

Erneuerbare Energieträger aus Mikroorganismen: Möglichkeiten und Grenzen

Von Friedrich Widdel

Die Verfügbarkeit von Wasser, Nahrung, Rohstoffen und Energie ist in unterschiedlichem Ausmaß mit der Existenz von Mikroorganismen verknüpft. So sind die Reinigung des Abwassers und die Reinhaltung der Gewässer ebenso das Werk von Mikroorganismen wie die Humusbildung, die natürliche Stickstoffdüngung und die Freisetzung lebenswichtiger Mineralien aus Kompost für das Pflanzenwachstum. Selbst bei der Gewinnung von Rohstoffen, wenn auch kein typisches Revier für Mikroorganismen, sind diese gelegentlich dabei, so bei der Laugung niederwertiger Erze zur Metallgewinnung. Auf dem Energiesektor treten mit dem Interesse an Bioenergie neben Pflanzen (Energiepflanzen) auch Mikroorganismen zunehmend auf den Plan.¹ Energieträger aus Mikroorganismen sind allerdings keine Neuheit. Bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde durch Hefe (einzellige Pilze) produzierter Alkohol (Ethanol), seit Jahrtausenden ein Konsumgut, als Treibstoff für Verbrennungsmotoren erprobt. Das von schlammbewohnenden Mikroorganismen gebildete Biogas Methan, 1776 von Alessandro Volta erstmals als „brennbare Luft“ beschrieben, dient im Betrieb kommunaler Kläranlagen schon seit vielen Jahrzehnten als zusätzliche Energiequelle oder in Gebieten Indiens als Brenngas, wozu es aus landwirtschaftlichen Abfällen gewonnen wird. Heute gibt es eine unüberschaubare Zahl an Programmen, Internetseiten, Stellungnahmen und Broschüren zum Thema „Bioenergie“. Bei einer solchen Fülle fällt es nicht leicht, die tatsächlichen Möglichkeiten und Grenzen ebenso wie die grundlegenden Prinzipien der technischen Nutzung lebender Organismen für Energiezwecke im Auge zu behalten, vor allem, wenn dabei Mikroorganismen im Spiel sind. Denn die Welt der Mikroorganismen entzieht sich weitgehend unserer Anschauung. So werden Mikroorganismen einerseits gerne lediglich als randständige Besiedler der Lebensräume und Begleiter von Pflanzen, Tieren und Menschen angesehen. Andererseits traut man Mikroorganismen bisweilen ungewöhnliche Leistungen zu, bedingt durch Berichte darüber, wie sie Gifte abbauen, in heißem oder säurehaltigem Wasser wachsen oder ihre Energie zum Leben aus unverdaulich anmutenden Substanzen beziehen: Warum sollten dann Mikroorganismen nicht auch „Wunder“ als Energielieferanten vollbringen können? Doch auch Mikroorganismen sind biologisch Grenzen gesetzt. Die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Mikroorganismen auf dem Energiesektor sind zuallererst durch deren spezifische Lebensweisen und deren Stoffwechsel gegeben. Weil darüber hinaus Mikroorganismen bei der Produktion von Energieträgern zumeist Pflanzensubstanz umwandeln, ist im Weiteren auch diese Abhängigkeit und damit der ökologische Kontext zu berücksichtigen.

Die Mikroorganismen und ihr Stoffwechsel

Der Begriff „Mikroorganismen“ (auch „Mikroben“) im ursprünglichen Sinne ist eine reine Größenbezeichnung, nämlich für Lebewesen, die nicht mit dem bloßen Auge, sondern nur unter dem Mikroskop erkennbar sind. Mikroorganismen sind Einzeller oder

Zellen in einfachen Verbänden wie Ketten oder wenig strukturierten Paketen. Die Ketten oder Pakete sehr großer Mikroorganismen sind manchmal mit bloßem Auge erkennbar, sodass die Größenübergänge zwischen Mikroorganismen und den kleinsten höheren Pflanzen und Tieren fließend sind. Biologisch betrachtet verbergen sich hinter der Sammelbezeichnung „Mikroorganismen“ höchst unterschiedliche Lebewesen, nämlich Bakterien, Archaeobakterien (Archaeen), einzellige Pilze, einzellige Algen und Protozoen (Urtierchen). Untereinander sind sie stammesgeschichtlich weniger miteinander verwandt als ein Säugetier mit einer Qualle.

Im Folgenden wird jedoch der Begriff Mikroorganismen in seinem ursprünglichen Sinne verwendet. Denn außer der geringen Größe gibt es noch mindestens eine weitere äußerliche Gemeinsamkeit, die gerade im Hinblick auf biotechnologische Anwendungen wichtig ist: Mikroorganismen sind in einem weit höheren Maße ihrer Umwelt ausgeliefert als größere Organismen. So trocknet ein Mikroorganismus, der von freier Luft umgeben ist, augenblicklich aus. Er gerät damit in einen inaktiven Zustand, obwohl er eine solche Situation durchaus überleben kann. Mikroorganismen benötigen daher für ihre Aktivität eine feuchte Umgebung, die für viele das wässrige Milieu ist. Deshalb ist die biotechnologische Nutzung von Mikroorganismen zumeist auf Wasser als Wachstumsmedium angewiesen, sodass entsprechende technische Vorrichtungen (dichte Behälter, Rohre, Pumpen) benötigt werden. Es gibt allerdings einige Ausnahmen, wie z.B. die mikrobiologische Sanierung von Böden, die dabei ausreichend Feuchtigkeit enthalten müssen. Wasser als Medium hat einerseits den Vorteil, dass die Wachstumsbedingungen (Nährstoffkonzentrationen, pH-Wert, Temperatur) genau und gleichmäßig eingestellt und kontrolliert werden können und dass eine Beförderung über Rohrleitungen möglich ist. Andererseits werden die begehrten Produkte von den Mikroorganismen direkt ins Wasser abgegeben. Insofern es sich dabei nicht um Gase handelt, die aus dem Wasser herausperlen und abgefangen werden können, müssen die Produkte aufwändig abgetrennt werden. Gerade bei der Destillation von Alkohol kostet das viel Energie. Ferner besteht besonders im wässrigen Milieu das Risiko einer unerwünschten Ausbreitung von eingedrungenen Nahrungskonkurrenten, von Parasiten (z.B. Mikroorganismen-Viren) oder von größeren Mikroorganismen, die sich von kleineren ernähren; dann ist der Weiterbestand der eigens gezüchteten Mikroorganismen gefährdet. Eine solche Gefahr besteht gerade in Reinkulturen (Monokulturen) von Hochleistungs-Mikroorganismen. In natürlichen, komplexen Mischpopulationen wie in Biogasreaktoren ist dieses Problem so gut wie unbekannt.

Das wichtigste Prinzip im Stoffwechsel ist das vom Erhalt von Energie und Masse, das die volkstümliche Wendung „von nichts kommt nichts“ wissenschaftlich formuliert. Man mag 1 kg Pflanzenmasse, die über einen vollständigen Verbrennungsprozess 18 000 kJ (5 kWh) liefern würde, durch einen noch so ausgeklügelten biotechnologischen Prozess schleusen – das Endprodukt wird stets weniger als 18 000 kJ liefern; denn unvermeidbar geht ein Teil der nutzbaren Energie in nicht nutzbare über, zumeist in Wärme, oder verbleibt in nicht verwertbaren Nebenprodukten. Ein Prozess mit den unvermeidbaren „Verlusten“ an Energie kann aber dennoch technisch sinnvoll sein, weil er zu einem sauberen flüssigen oder gasförmigen Endprodukt führt. Ethanol und Methan sind für eine technische Nutzung als Energieträger, gerade für den Betrieb von Verbrennungsmotoren, vielseitiger und besser geeignet als die ursprüngliche Pflanzenmasse z.B. in Form von Briketts.

Jeder Stoffwechsel, ob in Mikroorganismen oder höheren Lebewesen, erfüllt zweierlei Aufgaben. Erstens gilt es, die Nahrung in die Bausteine des betreffenden Lebewesens (Zellbausteine, außerzelluläre Struktursubstanzen), d.h. in organismische Substanz oder die lebende „Biomasse“ zu überführen. Das ist Aufgabe des

Synthesestoffwechsels, auch Anabolismus oder Assimilation genannt. Dieser benötigt chemische Energie:

(1) Nährstoffe + *chemische Energie* → organismische Substanz

Zweitens muss die benötigte chemische Energie zur Verfügung gestellt werden, was Aufgabe des Energiestoffwechsels ist. Entweder stammt diese Energie aus dem Sonnenlicht oder muss ebenfalls aus den Nährstoffen bezogen werden, also einem Teil davon; dieser Teil der Nährstoffe endet in Form von Abbauprodukten.

(2a) Licht → *chemische Energie*

(2b) Nährstoffe → Abbauprodukte + *chemische Energie*

Deshalb wird zwischen phototrophem (2a) und chemotrophem (2b) Energiestoffwechsel unterschieden. Entsprechend werden Lebewesen nach ihrem Energiestoffwechsel in phototrophe (photosynthetische) und chemotrophe Organismen unterteilt. Während phototrophe Organismen dank der Energie aus dem Licht ihre Nährstoffe vollständig assimilieren, ist in chemotrophen Organismen der Nahrungsfluss zweigeteilt: Ein Teil der Nährstoffe wird unter Energieverbrauch zum integralen Bestandteil des Lebewesens aufgewertet, während gleichzeitig ein anderer Teil unter Energiefreisetzung abgewertet und ausgeschieden wird. Der Energiestoffwechsel in chemotrophen Organismen wird auch Katabolismus oder Dissimilation genannt. Je energiereicher die Nährstoffe oder je effizienter der Energiestoffwechsel ist, desto mehr kann von einer vorgegebenen Nährstoffmenge assimiliert werden und desto weniger muss für die Bereitstellung von Energie dissimiliert werden.

Bei der Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten des Energiestoffwechsels und damit zwischen Stoffwechseltypen lebender Organismen geht es jedoch noch weiter: Das Wachstum phototropher Organismen im Licht ist entweder obligat mit der Freisetzung von Sauerstoff verbunden, oder es kann ohne eine solche stattfinden. Entsprechend wird weiter zwischen oxygenen und anoxygenen phototrophen Organismen unterschieden. Diese Unterteilung findet bei chemotrophen Organismen ihr Pendant: Sie sind entweder auf eine Atmung mit Sauerstoff angewiesen, oder sie können mit Sauerstoff nichts anfangen und werden durch ihn oft sogar gehemmt oder abgetötet. Erstere bezeichnet man als aerobe, Letztere als anaerobe Organismen. Einer dieser vier Kategorien lässt sich jedes Lebewesen zuordnen. Diese Vierteilung ist auch sehr geeignet, um die grundsätzlichen Nutzungsmöglichkeiten von Mikroorganismen als Energielieferanten zu beleuchten.

Oxygene phototrophe Organismen Oxygene phototrophe Organismen bilden ihre Biomasse aus Kohlendioxid, Wasser und Mineralsalzen, also anorganischen Nährstoffen. Zu diesen Organismen gehören grüne Pflanzen einschließlich Algen sowie Cyanobakterien. Weil Kohlendioxid die völlig oxidierte Form von Kohlenstoff ist, Biomasse aber stärker reduzierten Kohlenstoff (Kohlenstoff-Wasserstoff- und Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen) enthält, muss das Kohlendioxid mittels Reduktionskraft oder Reduktionseinheiten (Reduktionäquivalenten) reduziert werden, hinter denen sich immer leicht übertragbare gebundene Elektronen verbergen. Diese werden unter Aufwand von viel Energie, die das Licht liefert, dem Wasser entzogen (siehe den Beitrag von Hartmut Michel). Das führt zur Spaltung von Wasser und zur Freisetzung von Sauerstoff. Oxygene phototrophe Organismen bilden direkt oder indirekt die Nahrungsgrundlage fast aller anderen Organismen.

Auf Landpflanzen, insbesondere solche mit hohem Anteil an Stärke und Ölen² in der Biomasse, gehen alle heute relevanten erneuerbaren Energieträger biologischen Ursprungs („Bioenergie“) zurück. Hingegen hat die Biomasse der im Wasser lebenden

oxygenen phototrophen Mikroorganismen (Algen und Cyanobakterien) bisher keine Bedeutung als Energieträger. Deren Zucht in Aquakulturen für energetische Zwecke wird jedoch erforscht. Insbesondere Öle aus der Alge *Botryococcus* könnten von energetischem Interesse sein. Darüber hinaus können bestimmte Algen zur Bildung von Wasserstoff veranlasst werden.

Anoxygene phototrophe Organismen Anoxygene phototrophe Organismen gewinnen die Reduktionseinheiten zur Assimilation von Kohlendioxid nicht durch Wasserspaltung, sondern, ebenfalls lichtgetrieben, aus einigen anderen anorganischen Substanzen, vor allem aus Schwefelwasserstoff. Aus diesem entstehen Schwefel und Sulfat. Weiterhin können auch einfache organische Verbindungen (Zucker, organische Säuren, Alkohole) mit Hilfe der Lichtenergie assimiliert werden. Die Stoffwechselgruppe umfasst nur Mikroorganismen.

Die Biomasse der anoxygenen phototrophen Mikroorganismen ist bisher von keinerlei energietechnischem Interesse. Allerdings können sie auch zur Bildung von Wasserstoff gebracht werden.

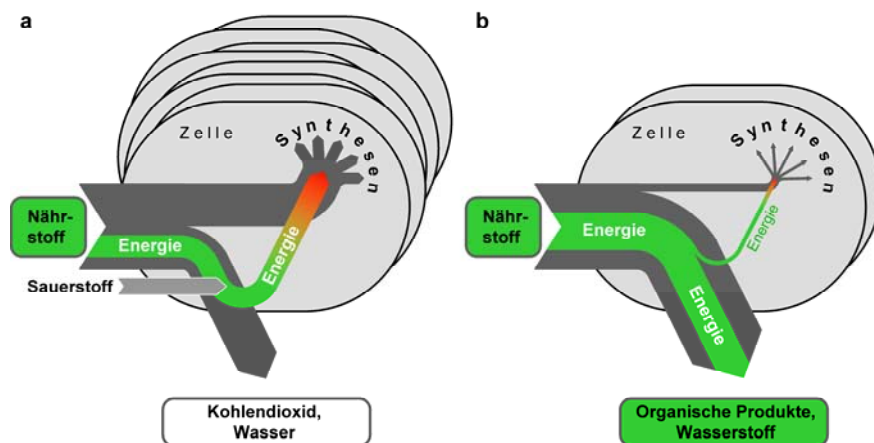


Abbildung 1: In chemotrophen Organismen ist der Weg der Nährstoffe geteilt. Er führt zu Synthesen (Anabolismus, oberer Teil) und Abbauprodukten (Katabolismus unterer Teil). Der Übersichtlichkeit halber ist die Energie (grün) nur im Katabolismus, nicht jedoch im Anabolismus, angedeutet. **a** Der aerobe Mikroorganismus entzieht den Nährstoffen das Maximum an Energie und vermag damit im Synthesestoffwechsel viel eigene Biomasse (viele neue Zellen) zu bilden. Die Nutzung dieser Energie erfolgt „verschwenderisch“, d.h. nur ein geringer Anteil wird bei den Synthesen tatsächlich konserviert. **b** Wird dieselbe Menge an Nährstoff von einem anaeroben (hier gärenden) Mikroorganismus verwertet, kann dem Nährstoff wegen des Fehlens von Sauerstoff prinzipiell nur wenig Energie entzogen werden, was dann deutlich weniger Biomasse (weniger Zellen) als aerob ergibt. Damit ist auch der nicht assimilierte, in Ausscheidungsprodukten endende Anteil der Nährstoffe größer als beim aeroben Mikroorganismus. Bei einer anschließenden Umsetzung der anaeroben Ausscheidungsprodukte mit Sauerstoff wird der zuvor ungenutzt gebliebene Energieanteil frei und kann technisch genutzt werden. Siehe dazu Abb. 2.

Aerobe chemotrophe Organismen Aerobe Organismen verwerten organische Nährstoffe, die alle direkt oder indirekt aus oxygenen phototrophen Organismen stammen. Dies ist die Lebensweise von Tier und Mensch sowie der Pilze und einer Fülle von Bakterienarten. Im Energiestoffwechsel wird über die Atmung Sauerstoff als ein starkes Oxidationsmittel genutzt. Dadurch können die Nährstoffe das Maximum an Energie liefern und werden dabei zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert, die keine

Energie mehr enthalten (Abbildung 1a). Aerobe Organismen kehren, summarisch betrachtet, die oxygene Photosynthese um, nutzen also indirekt Sonnenenergie.

Ein solch optimaler Energiestoffwechsel ermöglicht eine üppige Synthese von Biomolekülen, also Biomasse. Die Biomasse aerober Mikroorganismen, z.B. von Zuchthefen, mag als Tierfutterzusatz von Interesse sein; als Energieträger ist sie ohne Bedeutung. Selbst wenn man die aeroben Mikroorganismen dazu bringen würde, reichlich Stärke oder Öle zu bilden und zu speichern, stellte deren Nutzung als Energieträger gerade wegen des unvollständigen Nährstoffflusses in die Biosynthese und deren geringer energetischer Effizienz (Abbildung 1a) einen unwirtschaftlichen Prozess dar.

Anaerobe chemotrophe Organismen Die Fähigkeit zum anaeroben Wachstum ist eine Domäne der Mikroorganismen. Nur ganz wenige wirbellose Tiere wie Darmparasiten können ebenfalls anaerob leben. Anaerobe Mikroorganismen haben sehr vielfältige Strategien entwickelt, um trotz Abwesenheit von Sauerstoff Energie aus den Nährstoffen zu beziehen. Um Übersicht in diese Vielfalt zu bringen, wird biochemisch zwischen (i) anaeroben Atmungen, (ii) Gärungen, und (iii) besonderen anaeroben Stoffwechselwegen unterschieden.

- (i) Anaerobe Atmungen nutzen schwächere Oxidationsmittel als Sauerstoff, die zu charakteristischen Produkten reduziert werden. So werden Nitrat zu Stickstoff oder Ammoniak und Sulfat zu Schwefelwasserstoff reduziert. Dabei werden die organischen Nährstoffe wie bei der Atmung mit Sauerstoff ebenfalls zu Kohlendioxid und teils auch Wasser oxidiert.
- (ii) Bei Gärungen steht gar kein Oxidationsmittel zur Verfügung, sodass eine vollständige Oxidation der Nährstoffe im Energiestoffwechsel prinzipiell nicht möglich ist. Sie werden stattdessen zu Alkoholen, organischen Säuren, einem gewissen Anteil an Kohlendioxid und nicht selten auch Wasserstoffgas abgebaut.
- (iii) Die besonderen anaeroben Stoffwechselwege, die biochemisch betrachtet teils etwas an anaerobe Atmungen und teils an Gärungen erinnern, nutzen biochemische Reaktionsmechanismen, die mit denen im Stoffwechsel der meisten Lebewesen wenig Ähnlichkeit haben. Zu den besonderen anaeroben Stoffwechselwegen zählt die Bildung von Methan (siehe den Beitrag von Rudolf Thauer).

Weil anaerobe Mikroorganismen nicht wie aerobe das Maximum an Energie aus ihrer Nahrung herausholen können, muss die restliche Energie irgendwo verbleiben. Sie steckt in den Ausscheidungsprodukten des Energiestoffwechsels und kann im Prinzip technisch genutzt werden, wenn die Produkte mit Sauerstoff zusammengebracht werden. Außer Stickstoff sind daher alle Produkte anaerober Mikroorganismen Energieträger, und zwar umso ergiebigere, je weniger Energie der Mikroorganismus für sich selbst aus den Nährstoffen herausgeholt hat. Dieses Prinzip ist für eine Auswahl von Gärungsprodukten in Abbildung 2 dargestellt. Zudem bilden anaerobe Mikroorganismen wenig Biomasse, sodass der größte Teil der Nährstoffe in die Ausscheidungsprodukte übergeht, was energietechnisch ebenfalls von Vorteil ist.

Unter allen Mikroorganismen sind also derzeit die anaeroben die bei weitem wichtigsten für die Bereitstellung erneuerbarer Energieträger. Das bedeutet nicht, dass jedes energiereiche anaerobe Produkt auch energietechnisch genutzt werden kann. Ein Beispiel dafür ist Schwefelwasserstoff, der durch anaerobe Atmung aus Sulfat, einem verbreiteten Mineral, gebildet wird. Bei der Reaktion mit Sauerstoff wird viel Energie frei. Doch ist Schwefelwasserstoff giftig und greift etliche Metalle an. Auch existiert

noch kein Konzept für einen Prozess für die energetische Nutzung von Schwefelwasserstoff.

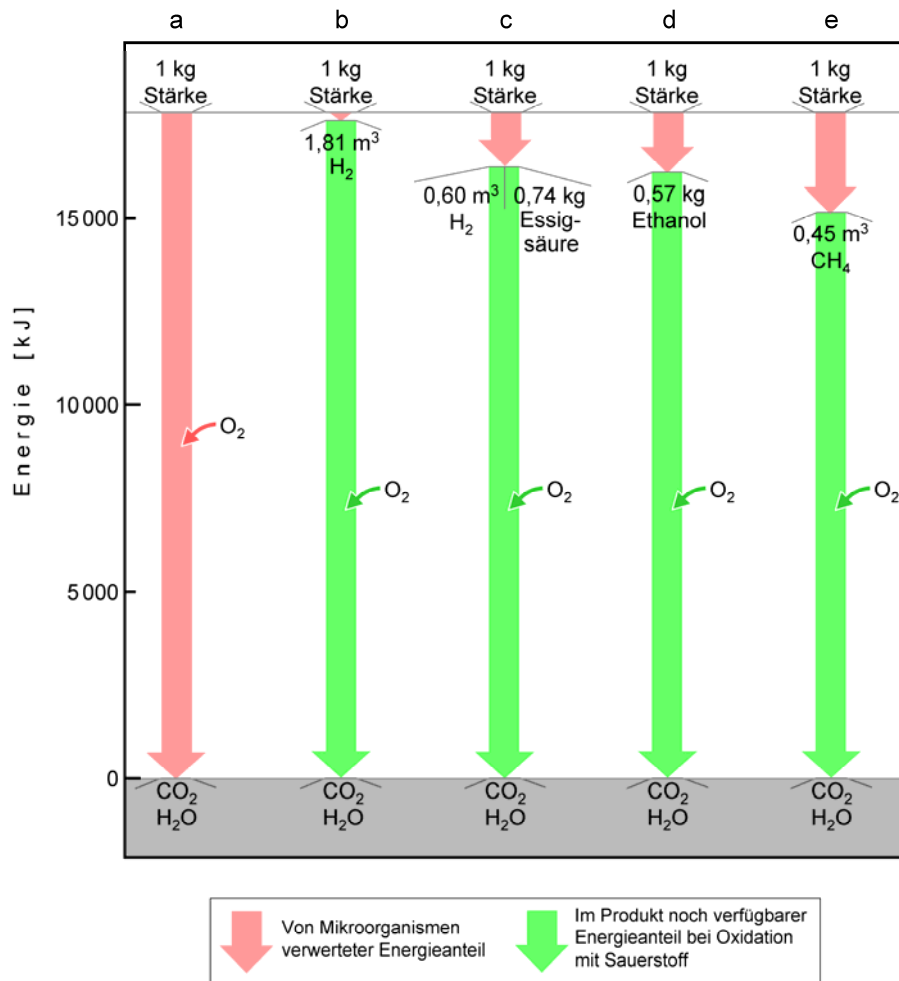


Abbildung 2: Verbleib der Energie (berechnet für 25 °C) bei der Umsetzung von 1 kg Stärke über den Energiestoffwechsel verschiedener chemotropher Mikroorganismen. **a** In aeroben Mikroorganismen ebenso wie bei Tier und Mensch wird über Atmung mit Sauerstoff (O₂) das Maximum an Energie (17 800 kJ) aus dem Nährstoff herausgeholt, die Produkte Kohlendioxid und Wasser sind energielos (s. Abb. 1a). **b–e** Im anaeroben Stoffwechsel kann prinzipiell nur ein kleiner Teil der Energie genutzt werden; der Rest bleibt in den Produkten enthalten und kann technisch über Oxidation mit Sauerstoff genutzt werden (s. Abb. 1b). In der Gesamtbilanz entstehen dann wieder Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). **b** Eine vollständige Umsetzung zu Wasserstoff (H₂), so gern man sie auch hätte, wurde bisher bei keinem gärenden Mikroorganismus beobachtet; sie brächte ihm zu wenig Energie zum Leben. (Eine solche Reaktion wäre nur mit Lichtenergie über bestimmte phototrophe Mikroorganismen möglich.) **c** Selbst ein Drittel der theoretischen Wasserstoffmenge mit gleichzeitiger Bildung von Essigsäure ist bereits ein günstiger Grenzfall. **d** Die Bildung von Ethanol (alkoholische Gärung) ist ein gut etablierter Prozess. Nur kann Stärke durch die gegenwärtig eingesetzten Mikroorganismen nicht direkt verwertet werden, sondern bedarf einer enzymatischen Vorbehandlung. Stärke verwertende Ethanolbildner für Produktionsprozesse lassen sich möglicherweise gentechnisch herstellen. **e** Die Umsetzung zu Methan (CH₄) ist ebenfalls gut etabliert; sie verläuft über mehrere kooperierende Gruppen von Mikroorganismen.

Die Produkte

Wasserstoff Wasserstoff, bestehend aus dem kleinsten aller Moleküle (H₂) und damit das leichteste Gas, gilt als zukünftiger sauberer Energieträger, denn seine Verbrennung

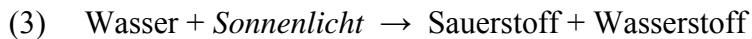
(am besten über Brennstoffzellen) liefert ausschließlich reines Wasser. Zu berücksichtigen sind selbstverständlich die Abfallprodukte bei den Herstellungsverfahren. Wasserstoff wird erst bei sehr niedriger Temperatur ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) flüssig. Sein Energiegehalt als Treibstoff pro Volumen beträgt weniger als ein Drittel des Energiegehalts des anderen Biogases, Methan (Tabelle 1). Eine möglichst raumeffiziente Energiespeicherung in Form von Wasserstoff ist deshalb eine wichtige Aufgabe (siehe den Beitrag von Ferdi Schüth und Robert Schlögl).

Unter Mikroorganismen kommt die Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoff häufig vor. Bei guten Produzenten perlt er erkennbar aus dem wässrigen Medium heraus. Obwohl Wasserstoff die einfachste chemische Verbindung ist, ist seine Freisetzung im Stoffwechsel biochemisch keineswegs trivial. Eigens dafür haben Mikroorganismen spezielle Enzyme, Hydrogenasen, entwickelt. Diese übertragen Reduktionseinheiten (gebundene Elektronen) auf die ständig und reichlich aus dem Wasser verfügbaren positiven Wasserstoffionen (H^+ -Ionen, Protonen), was zu Wasserstoffgas führt³.

Gut entwickelt ist die Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoffgas unter gärenden Bakterien. Weil sie über kein Oxidationsmittel im Energiestoffwechsel verfügen, haben sie natürlicherweise einen Überschuss an Reduktionseinheiten. Etliche gärende Bakterien können diesen Überschuss in Form von Wasserstoff über Hydrogenase als biochemisches Ventil ablassen. Eine biotechnologische Nutzung dieser Fähigkeit müsste bestrebt sein, so viel Wasserstoff wie möglich aus dem Ausgangsmaterial herauszuholen. Doch gerade hier sind leider biochemisch enge Grenzen gesteckt. Chemisch-rechnerisch ließen sich aus einem Kohlenhydratmolekül wie Glukose (Taubenzucker, Summenformel $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) oder ihrer gebundenen Form (der $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ -Einheit) als Baustein von Stärke und Zellulose 12 Moleküle Wasserstoff (12 H_2) gewinnen, obwohl das bei erster Betrachtung der Formel nicht sofort einleuchten mag;⁴ gleichzeitig würden 6 Moleküle CO_2 gebildet. Das entspräche einem Gasvolumen (bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) von ca. $1,8\text{ m}^3$ Wasserstoff/kg Stärke. Diese Ausbeute wurde bisher bei keinem gärenden Mikroorganismus beobachtet und ist auch unwahrscheinlich. Denn eine solche Reaktion würde bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht genügend Energie liefern, um einen Gärungsstoffwechsel zu unterhalten; der Mikroorganismus könnte nicht leben. Energetisch günstiger für einen Stoffwechsel würde die Reaktion, wenn man den Wasserstoff durch Vakuumpumpen absaugen würde, oder bei höherer Temperatur. Doch auch ein Kandidat für einen solchen Prozess ist unter den bekannten Mikroorganismen bisher noch nicht in Sicht. Über bekannte Reaktionswege, die ausreichend Energie für einen Gärungsstoffwechsel liefern, ließen sich maximal 4 Moleküle Wasserstoff pro Molekül Glukose (bzw. Stärke-Baustein) gewinnen,⁵ also höchstens ein Drittel der theoretischen Maximalmenge; und auch dieser Wert ist bereits ein idealer Grenzfall. Dabei entstünden ferner 2 Moleküle Essigsäure und 2 Moleküle Kohlendioxid. Eine solch geringe Ausbeute an Wasserstoff wäre biotechnologisch unwirtschaftlich, zumal die gärenden Bakterien in diesem Fall hochwertige Ausgangsstoffe wie Zucker oder Stärke benötigen. Immerhin könnte man die Essigsäure einer biologischen Methanbildung oder lichtgetriebenen Wasserstoffproduktion zuführen (s. im Folgenden), die dann den Hauptanteil der Energie lieferten.

In der Grundidee überzeugender sind Konzepte zur Erzeugung von Wasserstoff durch oxygene phototrophe Mikroorganismen. Mit der Energie des eingefangenen Sonnenlichts spalten diese eine solch universal verfügbare Substanz wie Wasser in Sauerstoff und Reduktionseinheiten. Würde man die Reduktionseinheiten an ihrer natürlichen Verwendung für die Biosynthese aus Kohlendioxid hindern und stattdessen einer Hydrogenase zuführen, entstünde Wasserstoff. Kein anderer Herstellungsprozess

wäre sauberer und umweltverträglicher als die lichtgetriebene Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff:



Tatsächlich besitzen einige einzellige Algen Hydrogenasen. Das Problem wäre nur, dass beide Gase zur selben Zeit im selben Organismus als ein nur aufwändig trennbares und gefährliches Gemisch (Knallgas) entstünden; bei gegebenem Anlass würde es die chemisch gespeicherte Sonnenergie in einer Detonation freisetzen und wieder in Wasser übergehen. Es gibt jedoch die Möglichkeit, die Bildungsreaktionen der beiden Gase zeitlich voneinander zu entkoppeln, indem die Reduktionseinheiten im Organismus zwischengespeichert und erst nach Abschalten der Sauerstoffbildung als Wasserstoff freigesetzt werden. Ein intensiv erforschter Kandidat dafür ist die Mikroalge *Chlamydomonas reinhardtii*.⁶ Wird sie in Abwesenheit des Minerals Sulfat gezüchtet, das für jede Proteinsynthese benötigt wird, kann Letztere nicht mehr stattfinden. Obwohl die Zellen sich dann nicht mehr vermehren können, laufen die lichtgetriebene Wasserspaltung unter Sauerstoffbildung und die Kohlendioxidfixierung mit den Reduktionseinheiten noch eine Zeitlang weiter. Die Kohlendioxidfixierung kann jedoch nicht mehr dem Wachstum dienen und führt deshalb zu einem Speicherstoff, Stärke (Prozess 4; dieser ist von höheren Pflanzen wie Getreide oder Kartoffeln unter natürlichen Wachstumsbedingungen gut bekannt). Weil die Proteinsynthese verhindert ist, kann ferner der unvermeidbare Verschleiß (das „Altern“) der Proteine nicht behoben werden. Davon ist besonders ein alterungsempfindliches Protein für die Wasserspaltung betroffen, sodass im weiteren Verlauf auch diese und damit ebenso Sauerstoffbildung und Stärkesynthese zum Erliegen kommen. Eine Ausschaltung der Sauerstoffbildung kann auch durch Zusatz von Kupfer erreicht werden.⁷ Der im Wasser noch verbliebene restliche Sauerstoff wird durch Atmung verbunden mit dem Abbau eines Teils der Stärke verbraucht, sodass die Bedingungen anoxisch (sauerstofffrei) werden. Unter diesen Bedingungen wird nun die gegen Sauerstoff empfindliche Hydrogenase aktiv. Gleichzeitig geht der Abbau der Stärke zu ihren Ausgangssubstanzen, Kohlendioxid und Reduktionseinheiten, weiter. Empfangen die Algen weiterhin Licht, das nun zu keiner Sauerstoffbildung mehr führt, werden die Reduktionseinheiten aus noch nicht ganz verstandenen Gründen über die noch funktionierenden Teile des ansonsten angegriffenen Photosystems lichtgetrieben der Hydrogenase zugeführt und als Wasserstoff freigesetzt (Prozess 5). Dabei entstehen pro Stärkebaustein (also pro gebundenem Glukosemolekül) 12 Moleküle Wasserstoff. Mit genau dieser Reaktion hätten gärende Bakterien ein großes Problem (siehe oben). Der Alge hingegen wird sie durch die Zufuhr von Lichtenergie ermöglicht.



Der Gesamtprozess, die Bilanz beider Einzelprozesse (Summe von 4 und 5), ist also die erstrebte Wasserspaltung (Prozess 3). Für eine hohe Wasserstoffausbeute muss in der ersten (oxygenen) Phase möglichst viel Stärke gespeichert und diese dann in der zweiten (anoxygenen) Phase möglichst vollständig abgebaut werden. Ein Problem bei diesem Prozess besteht allerdings darin, dass die Algen unter ungewöhnlichem Stress stehen, krank werden und bald absterben. Nach ein paar Tagen müssen wieder frische Algen eingesetzt werden. Ferner ist die Prozesssteuerung kompliziert.

Auch anoxygene phototrophe Mikroorganismen können zur Produktion von Wasserstoff veranlasst werden.⁸ Hier handelt es sich um die Nutzung einer Nebenreaktion der Fixierung von Stickstoff (Luftstickstoff). Wenn kein in Form von

Mineralsalzen gebundener Stickstoff (Ammoniak, Nitrat) vorliegt, überführt das Enzym Nitrogenase den Stickstoff aus der Luft mittels Reduktionseinheiten aus den Nährstoffen und unter hohem Energieaufwand in Ammoniak; dieser dient dann über Biosynthesen dem Wachstum. In einer Nebenreaktion der Nitrogenase entsteht durch Reaktion der Reduktionseinheiten mit H^+ -Ionen aus Wasser unvermeidbar immer etwas Wasserstoff. Fehlt auch noch der Luftstickstoff, wird die Wasserstoffbildung zur Hauptreaktion der Nitrogenase; sie wird damit zu einer Art Hydrogenase. Doch Stickstoffmangel bedeutet Wachstumsstillstand. Deshalb können die Reduktionseinheiten aus den Nährstoffen (organische Säuren, Alkohole, Schwefelwasserstoff) nicht mehr in die Biosynthese fließen. Es bleibt nur der Weg zur Nitrogenase und damit in die Wasserstoffbildung. Durch den Entzug von Reduktionseinheiten werden die Nährstoffe oxidiert; aus den organischen Nährstoffen wird CO_2 , aus Schwefelwasserstoff Sulfat. Dieser Weg der Wasserstoffbildung ließe sich in einen biotechnologischen Gesamtprozess integrieren, der mit oxygener Photosynthese beginnt. Zunächst würden oxygene phototrophe Organismen, bevorzugt kohlenhydratreiche Pflanzen, auf natürliche Weise wachsen (Prozess 6). Deren Biomasse würde dann geerntet, durch gärende Bakterien in Gärungsprodukte (Prozess 7) und letztlich über die anoxygenen photosynthetischen Bakterien in H_2 und CO_2 überführt (Prozess 8).

(6) Kohlendioxid + Wasser + *Sonnenlicht* → Pflanzenmasse + Sauerstoff

(7) Pflanzenmasse → Gärungsprodukte

(8) Gärungsprodukte + Wasser + *Sonnenlicht* → Kohlendioxid + Wasserstoff

Die Gesamtbilanz (Summe von 6, 7 und 8) wäre wiederum die lichtgetriebene Wasserspaltung (3), nun aber mit räumlicher Trennung von Sauerstoff- und Wasserstoffbildung und außerdem mit der Beteiligung diverser Organismen. Doch wiederum befinden sich die Mikroorganismen infolge des Stickstoffmangels in einem unnatürlichen Stresszustand. Man könnte sie mit Stickstoff in niedrigen, wachstumsbegrenzenden Konzentrationen versorgen, damit eine gewisse Zellsynthese möglich ist. Das erforderte eine sehr genaue Prozessführung. Aus Effizienzbetrachtungen⁹ unter Berücksichtigung des photosynthetisch aktiven Strahlungsanteils im Sonnenlicht¹⁰ läßt sich abschätzen, dass rund 2% der auf den Lichtreaktor eingestrahlteten Sonnenenergie in Form von Wasserstoff gespeichert werden können. Noch nicht genau vorstellbar ist der enorme technische Aufwand, der betrieben werden muss, um die Prozessbedingungen in den zur „Ernte“ von Sonnenlicht über weite Landschaftsflächen ausgebreiteten Bioreaktoren zu kontrollieren. Auch muss zusätzlich noch die Anbaufläche für die Pflanzen berücksichtigt werden, sofern es nicht nur um die Nutzung von Pflanzenabfall geht.

Ethanol Ethanol (Äthanol, Ethylalkohol, üblicher Alkohol; C_2H_5OH) ist neben Pflanzenöl und Biodiesel (technisch umgeestertes Pflanzenöl) der derzeit wichtigste biologisch erzeugte Kraftstoff für Fahrzeuge. Ethanol wird in verschiedenen Anteilen dem Benzin zugesetzt. Ausgangsstoffe für die Ethanolgewinnung durch Mikroorganismen sind bisher vor allem Zuckerrohr oder Getreide; doch auch Zuckerrüben gewinnen an Interesse. Zuckerrohr und Zuckerrüben liefern den für die Gärung benötigten Zucker (Saccharose, eine Verbindung aus Glucose und Fructose; auch als Rohrzucker oder Rübenzucker bekannt) direkt. Getreide hingegen liefert Stärke, ein Biopolymer und Makromolekül, das von den Ethanol bildenden Mikroorganismen nicht direkt verwertet werden kann. Zwar können sehr viele anaerobe Bakterienarten Stärke verwerten, doch bilden solche Arten kein oder nur wenig Ethanol.

Die Stärke wird daher nach dem Mahlen der Getreidekörner durch einen Auflösungsprozess in Wasser unter Erhitzung und durch Zusatz von Enzymen (Amylase, Amyloglucosidase) in Glukose gespalten.¹¹ Die Enzyme werden industriell gewonnen, wobei hitzestabile Enzyme aus thermophilen Mikroorganismen besonders beliebt sind. Solche Enzyme arbeiten bei ca. 100 °C und damit recht schnell. Die enzymatische Spaltung kann auch gleichzeitig während der Gärung erfolgen, dann selbstverständlich bei etwa 30 °C mit entsprechend geeigneten Enzymen. Ferner wird versucht, in Ethanol bildenden Mikroorganismen gentechnisch die Fähigkeit zu verankern, selbst Stärke spaltende Enzyme zu bilden und auszuschleiden.

Der derzeit am häufigsten eingesetzte Mikroorganismus für die Ethanolherzeugung ist die Brauherfe, *Saccharomyces cerevisiae*, ein einzelliger Pilz. Er wandelt Zucker mit hoher Ausbeute, d.h. mit nur geringer Bildung von unerwünschten Nebenprodukten (wie Glycerin) und Biomasse, in Ethanol um.¹² Der vom eingesetzten Zucker zu Ethanol (und Kohlendioxid) umgesetzte Anteil¹³ liegt bei etwa 90%. Obwohl die Gärung ein anaerober Prozess ist, muss eine kleine Menge Sauerstoff eingetragen werden. Die Hefe benötigt diesen für die Biosynthese lebensnotwendiger Steroide und bestimmter Fettsäuren der Zellmembran. *S. cerevisiae* ist ausgesprochen tolerant gegenüber dem produzierten Ethanol und häuft davon in den gängigen Produktionsverfahren bis 12% (Vol./Vol.) an. Die auf das Arbeitsvolumen (Kulturflüssigkeit) bezogene Produktionsrate von *S. cerevisiae* kann bei 12 kg Ethanol/m³/h liegen und somit 96 kW/m³ liefern. Ein weiterer Produzent von Ethanol in hoher Ausbeute und hohen Konzentrationen und somit von energietechnischem Interesse ist das Bakterium *Zymomonas mobilis*. Gegenüber Hefe hat es den Vorteil, noch weniger eigene Biomasse zu bilden und noch höhere Produktionsraten, nämlich bis ca. 40 kg Ethanol/m³/h entsprechend 320 kW/m³, zu erreichen. Das Bakterium ist nur wenig empfindlicher gegenüber Ethanol als die Hefe und erreicht Konzentrationen von 10% (Vol./Vol.).¹⁴ Ethanol können noch viele andere gärende Bakterien produzieren, doch ist deren Ausbeute oft niedrig. Vor allem erreichen sie nicht die hohen Ethanolkonzentrationen wie *S. cerevisiae* und *Z. mobilis*. Je niedriger aber die Konzentration des produzierten Ethanols ist, desto kostspieliger wird dessen Abtrennung durch Destillation.

Mit der Verwendung von Zucker und Stärke für die Treibstoffherstellung konkurriert der dafür betriebene Pflanzenanbau ernsthaft mit dem für den Nahrungsmittelsektor. Daher wird verstärkt erforscht, inwieweit zusätzlich oder bevorzugt andere Pflanzenbestandteile als Zucker und Stärke in Ethanol überführt werden können.¹⁵ Zellulose, der bei weitem häufigste Pflanzenbestandteil und die häufigste biologische Substanz auf der Erde, besteht zwar aus sehr langen Ketten von Glukosemolekülen. Doch sind diese Ketten regelmäßig und dicht gepackt und damit sehr stabil; sie können durch Enzyme nicht sehr zügig gespalten werden. Die Widerstandsfähigkeit der Zellulose gegenüber einem Abbau kann in der Pflanze durch Anlagerung von Hemizellulosen und Lignin noch weiter verstärkt werden. Die Substanz insgesamt wird Lignozellulose genannt. Hemizellulosen sind aus unterschiedlichen Zuckern zusammengesetzt, darunter solchen, die nur fünf statt (wie Glukose) sechs Kohlenstoffatome im Molekül enthalten. Hemizellulosen haben also eine kompliziertere Struktur, wenn auch kleinere Makromoleküle als Zellulose. Im biologischen Kontext ist die erzielte Stabilität und Abbaubeständigkeit von Zellulose verständlich, denn sie hat ja gerade die Aufgabe, Pflanzen als zug- und biegefestes Gerüstsubstanzen von langer Haltbarkeit zu dienen. Stärke hingegen ist ein Energiespeicher, der bei Bedarf leicht mobilisierbar und spaltbar sein muss. Damit der Lignozelluloseanteil von Pflanzen für die Ethanolgärung zugänglich wird, bedarf die Pflanzenmasse eines Aufschlusses durch

thermische und chemische Vorbehandlung, welche die Strukturen lockert und teilweise chemisch zerlegt. Zum Einsatz kommen, je nach Art der Pflanzemasse, z.B. übererhitzter Wasserdampf, verdünnte Schwefelsäure, oder Ammoniak. Die so besser zugänglich gewordene Zellulose kann dann durch Enzyme (Cellulase, Cellobiase) in Glukose überführt und anschließend vergoren werden. Ein Problem besteht darin, dass bei der chemischen Vorbehandlung Nebenprodukte entstehen, die den Gärungsstoffwechsel hemmen. Diese Hemmstoffe müssen in einer weiteren chemischen Behandlung entfernt werden. Auch Hemizellulosen lassen sich in Zuge der Vorbehandlung in ihre unterschiedlichen Zuckerbausteine spalten. Leider werden viele dieser besonderen Zucker von den derzeit erprobten Mikroorganismen mit nur schlechter Ausbeute zu Ethanol vergoren. Lignin besteht nicht aus Zuckerbausteinen, sondern aus aromatischen Ringsystemen, die vielfältig miteinander verknüpft sind; es ist nach bisherigen Erkenntnissen durch anaerobe Mikroorganismen überhaupt nicht verwertbar und kommt deshalb für Gärungsprozesse nicht in Frage.

1-Butanol Ein anderer durch Mikroorganismen gebildeter Alkohol, dessen Verwendung als erneuerbarer Energieträger diskutiert wird, ist Butanol, genauer 1-Butanol (primärer Butylalkohol; C_4H_9OH).¹⁶ In reiner Form hätte er gegenüber Ethanol mehrere Vorteile. Zum Beispiel hat Butanol eine höhere Energiedichte und könnte ferner ohne Beimischung von Benzin und ohne Umkonstruktion der Verbrennungsmotoren verwendet werden. Butanol wird aus Zuckern und sogar Stärke durch ein paar Arten der anaeroben Bakteriengattung *Clostridium* gebildet, z.B. durch *C. acetobutylicum*. Die gesamte Bakteriengattung hat die Fähigkeit zur Bildung von Sporen, die Trockenheit, Hitze und Sauerstoff (gegenüber denen aktive Zellen sehr empfindlich sind) überleben. Die Herstellung von Butanol stellt höhere biotechnologische Anforderungen als die von Ethanol und wirft auch Probleme auf. Die Butanol bildenden Bakterien können leicht auf eine Bildung wertloser Säuren wie Buttersäure umschalten; zur Aufrechterhaltung der Butanolbildung muss deshalb der pH-Wert gut kontrolliert und niedrig (pH 4,3) gehalten werden. Weil Butanol ein ausgesprochenes Lösungsmittel ist und starken Stress verursacht, können keine so hohen Konzentrationen wie im Fall von Ethanol gebildet werden, nämlich nur bis 2,5% (Vol./Vol.). Die Bakterien reagieren auf den Lösungsmittelstress leicht mit einem Übergang in das Sporenstadium, in dem sie gärungsaktiv sind. Durch geschickte Prozessführung ist es aber möglich, die Bakterien langfristig im Produktionszustand zu halten. Neben Butanol entstehen unvermeidbar auch noch Aceton und Ethanol in geringeren Anteilen (Aceton $\frac{1}{2}$ und Ethanol $\frac{1}{6}$ des Butanolvolumens). Produktionsraten von Butanol bis ca. $2 \text{ kg/m}^3/\text{h}$ entsprechend $19,5 \text{ kW/m}^3$ sind möglich. Die aus dem Zucker theoretisch zu erwartende Ausbeute wird nicht erreicht.

Methanol Methanol (Methylalkohol; CH_3OH), der chemisch einfachste aller Alkohole, ist kein Gärungsprodukt. Methanol kann also auch nicht, entgegen gelegentlichen Befürchtungen, durch eine „verunglückte“ Weingärung aus dem vorhandenen Zucker entstehen. Vielmehr entstehen geringe Anteile von Methanol unabhängig von der Gärung jedoch gleichzeitig infolge seiner Abspaltung aus den Methylester-Gruppen von Pektin, einer pflanzlichen Bindesubstanz unter anderem in Trauben und Obst und insbesondere in Rüben. Höhere Anteile an Methanol in vermeintlichen alkoholischen Getränken sind auf chemische Beimischungen oder Verwechslungen zurückzuführen. Die gefürchtete Giftigkeit von Methanol ist keine direkte, sondern die seiner Umwandlungsprodukts im Körper, Formaldehyd und Ameisensäure. Im Abwasser ist Methanol recht unbedenklich, weil es von Mikroorganismen, die sich sich eigens darauf spezialisiert haben, schnell abgebaut wird. Als Energieträger wird Methanol immer

wieder diskutiert. So gibt es eine auf Methanol basierende Brennstoffzelle (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell; siehe den Beitrag von Kai Sundmacher). Wenn auch nicht durch Gärung, so kann Methanol doch im Stoffwechsel spezialisierter Mikroorganismen gebildet werden. Es sind Bakterien, die sich von dem Biogas Methan (CH_4) ernähren. Der erste Schritt dabei ist ein Einbau von Sauerstoff in das Methanmolekül, was zu Methanol führt. Allerdings wird das so gebildete Methanol normalerweise gleich weiter umgesetzt und häuft sich nicht an. Ein Zeitlang waren Pläne von Interesse, das Enzymsystem dieser Bakterien so zu verändern, dass sich das gebildete Methanol anhäuft. So könnte das gasförmige Methan in das leichter zu transportierende flüssige Methanol überführt werden kann. Dieser Prozess erwies sich jedoch als nicht realisierbar und wäre außerdem mit spürbarem Energieverlust verbunden. Nur 57% der Energie des Methans blieben im produzierten Methanol erhalten,¹⁷ das dazu noch sehr verdünnt im Wasser anfiel. Was gelegentlich irreführend als „Biomethanol“ bezeichnet wird, ist aus Synthesegas (Kohlenmonoxid und Wasserstoff) in einem rein chemischen Prozess gewonnenes Methanol, wobei in diesem Fall das Synthesegas aus „verkohlter“ Biomasse gewonnen wird.

Methan Methan (CH_4) ist der einfachste und leichteste Vertreter der chemischen Gruppe der Kohlenwasserstoffe (Verbindungen, die nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen) und neben Wasserstoff der einzige relevante gasförmige Energieträger, der von Mikroorganismen gebildet wird (siehe den Beitrag von Rudolf Thauer). Methan hat zwar einen deutlich höheren Siedepunkt (-162 °C) als Wasserstoff, kann jedoch wie Wasserstoff bei Raumtemperatur durch noch so hohen Druck nicht verflüssigt werden. Die einfachste Form einer raumsparenden Speicherung von Methan ist die in Druckbehältern (z.B. bei 200-fachem Überdruck).

Die biologische Gewinnung von Methan (Biogas im üblichen Sinn) bietet etliche Vorteile. Sie bedarf wie die von Wasserstoff keiner Destillation. Auch werden nicht unbedingt ausgesuchte, wertvolle Ausgangsstoffe wie Zucker oder Stärke benötigt. Zwar werden auch diese leicht und mit hervorragender Ausbeute in Methan überführt, doch werden auch viele andere biologische Substanzen wie Proteine, Lipide, Fette (sofern sie nicht zu kompakt sind), Zellulose und Hemizellulosen zu Methan umgesetzt. Methan kann somit aus diversen Sorten von Pflanzenmasse und Abfällen biologischen Ursprungs gebildet werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass für die Methanbildung weder der Einsatz von Zuchtstämmen noch eine Reinhaltung und besondere Pflege der Mikroorganismenkulturen erforderlich ist. Bei vielen biologischen Abfällen stellt sich die Methanbildung wie von selbst ein, wenn diese unter Ausschluss von Sauerstoff und anderen biologischen Oxidationsmitteln (Nitrat, Sulfat) in Wasser mit etwas Grabenschlamm als Mikroorganismenquelle vermengt und aufbewahrt werden. Erklären lassen sich die gute Verwendbarkeit sehr diverser Ausgangsstoffe für die Methanbildung und die Robustheit der Mikroorganismenkulturen dadurch, dass es sich um einen in der langen Entwicklungsgeschichte des Lebens „optimierten“ und in Gewässersedimenten weit verbreiteten Prozess beim Abbau toter Biomasse handelt. In Abwesenheit von Sauerstoff und anderen Oxidationsmitteln (Nitrat, Sulfat) ist er sogar nahezu unvermeidbar. An der Methanbildung sind diverse Mikroorganismen unterschiedlicher Abstammung beteiligt, die arbeitsteilig „kooperieren“. Die eigentlichen Methanbildner, so genannte methanogene Archaeobakterien (Archaeen), sind recht spezialisiert und bilden Methan nur aus ganz wenigen Verbindungen, so durch Reduktion von Kohlendioxid mit Wasserstoff oder Spaltung von Essigsäure. Dass dennoch die chemisch sehr heterogene Biomasse in Methan überführt werden kann, ist zahlreichen gärenden und so genannten syntrophen Bakterien zu verdanken; diese

überführen die tote Biomasse in die einfachen Abbauprodukte Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff.

Berechnungen des Verhältnisses von Methan zum gleichzeitig gebildeten Kohlendioxid basieren meist auf der Tatsache, dass die chemische Zusammensetzung von Biomasse in der Summe etwa der von Kohlenhydraten, also der der pflanzlichen Hauptbestandteile, entspricht. Bei Kohlenhydraten als Ausgangsstoff stammen zwei Drittel des Methans aus der Spaltung von Essigsäure und ein Drittel aus der Reduktion von Kohlendioxid mit Wasserstoff. Das Verhältnis von Methan zum übrig gebliebenen Kohlendioxid beträgt am Ende 1:1. Sehr oft ist der Methananteil im Biogas jedoch höher. Das erklärt sich dadurch, dass die Biomasse auch Lipide und Fette enthält, die prinzipiell einen höheren Methananteil liefern,¹⁸ sowie ferner dadurch, dass das Kohlendioxid zu einem beträchtlichen Teil gelöst (als Hydrogencarbonat) in dem schwach alkalischen Wasser verbleibt. Methan hingegen ist wenig löslich und sammelt sich in der Gasphase.

Methanreaktoren werden bevorzugt kontinuierlich, also mit ständiger Zufuhr von Biomasse und Ausleitung von „ausgefautem“ Schlamm betrieben. Sehr wichtig ist der Ausschluss von hemmendem Sauerstoff. Ebenfalls sollte so wenig wie möglich des weit verbreiteten Minerals Sulfat vorhanden sein. Letzteres wird durch anaerobe Bakterien in Schwefelwasserstoff überführt. Wegen seiner korrosiven Wirkung auf Metalle und seiner Giftigkeit, vergleichbar mit der von Blausäure, ist Schwefelwasserstoff ein unerwünschter und zu Recht gefürchteter Bestandteil von Biogas. Er kann chemisch jedoch verhältnismäßig einfach entfernt werden, z.B. mit eisenhaltigen Pellets, die sogar regeneriert werden können. Sulfat, in fester Form als Gips bekannt, kommt in fast allen Gewässern und im Leitungswasser, jedoch so gut wie nicht im Regenwasser, vor. Auch Zement kann Sulfat abgeben. Der Eintrag von Säuren und giftigen Substanzen wie Lösungsmitteln oder Schwermetallen muss ebenfalls vermieden werden. Der pH-Wert sollte etwas oberhalb von 7 liegen, ein Wert, den eine funktionierende Methananlage oft von sich aus aufrecht erhält. Heizen auf 33–40 °C ist günstig. Zu vermeiden ist weiterhin ein zu plötzlicher hoher Eintrag großer Mengen leicht vergärbare Biomasse wie Zucker. Passiert das, so können infolge sehr aktiver Gärungen organische Säuren schneller gebildet als in den Folgeprozessen zu Methan umgewandelt werden. Denn die gärenden Bakterien arbeiten viel schneller als die syntrophen Bakterien und Essigsäure spaltenden Methan bildenden Archaeobakterien. Die Säuren häufen sich dann an und hemmen die Methanbildung.

Wieviel vom organischen Abfall in Methan überführt wird, hängt nicht nur von der Zusammensetzung des Eintrags, sondern auch von dessen Verweilzeit im Reaktor ab.¹⁹ Pflanzenmasse und natürlicher organischer Abfall bestehen aus schnell bis sehr langsam und schwer abbaubaren Fraktionen. Zu den schnell abbaubaren gehören Zucker und Stärke bzw. deren Reste, langkettige Fettsäuren und viele Proteine. Langsamer, aber mit akzeptabler Rate werden auch aufbereitete Zelluloseprodukte (Toilettenpapier, Abfälle aus der Papierindustrie) und Hemizellulosen in Methan überführt. Sehr langsam und auch unvollständig ist der Abbau von Zellulose und Hemizellulosen im natürlichen Verbund mit Lignin (d.h. die Lignozellulose). Mit der Länge der Verweilzeit des Abfalls im Reaktor wird daher der Abbau vollständiger, d.h. die Ausbeute an Methan pro Biomasse nimmt zu; doch steigt der Zugewinn an Methan aus den schwerer abbaubaren Fraktionen mit zunehmender Verweilzeit immer weniger. Je länger die Verweilzeit bei gleichbleibendem Anfall von Biomasse ist, desto größer muss zwangsläufig das Reaktorvolumen sein, und desto geringer wird die Rate der Methanbildung pro Schlammvolumen. Die wirtschaftlichsten Verweilzeiten hängen sehr vom Ausgangsmaterial ab und liegen bei Pflanzenmasse gewöhnlich bei 20 Tagen oder

länger. Dabei kann die Methanausbeute aus der Pflanzenmasse oder dem Abfall²⁰ in günstigen Fällen bis zu 75% der theoretischen Menge²¹ betragen, entsprechend ca. 0,34 m³ Methan/kg Pflanzentrockenmasse. Die Bildungsrate von Methangas (Als Volumen bei 25 °C) pro Volumen Reaktorschlamm liegt oft zwischen 0,02 und 0,12 m³/m³/h, entsprechend einer auf das Schlammvolumen bezogenen Leistung von 0,19 bis 1,12 kW/m³. Mit reinen Ausgangssubstanzen werden höhere Raten erzielt. Der Abbau der Pflanzenmasse oder des Abfalls zu Methan ist grundsätzlich langsamer als die Vergärung von Zucker zu Ethanol, primär bedingt durch die Langsamkeit der syntrophen Bakterien und Essigsäure spaltenden methanogenen Archaeobakterien. Biogasfermenter als Energielieferanten aus Pflanzenmasse müssen deshalb grundsätzlich sehr groß sein.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil der Methangewinnung ist, dass der übrig bleibende („ausgefaulte“) Schlamm, sofern er nicht mit Problemstoffen wie Schwermetallen belastet ist, einen guten Pflanzendünger mit hohem Gehalt an Mineralstoffen und organischer, humusähnlicher Gerüstsubstanz darstellt.

Weitere Kohlenwasserstoffe, Öle. Während der einfachste Kohlenwasserstoff, Methan, bei Raumtemperatur immer gasförmig ist, können fast alle anderen Kohlenwasserstoffe unter Druck verflüssigt werden oder sind bereits bei Normaldruck flüssig oder sogar fest. Solche Kohlenwasserstoffe sind wegen ihrer hohen Energiedichte (hoher Energiegehalt bei wenig Gewicht) ideale Energieträger. Entsprechend interessant wären anaerobe Mikroorganismen, die leicht zu verflüssigende oder flüssige Kohlenwasserstoffe als Ausscheidungsprodukte des Energiestoffwechsels, analog zur mikrobiellen Methanproduktion, bilden können. Doch sind solche Fähigkeiten eher eine Rarität und offensichtlich wenig entwickelt. So wurde eine biologische Bildung von Ethan und Propan in Abwesenheit von Sauerstoff beobachtet;²² doch waren die Mengen so winzig, dass an eine Nutzung nicht zu denken ist. Ferner wurde die Bildung von Toluol, einem aromatischen Kohlenwasserstoff, durch anaerobe Mikroorganismen nachgewiesen.²³ Ausgangsstoff dafür ist ein Produkt aus dem Abbau von Aminosäuren, Phenyllessigsäure. Toluol ist ein häufiger Bestandteil in Erdöl und Benzin. Biotechnologische Anwendungen verspricht die mikrobielle Bildung jedoch nicht, denn die gebildete Konzentration bleibt gering und der Ausgangsstoff ist sehr teuer.

Kohlenwasserstoffe kommen in Mikroorganismen ebenso wie in höheren Lebewesen (insbesondere Pflanzen) bisweilen auch in der Zellmembran (Lipid-Membran) und in gespeicherten Ölen vor. Solche Kohlenwasserstoffe sind keine Endprodukte eines Energiestoffwechsels, sondern biochemisch dem Synthesestoffwechsel zuzurechnen. Eine Nutzung chemotropher Mikroorganismen als Produzenten solcher Kohlenwasserstoffe ebenso wie generell von Ölen²⁴ wäre nicht sinnvoll, weil grundsätzlich nur ein Teil der Nährstoffe in die Biosynthese fließt (s. Abbildung 1). Sinnvoll hingegen wäre ein Einsatz phototropher Mikroorganismen als Produzenten von Kohlenwasserstoffen und Ölen. Der sicherlich interessanteste Mikroorganismus in dieser Hinsicht ist *Botryococcus braunii*, eine Süßwasseralge, deren Einzelzellen zu kleinen Kolonien vereinigt sind. Diese enthalten einen hohen Anteil langkettiger ungesättigter Kohlenwasserstoffe, die in sichtbaren Öltröpfchen enthalten sind. Die Kohlenwasserstoffe können einen großen Anteil der Trockenmasse ausmachen, nämlich zwischen 35 und 75%.²⁵ Weil diese Alge die Kohlenwasserstoffe im Zuge ihrer Photosynthese im Licht aus Kohlendioxid und Wasser unter Sauerstofffreisetzung bildet, handelt es sich um eine Art Umkehrung der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen. Über eine biotechnologische Anwendung wurde diskutiert. So könnte man diese Algen in großen flachen Wasserbecken im Sonnenlicht züchten, die

Algenmasse kontinuierlich ernten und aus dieser die Kohlenwasserstoffe extrahieren und gegebenenfalls durch einen Crackprozess veredeln.

Elektrizität Ein weiteres energietechnisch möglicherweise nützliches Produkt aus Mikroorganismen ist Elektrizität. Diese wird in so genannten mikrobiellen Brennstoffzellen (Microbial Fuel Cells, MFCs) erzeugt.²⁶ Das Prinzip gleicht dem einer chemischen Brennstoffzelle. An zwei Elektroden, die in eine Elektrolytlösung tauchen und mit einem oxidierbaren bzw. oxidierendem Betriebsmittel versorgt werden, laufen kontinuierlich jeweils unterschiedliche Reaktionen ab, nämlich eine Elektronen abgebende und eine Elektronen aufnehmende Reaktion. Die elektrische Spannung zwischen den Elektroden treibt über einen angeschlossenen Verbraucher, der Nutzarbeit verrichtet, einen Stromfluss. Der Unterschied zu einer rein chemisch arbeitenden Brennstoffzelle liegt darin, dass mindestens eine der Reaktionen durch Mikroorganismen bewerkstelligt wird. An der negativen Elektrode, dem äußeren Minuspol, sind es stets anaerob wachsende Mikroorganismen, welche mit einem organischen Nährstoff versorgt werden; normalerweise würden sie ihn mittels eines natürlichen Oxidationsmittels oxidieren. Ein solches wird ihnen jedoch vorenthalten. Die Reduktionseinheiten aus dem organischen Nährstoff werden daher in Form von Elektronen an die elektrisch leitende Elektrode abgegeben, so dass der organische Nährstoff schließlich doch oxidiert wird. Die von der Elektrode über den Verbraucher in die gegenüberliegende Elektrode, den Pluspol, fließenden Elektronen werden dort entweder in einer chemischen Reaktion mit einem Oxidationsmittel oder durch einen anderen Mikroorganismus, der über ein Oxidationsmittel verfügt, aufgenommen. Das Oxidationsmittel ist idealerweise Sauerstoff aus der Luft. Weil es sich am Minuspol und Pluspol um grundsätzlich verschiedene Mikroorganismen handelt, müssen diese durch eine Barriere im wässrigen Elektrolyten voneinander getrennt gehalten werden. Die Barriere verhindert außerdem, dass das Oxidationsmittel vom Pluspol zum Minuspol und den dort ansässigen Bakterien gelangt und die Elektronen direkt aufnimmt. Auch würde das Oxidationsmittel die anaerobe Lebensweise der Bakterien stören. Umgekehrt soll der Nährstoff der anaeroben Bakterien nicht auf die Gegenseite in die Umgebung des Pluspols gelangen und mit dem dort vorhandenen Oxidationsmittel reagieren. Dennoch muss die Barriere für den Fluss geladener Teilchen im Wasser, der Ionen, durchlässig sein; denn wenn intern in der Brennstoffzelle kein Ionenfluss zwischen den Elektroden möglich ist, kommt auch extern kein Elektronenfluss zustande. Bewährt haben sich spezielle Membranen, die bevorzugt für die positiven Wasserstoffionen (H^+ -Ionen) durchlässig sind.

Die Abgabe der Elektronen an die Elektrode bzw. deren Aufnahme von der Elektrode erfolgt entweder über lösliche Elektronenüberträger oder im beinahe direkten Kontakt mit den Mikroorganismen. Im ersteren Fall befinden sich lösliche Substanzen im Elektrolyten, die Elektronen aufnehmen und abgeben können und so zwischen den Elektrodenoberflächen und den Zellen, die sich frei im Elektrolyten befinden, vermitteln. Im zweiten Fall sitzen die Mikroorganismenzellen dicht gedrängt z.B. an der Elektrode aus Graphit („Kohle“). Der Elektronenfluss zwischen Zellen und Elektrodenoberfläche findet dann über noch nicht ganz verstandene leitende Mikrostrukturen oder über nur dort aktive lösliche Elektronenüberträger statt.

Als Bakteriennährstoff wurden häufig Glukose und Essigsäure verwendet. Auf lange Sicht möchte man Abfallstoffe wie lösliche Abbauprodukte aus Abwässern verwenden und so deren Entsorgung mit Stromerzeugung verbinden. Der Vorteil von Bio-Brennstoffzellen liegt nämlich darin, dass der Betrieb im Prinzip mit den unterschiedlichsten Substanzen möglich ist, auch solchen, die für chemische Brennstoffzellen ungeeignet sind. Denn Mikroorganismen können sehr diverse

organische Substanzen verwerten. Wie alle Prozesse zur Gewinnung von Bioenergie haben mikrobielle Brennstoffzellen jedoch auch Nachteile. Die maximal mögliche Spannung zwischen den Elektroden, die man auf Grund der chemischen Natur des eingespeisten Bakteriennährstoffs und des Oxidationsmittels berechnen kann, wird nie erreicht. Denn die Bakterien können nur leben, wenn ihnen ein Teil von der Gesamtspannung als Triebkraft zur Verfügung steht. Die Bakterien sind ebenfalls Verbraucher, die, elektrotechnisch gesehen, mit dem technischen Verbraucher in Reihe geschaltet sind, entsprechend dem Elektronenfluss

Biochemische Elektronenquelle → Bakterien (→ Elektrode) → techn. Verbraucher
(→ Elektrode) → Bakterien → Biochemische Elektronensenke.

Die außen an den Elektroden abgreifbare Spannung erreicht kaum 0.5 V. Ferner sind die Stromdichten (Strom pro Elektrodenfläche) derzeit noch sehr gering. Um akzeptable Leistungen zu erzielen, werden große Bauvolumina zum Unterbringen der Elektroden benötigt. Zur Zeit werden keine höheren auf das Volumen bezogene Leistungen als 1 kW/m^3 erreicht.²⁷ Welcher Anteil der Reduktionseinheiten aus der Biomasse (sog. Coulomb'sche Effizienz) tatsächlich über die Elektroden fließt, hängt von der Art der eingesetzten Substanzen ab. Mit Essigsäure wurde eine Coulomb'sche Effizienz bis zu 75% gemessen. Oft ist sie geringer, da biologische Nebenreaktionen ohne Elektronenabgabe an die Elektrode ablaufen. Aus der Elektrodenspannung, dem Gehalt an Reduktionseinheiten in dem eingebrachten Nährstoff, der Coulomb'schen Effizienz und der in der Biomasse tatsächlich steckenden Energie berechnet sich der energetische Wirkungsgrad. Mit Essigsäure und Sauerstoff wurde ein Wirkungsgrad von knapp 20% erzielt.²⁸

Energiebilanzen

Die derzeit wichtigsten erneuerbaren Energieträger aus Mikroorganismen sind Umwandlungsprodukte aus Substanzen pflanzlichen Ursprungs, sei es aus roher Pflanzenmasse, aus hochwertigen Pflanzenbestandteilen (Zucker, Stärke), aus Pflanzenabfall oder aus tierisch verdauten Futterpflanzen. Die mit dem Produkt verfügbare Energie ist ein Teil der ursprünglichen Sonnenenergie, die über Photosynthese beim Wachstum der Pflanzen konserviert wurde. Sehr aufschlussreich ist es deshalb, den Weg der Sonnenenergie bis ins begehrte Endprodukt zu verfolgen, z.B. bei der Gewinnung von Ethanol oder Methan.

Oberhalb unserer Atmosphäre beträgt die Strahlungsleistung der Sonne bei senkrechtem Einfall 1367 W/m^2 (Solarkonstante). Infolge von Absorption und Streuung in der Atmosphäre, zeitweiligen Wolken, Tag-Nacht-Wechsel und zumeist schrägem Einfall ist die durchschnittliche Einstrahlung auf der horizontalen Erdoberfläche wesentlich geringer und vom geographischen Breitengrad abhängig. In der Mitte Deutschlands beträgt sie auf der waagerechten Erdoberfläche im Jahresdurchschnitt 111 W/m^2 (1110 kW/ha , $9,7 \text{ GWh/ha/Jahr}$), mit monatsdurchschnittlich 202 W/m^2 im Juli und 20 W/m^2 im Dezember.²⁹ Die Energie der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung auf ca. 4060 km^2 (knapp einem Fünftel der Fläche von Hessen) entspricht somit dem Primärenergiebedarf – eigentlich Primärleistungsbedarf* –

* Im üblichen Sprachgebrauch wird zwischen Energie und Leistung (Energie pro Zeit) nicht immer strikt unterschieden. Auch im vorliegenden Text wird diese sprachliche Ungenauigkeit bei der Verwendung eingebürgerter Ausdrücke in Kauf genommen. Eindeutigkeit ist durch die jeweils verwendete Maßeinheit gegeben.

Deutschlands von 451 GW (14,24 EJ/Jahr, 3,96 PWh/Jahr).³⁰ In der Tropenzone Brasiliens liegt die Sonneneinstrahlung mit etwa 210 W/m^2 (2100 kW/ha, 18,4 GWh/ha/Jahr) im Jahresdurchschnitt fast doppelt so hoch.³¹

Bei der Photosynthese kann jedoch nur ein Bruchteil der eingestrahnten Sonnenenergie in Form organischer Pflanzensubstanz konserviert werden. Das liegt an sehr vielen Faktoren. Selbst bei dichtem Wuchs trifft ein Teil des Lichts nicht die Blätter und ihre photosynthetisch aktiven Bereiche, wird reflektiert oder ungenutzt absorbiert. Außerdem kann über die Photopigmente nur ein Ausschnitt aus dem gesamten Wellenlängenspektrum des auftreffenden Sonnenlichts, die sogenannte photosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetically Active Radiation, PAR), als Energie eingefangen werden. Wenn die so eingefangene Energie in die biochemischen Syntheseprozesse weitergeleitet wird, kommt es zu weiteren Verlusten. Ein merklicher Verlust aufgenommener Energie findet bereits beim ersten Biosyntheseschritt statt, der Fixierung von Kohlendioxid, weil hier eine unvermeidbare Nebenreaktion mit Sauerstoff stattfindet. Auch bei weiteren Synthesereaktionen wird stets mehr Energie aufgewendet, als in den Produkten erhalten bleibt. Energetisch betrachtet erfolgen die Synthesen also mit übermäßigem Energieaufwand, d.h. mit niedrigem Wirkungsgrad. Recht niedrig ist der Wirkungsgrad bei der Synthese von Proteinen, besser hingegen bei der von Kohlenhydraten. Je mehr Kohlenhydrate (und Öle) und je weniger Protein eine Pflanze also enthält, desto rentabler ist sie als Energiepflanze*. Dass die Pflanze einen Teil der gebildeten Substanzen, insbesondere Zucker und Stärke, für Atmungsvorgänge im Dunkeln selbst wieder verbraucht, fällt nicht so sehr ins Gewicht. Unter Berücksichtigung der hier genannten und anderer biologisch unvermeidbarer Verluste wurde berechnet, dass bei einer sehr effektiven Landpflanze bis 6%** der auf sie insgesamt eingestrahltene Sonnenenergie in Form von Biomasse konserviert werden könnten.³² Rechnet man mit einer Vegetationsperiode einer solchen idealen (am besten mehrjährigen) Pflanze von 6 Monaten und einer durchschnittlichen Strahlungsleistung während dieser Saison in Deutschland von 171 W/m^2 , so könnten über die geerntete Biomasse gleichmäßig über das gesamte Jahr verteilt laufend bis $5,1 \text{ W/m}^2$ (51 kW/ha) geliefert werden. Eine Anbaufläche von 88400 km^2 (ein Viertel der Fläche von Deutschland; 357114 km^2) mit einer solchen Idealpflanze würde aus dem Sonnenlicht eine Leistung einfangen, die dem Primärbedarf in Deutschland entspräche. Pro Einwohner (Gesamtzahl 82 Mio) wären das 1080 m^2 ($33 \text{ m} \times 33 \text{ m}$) Anbaufläche. Die eingefangene Sonnenleistung entspräche einem Ernteertrag (als Pflanzentrockenmasse) von etwa $9 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (90 t/ha/Jahr) oder $0,025 \text{ kg/m}^2/\text{Tag}$ im Jahresdurchschnitt.

Der Effizienz der Lichtnutzung der Idealpflanze am nächsten kommen möglicherweise bestimmte Arten von Mikroalgen insbesondere bei guter Versorgung mit Nährsalzen und Kohlendioxid.³³ In Aquakulturen in Japan wurden in der Sommerzeit Trockenmasse-Spitzenenerträge von $0,02$ oder gar $0,03 \text{ kg/m}^2/\text{Tag}$ erzielt.³⁴ Bei Betrachtungen zur Effizienz der Nutzung des Lichts ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Sonneneinfall in Japan stärker als in Deutschland ist und dass der (noch zu ermittelnde) jahresdurchschnittliche Tagesertrag bei Einbeziehung der weniger produktiven Monate der kälteren Saison niedriger ausfällt.

* Auch sonst ist ein hoher Proteingehalt in Energiepflanzen nicht erstrebenswert (ganz anders als bei Nahrungspflanzen). Denn je mehr Protein eine Pflanze enthält, desto mehr Stickstoffdünger wird für den Anbau benötigt und desto mehr Ammoniak fällt mit den Rückständen aus den biotechnologischen Umwandlungsprozessen an.

** Bei der Angabe der Effizienz wird nicht selten der von der photosynthetisch aktiven Strahlung (statt von der gesamten Einstrahlung) genutzte Energieanteil angegeben. Das ergibt selbstverständlich höhere Prozentwerte.

Unter den Landpflanzen nutzen selbst die ertragreichsten das eingestrahlte Sonnenlicht zu einem deutlich geringeren Prozentsatz als die genannte Idealpflanze. Winterweizen, in Deutschland ein Kandidat für die Bioethanolgewinnung, liefert bei geeigneter Fruchtfolge einen Kornenertrag von $0,85 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ ($8,5 \text{ t/ha/Jahr}$ ³⁵) bei gleichzeitigem Strohertrag von $0,7 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (jeweils als Trockenmasse),³⁶ also insgesamt eine Biotrockenmasse von $1,55 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ ($15,5 \text{ t/ha/Jahr}$); das sind nur 17% des Ertrags der Idealpflanze. Eine Alkoholausbeute von $0,31 \text{ kg/kg Korn}$ ³⁷ über Hefegärung würde $0,26 \text{ kg Ethanol/m}^2/\text{Jahr}$ ($3,34 \text{ m}^3/\text{ha/Jahr}$) liefern und damit brutto $7500 \text{ kJ/m}^2/\text{Jahr}$ (21 MWh/ha/Jahr) oder $0,24 \text{ W/m}^2$, also 0,22% der eingestrahnten jahresdurchschnittlichen Sonnenleistung. Mit dem Stroh stünde eine Verbrennungsenergie von etwa $12600 \text{ kJ/m}^2/\text{Jahr}$ (35 MWh/ha/Jahr) oder $0,4 \text{ W/m}^2$ zur Verfügung. Könnten damit die gesamten Energiekosten für die Ethanolherstellung gedeckt werden, wäre die mit dem Ethanol zur Verfügung stehende Energie ein Nettogewinn. Selbstverständlich sollte das Ethanol angesichts des geringen Flächenertrags und der aufwändigen Produktion nicht wahllos für Heizzwecke, sondern gezielt zum Antrieb von Fahrzeugen eingesetzt werden. Der Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland verbraucht im Tag-Nacht-Durchschnitt $83,3 \text{ GW}$ (18% der Primärenergie).³⁸ Sein Betrieb ausschließlich mit „Weizensprit“ würde eine Anbaufläche von 347000 km^2 , also nahezu die Fläche Deutschlands benötigen; dabei ist die Zusatzfläche für die Fruchtfolge noch gar nicht berücksichtigt. Ähnlich viel Fläche würde auch für einen ganz mit Rapsöl oder Biodiesel (mit Methanol umgeestertes Rapsöl) betriebenen Kraftverkehr benötigt, auf Grund der in etwa vergleichbaren Energieerträge pro Anbaufläche.³⁹ Ein höherer Flächenertrag von Ethanol wäre in Deutschland über Zuckerrüben möglich, die bei Fruchtwechsel oft Frischmasseerträge von ca. $6 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (60 t/ha/Jahr) erbringen⁴⁰. Der Trockenmasseertrag ($1,5 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ oder 15 t/ha/Jahr , das Maß für die pflanzliche Nutzung der Lichtenergie) ist zwar nicht höher als bei Weizen, doch steht der vergärbare Zucker direkt und zudem mit sehr hohem Anteil in der Pflanzenmasse zur Verfügung. Zuckererträge können $1 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (10 t/ha/Jahr) betragen, die über Gärung Ethanolmengen von etwa $0,48 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (ca. $6,1 \text{ m}^3/\text{ha/Jahr}$) liefern, entsprechend $13800 \text{ kJ/m}^2/\text{Jahr}$ (38 MWh/ha/Jahr) oder $0,44 \text{ W/m}^2$, d.h. 0,4% der eingestrahnten Sonnenleistung. „Rübensprit“ aus einem Anbau auf etwa der Hälfte der Fläche Deutschlands könnte dessen Kraftfahrzeugverkehr unterhalten. Energieaufwand für die Ethanolproduktion und Fläche für die Fruchtfolge sind hier allerdings nicht berücksichtigt.

In Brasilien können über Zuckerrohr etwa $0,71 \text{ kg Ethanol/m}^2/\text{Jahr}$ ($9 \text{ m}^3/\text{ha/Jahr}$) gewonnen werden,⁴¹ bedingt durch die in den Tropen jahreszeitlich nicht eingeschränkte Wachstumszeit und die im Vergleich zum Weizen effektivere Photosynthese des Zuckerrohrs. Ein solcher Ethanolertrag liefert brutto $20450 \text{ kJ/m}^2/\text{Jahr}$ (57 MWh/ha/Jahr) oder $0,65 \text{ W/m}^2$, entsprechend 0,31% der dort einfallenden Sonnenleistung. Der größte Energieanteil (nutzbar für die Wärmeerzeugung) steckt in dem reichlich anfallenden Zuckerrohrstroh.

Eine besonders ertragreiche Energiepflanze ist die Hybridpflanze *Miscanthus × giganteus*, das Chinaschilf. Bei einem Anbau in Deutschland unter günstigen Bedingungen gilt ein Trockenmasseertrag von ca. $2,5 \text{ kg/m}^2/\text{Jahr}$ (25 t/ha/Jahr) als möglich,⁴² was $45000 \text{ kJ/m}^2/\text{Jahr}$ (125 MWh/ha/Jahr) oder $1,43 \text{ W/m}^2$ und damit 1,3% der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung entspricht. Chinaschilf ist zwar keine stärkereiche Pflanze für die Ethanolproduktion, könnte aber zur Biogaserzeugung dienen. Nimmt man den günstigen Fall an, dass 70% der

Pflanzenmasse zu Methan umgesetzt werden*, so ergibt das ein Methanvolumen (bei 25 °C) von $0,79 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{Jahr}$ ($7900 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$) und damit $26600 \text{ kJ}/\text{m}^2/\text{Jahr}$ ($74 \text{ MWh}/\text{ha}/\text{Jahr}$) oder $0,84 \text{ W}/\text{m}^2$; das sind $0,76\%$ des Sonneneinfalls. Wäre das der Nettogewinn, könnte Methan aus Chinaschilf von 99000 km^2 Anbaufläche (etwas mehr als ein Viertel der Fläche Deutschlands) den Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland nach einer Umstellung von Benzin und Diesel auf Biogas⁴³ in fahrzeugfähigen Hochdrucktanks unterhalten. Doch selbst wenn die Biogasbetriebe direkt mit Sonnenwärme geheizt werden, wird ein Teil des Methans für den Maschinenbetrieb verwendet werden müssen, sodass die Nettoproduktion von Methan geringer und die nötige Anbaufläche größer wäre. In Abbildung 3 ist der Energiefluss vom Sonnenlicht bis zum Methan dargestellt.

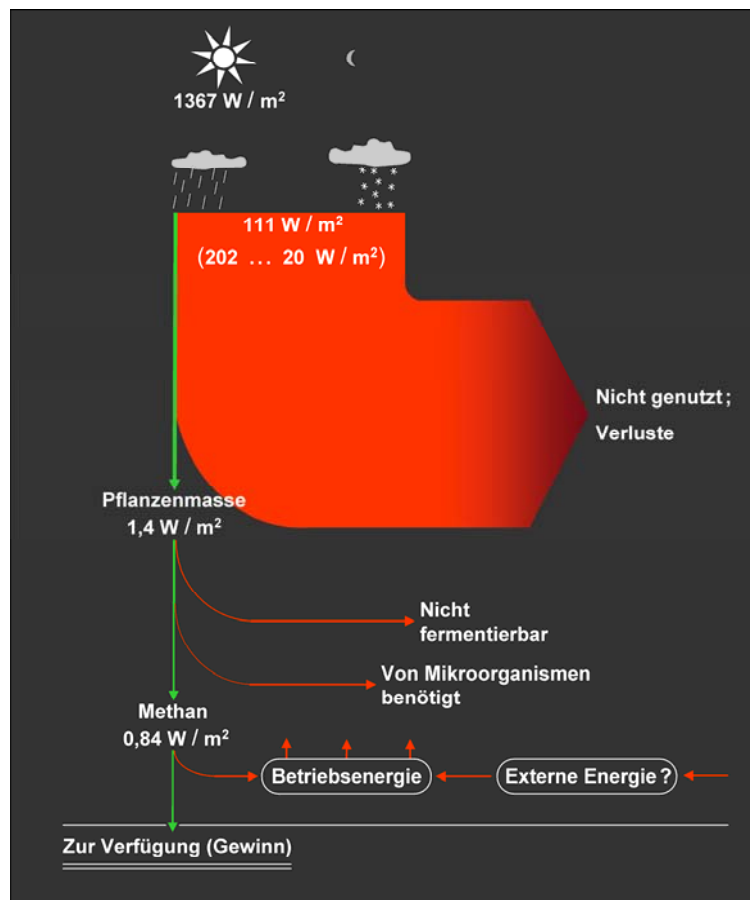


Abbildung 3: Leistungsfluss von der auf eine Anbaufläche von Chinaschilf in Deutschland einfallenden Sonnenleistung ($111 \text{ W}/\text{m}^2$ im Jahresdurchschnitt, im Monatsdurchschnitt $202 \text{ W}/\text{m}^2$ im Juli und $20 \text{ W}/\text{m}^2$ im Dezember) bis zum Endprodukt, Methan. Chinaschilf ist eine besonders ertragreiche Pflanze. Der vom produzierten Methan im Betrieb benötigte Anteil hängt von dessen Effizienz und Energieeinsparung, z.B. durch Nutzung von Sonnenwärme, ab. Möglicherweise benötigte externe Energie ist in der Bilanz ebenfalls zu berücksichtigen.

* Chinaschilf ist wegen seines hohen Fasergehalts weniger gut fermentierbar als Mais. Der Ertrag ist etwas höher als der von Mais, weshalb Chinaschilf hier als Beispiel für eine photosynthetisch sehr effektive Landpflanze dient.

Ausblick

Die hier genannten Erträge an Bioenergie sind Bruttoerträge aus den biologischen Prozessen, bei denen der Energieverbrauch für Anlagenbau, Herstellung und Ausbringung von Pflanzendünger, Landbearbeitung, Ernte, Prozessführung und Restmasse-Entsorgung nicht berücksichtigt wurde. Wird auch dieser Energieverbrauch einbezogen, ist die tatsächlich verbleibende Nettoleistung nur noch ein bescheidener Rest aus der einfallenden Sonnenleistung und ein sehr kleiner Beitrag zur Einsparung fossiler Energie in einem dicht besiedelten und hoch industrialisierten Land. Eine solche oder gar größere Einsparung sollte langfristig auch auf anderen Wegen wie energiebewusste Lebensweise und technische Entwicklungen (Leichtautos, Passivhäuser, Solar- und Windenergie-technik etc.) zu erzielen sein. Darüber hinaus müsste die Beurteilung des langfristigen Nutzens eines Pflanzenanbaus eigens zur Bioenergiegewinnung noch andere als rein energetische Kategorien einbeziehen, zum Beispiel die Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion, das lokale Ökosystem und die weitere Umwelt. So kann ein steigender Anbau von Energiepflanzen zur Gewinnung von Ethanol oder Methan einen ausreichenden Anbau von Nahrungspflanzen zunehmend beeinträchtigen und bestehende Ökosysteme stören oder zerstören. Die Verwendung von Stickstoffdünger zur Ertragssteigerung von Energiepflanzen kann zu einer erhöhten Freisetzung von Distickstoffoxid (N_2O) aus dem Boden führen, das in der Atmosphäre als Treibhausgas wirkt und dem über die Bioenergie angestrebten Effekt eines geringeren CO_2 -Ausstoßes entgegenwirkt.⁴⁴ Bei solch übergreifenden, allerdings sehr komplexen Betrachtungen und Kalkulationen erscheinen der Anbau und die mikrobielle Umwandlung von Energiepflanzen als ein kritisches Unterfangen,⁴⁵ dessen Subventionierung und Entwicklung Anlass zu Sorgen gibt. Ausgerechnet die „Bioenergie“ läuft Gefahr, Umwelt und Wirtschaft einen schlechten Dienst zu erweisen. Schwerwiegend wären die Folgen unkontrollierter weltweiter Geschäfte mit Biokraftstoffen bei steigendem Bedarf. Auf der Ebene der Marktpreise für Bioenergie bleibt diese Problematik selbstverständlich verborgen. Völlig abwegig ist die Verwendung der mit Aufwand „veredelten“ Pflanzenprodukte für Heizzwecke. Stattdessen könnte die Ausgangspflanzenmasse direkt zum Heizen verwendet werden und so noch ein wenig mehr von der eingefangenen Sonnenenergie und zudem auf einfacherem Wege abliefern. Wesentlich mehr als über Energiepflanzen kann über thermische Solarkollektoren von der Sonnenenergie (um die 70%) als Wärme genutzt werden, wobei derzeit allerdings die nicht ausreichenden Möglichkeiten zur Speicherung der Sommerwärme für die kalte Jahreszeit ein Problem darstellen.

Solche Erwägungen mögen zunächst wie ein Widerspruch zu Schätzungen klingen, denen zufolge bereits etwa ein Zehntel der weltweit wachsenden Pflanzenmasse (Nettoprimärproduktion) den Weltenergiebedarf decken könnte. Weshalb kann dann ein flächendeckender Pflanzenanbau in Deutschland nicht einmal den nationalen Energiebedarf decken? Dafür gibt es vier wichtige Gründe: (a) Bei Angaben zur weltweiten Nettoprimärproduktion wird selbstverständlich auch die in den Weltmeeren mitgezählt. Pflanzenmasse für Bioenergie kann jedoch nur vom Festland kommen. (b) Sehr viele Menschen leben mit einem weit geringeren Energiebedarf als die Bewohner der hoch industrialisierten Länder. Hätte jeder Mensch auf der Welt den Energiebedarf wie ein Mensch z.B. in Deutschland, müsste die Hälfte der pflanzlichen Primärproduktion auf dem gesamten Festland ständig eingefahren und genutzt werden.⁴⁶ (c) Deutschland gehört zu den dicht besiedelten Ländern und hat damit einen besonders hohen Energiebedarf pro Siedlungsfläche. (d) Die pflanzliche Primärproduktion in einem Land wie Deutschland mit seinem gemäßigten Klima und

jahreszeitlich eingeschränkten Vegetationsperioden (für welches die obigen Berechnungen angestellt wurden) kann nicht die Primärproduktionswerte (pro Fläche) warmer Klimazonen mit längeren bis ganzjährigen Vegetationsperioden und üppigerem Wachstum erreichen.

Die Problematik „Bioenergie contra Nahrung und Ökosysteme“ wird auch an Hand einer einfachen Bedarfsrechnung sichtbar: Die durchschnittliche Leistungsaufnahme des menschlichen Körpers aus der Nahrung sei hier grob auf 0,12 kW (2 500 kcal/Tag) geschätzt. Die Gesamtleistung, die jeder Mensch für Stromerzeugung, Heizung, Kraftverkehr, Güterproduktion (einschließlich Nahrungserzeugung) etc. benötigt oder beansprucht, beträgt in Deutschland (gemäß Primärenergiebedarf; s. oben) durchschnittlich 5,5 kW pro Einwohner und ist damit 46-fach(!) höher als der rein biologische Leistungsdarf. Daher ist auch bei einem „Ausbau der Bioenergie“ der Bedarf an Anbaufläche für Energiepflanzen ungleich größer als der für Nahrungspflanzen.

Sind nun Mikroorganismen als Produzenten erneuerbarer Energieträger uninteressant? Keineswegs, denn das Problem der unzureichenden Bioenergie liegt nicht bei den Mikroorganismen, zumindest nicht im Falle der derzeit am meisten produzierten Produkte Ethanol und Methan. Die Mikroorganismen setzen die Ausgangsmaterialien mit guter Ausbeute und hoher bzw. akzeptabler Geschwindigkeit um. Das Problem liegt bei der Gewinnung ausreichender Ausgangsmaterialien, also von Pflanzenmasse. Ganz anders zu bewerten ist daher eine Situation, in der Pflanzenmasse in der Landwirtschaft ohnehin als Abfall anfällt und zur Beseitigung ansteht; hier wird dessen mikrobielle Umwandlung vor allem in Methan auch in Zukunft vernünftig sein und punktuell spürbar zur Energieversorgung beitragen, ähnlich wie eine energetische Nutzung von Abfallholz und brennbarem Müll sinnvoll ist. Darüber hinaus könnte Bioenergie aus eigens angebauten Pflanzen mit anschließender Umwandlung durch Mikroorganismen in dünn besiedelten Gegenden vertretbar sein, wenn Flächen vorhanden sind, die weder für Nahrungspflanzen in Frage kommen noch empfindliche Ökosysteme beheimaten. Hier könnten Produkte aus Mikroorganismen bei energiebewusster Lebensweise einen entscheidenden Beitrag zur lokalen Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern leisten.

Tabelle 1: Energiegehalt* von Biokraftstoffen und natürlichem Pflanzenmaterial.

	Dichte (kg/m ³)	Energie pro Masse (kJ/kg)	Energie pro Volumen (kJ/m ³)
Wasserstoff (H ₂) (Normaldruck, 25 °C)	0,082	119 000	9 700 (bei 20 MPa: 1 940 000)**
Methan (CH ₄) (Normaldruck, 25 °C)	0,66	51 100	33 700 (bei 20 MPa: 6 740 000)**
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	789 (20 °C)	28 800	22 750 000
1-Butanol (C ₄ H ₉ OH)	810 (20 °C)	35 200	28 470 000
Biodiesel	880	37 100	32 650 000
Stärke, Zellulose (C ₆ H ₁₀ O ₅)	Von der Kompaktheit abhängig	17 800	Von der Kompaktheit abhängig
Holzbriketts	990 bis 1 200	17 000 bis 19 000	16 800 000 bis 22 800 000

* Freie Energie (Gibbs Energie); bei Biodiesel und Holzbriketts handelt es sich um den Brennwert.

** Gas im Druckbehälter mit 200-fachem Überdruck

Anmerkungen

- ¹ D. Antoni, V. V. Zverlov und W. H. Schwarz (2007): Biofuels from microbes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 77, 23–35; B. E. Rittmann (2007): Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 100, 203–212.
- ² Bei biologischen Produkten wird die Bezeichnung „Öl“ allgemein für nicht mit Wasser mischbare, oft etwas visköse (zäh fließende) Flüssigkeiten ohne genauere chemische Definition verwendet. Chemisch sind es meist Fettsäureester (organische Verbindungen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff), doch können biologische Öle auch Kohlenwasserstoffe (organische Verbindungen nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff) enthalten. Auf technischem Gebiet ist die Bezeichnung „Öl“ anders und genauer definiert; sie wird dort für mehr oder weniger visköse Kohlenwasserstoffe (das sind meist Erdölprodukte oder Erdöl selbst) verwendet.
- ³ Gemäß $2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2$.
- ⁴ Entscheidend ist die Formulierung der stöchiometrischen Umsatzgleichungen, wofür meist Wasser als „neutrale“ Substanz zum Massenausgleich einbezogen werden muss. Für einen vollständigen Umsatz von Glucose oder Stärke zu Wasserstoff lauten sie:

$$C_6H_{12}O_6 + 6 H_2O \rightarrow 6 CO_2 + 12 H_2$$

$$C_6H_{10}O_5 + 7 H_2O \rightarrow 6 CO_2 + 12 H_2$$
- ⁵ Idealer Grenzfall eines Umsatzes von Glucose oder Stärke unter Bildung von Wasserstoff und Essigsäure:

$$C_6H_{12}O_6 + 2 H_2O \rightarrow 2 CO_2 + 4 H_2 + 2 CH_3COOH$$

$$C_6H_{10}O_5 + 3 H_2O \rightarrow 2 CO_2 + 4 H_2 + 2 CH_3COOH$$
- ⁶ B. Hankamer et al. (2007): Photosynthetic biomass and H_2 production by green algae: from bioengineering to bioreactor scale-up. *Physiologia Plantarum*, 131, 10–21; A. Melis (2007): Photosynthetic H_2 metabolism in *Chlamydomonas reinhardtii* (unicellular green algae). *Planta*, 226, 1075–1086.
- ⁷ R. Surzycki et al. (2007): Potential for hydrogen production with inducible chloroplast gene expression in *Chlamydomonas*. *Proceeding of the National Academy of Sciences USA*, 104, 17548–17553.
- ⁸ H. Takabatake, K. Suzuki, I. B. Ko und T. Noike (2004): Characteristics of anaerobic ammonia removal by a mixed culture of hydrogen producing photosynthetic bacteria. *Bioresource Technology* 95, 151–158.
- ⁹ S. Hoekema et al. (2006): Controlling light-use by *Rhodobacter capsulatus* continuous cultures in a flat-panel photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 95, 613–626.
- ¹⁰ M. D. Archer und J. Barber (2004): Photosynthesis and photoconversion. In: M. D. Archer und J. Barber (Hrsg.): *Molecular to global photosynthesis*. London: Imperial College Press, 1–41.
- ¹¹ Ó. J. Sánchez und C. A. Cardona (2007): Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.013; H. S. Olsen und T. Schäfer (2006): Ethanol-Produktion aus pflanzlicher Biomasse. In: G. Antranikian (Hrsg.): *Angewandte Mikrobiologie*. Berlin: Springer, 323–339.
- ¹² Ó. J. Sánchez und C. A. Cardona (2007): wie Anm. 11.
- ¹³ Ethanolgewinnung aus Glucose bei vollständiger (100%iger) Umsetzung:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$$
 Ethanolgewinnung aus Stärke mit vorausgehender enzymatischer Spaltung bei vollständiger Umsetzung:

$$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$$
- ¹⁴ Ó. J. Sánchez und C. A. Cardona (2007): wie Anm. 11.
- ¹⁵ Ó. J. Sánchez und C. A. Cardona (2007): wie Anm. 9; B. Hahn-Hägerdal et al. (2006) Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnology*, 24, 549–556.

- ¹⁶ H. Bahl (2006): Produktion von Lösungsmitteln. In: G. Antranikian (Hrsg.): *Angewandte Mikrobiologie*. Berlin: Springer, 316–321; P. Dürre (2007): Biobutanol: an attractive biofuel. *Biotechnology Journal*, 2, 1525–1534.
- ¹⁷ Bei der biochemischen Umwandlung von Methan zu Methanol kann aus dem Sauerstoffmolekül (O₂) nur eines der Atome (O) in Methan eingebaut werden. Das andere O-Atom wird zu Wasser reduziert, wofür ein Teil Methanol geopfert werden muss; die biochemische Methanolgewinnung hätte die Bilanz
- $$3 \text{ CH}_4 + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ CH}_3\text{OH} + \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$$
- Während die 3 mol CH₄ bei einer Nutzung durch Reaktion mit Sauerstoff 2454 kJ liefern würden, sind es bei den 2 mol CH₃OH nur 1387 kJ.
- ¹⁸ Methan aus einem Kohlenhydrat, z.B. Stärke oder Zellulose:
 $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + 3 \text{ CO}_2$ (Mol- oder Volumenverhältnis 1:1)
 Methan aus einer Fettsäure, z.B. Stearinsäure:
 $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH} + 8 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 13 \text{ CH}_4 + 5 \text{ CO}_2$ (Mol- oder Volumenverhältnis 2,6:1)
- ¹⁹ H. Märkel und H. Friedmann (2006): Biogasproduktion. In: G. Antranikian (Hrsg.): *Angewandte Mikrobiologie*. Berlin: Springer, 459–487.
- ²⁰ K. Karim et al. (2007): Mesophilic digestion kinetics of manure slurry. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 142, 231–242; H. Lindorfer et al. (2008): Doubling the organic loading rate in the co-digestion of energy crops and manure – a full scale study. *Bioresource Technology*, 99, 1148–1156.
- ²¹ Ein genaues Maß für die Methanausbeute ist der Prozentsatz der Reduktionseinheiten, die von den tatsächlich in der Biomasse vorhandenen in Form von Methan gewonnen werden. Die Reduktionseinheiten in der Biomasse werden als sog. Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) angegeben, der allerdings meist indirekt, z.B. durch Reaktion mit Chromsäure ermittelt wird. Ein CSB von 2,63 kg O₂ liefert bei 100%iger mikrobieller Umsetzung 1 m³ CH₄.
- ²² K. U. Hinrichs et al. (2006): Biological formation of ethane and propane in the deep marine subsurface. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103, 14684–14689.
- ²³ C. Fischer-Romero, B. J. Tindall und F. Jüttner (1996): *Tolumonas auensis* gen. nov., sp. nov., a toluene-producing bacterium from anoxic sediments of a freshwater lake. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 46, 183–188.
- ²⁴ s. Anm. 2.
- ²⁵ A. Banerjee et al. (2002): *Botryococcus braunii*: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22, 245–279; P. Metzger und C. Largeau (2005): *Botryococcus braunii*: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66, 486–496.
- ²⁶ T. H. Pham et al. (2006): Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology. *Engineering in Life Sciences* 6, 285–292.
- ²⁷ Ebd.
- ²⁸ H.-S. Lee et al. (2008): Evaluation of energy conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. *Water Research*, 42, 1501–1510.
- ²⁹ Solar irradiation data, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), Joint Research Centre, European Commission. <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/apps/radmonth.php>.
- ³⁰ Umweltbundesamt, Umweltdaten Deutschland online. <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/>.
- ³¹ Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), potencial energético solar – sun data. http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=http%3A//www.cresesb.cepel.br/potencial_solar.htm.
- ³² M. D. Archer und J. Barber (2004): wie Anm. 10.
- ³³ A. Papazi et al. (2008): Bioenergetic changes in the microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO₂ concentrations induce an intense biomass production. *Physiologia Plantarum*, 132, 338–349.

-
- ³⁴ R. Morita, Y. Watanabe und H. Saiki (2002): Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactor incorporating *Chlorella sorokiniana* under field conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 77, 155–162; R. Hase et al. (2000): Photosynthetic production of microalgal biomass in a raceway system under greenhouse conditions in Sendai City. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 89, 157–163.
- ³⁵ O. Christen (2001): Ertrag, Ertragsstruktur und Ertragsstabilität von Weizen, Gerste und Raps in unterschiedlichen Fruchtfolgen. *Pflanzenbauwissenschaften*, 5, 33–39.
- ³⁶ K. Henning (2005): Cross-Compliance und Direktzahlungen: Verpflichtung zum Erhalt der organischen Substanz (Humus) im Boden. *Bauernblatt Schleswig-Holstein und Hamburg*, Heft 26 (2. Juli 2005).
- ³⁷ H. S. Olsen und T. Schäfer (2006): wie Anm. 11.
- ³⁸ Umweltbundesamt, Umweltdaten Deutschland online: wie Anm. 30.
- ³⁹ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe und Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2007): Biokraftstoffe, Basisdaten Deutschland. http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_174basisdaten_biokraftstoff_08.pdf.
- ⁴⁰ Versuchsbericht, Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (2003): Striegel Hackversuch zu Zuckerrüben (http://lsa-st23.sachsen-anhalt.de/llg/versuchsergebnisse_03/striegel_hackversuch_zu_zuckerrueben.pdf); H. Hoffmann, W. Mauch und W. Untze (2002): *Zucker und Zuckerwaren*. Hamburg: Behr's Verlag.
- ⁴¹ Ó. J. Sánchez und C. A. Cardona (2007): wie Anm. 11.
- ⁴² J. C. Clifton-Brown, P. F. Stampel und M. B. Jones (2004): *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emission. *Global Change Biology*, 10, 509–518.
- ⁴³ P. Börjesson and B. Mattiasson (2007): Biogas as a resource-efficient vehicle fuel. *Trends in Biotechnology*, 26, 7–13.
- ⁴⁴ P. J. Crutzen et al. (2007): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 7, 11191–11205.
- ⁴⁵ J. Hill et al. (2006): Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103, 11206–11210; D. Pimentel, T. Patzek and G. Cecil (2007): Ethanol production: energy, economic, and environmental losses. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, 189, 25–41; J. P. W. Scharlemann und W. F. Laurence (2008): How green are biofuels? *Science*, 319, 43–44.
- ⁴⁶ Auf dem Festland beträgt die weltweit von Pflanzen netto fixierte Menge an Kohlenstoff (C) ca. 56×10^{12} kg/Jahr, entsprechend einer Pflanzentrockenmasse (vereinfacht C₆H₁₀O₅) von ca. 130×10^{12} kg/Jahr und einem Energiegehalt von 2300×10^{18} J/Jahr. Der Primärenergiebedarf der Welt wird auf 460×10^{18} J/Jahr geschätzt; das sind ein Fünftel der in der jährlichen Landpflanzenproduktion gespeicherten Energie. Der Primärenergiebedarf pro Kopf in Deutschland beträgt 172×10^9 J/Jahr (5,5 kW!). Hätte jeder Mensch auf der Welt (bei 6,7 Mrd Bewohnern) diesen Verbrauch, so wären das 1150×10^{18} J/Jahr, d.h. im Falle einer Deckung allein über Bioenergie würden 50% der auf dem Festland netto gebildeten Pflanzenmasse benötigt. Berechnet aus: C. B. Field et al. (1998): Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237–240; sowie aus: *BP statistical review of world energy*, Juni 2007 (<http://www.bp.com/statisticalreview>).

Wichtige Maßeinheiten und ihre Umrechnung

Energie

$$1 \text{ J} = 0,2778 \times 10^{-6} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kJ} = 0,2778 \times 10^{-3} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$$

Leistung

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0,024 \text{ kWh/Tag} = 8,766 \text{ kWh/Jahr}$$

$$1 \text{ kW} = 24 \text{ kWh/Tag} = 8\,766 \text{ kWh/Jahr}$$

$$1 \text{ kWh/Tag} = 41,67 \text{ W}$$

$$1 \text{ kWh/Jahr} = 0,1141 \text{ W}$$

$$1 \text{ PS} = 0,7355 \text{ kW}$$

Zeit

$$1 \text{ Jahr} = 365,25 \text{ Tage} = 31\,557\,600 \text{ s}$$

Masse

$$1 \text{ t} = 10 \text{ dt (landwirtschaftliche Ertragseinheit)} = 1000 \text{ kg}$$

Fläche

$$1 \text{ ha} = 10\,000 \text{ m}^2 (100 \text{ m} \times 100 \text{ m})$$

$$1 \text{ km}^2 = 100 \text{ ha} = 10^6 \text{ m}^2$$

Vorsilben zur Kennzeichnung großer Zehnerpotenzen

$$\text{Kilo (k)} \quad 10^3$$

$$\text{Mega (M)} \quad 10^6$$

$$\text{Giga (G)} \quad 10^9$$

$$\text{Tera (T)} \quad 10^{12}$$

$$\text{Peta (P)} \quad 10^{15}$$

$$\text{Exa (E)} \quad 10^{18}$$