ERSCHIENENEN AUSFÜHRLICHEN STELLUNGNAHME

Bioenergy – Chances and Limits*

| | |
|---|----|
| OUTLINE | 4 |
| INTRODUCTORY CHAPTER..... | 5 |
| References..... | 8 |
| 1. THE AVAILABILITY AND SUSTAINABILITY OF BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE | 9 |
| 1.1. Carbon and energy content of biomass, primary energy and final energy | 10 |
| 1.2. Net primary production (NPP) in terrestrial systems and primary energy consumption..... | 11 |
| 1.2.1. Global NPP and primary energy consumption..... | 11 |
| 1.2.2. NPP and primary-energy consumption in Germany | 15 |
| 1.2.3. NPP in other countries..... | 17 |
| 1.3. Human appropriation of net primary production and bioenergy potential..... | 18 |
| 1.4. Fossil fuel costs of net primary production, energy returns on investment, area efficiencies, and capacity credits | 18 |
| 1.5. Greenhouse gas fluxes associated with net primary production | 22 |
| 1.6. Greenhouse gas mitigation potential of using biomass as an energy source and effects of land use change | 24 |
| 1.7. Life-cycle assessments and carbon capture | 25 |
| 1.8. Accounting of greenhouse gas emissions in international agreements..... | 26 |
| 1.9. Import of biomass | 26 |
| 1.10. Losses in the human food production chain | 28 |
| 1.11. Availability of agricultural and municipal wastes and of straw | 29 |
| 1.12. Soil quality and intensive agriculture..... | 30 |
| 1.13. Water requirement of NPP and effects of global warming on NPP | 31 |
| 1.14. Phosphate limitation of net primary production in terrestrial systems | 32 |
| 1.15. Plant breeding for energy crops..... | 33 |
| 1.16. Sustainable intensification of crop yields..... | 35 |
| 1.17. Net primary production by algae | 35 |
| 1.18. Net primary production in oceans | 36 |
| References..... | 37 |
| 2. CONVERSION OF BIOMASS INTO MARKETED ENERGY CARRIERS AND PRECURSORS FOR CHEMICAL SYNTHESIS | 43 |
| 2.1. Lignocellulose as a biofuel source..... | 44 |
| 2.2. Biogas..... | 44 |
| 2.3. Bioethanol..... | 45 |
| 2.4. Biodiesel and renewable diesel | 46 |
| 2.5. Butanol..... | 49 |
| 2.6. Methanol and hydrogen | 49 |

* Verfügbar unter <http://www.leopoldina.org>

| | |
|--|-----------|
| 2.7. Advanced biofuels..... | 49 |
| 2.8. Microbial fuel cells..... | 50 |
| 2.9. Commodity chemicals..... | 51 |
| 2.10. Biofuel combustion-associated emissions | 52 |
| 2.11. Best practice example: Combined production of ethanol and biogas | 53 |
| 2.12. Large-scale bioethanol production in Brazil..... | 55 |
| 2.13. H ₂ storage via microbial methane formation | 57 |
| 2.14. Thermochemical path from biomass to fuels | 57 |
| References..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 3. BIOLOGICAL AND BIO-INSPIRED SOLAR DIHYDROGEN PRODUCTION | 63 |
| 3.1. Technical routes to hydrogen production using solar energy | 64 |
| 3.2. Biological routes to hydrogen production based on water and sunlight | 66 |
| 3.2.1. Photosynthetic hydrogen formation from water | 66 |
| 3.2.2. Photosystem II | 67 |
| 3.2.3. Hydrogenases | 67 |
| 3.3. Cellular and semi-artificial systems for H ₂ production | 68 |
| 3.3.1. Using immobilized enzymes for H ₂ production..... | 69 |
| 3.3.2. On the way to H ₂ producing design cells | 70 |
| 3.4. Bio-inspired systems for solar water splitting and hydrogen production..... | 71 |
| 3.4.1. Light reactions | 72 |
| 3.4.2. Water oxidation | 72 |
| 3.4.3. Hydrogen formation | 73 |
| 3.4.4. Perspectives | 74 |
| References..... | 76 |

| | |
|-----------------------|-----------|
| GLOSSARY | 78 |
|-----------------------|-----------|

| | |
|----------------------------------|-----------|
| SCIENTISTS INVOLVED | 84 |
|----------------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| PROGRAM OF THE WORKSHOP “BIOFUELS AND BIOCONVERSION” | 86 |
|---|-----------|

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| SUPPLEMENT TO CHAPTER 1 | 89 |
|--------------------------------------|-----------|

| | |
|--|-----|
| 1. Nettoprimärproduktion und Bioenergie (Net primary production and bioenergy) Ernst-Detlef Schulze & Christian Körner | 90 |
| 2. Menschliche Aneignung von Nettoprimärproduktion in Europa: Schlussfolgerungen für Bioenergiepotentiale (Human appropriation of net primary production in Europe: Conclusions with respect to bioenergy potentials) Helmut Haberl, Karl-Heinz Erb, Christian Lauk & Christoph Plutzer | 102 |

Executive Summary and Recommendations

Bioenergy – Chances and Limits

An extended version of the report written in English has been printed separately.

The executive summary and the extended version are also found under www.leopoldina.org

Legal Information

Publisher:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)

Berlin Office:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Editors:

Dr. Christian Anton
Dr. Henning Steinicke

Design and Setting:

unicom Werbeagentur GmbH, Berlin

Printing:

H. Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Cover picture:

© PhotographyByMK – Fotolia.com

Edition (08/2012): 1500

How to cite this report: German National Academy of Sciences
Leopoldina (2012): Bioenergy – Chances and limits. Halle (Saale).

© Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

ISBN: 978-3-8047-3082-3

PREFACE

Back in 2009, the German National Academy of Sciences Leopoldina, the German National Academy of Science and Engineering and the Berlin-Brandenburg Academy of Sciences and Humanities outlined the necessary scope of future energy research in their “Concept for an integrated energy research programme for Germany”. The Leopoldina updated the concept last year when it issued its statement entitled “Energy and research policy recommendations following the events in Fukushima”.

The present study now provides a comprehensive analysis of the use of bioenergy.

In recent years Germany has seen a steady rise in the number of energy crops being cultivated for the production of biofuels and biogas. Because bioenergy is so versatile and easy to store, the German Federal Government wants to ensure that it continues to play a major role in the future.

Over the past one-and-a-half years, a group of experts from various disciplines have been helping the Leopoldina investigate how Germany can best harness biomass in ways that make sense from the point of view of energy and the climate. The statement on the opportunities and limits of bioenergy analyses the availability and feasibility of using biomass in Germany, provides an overview of energy conversion technologies and introduces promising approaches to producing hydrogen from renewable resources.

The recommendations contained in this statement are intended to provide parliaments, ministries, associations and companies with well-founded and unbiased support in making the important decisions that will lay the foundations for a climate-friendly, secure and sustainable use of bioenergy.

June 2012



Professor Jörg Hacker

President of the German National Academy of Sciences Leopoldina

CONTENTS

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION | 31 |
| 1. THE AVAILABILITY AND SUSTAINABILITY OF PLANT BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE | 33 |
| Conclusions | 33 |
| Availability and use of biomass as energy source..... | 33 |
| Biomass imports | 34 |
| Ecological risks, climate and environmental costs | 34 |
| Biomass and human nutrition | 35 |
| Phosphate reserves and water requirement | 36 |
| Crop yield, application of fertilizers, and plant breeding..... | 36 |
| Higher NPP in tropical zones..... | 37 |
| Use of algae | 37 |
| Comparison photosynthesis, photovoltaics, solar thermal collectors and wind energy | 38 |
| Capacity credit | 38 |
| Future developments | 38 |
| Recommendations | 39 |
| 2. CONVERSION OF BIOMASS INTO MARKETED ENERGY CARRIERS AND PRECURSORS FOR CHEMICAL SYNTHESIS | 40 |
| Conclusions | 40 |
| First generation biofuels | 40 |
| Second generation biofuels | 41 |
| Biogas | 41 |
| Thermochemical conversion to synthesis gas..... | 41 |
| Flex engines and combustion products | 42 |
| Synthesis of platform chemicals | 42 |
| Recommendations | 43 |
| 3. BIOLOGICAL AND BIO-INSPIRED SOLAR DIHYDROGEN PRODUCTION..... | 44 |
| Conclusions | 44 |
| Recommendations | 45 |
| INVOLVED SCIENTISTS | 46 |
| TABLE OF CONTENTS OF THE SEPARATELY PUBLISHED EXTENDED REPORT | 49 |

INTRODUCTION

Definition

Bioenergy is energy derived from non-fossilized plant and algal biomass including wood. The biomass can be burned directly for energy purposes or after prior conversion into bioethanol, biodiesel, biogas, hydrogen or synthesis gas¹. Biofuels is the term used for liquid or gaseous fuels for transport produced from biomass.

Goals

The aim of this report is to assess the chances and limits of bioenergy as an energy source for Germany today and in the future, considering not only quantitative aspects but also the ecological and climate risks. An important question was, what contributions can bioenergy make to the change in energy policy? Although the focus is on Germany, the discussion includes Europe (EU-25) and has a global perspective.

The report “Bioenergy – chances and limits” is complementary to the previous surveys on: “Biotechnological energy conversion” (2008)², “Die Zukunft der Energie” (2008)³, “Concept for an integrated energy research programme for Germany” (2009)⁴ and “Energy policy and research policy recommendations after the events in Fukushima” (2011)⁵ published earlier.

Background

One of the main motivations for using bioenergy is to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions by substituting biomass for fossil fuels, in the hope to thereby mitigate anthropogenic climate change. Bioenergy is often considered to be CO₂ neutral because the generation of biomass by photosynthesis absorbs the same amount of CO₂ as is released by burning the biomass. This concept, however, fails to consider the intimate linkage between the carbon cycle and the nutrient cycles of nitrogen, phosphorus, sulfur and metals, as well as the water cycle, all of which are besides carbon constituents of biomass and are required for photosynthesis. Whenever biomass is produced, soil nutrients are consumed. Whenever biomass is repeatedly removed from an ecosystem or its production accelerated by human intervention, nutrients need to be added. Yet, fertilizer application induces release of nitrogen-based greenhouse gases (GHGs)⁶ with a much higher global warming potential than that of CO₂.

The assumption of the CO₂ neutrality of bioenergy also neglects the fact that forest biomass contains carbon which has been assimilated over the past decades and centuries. This carbon is partially released when wood is harvested and burned at higher rates than regrown.

In a full carbon-cycle assessment carbon costs in the agricultural production and transformation processes must also be considered. In some cases these costs can substantially reduce or even nullify any GHG reduction from lower fossil energy use. In these cases bioenergy is neither renewable nor carbon neutral.

¹ Synthesis gas (syngas) is a mixture of carbon monoxide and hydrogen. Examples of production methods include the gasification of coal or biomass and the steam reforming of methane and other hydrocarbons.

² Bley, T. (Ed.): Biotechnologische Energieumwandlung – Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf. acatech diskutiert. Springer Berlin Heidelberg, 2009: p. 112.

³ Gruss, P. & Schüth, F. Die Zukunft der Energie – Die Antwort der Wissenschaft. C.H. Beck, München, 2008.

⁴ Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech und Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland 2009: 62 pp.

⁵ German National Academy of Sciences Leopoldina: Energy- and research-policy recommendations following the events in Fukushima. 2011: 32 pp.

⁶ Greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) absorb and emit radiation within the thermal infrared range.

EU-targets

Despite these considerations, the European Union (EU) has agreed on the target that at least 10 per cent of the fuel used for transport and mobility should come from renewable energy sources (mostly biomass) by 2020.⁷ The objective of replacing conventional liquid fuels with bioethanol or biodiesel is not only based on the assumption that it will significantly contribute to the reduction of GHG emissions, (35 per cent now and 60 per cent at 2018) but also that the negative ecological consequences and impacts on biodiversity of biofuel generation are acceptable when compared to the benefits.

Leopoldina report

To address these issues, a working group of the National Academy of Sciences Leopoldina organized an international workshop on “Bio-fuels and Bioconversion” at the Alfried Krupp Wissenschaftskolleg Greifswald, in October 2010. Scientists from various disciplines (biology, biophysics, biotechnology, chemistry and ecology) discussed the following topics:

1. Availability and sustainability of plant biomass as a source of energy, considering also the direct and indirect production and transformation costs;
2. Conversion of biomass into fuels (biogas, bioethanol, and biodiesel) and raw materials for the chemical industry;
3. Biological and bio-inspired processes that use solar energy to split water (H₂O) into hydrogen (H₂) and oxygen (O₂).

Economic aspects of bioenergy have already been intensively discussed elsewhere.⁸ Therefore, issues such as the present inability of bioenergy to compete economically with other energy sources, and the effect on food prices of the competition between food and energy production chains for land and biomass are only

touched upon in this report. Therefore, the report does not cover all aspects of bioenergy⁹.

Reports of the IPCC and of the BioÖkonomieRat

After almost completion of this Leopoldina report, the IPCC Special Report 2012 on Renewable Energy (SRREN) was published. The SRREN includes a more than 100 page-long chapter (Chapter 2) on bioenergy with a global focus.¹⁰ While this chapter discusses low-to-high bioenergy deployment scenarios, in the Executive Summary it is mainly the high deployment case that is emphasized. In view of the findings discussed in this document, the SRREN appears to draw too optimistic a picture with respect to the GHG mitigation potential of bioenergy and the technical potential of biomass for bioenergy. But the SRREN is not alone in doing this. The BioÖkonomieRat of the German Federal Republic recently also published a statement, which discusses a scenario that by 2050 23 per cent of Germany's total energy consumption could be derived from bioenergy, mainly via imports.¹¹

The Leopoldina report is much less optimistic about the future of bioenergy. Its conclusion is that with the exception of the use of biogenic waste the larger scale use of biomass as energy source is not a real option for countries like Germany.¹²

Parallel to the Leopoldina Report, which mainly deals with science aspects of bioenergy, the Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) published a supplementary report on “Biotechnologische Energieumwandlungen in Deutschland”, which mainly deals with the technical aspects.

⁷ Directives 2009/28/EC, 2009/29/EC, and 2009/30/EC from 23rd April 2009 of the European Parliament and of the Council.

⁸ OECD Biofuel Support Policies, an Economic Assessment (2008). Harvey, M. & Pilgrim, S. The new competition for land: Food, energy, and climate change. Food policy 36, 40–51 (2010).

⁹ A full assessment would have to include economic and socioeconomic aspects of bioenergy. The criteria for a full assessment have been formulated by Creutzig, F. et al. Can Bioenergy Assessments Deliver? Economics of Energy & Environmental Policy 1 (2), 2012 (doi:10.5547/2160-5890.1.2.5).

¹⁰ Edenhofer, O., Madrugá, R.P., Sokona, Y. (Hrsg.): Renewable energy sources and climate change mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge 2012: p. 214–331.

¹¹ Nachhaltige Nutzung von Bioenergie: Empfehlungen des BioÖkonomieRats. 2012: p. 36 et seq.

¹² Sinn, H. W. The Green Paradox. MIT Press, Cambridge, 2011.

1. THE AVAILABILITY AND SUSTAINABILITY OF PLANT BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE

In Chapter 1, the use of biomass as an energy source is considered in the context of the total primary-energy¹³ consumption, mainly of Germany and EU-25 countries. Bioenergy is also considered in relation to the ecological and climate costs of production and conversion, and to the competing demands for land area for the production of human food, animal feed and industrial raw materials. The relatively low overall availability of biomass in most countries is given special attention, because it is the driving force of intensive agriculture that is associated with considerable consequences for climate and ecology.

The amount of biomass grown in a country is determined by the net primary production (NPP)¹⁴, which is the net amount of plant biomass that grows over a year in a given area. In Germany and the EU-25 this amounts to an average of about 600 g carbon (C) per m² of vegetated land per year. The NPP of forests (518 g C per m² per year) and of cropland (550 g C per m² per year) in the EU-25 are almost the same, whereas the NPP of the grasslands is higher by about 50 per cent (750 g C per m² per year). NPP occurs mainly aboveground (on average 60 – 70 per cent) but also to a considerable part belowground (40 – 30 per cent).

Conclusions regarding the use of biomass as energy source

- In Germany¹⁵, approximately 30 per cent of the land are forested, 34 per cent are used for agriculture, and 24 per cent as grass and pasture; the remaining 11 per cent of the land are used for infrastructure. The total NPP on Germany's territory is up to 210 million metric tonnes C per year¹⁶, of which between 130 and 160 million tonnes C are produced aboveground, including leaves, stems and fruits. Of the above ground NPP about 14 million tonnes C as wood from forests and about 53 million tonnes of C as biomass from crop- and grasslands are harvested not counting the about 20 million tonnes C as straw generated as side product. About 20 million tonnes C per year are grazed by livestock. Altogether, this is about 75 per cent of aboveground NPP that are directly or indirectly appropriated by the people in Germany.

Availability and use of biomass as energy source

- The 14 million tonnes C as wood¹⁷ harvested in Germany per year have a calorific value of about 0.5×10^{18} J to 0.6×10^{18} J. This corresponds to about 4 per cent of the primary energy (oil, coal, gas, nuclear, and renewables) consumed per year in Germa-

¹³ Primary energy is in the case of biomass, coal and oil the energy of their combustion. In the case of non-combustible energy sources, including nuclear energy and all non-combustible regenerative energies, primary energy is often measured as the secondary energy that they produce (e.g. electricity). Primary energy also includes the energy required for heating.

¹⁴ NPP is the amount of plant biomass (above and belowground) that grows over a year in a given area. It neglects emissions of volatile organic compounds and root exudates as well as above and belowground litter recycled within a year. It is generally given in units of grams (g) of carbon (C) per square meter (m²) per year or for countries in million tonnes C per year. One g C corresponds to about 2 g biomass (dry weight).

¹⁵ Germany's land area is 357×10^9 m² (0.24 per cent of the global terrestrial area of 150×10^{12} m²), its population is 82 million people (1.17 per cent of the global population of 7 billion people) and its primary-energy consumption is 14×10^{18} J per year (2.8 per cent of the global primary-energy consumption of 500×10^{18} J per year). Germany's population density is 230 people per square km, its primary-energy consumption is 170×10^9 J per person per year and its average net primary production is 600 g C per m² per year

¹⁶ The net primary production data given have an error of about ± 10 per cent

¹⁷ $56 \text{ million m}^3 \text{ wood} \times 28 \text{ million tonnes biomass}$

ny (14×10^{18} J).¹⁸ About 40 per cent of the harvested wood is burned for energy, 60 per cent is used to produce wood-based products (some of these may be burned later). Carbon accounting suggests that extensive bioenergy production from forest biomass does not reduce anthropogenic climate forcing on decadal time scales. There is presently a substantial risk of sacrificing forest integrity and sustainability for maintaining or even increasing energy production without mitigating climate change.¹⁹

- The 53 million tonnes C as biomass harvested in Germany from crop- and grasslands are used to over 90 per cent for human food, animal feed and industrial products. Less than 10 per cent, mainly plant residues, with a calorific value of less than 0.2×10^{18} J are available as an energy source, which equals to less than 1.5 per cent of Germany's primary-energy consumption. Growth of crops for bioenergy has to consider that the production of fertilizers, pesticides and machines, as well as farm operations, transport (from plowing to harvest) and manpower entail significant fossil energy costs, which reduce the net energy gain from bioenergy.
- Of the 20 million tonnes C straw produced per year about 13 million tonnes are left on the fields for humus formation and about 4 million year of straw are used as bedding material for animal husbandry. Only the remaining 3 million tonnes with a calorific value of about 0.1×10^{18} J are potentially available as energy source. But even this low potential is restricted by the fact that at present, cropland soils in the EU-25 appear to lose about 3 per cent of their soil carbon per year, and that therefore more of the straw should remain on the fields.
- In 2010, about 7 per cent of the primary energy used in Germany was derived from biomass and renewable wastes. This was only

possible due to biomass imports. Without net imports, less than 3 per cent of Germany's primary energy could have been derived sustainably from biomass grown in Germany (mostly from renewable wastes).²⁰

Biomass imports

- As with Germany, most other European countries are net importers of biomass and of biomass products. Through imports, the EU-25 countries "appropriate" plant growth outside their borders equivalent to more than 30 per cent of their domestic NPP. Most of the net imports are related to animal feed. Less would have to be imported if local biomass were not used for bioenergy.
- Biomass imports effectively export the environmental pressures of intensive agriculture and forestry, unless it is ascertained that imports (a) are derived from biomass that is grown and harvested sustainably in the exporting countries, (b) do not negatively affect the provision of food and fodder in the exporting countries and (c) do not contribute to environmental conflicts in the exporting countries (e.g. deforestation). Adequately feeding a growing world population and reducing world hunger will result in increasing biomass requirements from the food system and may result in lower biomass availability in many of the regions from which Germany currently imports biomass. In the view of the authors it seems unlikely that future increases in crop yields will outpace the growth of the world population and of its standard of living (see below).

Ecological risks, climate and environmental costs

- The direct and indirect use of 75 per cent of the aboveground NPP for human purposes in Germany implies that human society already directly or indirectly uses a larger fraction of the aboveground NPP than all other living beings (non-farm animals, micro-organisms). In the light of this situation, an ex-

¹⁸ 14×10^{18} J per year equal to 370 million tonnes C equivalent per year.

¹⁹ Schulze, E. D. et al. Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *GCB Bioenergy* 2012 (doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x).

²⁰ Renewable wastes are all agricultural and forestry wastes (manure, crop, and wood residues, etc.), food wastes and e.g. scrap paper.

tension of intensive agriculture for energy-crop²¹ production appears to be ecologically questionable and hardly compatible with the existing German regulations towards the conservation of nature and biodiversity for non-agricultural land (BNatSchG)²² and with the EU Natura 2000 regulations, which include agricultural land.

- Intensive agriculture with use of fertilizers and impact on belowground biomass carbon through plowing and harvesting is almost always accompanied by emissions of the GHGs carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) and of methane (CH₄) as a result of livestock husbandry. On a 100-year time horizon, N₂O is about 300 times, and CH₄ about 25 times more potent as GHG than CO₂. The emissions on croplands (about 40 per cent relative to the CO₂ fixed into biomass) are on average twice as high as those on grasslands; only forests in equilibrium (no more wood harvested than re-grown) are near to GHG neutral.
- The emissions from cultivation and from direct and indirect land-use change²³ need to be fully taken into account when estimating the GHG emissions of biofuel production per unit of energy. Also the GHG emissions associated with the energy-dependent conversion of biomass into usable biofuels such as bioethanol and biodiesel have to be considered.
- In life-cycle assessments of biofuel production and consumption the following environmental costs have to be considered in addition to the factors mentioned above: changes in soil quality and in biodiversity; contamination of groundwater, lakes and rivers with nitrates and phosphates; and – in the case of irrigation – negative effects on the water-

table and salinization of the soils. For example, full life-cycle assessments of biogas formation and consumption show that the use of biogas as an energy source is only sustainable under very special conditions²⁴; liquid biofuels (bioethanol and biodiesel) are even less likely to be produced sustainably in EU25.²⁵ Full life-cycle assessments are difficult to develop and are subject to ongoing research.²⁶

Biomass and human nutrition

- In Germany, about two-thirds of the food-energy requirement of the population is provided by plant products and about one-third by animal products (meat, milk, grains and egg products, etc.). Approximately 10 million tonnes C as plant biomass are required each year for supplying the plant products (potatoes, fruits, vegetables). For providing the animal products, each year more than 40 million tonnes C in the form of plant biomass have to be fed to animals and 20 million tonnes C are grazed by animals.
- To sustain the metabolic rate²⁷ of the German population calory wise only 9 million tonnes C of biomass (0.33×10^{18} J) would be required. In reality more than 70 million tonnes C are consumed. The calorific losses in the human food production chain are thus enormous. One reason is that the cellulose portion of the biomass, which can be more than 50 per cent, cannot be digested by humans and that the lignin part can be digested neither by animals nor humans. The main reason is, however, the high consumption of animal products. The immense losses in

²¹ Energy crop is a plant grown to make biofuels (wood chips, bioethanol, biodiesel, or biogas), or to be combusted directly for its energy content to generate electricity or heat.

²² Bundesnaturschutzgesetz (Federal Nature Conservation Act) from 29 July 2009 (BGBl. I p. 2542), which has been changed by Article 3 of the law from 28 July 2011 (BGBl. I p. 1690).

²³ An example of direct land-use change is the conversion of grassland to cropland for bioenergy production. Indirect land-use change occurs if cropland previously used for food crops is used for bioenergy production.

²⁴ Meyer-Aurich et al. Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renewable Energy* 37, 2012: 277–284.

²⁵ Lisboa, C.C. et al. Bioethanol production from sugar cane and emissions of greenhouse gases- known and unknowns. *Global Change Biology Bioenergy* 3, 2011: 277–292.

²⁶ Creutzig, F. et al. Reconciling top-down and bottom-up modeling on future bioenergy deployment. *Nature Climate Change*, 2012, (doi:10.1038/nclimate1416).

²⁷ Metabolic rate is the amount of daily food energy expended by humans or animals. Food energy is the amount of energy obtained from food that is available through cellular respiration. On average (all ages, both sexes) the metabolic rate of humans is approximately 11,000 kJ per person per day (127 W).

the animal products supply chain are mainly due to the metabolic rate of the animals but also amongst others to the production of about 10 million tonnes C of animal manure. Above that, a large volume of food (estimates lie between 30 per cent and 50 per cent) is never consumed but instead discarded or consumed by pests along the food supply chain.

- Livestock are associated with methane emissions with a high global warming potential. A shift towards a more vegetarian diet would result in less biomass being devoted to animal feed, allowing land to be farmed less intensively – as a consequence, GHG emission would decline. A reduction of climate-relevant GHG emissions associated with less intense agriculture could contribute more to climate-change mitigation than the production of bioenergy.

Phosphate reserves and water requirement

- Geological reserves of mineral phosphate are limited. The availability of phosphates for fertilizer may therefore limit the future operation of intensive agriculture. Although sufficient phosphate is normally present in soils, most occurs in insoluble compounds that are not readily accessible to plants. The mobilization of phosphates may be enhanced by microbes using energy from plant photosynthesis (mycorrhiza)²⁸, but is slow. Therefore, enhanced phosphate supply promotes plant growth. When biogas is produced from energy crops, the phosphate could be recycled by application of the residues as a fertilizer. However, in the residues the nitrogen-to-phosphate ratio can be higher than required by the plants with the result that this fertilizer applies too much nitrogen to the fields, leading to losses of nitrate to groundwater and N₂O emissions.
- Plants with high yields generally consume a lot of water (> 500 ml per g C). The water requirement depends on the crop type, climate and soil conditions. Most of the wa-

ter is required for transpiration. Southern geographic regions with more sunshine than Germany mostly suffer from less rainfall (except the tropics) so that high crop yields can only be obtained with irrigation. In many parts of the world, water tables are falling as groundwater is unsustainably extracted for irrigation. Salinization of the soils is an additional major problem created by irrigation in arid regions²⁹. The long-term ecological costs of irrigation are very high.

- There are almost unlimited amounts of water in the world's oceans, but already the theoretical energy costs of desalinization are about one-half of the energy conserved during plant growth made possible by the water and this does not include the energy costs of water transport to the irrigation fields and of water losses during transport. Another problem concerning water is that conversion of biomass to biofuels such as ethanol requires a lot of water (> 10 liter water per liter bioethanol), which has to be treated after the fermentation and removal of the ethanol in an energy requiring process before it can be released into the environment or be reused again.

Crop yield, application of fertilizers, and plant breeding

- Since 1965, the yields of individual crops have increased by 70 – 80 per cent but the rate of increase has decreased in the past few years. The continuous increase (up to 2 per cent per year) was only in part the result of plant breeding for better allocation of carbon into grain (increased grain harvest index). It mainly resulted from more intense land management, fertilizer and pesticide application (over 800 per cent for nitrogen alone)³⁰ and irrigation, activities that are associated with the climate and environmental costs outlined above.
- Plant breeding, genetic modification and synthetic biology approaches are hoped to

²⁸ A mycorrhiza is a symbiotic association between a fungus and the roots of a vascular plant. In a mycorrhizal association the fungus colonizes the host plant's roots.

²⁹ Regions in which the evaporation is most of the time higher than the rainfall

³⁰ Groß, M. Stickstoffkreislauf: zuviel des Guten. Nachrichten aus der Chemie 60, 2012: 451-453.

lead to new variants of plants with substantially higher NPP and/or a lower requirement for water and fertilizers. This development would enhance biomass availability at lower ecological costs. However, there is a physical upper limit of production set by available photons (light conversion efficiency into biomass), nutrients, water, and plant structure, a limit that cannot be exceeded, either by applying fertilizer and pesticides or by bioengineering. There is not yet general agreement, where exactly this limit is for field-grown crops.

- In Germany, and most EU-25 countries, agricultural crop yields are already very high. However, in other parts of the world, including Eastern Europe, a considerable gap exists between actual and potential yields, and there are also large areas of abandoned farmland. Therefore, there is still technical potential for increasing global crop yields as well as bioenergy production. However, in many cases, abandoned crop fields are important CO₂ sinks because of gradual conversions to forests. Thus, the full GHG consequences of using abandoned agricultural land for bioenergy production needs to be taken into account before embarking on large-scale programs to realize these potentials.³¹
- Where and to what extent further growth of crop yields can be reconciled with the goal of reducing nitrogen-based GHG emissions from agriculture – examples include low-till agriculture or agroforestry – is an important area for future research. The challenges seem substantial, especially in regions where yields are already high.

Higher NPP in tropical zones

- In humid tropical zones NPP is mostly substantially higher than in temperate climates such as Germany. For example, in Brazil nat-

ural NPP is about twice that of Germany's, while population density is less than one-tenth and primary-energy consumption only one-third. In such cases, bioenergy may be a suitable option if appropriate policies (e.g. environmental zoning) are in place. However, bioenergy deployment in these regions needs to take into account: (a) avoidance of deforestation, (b) difficult soil conditions (leaching), (c) competition with other land-based products, as well as other socioeconomic and environmental concerns. While bioenergy, if managed well, may contribute to the energy supply of these regions, in the long-run and with growing food demand, it seems questionable whether these regions could remain large-scale suppliers on the global energy market.

Use of algae

- There has been a lot of discussion on using algae and cyanobacteria³² for production of biomass. However, detailed life-cycle analyses indicate that, with the currently available technologies, the energy return on investment (EROI)³³ is less than one. Algae are, however, of increasing interest as producers of precursors of chemical synthesis.
- Globally viewed, gross primary production in the oceans is of similar magnitude to that on land. There is, however, a striking difference between the standing stocks of biomass in the two biomes³⁴. About 650 x 10⁹ tonnes C are bound in terrestrial vegetation, whereas in the ocean the standing stock of total plankton biomass at any given moment is only 3 x 10⁹ tonnes of carbon. The difference can be partially explained by the much faster turnover of the unicellular phytoplankton due to grazing by zooplankton, but there are also other causes of mortality. The high turnover makes the oceans unsuitable as a source of biomass for large-scale biofuel production.

³¹ Abandoned land can be a substantial carbon sink for decades or even centuries by gradually converting to grassland and forests. This C sink would be reduced or even nullified if that land were to be used to produce energy crops (Kuemmerle, T. et al. Post-Soviet farmland abandonment, forest recovery, and carbon sequestration in western Ukraine. *Global Change Biology* 17, 2011: 1335-1349).

³² Algae and cyanobacteria have the ability to gain their energy by photosynthesis, see Chapter 3.

³³ Energy output divided by fossil energy input.

³⁴ A biome is a large geographical area of distinctive plant and animal groups, which are adapted to that particular environment.

Comparison photosynthesis, photovoltaics, solar thermal collectors, and wind energy

- The total solar energy that reaches the Earth's terrestrial vegetated surface ($100 \times 10^{12} \text{ m}^2$) per year and is absorbed there is about $0.5 \times 10^{24} \text{ J}$ (about 170 W per m^2). Of this energy, only approximately $2.2 \times 10^{21} \text{ J}$ (about 0.5 per cent) is contained in the biomass produced by green plants in terrestrial ecosystems each year. The efficiency of photosynthetic light energy conversion is thus very low.³⁵ Clearly, there are other techniques with higher efficiencies of light energy harvest: directly, such as by photovoltaics³⁶ and solar thermal collectors³⁷, or indirectly – via heating of air and evaporation of water – by using water- or wind turbines.³⁸ Photovoltaics, solar thermal collectors and wind turbines are mostly 10 times more area-efficient than plant photosynthesis. These techniques also require a much lower investment in fossil fuel energy than the agricultural production of biomass: the energy returns of investment (Energy output divided by fossil energy input; EROI) are about seven for photovoltaic electricity, eighteen for wind turbine electricity but generally well below three for most bioenergy schemes.³⁹ Non-surprisingly, of the alternative energy technologies, energy from biomass presently contributes least to the reduction of GHGs and has the highest financial price per tonne of CO_2 saved.⁴⁰

Capacity credit

- Although NPP has a much lower area efficiency of sunlight harvest than photovoltaics and wind turbine electricity, it does have the advantage that its product (biomass and the biofuels generated from it) can be stored for later use in large amounts and at high energy density. Currently there are limited capacities for storing large amounts of electricity, which is why photovoltaic electricity and wind turbine electricity has to be backed up by electricity generated from conventional power plants for times when there is not sufficient light or wind. Bioenergy does not need to be backed up and can therefore also be used to reliably meet fluctuating demands. By that it has a capacity credit.⁴¹

Future developments

- It is difficult to compare climate and ecological risks caused by generating biofuels from crops with those related to other renewable fuels and to fossil fuels because the use of crop biomass as an energy source competes with its use for human food and for feed for farm and non-farm animals, which is not relevant to the other energy sources. The present world's population of 7 billion people, of which about 1 billion are undernourished, is annually increasing by 1 per cent, at the same time the primary-energy consumption is continuously going up (5 per cent in 2010). Meeting the food demands of the world's growing population and providing them with a European standard of living has been predicted to require a 100 per cent increase in global food production until 2050. At the same time, it is estimated that the increase in arable land between 2005 and 2050 will be just 5 per cent.⁴²
- The global terrestrial NPP is currently approximately 10 per cent lower than it would

35 Michel, H. Vom Unsinn der Biokraftstoffe. *Angewandte Chemie* 124, 2012: 2566–2568.

36 Photovoltaic is a method of generating electrical power by converting solar radiation into direct current electricity using semiconductors.

37 Solar thermal collectors are designed to collect heat by absorbing sunlight. The term is applied to solar hot water panels, but may also be used to denote more complex installations such as solar parabolic, solar trough and solar towers or simpler installations such as solar air heat.

38 Wind turbines are devices that convert kinetic energy from the wind into mechanical energy. Wind is the movement of air across the Earth's surface. Most winds are produced by differences in air pressure between two places. Differences in air pressure and the pressure gradient force are caused by the unequal heating (in time and space) of the Earth's surface by solar radiation.

39 It is noted that a technology with a high EROI may be still irrelevant in practice due to high financial production costs. Thus the relatively high production costs of photovoltaic modules is a problem.

40 Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). *Biofuel Support Policies, an economic assessment* (2008).

41 Capacity credit of a fuel indicates the probability of the energy to reliably meet fluctuating demands. Thus bioenergy can support grid stability by providing balancing and reserve power to an energy system with increasing shares of fluctuating renewable (IPCC-SRREN Report, Chapter 8, p. 623, Table 8.1).

42 FAO Expert meeting 2009 on how to feed the world in 2050. Contribution by J. Bruinsma: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? See also contributions by others.

be in the absence of human land use. One major reason for this is that many agro-ecosystems have a lower NPP than the vegetation they replace. In addition, NPP is lost due to soil sealing and degradation (the latter resulting from past and present land use). The overall decrease in NPP has not been compensated by the increase in NPP from crop plant breeding, the application

of fertilizers and pesticides, and irrigation, although current NPP surmounts the NPP of potential vegetation in some intensively used regions, e.g. northwest Europe and irrigated dry lands such as the Nile valley. Whether it will be possible to raise NPP over its natural potential sustainably over large regions and longer periods of time, as has been proposed, seems questionable.

Recommendations regarding the use of biomass as energy source

- Germany should not focus on Bioenergy to reduce the consumption of fossil fuels and GHG emissions. This is the conclusion by the authors of this report after balancing all the arguments for and against the use of biomass as an energy source. Particularly, it should insist that the EU 2020 target of 10 per cent renewable content in road fuel energy is revisited. Rather, Germany should concentrate on other renewable energy sources such as solar heat, photovoltaics, and wind energy, whose area demand, GHG emissions, or other environmental impacts are lower than those of bioenergy. Energy conservation and energy efficiency improvements should have priority.
- Promotion of bioenergy should be limited to those forms of bioenergy that: (a) do not reduce food availability or spur food-price increases due to competition for limited resources such as land or water; (b) do not have large adverse impacts on ecosystems and biodiversity; and (c) have a substantially (> 60 – 70 per cent) better GHG balance than the energy carriers they replace. The valuable range of services that ecosystems provide to the public also needs to be respected. All these items have to be considered when biomass or biomass products are imported for bioenergy purposes.
- A combined optimization of food and bioenergy production, e.g. through use of animal manures for biogas production or energy capture from biogenic wastes or agricultural residues holds promise for a significant bioenergy production.
- With energy generation from agricultural residues, the effects of their removal on soil fertility need to be taken into account when determining sustainable levels of residue use. At present, European cropland soils are losing too much carbon. For sustainability, it is therefore important that in future more residues are plowed back into the soil.
- When evaluating the GHG emissions of bioenergy, the full suite of emissions (CO_2 , N_2O and CH_4) resulting from fertilizer application, from fossil-fuel consumption during production and conversion of the biomass and from manpower for operations all need to be separately addressed and taken into account. Also the effects of direct and indirect land use change on the GHG balance, on ecosystem functions and biodiversity have to be considered.
- All GHG emissions have to be included in a comprehensive climate policy framework, preferably by including these sectors in an emission-trading scheme. This is necessary to provide the right incentives for switching towards low-emission production technologies in agriculture (e.g. mixed systems, precision farming) and restricting additional land conversion for bioenergy production.
- To find the best solutions, further research is required on the measurement of land-use related GHG emissions and on consequential comprehensive GHG life-cycle assessments of different production systems for agriculture, food, and bioenergy. Consequential life-cycle assessments have to be based on models, which are able to reliably calculate the total change in global GHG emissions due to bioenergy deployment.

2. CONVERSION OF BIOMASS INTO MARKETED ENERGY CARRIERS AND PRECURSORS FOR CHEMICAL SYNTHESIS

The first part of this report documents the very limited extent to which biomass is available as an energy source, and that biomass production is problematic from an environmental and climate perspective. Only a few per cent of our primary-energy consumption could be sustainably produced in Germany from biomass, and that primarily from agricultural and wood industrial wastes. In Chapter 2 of the report, the processes of biomass conversion into fuels are discussed. Biological fuel cells⁴³, hydrogen production by fermentation, so-called “advanced biofuels”⁴⁴, and hydrogen storage through microbial methane formation are dealt with only in the accompanying extended report because these processes will probably not be of relevance for application in the near future but are of interest from the perspective of long-term research. Similar considerations account for biological and bio-inspired processes that apply the energy of solar light to split water into hydrogen (H₂) and oxygen (O₂). Because of the innovative potential this topic will be covered briefly in the executive summary to Chapter 3.

Conclusions regarding biomass conversion

- Among the energy carriers that can be produced from biomass through biological processes, bioethanol⁴⁵, biodiesel⁴⁶, and biogas⁴⁷ are well established and represent the most reliable products that could be produced industrially on a medium time scale. At present, biobutanol⁴⁸ produced by fermentation can hardly compete as an energy carrier with the production of ethanol or biogas. However, butanol production through fermentation is already being used to provide a raw material for the chemical industry and this will gain importance as the availability of petrochemicals decreases.

First generation biofuels

- Production of bioethanol from sugars and starch, and of biodiesel from vegetable oils, competes both locally and globally with the production of food and animal feed. These processes are hard to justify in densely populated areas such as central Europe or China – the reason why China already prohibits production of ethanol or butanol from sugar and

⁴³ A fuel cell is a device that converts the chemical energy held in a fuel into electricity through a chemical reaction with oxygen or another oxidizing agent. Hydrogen (H₂) is the most common fuel in these cells.

⁴⁴ Advanced biofuels are generated by aerobic microorganisms as part of their anabolism whereas biofuels such as bioethanol are generated as part of the energy metabolism of anaerobic microorganisms. Amongst them are isobutanol (2-methylpropanol) and isoprenes.

⁴⁵ Bioethanol is an alcohol generated by microorganisms through the fermentation of carbohydrate components of biomass or of biomass wastes. Bioethanol can be used as a fuel for vehicles either in its pure form or as additive.

⁴⁶ Biodiesel is made from vegetable oils and animal fats by methanol based transesterification. In its pure form, it can be used as a fossil-fuel substitute for diesel engines, but it is usually used as an additive. Transesterification is replacing, in an ester compound, one alcohol by another alcohol, e.g. glycerol by methanol, using an acid or a base catalyst.

⁴⁷ Biogas is a mixture of methane (approximately 60 per cent) and carbon dioxide, produced by anaerobic digestion (in the absence of oxygen) of organic material by microorganisms. Biogas can be used as a transport fuel or as a replacement for natural gas.

⁴⁸ Biobutanol is generated by microorganisms from the sugar-containing components of biomass through fermentation. It is more similar to gasoline than it is to ethanol.

starch-containing edible parts of plants. Also, the low energy return on investment (Energy output divided by fossil energy input; EROI) makes the production of these fuels hard to justify, given the implied environmental risks. Even ethanol production from sugar cane in the tropics with an EROI of eight appears to be only a transient option. This high EROI is reached only when bagasse (the residue from sugar cane after it has been crushed to extract the juice) is used as the main energy source for ethanol distillation rather than plowed under, which is not sustainable because of the resulting loss in soil carbon.

Second generation biofuels

- Processes for the production of bioethanol and biobutanol from the cellulose⁴⁹, hemicellulose⁵⁰ or lignocellulose⁵¹ constituents of plants are still in a state of development and have not yet found widespread industrial application. Nevertheless, there is a major expectation that the development of these so-called “second generation biofuels” will be successful. Ultimately, lignocelluloses constitute by far the largest part of plant biomass and are of no direct use as a food source for mankind.
- Use of cellulose and lignocellulose constituents of plant material (wood, straw etc.) for bioethanol or biobutanol production is limited by the high stability of lignocelluloses. Mechanical and thermochemical treatment help to overcome this limitation, but these treatments in turn are highly energy-intensive. Pretreatment of biomass with specific enzymes is an important field of biotechnical development.
- Production of “renewable diesel”⁵² from vegetable fats and oils and oxidized resource compounds such as lignocelluloses (so-called “second generation” diesel) needs molecular hydrogen as a co-substrate. Much technical research and development is needed before this conversion could be applied at an industrial scale. The same applies to the exploitation of alternative hydrogen-production processes, which will be treated in the third chapter of this report.

Biogas

- Production of biogas through the fermentation of domestic wastes, wastewater and agricultural by-products, including manure, is a slow but efficient process. As a by-product, a liquid residue is formed which is used as an agricultural fertilizer to replenish nitrogen and phosphorus compounds in the soil (Chapter 1), although there are possible negative effects on the GHG balance and groundwater quality. Biogas reactors are used more efficiently at small to medium size in rural areas rather than in large-scale reactors, since a decentralized management reduces the energy costs of transporting the raw waste material.
- Biogas reactors can also be coupled with ethanol production from maize or Triticale⁵³. The residues from ethanol production are fermented to produce biogas, which in turn can be used as an energy source for ethanol distillation. This integrated system results in a negative greenhouse gas balance (more CO₂ fixed than GHGs emitted). This concept is described in detail in the extended report as a “best practice” example.

Thermochemical conversion to synthesis gas

- Thermochemical conversion of biomass (analogous to coal gasification) leads to a mixture of carbon monoxide and hydrogen (synthesis gas) as a valuable substrate for microbial production of ethanol and other combustible

⁴⁹ Cellulose is a cell wall component of plants. It is a polysaccharide consisting of a linear chain of several hundred to over ten thousand β (1 \rightarrow 4) linked D-glucose units. Cellulose is crystalline and resistant to hydrolysis.

⁵⁰ Hemicelluloses are cell wall components of plants. They are polysaccharides composed mainly of pentoses present along with cellulose in almost all plant cell walls. While cellulose is crystalline, strong, and resistant to hydrolysis, hemicelluloses are easily hydrolyzed by dilute acid or base.

⁵¹ Lignocellulose is composed of cellulose, hemicellulose, and lignin. Lignin is one of the most abundant organic polymers on Earth, exceeded only by cellulose, employing 30 per cent of non-fossil organic carbon and constituting from a quarter to a third of the dry mass of wood.

⁵² Renewable diesel fuel is derived from fats and oils by catalytic hydrogenation. It is distinct from biodiesel which is derived from fats and oils via transesterification.

⁵³ A hybrid crop from wheat and rye.

compounds. Synthesis gas can also be used for chemical production of methanol and of long-chain hydrocarbons (Fischer-Tropsch synthesis)⁵⁴ to replace petrochemicals. Thermochemical pyrolysis can be recommended as a strategy for energetic utilization of lignocellulosic and other similarly stable organic matter of low water content.

synthetic chemistry established on biological raw material is basically possible, it will require major efforts in research and development: common chemical production processes will need to be adapted or fundamentally changed.

Flex-engines and combustion products

- Internal combustion engines must be specially adapted to run on ethanol and biodiesel, but the technology to do this has been developed. For example, the so-called flex-engines, which are widely used in Brazil, can run on any mixture of gasoline and ethanol, apparently without diminished efficiency.
- Combustion of biofuels is a far more complex process than combustion of conventional gasoline or diesel fuel, which consist nearly exclusively of saturated hydrocarbons. One should be aware of possibly toxic by-products (aldehydes, sulfur and nitrogen compounds) will be formed at substantially higher rates during combustion of biofuels than when using conventional fuels. The combustion of biodiesel with its higher structural heterogeneity could especially cause unforeseeable problems through the production of by-products; this might necessitate the development of new engine exhaust catalysts.

Synthesis of platform chemicals

- The use of biomass as a raw material for the synthesis of platform chemicals, e.g. propane-1,3 diol and specific biofuels, requires the development of new catalytic processes, which operate at low substrate concentrations in aqueous solutions. Biomass is rich in functional chemical groups; its utilization is therefore fundamentally different to the conventional conversions of comparably homogeneous hydrocarbons as a foundation for synthetic chemistry. Although a new

⁵⁴ Fischer-Tropsch-Synthesis is a large-scale industrial process developed before 1925 by Franz Fischer and Hans Tropsch in Mülheim an der Ruhr, Germany, in which carbon monoxide (CO) and hydrogen (H₂) mixtures are converted to liquid hydrocarbons.

Recommendations concerning biomass conversion into biofuels

- The production of bioethanol from starch and sugars is not recommended for Germany because of the associated climate and ecological risks as discussed in Chapter One. Importing bioethanol produced from these sources is also problematic for the same reasons. However, combination of bioethanol and biogas production in small, decentralized reactors operating mainly on agricultural wastes does appear to be an option, as long as there is optimal exploitation of internal energy fluxes and all ecological aspects are respected.
- Production of bioethanol from lignocellulose makes sense only if the total process (including biomass growth, harvest, bioenergy conversion and combustion) emits substantially lower amounts of GHGs than would be emitted in the combustion of an energy-equivalent amount of fossil fuel. For imported biomass, GHG emissions associated with biomass production in the exporting countries should be included in the overall calculations. The same recommendations apply to the production of biodiesel from rapeseed, sunflower, oil palm, or soybeans.
- Production of biogas from agricultural and municipal wastes deserves to be developed further; from the perspective of waste disposal, alternatives such as direct combustion or pyrolysis should also be included. The decision on which of these techniques to use depends essentially on the water content of the waste material: the lower the water content, the more direct combustion or pyrolysis is recommended. Energy crops should be used for biogas production only as far as this is needed for stabilization and optimization of the overall process of utilization of agricultural wastes and for the stabilization of fluctuating energy demands.
- Until now biomass, was mainly used for heating (most of the wood) and for electricity production (most of the biogas) rather than for transport. This is of concern since transport fuels are in the long run most difficult to replace. Therefore, the conversion of biomass should concentrate on biofuels for heavy good vehicles, airplanes and large ships that probably, also in the future, can not be powered by electricity.
- The development of processes for production of platform chemicals is a promising field of research, when these chemicals replace those currently produced from petrochemical resources.
- With the combustion of biofuels, care has to be taken that the possibly toxic emissions remaining after incomplete combustion are controlled, and that remaining pollutants are catalytically detoxified.

3. BIOLOGICAL AND BIO-INSPIRED SOLAR DIHYDROGEN PRODUCTION

Hydrogen is expected to be an important energy carrier in the future. It can be converted to heat through combustion or directly transformed to electricity in fuel cells yielding only water (H_2O), with no carbon dioxide (CO_2) produced. Furthermore hydrogen is also required in substantial amounts for chemical syntheses. At present, hydrogen is predominantly produced from fossil fuels – only a relatively small amount is produced by the electrolysis of water. However, a hydrogen-based economy only has a future if it is based on renewable resources.

Biomass can provide a source of hydrogen production through several different routes, including thermochemical processes (pyrolysis and gasification of biomass) and various biological pathways (photo-fermentation and dark fermentation). In addition, some photosynthetic organisms are capable of producing hydrogen by sunlight-driven photolysis of water. This latter option is particularly attractive since it is based on abundant resources: namely, water and sunlight. Deeper insights into photosynthesis and the catalytic reactions involved in biological hydrogen production from H_2O have inspired chemists to mimic the natural system by creating “artificial” photosynthetic devices referred to as “artificial leaves”. These devices can harness sunlight to split H_2O into hydrogen and oxygen, thereby converting solar energy directly into a storable chemical form⁵⁵.

Despite both the biological and photochemical splitting of water to H_2 and O_2 still being far from ready to apply at industrial-scale, these approaches are innovative ongoing research topics exploring novel renewable en-

ergy resources with a long-term perspective. Therefore, we have included this issue in the Leopoldina Report.

Conclusions concerning hydrogen production

- Molecular hydrogen (H_2) is a unique, environmentally friendly energy carrier. Its conversion into electricity or heat yields only H_2O , with no CO_2 being produced. Currently 500×10^9 standard cubic meters⁵⁶ of H_2 per year are used in industrial processes worldwide, of which more than 90 per cent is derived from fossil resources, primarily from natural gas. A hydrogen-based economy would require renewable resources for H_2 production, appropriate large-scale storage and transportation devices and the establishment of a commonly accessible infrastructure.
- None of the techniques for producing H_2 from renewable resources can compete with the current market price of H_2 from natural gas (1 € per kg H_2). Alkaline electrolysis of water for the production of H_2 is so far the most cost-effective technique (3 € per kg H_2). It provides a more than 50 per cent yield of electrical current conversion. The electricity accounts for 50 per cent of the production costs. However, hydrogen production is climate-friendly only if the electricity is not generated by combustion of fossil energy sources. The pyrolysis of biomass to syngas (see Chapter 2) is also a well-established process, which can currently supply H_2 at a price of 7 € per kg from a medium sized plant.
- The photo-electrochemical generation of hydrogen in which electrolysis of water is directly coupled to a photovoltaic module is still in the process of development. The tech-

⁵⁵ Reece, S.Y. et al. Wireless solar water splitting using silicon based semiconductors and earth-abundant catalysts. *Science* 334, 2011: 645-648.

⁵⁶ At 20°C and 1 bar pressure.

nique involves the use of expensive platinum/iridium catalysts. Research is directed at increasing the efficiency of coupling and replacement of the scarce and expensive catalytic materials with cost-effective new materials.

- An alternative process, also still at the level of research, is the development of a photocatalytic process in which H_2 is released directly from water circumventing electricity. This naturally occurring process is mediated by some unicellular green algae during “natural photosynthesis”. However, the yield of H_2 would need to be increased approximately 100-fold before the technique could be viable for practical applications.
- In the past ten years, detailed insights have been gained into the structure, synthesis and reaction mechanism of the photosynthetic apparatus and the hydrogenase enzymes involved in the generation of H_2 . These investigations uncovered complex metal clusters at the centres of these enzymes and showed that natural catalysts take advantage of abundant metals such as iron, nickel

and manganese rather than the precious metals such as platinum or iridium that are employed industrially. So far, the technical application of these biological systems has been hindered by their relative instability.

- Learning from nature does not necessarily mean synthesizing catalysts that mimic the exact structure of the photosynthetic apparatus and the H_2 -producing enzyme hydrogenase. One strategy is based on the preparation of functional analogues, which operate according to the same principles as enzymes, but are more stable and less expensive. Two recent breakthroughs provide promising examples: a nickel-based system for production and oxidation of hydrogen⁵⁷ and a cobalt-based system for splitting water⁵⁸. Although this bio-inspired strategy, often referred to as “artificial photosynthesis”, is still at the level of basic research, it opens promising perspectives for the future. Nevertheless, it is still an open question whether “natural” and/or “artificial” photosynthesis will ever be applied at an industrial scale for the production of hydrogen from water.

⁵⁷ Tran, P.D., Artero, V., Fontecave, M. Water electrolysis and photo electrolysis on electrodes engineered using biological and bio-inspired molecular systems. *Energy & Environmental Science* 3, 2010: 727-747.

⁵⁸ Nocera, D.G. The artificial leaf. *Acc. Chem. Res.* 45, 2012: 767-776

Recommendations concerning hydrogen production from water

- Considering the almost unlimited availability of water and sunlight, the production of hydrogen via photolytic cleavage of water could be an ideal energy source – renewable, environmentally friendly, and sustainable. Therefore, natural- and artificial photosynthesis systems generating hydrogen are a focus of ongoing and future basic research
- Molecular and synthetic biological techniques will help in constructing genetically modified microorganisms with oxygenic photosynthesis that have more stable and more efficient H_2 -evolving systems. However, whether hydrogen formation via phototrophic organisms (natural photosynthesis) will ever be efficient enough to be of applied relevance is still an open question that needs to be further explored.
- The development of chemically synthesized catalysts capable of solar splitting of water into hydrogen and oxygen (artificial photosynthesis) under benign conditions is making considerable progress. It additionally opens the chance to provide robust, highly active and economically affordable catalysts that can be applied to burning H_2 in fuel cells and in chemical syntheses. This is an area of research with high innovation potential that deserves further monitoring.

SCIENTISTS INVOLVED

Coordinators

| | |
|-------------------------------|--|
| Prof. Dr. Bärbel Friedrich ML | <i>Institut für Biologie/Mikrobiologie, Humboldt-Universität zu Berlin</i> |
| Prof. Dr. Bernhard Schink ML | <i>Lehrstuhl für mikrobielle Ökologie, Limnologie und allgemeine Mikrobiologie, Universität Konstanz</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |

Scientists involved in writing the report

1. Chapter: THE AVAILABILITY AND SUSTAINABILITY OF PLANT BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE

| | |
|-----------------------------------|--|
| Prof. Dr. Helmut Haberl | <i>Institut für Soziale Ökologie (SEC), Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien, Graz, Österreich</i> |
| Prof. Dr. Christian Körner ML | <i>Institut für Botanik, Universität Basel, Schweiz</i> |
| Dr. Christian Lauk | <i>Institut für Soziale Ökologie (SEC), Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien, Graz, Österreich</i> |
| Dr. Ulrike Schmid-Staiger | <i>Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Verfahrenstechnik, Stuttgart</i> |
| Prof. Dr. Victor Smetacek | <i>Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven</i> |
| Prof. Dr. Ernst-Detlef Schulze ML | <i>Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |
| Prof. Dr. Peter Weiland | <i>Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig</i> |
| Dr. Karen Wilson | <i>Cardiff School of Chemistry, Cardiff University, Wales, Great Britain</i> |

2. Chapter: CONVERSION OF BIOMASS INTO MARKETED ENERGY CARRIERS AND PRECURSORS FOR CHEMICAL SYNTHESIS

| | |
|---|--|
| PD Dr. Nicolaus Dahmen | <i>Institut für Katalyseforschung und -Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i> |
| Prof. Dr. Eckhard Dinjus | <i>Institut für Katalyseforschung und -Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i> |
| Prof. Dr. Peter Dürre | <i>Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie, Universität Ulm</i> |
| Prof. Dr. Gerd Kohlhepp | <i>Geografisches Institut, Eberhard-Karls-Universität Tübingen</i> |
| Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus ML | <i>Fakultät für Chemie, Universität Bielefeld</i> |
| Prof. Dr. Bernhard Schink ML | <i>Lehrstuhl für mikrobielle Ökologie, Limnologie und allgemeine Mikrobiologie, Universität Konstanz</i> |
| PD Dr. Thomas Senn | <i>Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Universität Hohenheim</i> |
| Prof. Dr. Rudolf K. Thauer ML | <i>Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg</i> |
| Prof. Dr. Peter Weiland | <i>Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig</i> |
| Dr. Karen Wilson | <i>Cardiff School of Chemistry, Cardiff University, Wales, Great Britain</i> |

3. Chapter: BIOLOGICAL AND BIO-INSPIRED SOLAR DIHYDROGEN PRODUCTION

| | |
|-------------------------------|--|
| Prof. Dr. Fraser A. Armstrong | <i>Department of Inorganic Chemistry, University of Oxford, Great Britain</i> |
| Dr. Vincent Artero | <i>Institute de Recherches en Technologies et Sciences pour le Vivant, Université Joseph Fourier, Grenoble, France</i> |
| Prof. Dr. Holger Dau | <i>Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin</i> |
| Prof. Dr. Bärbel Friedrich ML | <i>Institut für Biologie/Mikrobiologie, Humboldt-Universität zu Berlin</i> |
| Prof. Dr. Thomas Happe | <i>AG Photobiotechnologie, Ruhr-Universität Bochum</i> |
| Dr. Philipp Kurz | <i>Institut für Anorganische Chemie, Christian-Alberts-Universität zu Kiel</i> |
| Prof. Dr. Wolfgang Lubitz | <i>Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion, Mülheim an der Ruhr</i> |
| Prof. Dr. Matthias Rögner | <i>Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen, Ruhr-Universität Bochum</i> |

Scientists, who were interviewed to specific points

| | |
|--|---|
| Prof. Dr. Thomas Bley | <i>Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik der Technischen Universität Dresden</i> |
| Prof. Dr. Christian Barth | <i>Deutsches Institut für Ernährungsforschung, Golm</i> |
| Prof. Dr. Detlev Drenckhahn ML | <i>Institut für Anatomie und Zellbiologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg</i> |
| Prof. Dr. Ian Donnison | <i>Institute for Biological, Environmental and Rural Sciences, Aberystwyth University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Ottmar Edenhofer und Kollegen | <i>Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam</i> |
| Prof. Dr. Maarten Koornneef | <i>Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtung, Köln</i> |
| Prof. Dr. Adam Powell | <i>Centre for Sustainable Aquaculture Research, Swansea University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Robin Shields | <i>Centre for Sustainable Aquaculture Research, Swansea University, Wales, Great Britain</i> |
| Prof. Dr. Mark Stitt ML | <i>Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie, Golm</i> |

These scientists are thanked for taking their time to read individual chapters and for raising many critical questions on numerous points, which helped balance the recommendations. The final text is, however, in the responsibility of the scientists who have written the report.

Scientific administration

| | |
|-----------------------|--|
| Dr. Christian Anton | <i>Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle</i> |
| Dr. Henning Steinicke | <i>Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle</i> |

External Reviewers

| | |
|--|--|
| Prof. Dr. Nikolas Amrhein ML | <i>Group for Plant Biochemistry und Physiology, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz</i> |
| Prof. Dr. Georg Fuchs ML | <i>Institut für Biologie II, Mikrobiologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</i> |
| Prof. Dr. Wolfgang Junge | <i>Abteilung Biophysik, Universität Osnabrück</i> |
| Prof. Dr. Bernt Krebs ML | <i>Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster</i> |
| Prof. Dr. Hermann Sahm | <i>Institut für Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich</i> |
| Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber ML | <i>Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam</i> |
| Prof. Dr. Ferdi Schüth ML | <i>Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr</i> |
| Prof. Dr. Stefan Tangermann | <i>Department für Agrarökonomie und rurale Entwicklung, Georg-August-Universität Göttingen, Akademie der Wissenschaften zu Göttingen</i> |

*The reviewers are thanked for their many valuable suggestions, most of which were followed.
The final text is, however, in the responsibility of the scientists who have written the report.*

TABLE OF CONTENTS OF THE SEPARATLY PUBLISHED EXTENDED REPORT

Bioenergy – Chances and Limits*

| | |
|--|--------|
| OUTLINE | 4 |
| INTRODUCTORY CHAPTER..... | 5 |
| References..... | 8 |
| 1. THE AVAILABILITY AND SUSTAINABILITY OF BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE | 9 |
| 1.1. Carbon and energy content of biomass, primary energy and final energy | 10 |
| 1.2. Net primary production (NPP) in terrestrial systems and primary energy consumption..... | 11 |
| 1.2.1. Global NPP and primary energy consumption..... | 11 |
| 1.2.2. NPP and primary-energy consumption in Germany | 15 |
| 1.2.3. NPP in other countries..... | 17 |
| 1.3. Human appropriation of net primary production and bioenergy potential..... | 18 |
| 1.4. Fossil fuel costs of net primary production, energy returns on investment, area efficiencies, and capacity credits | 18 |
| 1.5. Greenhouse gas fluxes associated with net primary production | 22 |
| 1.6. Greenhouse gas mitigation potential of using biomass as an energy source and effects of land use change | 24 |
| 1.7. Life-cycle assessments and carbon capture | 25 |
| 1.8. Accounting of greenhouse gas emissions in international agreements | 26 |
| 1.9. Import of biomass | 26 |
| 1.10. Losses in the human food production chain | 28 |
| 1.11. Availability of agricultural and municipal wastes and of straw | 29 |
| 1.12. Soil quality and intensive agriculture | 30 |
| 1.13. Water requirement of NPP and effects of global warming on NPP | 31 |
| 1.14. Phosphate limitation of net primary production in terrestrial systems | 32 |
| 1.15. Plant breeding for energy crops..... | 33 |
| 1.16. Sustainable intensification of crop yields..... | 35 |
| 1.17. Net primary production by algae | 35 |
| 1.18. Net primary production in oceans | 36 |
| References..... | 37 |
| 2. CONVERSION OF BIOMASS INTO MARKETING ENERGY CARRIERS AND PRECURSORS FOR CHEMICAL SYNTHESIS | 43 |
| 2.1. Lignocellulose as a biofuel source..... | 44 |
| 2.2. Biogas..... | 44 |
| 2.3. Bioethanol..... | 45 |
| 2.4. Biodiesel and renewable diesel | 46 |
| 2.5. Butanol..... | 49 |
| 2.6. Methanol and hydrogen | 49 |

* Available under <http://www.leopoldina.org>

| | |
|--|-----------|
| 2.7. Advanced biofuels..... | 49 |
| 2.8. Microbial fuel cells..... | 50 |
| 2.9. Commodity chemicals..... | 51 |
| 2.10. Biofuel combustion-associated emissions | 52 |
| 2.11. Best practice example: Combined production of ethanol and biogas | 53 |
| 2.12. Large-scale bioethanol production in Brazil..... | 55 |
| 2.13. H ₂ storage via microbial methane formation | 57 |
| 2.14. Thermochemical path from biomass to fuels | 57 |
| References..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 3. BIOLOGICAL AND BIO-INSPIRED SOLAR DIHYDROGEN PRODUCTION..... | 63 |
| 3.1. Technical routes to hydrogen production using solar energy | 64 |
| 3.2. Biological routes to hydrogen production based on water and sunlight | 66 |
| 3.2.1. Photosynthetic hydrogen formation from water..... | 66 |
| 3.2.2. Photosystem II | 67 |
| 3.2.3. Hydrogenases | 67 |
| 3.3. Cellular and semi-artificial systems for H ₂ production | 68 |
| 3.3.1. Using immobilized enzymes for H ₂ production..... | 69 |
| 3.3.2. On the way to H ₂ producing design cells | 70 |
| 3.4. Bio-inspired systems for solar water splitting and hydrogen production..... | 71 |
| 3.4.1. Light reactions | 72 |
| 3.4.2. Water oxidation | 72 |
| 3.4.3. Hydrogen formation | 73 |
| 3.4.4. Perspectives..... | 74 |
| References..... | 76 |

| | |
|-----------------------|-----------|
| GLOSSARY | 78 |
|-----------------------|-----------|

| | |
|----------------------------------|-----------|
| SCIENTISTS INVOLVED | 84 |
|----------------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| PROGRAM OF THE WORKSHOP “BIOFUELS AND BIOCONVERSION” | 86 |
|---|-----------|

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| SUPPLEMENT TO CHAPTER 1 | 89 |
|--------------------------------------|-----------|

| | |
|--|-----|
| 1. Nettoprimärproduktion und Bioenergie (Net primary production and bioenergy) Ernst-Detlef Schulze & Christian Körner | 90 |
| 2. Menschliche Aneignung von Nettoprimärproduktion in Europa: Schlussfolgerungen für Bioenergiepotentiale (Human appropriation of net primary production in Europe: Conclusions with respect to bioenergy potentials) Helmut Haberl, Karl-Heinz Erb, Christian Lauk & Christoph Plutzer | 102 |

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: +49 345 472 39 600
Fax: +49 345 472 39 19
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

ISBN: 978-3-8047-3082-3