

Licht für Nachhaltigkeit

Michael W. Tausch

Alle reden heute von Nachhaltigkeit. Doch der Begriff wird leider inflationär und nicht selten ungerechtfertigt gebraucht. Allzu oft werden Produkte als nachhaltig angepriesen, die dieses Etikett nicht verdienen. Und vielfach werden als nachhaltig auch Verhaltensweisen und Ansichten bezeichnet, die eigentlich kritisch hinterfragt werden müssen. Beim Umgang mit dem Begriff Nachhaltigkeit ist eine Mischung aus Fakten und Fakes an der Tagesordnung, sowohl in gedruckten als auch in elektronischen Medien. Hilfe beim Differenzieren und Aufräumen sei mit dem obigen Titel angesagt.

Licht ist der eindeutige und wesentliche Garant für Nachhaltigkeit auf unserem Planeten. In der folgenden Sammlung aus Kurzinformaten, Essays, Glossen und Parabeln greife ich Fragen auf, die mir im Laufe von über 50 Jahren Berufstätigkeit als Forscher und Lehrer in Instituten, Schulen und Universitäten begegnet sind. Vorrangig gehe ich allerdings Fragen ein, die von Freunden und Bekannten, in der Mehrheit naturwissenschaftlichen Laien, an mich herangetragen wurden. Ihre Fragen standen stets unter dem Motto: *Was sagst Du als Experte dazu?*



Ich werde in drei Kapiteln verschiedene Facetten der Titelbegriffe Licht und Nachhaltigkeit aufdecken um zu illustrieren, wie vielfältig damit umgegangen wird. Dabei will ich versuchen, weder sarkastisch noch polemisch zu werden. Das wird nicht immer gelingen und stellenweise verzichte ich darauf bewusst. Denn andere übertreiben auch, nicht nur in Comedy-, Satire- und Talkshows, sondern auch in Reportagen, Dokumentationen und Sachbüchern. Und manchmal trifft eine zugespitzte, auf etwas oder jemanden zielende Formulierung den Kern der Sache einfach besser und genauer als eine trockene Aussage.

Ebenfalls um einiges kurz und ohne viele Worte auf den Punkt zu bringen, habe ich den Text an einigen Stellen mit einer chemischen Formel, einer Reaktionsgleichung oder sonstigen fachlichen Symbolen gespickt. Es ist aber nicht zu viel dergleichen. Versprochen!

Kapitel 1

All We Need Is Light

Plagiat oder Original?

Eigentlich müsste der vollständige Titel dieses ersten Kapitels lauten: „*Synthetische Energieträger und Wertstoffe aus Wasser und Kohlenstoffdioxid mit Solarlicht als einziger Energiequelle*“. Das ist zu lang und zu holprig. Aber mache ich mich mit der englischen Abkürzung nicht eines Plagiats schuldig oder zumindest verdächtig? Ganz offensichtlich hört sich das an, wie der Titel eines Beatles Songs aus dem Jahr 1967. Dort heißt es allerdings *All You Need Is Love* - meine Abkürzung ist also keine Kopie. Sie will allerdings nicht nur im Klang eine Analogie erzeugen, sondern auch in der Bedeutung und in dem beabsichtigten Denkanstoß.

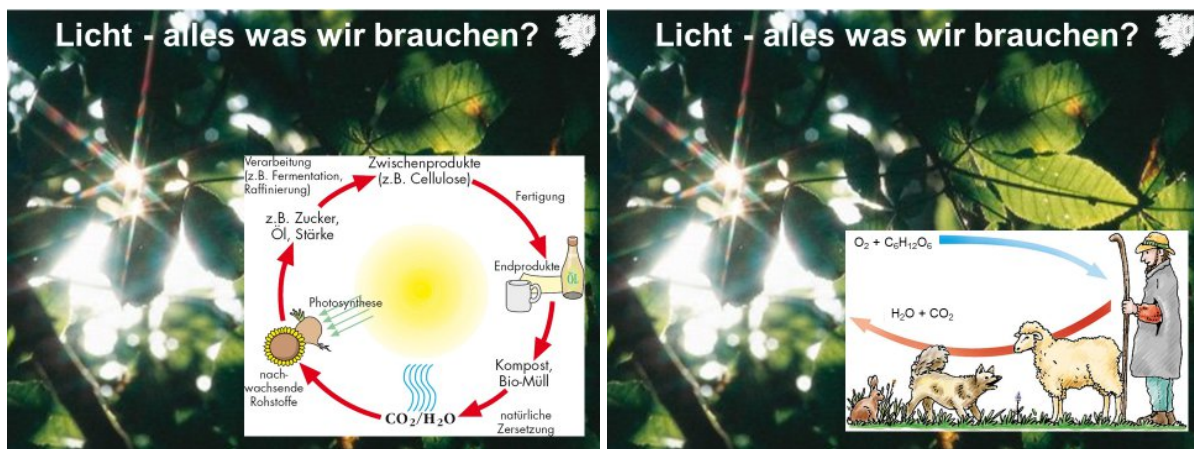


All We Need Is Light und Titel des Beatles Songs *All You Need Is Love* sind eigentlich Variationen zu einem sehr allgemeinen Thema. Die Überschrift des Kapitels deklariert Licht zur wichtigsten Energieform für das menschliche Leben auf diesem Planeten, der Titel der Beatles hebt Liebe als die schönste und wichtigste zwischenmenschliche Beziehung hervor. Beides ist besonders in einer Zeit wie der heutigen zwingender denn je. Denn seit der im Jahr 2022 ausgerufenen Zeitenwende erleben wir auch, wie Menschen, die sich unsinnigerweise für die „letzte Generation“ auf diesem Planeten halten, jeder sachlichen und naturwissenschaftlich fundierten Aufklärung aus dem Weg gehen, schreckliche Visionen von einem baldigen Weltuntergang propagieren und erpresserische, demokratiefeindliche und teilweise menschenverachtende Aktionen durchführen. Unvergleichlich schlimmer und grausamer ist es aber, dass wir täglich mit ansehen müssen, wie in einem brutalen Angriffskrieg auf ein Land in unserer geographischen Nähe Menschen gequält, gefoltert und getötet werden. Der Gipfel des Bösen ist, wenn Menschen zu mordenden Bestien werden wie bei dem terroristischen Überfall der Hamas auf Israel und sich daraus wiederum in geographischer Nähe ein zerstörerischer Krieg entwickelt, in dem viele unschuldige Menschen leiden und sterben. In diesen Zeiten der multiplen Krisen sollte jeder der beiden Slogans zum Leitmotiv werden. Wenn die Menschen nach der Maxime *All You Need Is Love* miteinander umgehen würden, ließen sich Ausbeutung, Kriege und Terror eindämmen und vermeiden. Und wenn nach der Devise *All We Need Is Light* mit Solarlicht angetriebene Techniken erforscht und umgesetzt

würden ließen sich der Klimawandel begrenzen, die stofflichen Ressourcen des Planeten erhalten und die Energienutzung nach dem Vorbild der Natur umgestalten. So viel zur Rechtfertigung und Interpretation der Überschrift dieses Abschnitts.

Licht - alles was wir brauchen?

Kann man wirklich behaupten, *Licht* sei *alles*, was wir brauchen? Tatsächlich ist das Sonnenlicht die einzige *Energieform*, die seit Jahrmillionen alles Leben auf unserem Planeten antreibt. Genau genommen, werden aber außer der Energie des Lichts auch *Stoffe* benötigt damit Leben, wie wir es kennen, möglich ist. Licht treibt die Photosynthese in grünen Pflanzen an, eine chemische Reaktion, bei der aus den Stoffen Wasser H_2O und Kohlenstoffdioxid CO_2 energiereiche Stoffe, z.B. Zucker, Stärke und Cellulose gebildet werden.



Diese Stoffe sind Verbindungen des Kohlenstoffs. Sie dienen als Rohstoffe für die Fertigung vieler, bioabbaubarer Endprodukte, sie sind aber vor allem und seit jeher die Energielieferanten in allen Lebewesen. Dabei wird beispielsweise Glucose $C_6H_{12}O_6$ bei der Zellatmung, einer in vielen Schritten verlaufenden Reaktionsfolge, zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut. Über die für alle Organismen gemeinsame Verbindung ATP (Adenosintriphosphat) wird Energie in verschiedenen Formen verfügbar.

In der Summe ist die Chemie der Zellatmung also eine langsame *Verbrennung* von Zuckern und anderen Kohlenstoffverbindungen zu den Endprodukten Wasser und Kohlenstoffdioxid. Moment mal, da drängt sich doch folgende grundsätzliche Frage auf:

Bin denn auch ich selbst ein Verbrenner?

Kann unser Körper etwa ähnlich wie ein benzinbetriebenes Auto als ein *Verbrenner* von Kohlenstoffverbindungen bezeichnet werden?

Die Antwort darauf ist ein klares JA. Denn alle Formen von Energie, die unser Körper benötigt und nutzt, stammen aus der langsamen Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen auf zellulärer Ebene. Damit diese Verbrennung ablaufen kann, nutzen wir Sauerstoff O_2 , den wir mit der Luft einatmen. Und die Endprodukte der Verbrennung sind Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O . Die Luft, die wir ausatmen, enthält im Vergleich zu der eingeatmeten Luft weniger Sauerstoff und mehr Kohlenstoffdioxid. Wir selbst sind also auch CO_2 -Emittenten.



Ist also jede und jeder von uns alleine dadurch, dass wir leben, auch für den Klimawandel verantwortlich? Einige Propheten des Weltniedergangs und *philosophische Kulturpessimisten* neigen offen oder verkappt dazu, diese Frage ebenfalls mit JA zu beantworten. Doch da irren sie. Denn der CO₂ Gehalt in der Luft blieb über Jahrmillionen bis zum Beginn des industriellen Zeitalters um 1850 annähernd konstant, obwohl viele Pflanzen, Tiere und Menschen auf diesem Planeten gelebt, also Kohlenstoffverbindungen verbrannt haben. Was heißt „blieb annähernd konstant“ und was geschieht seit Beginn des Industriezeitalters?

Wie viel CO₂ ist in der Luft?

Fragt man erwachsene, mündige Bürger - egal ob mit oder ohne akademischer Bildung - wie hoch sie den CO₂ Gehalt der Luft schätzen, so erhält man mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit falsche Antworten. Zwar mussten alle im siebten oder achten Jahr ihres Schulunterrichts die wichtigsten Bestandteile der Luft im Zusammenhang mit der Verbrennung lernen, aber das ist ja lange her.

Angesichts häufig halbwarer oder falscher Darstellungen in den Medien ist es nicht verwunderlich, dass viele Zeitgenossen schaurige Vorstellungen über den Klimakiller CO₂ entwickeln. Die Wochenzeitung DIE ZEIT druckte in ihrer Ausgabe Nr. 4 vom 17. Januar 2019 eine groß aufgemachte Grafik zur „Physik des Treibhauses“ ab, in der CO₂ mit dem Beitrag 66% angegeben ist (vgl. übernächsten Abschnitt „Treibhauseffekt - kurz und bündig). Solche völlig abstrusen Daten prägen sich auf den ersten Blick stärker ein, als die in der derselben Ausgabe der Zeitung und in derselben Rubrik (Politik) von Stefan Schmidt ausführlichen, korrekten und fundierten Erläuterungen über das, was wir zum Klimawandel wissen und was wir nicht wissen.



Das Wissen von Chemiestudierenden habe ich jeweils im ersten Semester Jahr für Jahr mit einer Quizfrage getestet. Man sollte sich einfach per Handzeichen melden, wenn man den CO₂ Gehalt in der Luft eher auf 10% oder auf 1% oder auf 0,1% schätzt. Die Mehrheit der Studierenden - alle mit naturwissenschaftlichem Unterricht in der Oberstufe und Abitur - meldete sich jedes Mal bei 1%. Damit lagen auch sie voll daneben. Der Erfolg war aber, dass sie jetzt doch scharf auf die richtige Antwort warteten. Hier ist sie:

Trockene Luft besteht aus 78 % Stickstoff N₂ und 21 % Sauerstoff O₂. Die restlichen 1% bestehen größtenteils (mehr als 0,9%) aus dem Edelgas Argon Ar. Kohlenstoffdioxid macht aktuell „nur“ 0,042 % aus, aber das ist schon mehr als genug. Als ich in den 1960-er Jahren Chemie studierte, lag der atmosphärische CO₂ Gehalt noch bei 0,033 %. Eine Erderwärmung war damals noch nicht messbar, Klimawandel kein Thema in Politik und Öffentlichkeit. Chemiker wiesen aber schon damals darauf hin, dass es viel zu schade ist, fossile Kohlenstoffverbindungen aus Erdöl und Erdgas einfach zu verbrennen.

Zeitalter der Petrochemie

Zu Recht wird die Epoche in der wir leben als das *Zeitalter der Petrochemie* bezeichnet. Erdöl und Erdgas fossilen Ursprungs waren in den vergangenen 100 Jahren und sind auch heute noch die wichtigsten Energieträger *und* Rohstoffe. In der chemischen Industrie werden sie - neben Wasser und Luft - zu einer enormen Vielfalt von Produkten verarbeitet. Die wirtschaftliche Wertschöpfung aus Erdöl und Erdgas kann bis zu 1000-mal und mehr vervielfacht werden, wenn man sie industriell zu Kunststoffen, Farbstoffen, Medikamenten, „intelligente“ Materialien für Photovoltaik, Computer, Batterien etc. sowie Gegenstände unseres Alltags, z.B. Hygiene-, Sport- und Freizeitartikel verarbeitet.

Erdöl und Erdgas sind Rohstoffe für über 90% der Erzeugnisse der chemischen Industrie. Doch zwischen den 1980-er Jahren und Mitte der 2020-er Jahre wurden weniger als 10% des geförderten Erdöls und Erdgases der Veredlung durch chemische Umwandlung zugeführt. Der weitaus größte Teil wurde tatsächlich verbrannt, nicht nur, aber ganz viel in Verbrennungsmotoren von Fahrzeugen aller Art. Dabei wurde der darin gebundene Kohlenstoff als CO₂ in die Luft gejagt.

Sowohl darüber, als auch über den Treibhauseffekt, seine Verstärkung durch Zunahme des CO₂ Anteils in der Atmosphäre und die Folgen für das Klima haben Wissenschaftler bereits seit einem halben Jahrhundert gewarnt. Doch in der Öffentlichkeit und in allen Schichten der Gesellschaft blieb dieses Thema weitgehend unbeachtet. Auch die Medien haben es zu stark vernachlässigt, obwohl in allen Bildungseinrichtungen, Universitäten, Hochschulen und Schulen, über die ökonomischen und ökologischen Vor- und Nachteile bei der Nutzung fossilen Energieträger gelehrt bzw. unterrichtet wurde. Statt Erdöl und Erdgas in Form von Kraftstoffen zu verbrennen sollten die fossilen Reserven geschont und gestreckt werden indem man sie zu Hightech-Materialien verarbeitet, die man durch Recycling wiederverwenden kann.

In dem Schulbuch CHEMIE 2000+ leitete ich das Kapitel der Organischen Chemie „Vom Erdöl zum Plexiglas“ mit folgender Anrede an die Schuljugend ein:

„Die begrenzten Erdölvorräte, ein wertvolles Geschenk aus prähistorischen Zeiten, sollten wir nicht in unüberlegter Weise durch den Auspuff jagen, sondern mit dem Wissen und Können der Chemie zu Produkten veredeln, die wir aus anderen Rohstoffen nicht oder nur mit viel mehr Aufwand gewinnen können“ [1].



Ganz in diesem Sinne ist der Lehrstoff in der oben genannten Schulbuchreihe für die Sekundarstufen II und I konzipiert und strukturiert. Ähnlich wurde und wird auch in anderen Schulbüchern verfahren. Im Chemieunterricht werden seit mindestens 50 Jahren die Chancen und Risiken von industriell hergestellten Stoffen und Produktionsketten an relevanten Beispielen (Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW, Chlorchemie u.a.) erörtert - alternative Stoffe und Verfahren zur Minimierung der Risiken gehören dabei stets dazu. Schon seit drei Jahrzehnten nehmen der Treibhauseffekt und die Klimaproblematik im Zusammenhang mit der Nutzung von fossilen Brenn- und Rohstoffen einen herausragenden Platz ein - das Thema gehört bereits im Anfangsunterricht aller allgemeinbildenden Schulen zu den obligatorischen Lehrinhalten. In der Oberstufe wird die Klimaerwärmung in naturwissenschaftlichen Fächern, vornehmlich in Chemie, aber auch sozialwissenschaftlichen Fächern unterrichtet. Alle heute lebenden Jugendlichen und Erwachsenen im Alter zwischen 30 und 40 Jahren, ganz gleich, ob mit oder ohne Abitur, sollten demnach einige naturwissenschaftliche Fakten und Zusammenhänge zu dieser Thematik „drauf“ haben. Leider ist das nicht der Fall. Auf die Ursachen und Möglichkeiten für deren Abschaffung gehe ich an anderer Stelle ein. Hier aber zunächst einiges, das alle wissen sollten:

Der Treibhauseffekt - kurz und bündig

Über die Zusammensetzung der Luft sowie über das mangelhafte Wissen bei der wohl überwiegenden Mehrheit unserer Zeitgenossen habe ich weiter oben unter „Wie viel CO₂ ist in der Luft?“ berichtet. Dabei ist zu betonen, dass es nicht nur über den CO₂ Gehalt der Luft, sondern auch über den Treibhauseffekt, seine Bedeutung, für das Leben und seinen Einfluss auf den Klimawandel bis heute noch teilweise irre Vorstellungen gibt. Das dürfte eigentlich nicht sein, denn bereits seit den 1990-er Jahren wird der Treibhauseffekt der Atmosphäre im Schulunterricht ausführlich aufgeklärt [2].

Zunächst müssen wir feststellen, dass es ohne den Treibhauseffekt in Bodennähe viel kälter wäre (-18 °C) als es tatsächlich ist (+15 °C) und menschliches Leben wahrscheinlich nicht hätte entstehen können. Von den 33 °C, die der Treibhauseffekt ausmacht, werden 20,6 °C durch den Wasserdampf aus der Atmosphäre verursacht und 7,2 °C durch das Kohlenstoffdioxid. Weitere Treibhausgase sind das Ozon O₃ (beteiligt mit 2,4 °C), das als „Lachgas“ bekannte Distickstoffmonooxid N₂O (1,4 °C) und das Methan CH₄ (0,8 °C).

Der Treibhauseffekt kommt zustande, weil ein großer Teil des Sonnenlichts, das auf die Erde trifft, absorbiert, in Wärme umgewandelt und als solche zurückgestrahlt wird (Abb. 1a). Die Treibhausgase aus der Atmosphäre absorbieren die von der Erde zurückgestrahlte Wärme fast vollständig und halten sie wie in einem Treibhaus fest.

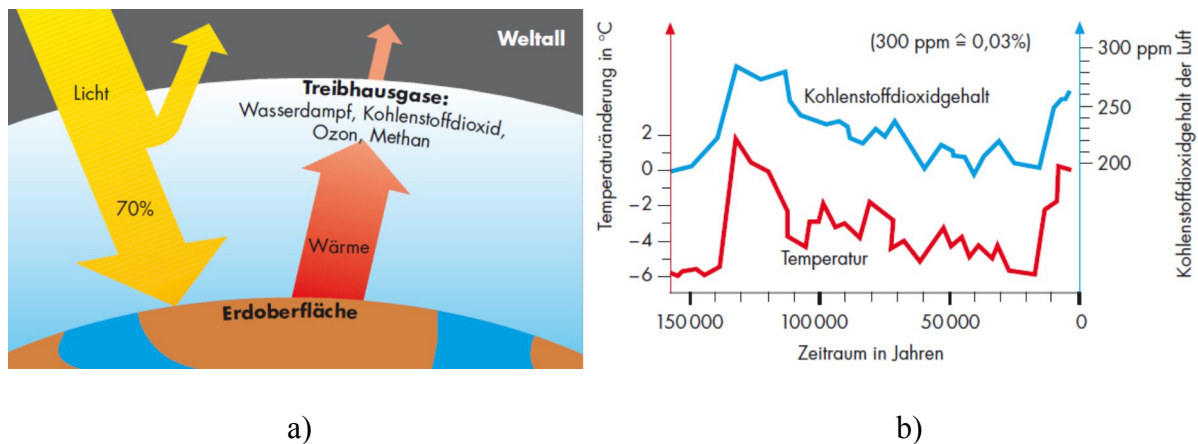


Abb. 1: Modell zum Treibhauseffekt (a) und Zusammenhang zwischen der mittleren Temperatur in Bodennähe und CO₂ Gehalt in der Luft (b) [1, 2].

Ganz zu Recht wird von dem „Klimakiller“ CO₂ gesprochen, obwohl Kohlenstoffdioxid mit 7,2 °C in viel geringerem Maße am Treibhauseffekt beteiligt ist als Wasserdampf. Tatsächlich konnte durch die Analyse der Zusammensetzung von Lufteinschlüssen in Bohrkernen aus dem arktischen und antarktischen Eis bewiesen werden, dass sich die Temperatur über lange Zeiträume, die bis zu 150.000 Jahre zurückliegen, in der gleichen Weise geändert hat wie der Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre (Abb. 1b).

Seit den 1960-er Jahren steigt der Gehalt an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre rapide an, von 0,033%, dem vorindustriellen Mittelwert der Jahre 1850 bis 1900, auf 0,037% im Jahr 2000. Gleichzeitig hatte auch die mittlere Jahrestemperatur um ca. 1 °C zugenommen. Im Jahr 2023 war der CO₂-Gehalt der Atmosphäre auf 0,042% gestiegen und der Temperaturanstieg lag nur knapp unterhalb 1,5 °C. In den letzten fünf Jahren werden die Folgen des Klimawandels immer gravierender.

Status quo und Prognosen

Im Jahr 2022 kündigte der Bundeskanzler Scholz eine „Zeitenwende“ an. Es war die Reaktion der Politik auf den Beginn des brutalen Angriffskriegs Russlands gegen die Ukraine. Als Folge dieses Krieges wurden die folgenden Jahre von einer Lawine mehrerer, eng miteinander verflochtener Krisen, Verwerfungen und „Wenden“ in Bereichen der Wirtschaft, Gesellschaft und Politik überrollt, die sich hemmend und sogar kontraproduktiv auf die dringend notwendige Energiewende auswirkten. Nicht nur, aber auch deswegen eignet sich das Jahr 2022 als zeitlicher Referenzrahmen in Sachen Klimawandel und Entwicklungsprognosen.



Anno 2022 betrug die Erderwärmung $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zum vorindustriellen Mittelwert, ein Jahr später waren es schon fast $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vgl. oben). Die Thematik rund um den Treibhauseffekt und den Klimawandel hat sich mehr und mehr in den Medien, der breiten Öffentlichkeit und in der Politik durchgesetzt. Sie wird in Zeitungen, Zeitschriften, TV-Talkshows, Terra X Dokumentationen, Reportagen und einer ganzen Reihe von Sachbüchern thematisiert. Wer im Netz unter „Sachbücher zum Klimawandel“ sucht, erhält in Sekundenschnelle über 30 Angebote. Die Autorenschaft ist breit gestreut. Sie erstreckt sich von der anerkannten Belletristik-Autorin bis zum Diplom-Physiker und Kabarettisten, von der Wissenschaftsjournalistin bis zum Diplom-Meteorologen. Im gesamten medialen *mainstream* überwiegt die Notwendigkeit der Eindämmung der Erderwärmung.

In den Jahren seit 2022 setzten Initiativen wie *Fridays for Future* ihre Aktivitäten fort. Sie akzentuieren die Gefahren des Klimawandels durch regelmäßige Demonstrationen und argumentieren vehement für die Abkehr von den fossilen Energieträgern bei gleichzeitiger Nutzung regenerativer Energiequellen. Andere Aktivistengruppen wie die „Letzte Generation“ gingen noch viel weiter. Sie sprengten sogar den Rahmen rechtlicher und demokratischer Grundlagen um ihre Ziele durchzusetzen indem sie wertvolle Kunstwerke, das Kanzleramt und das Brandenburger Tor beschmierten oder empfindliche Verkehrswege wie Autobahnen, Start- und Landebahnen von Flughäfen blockierten. In den folgenden Jahren flachte der Klima-Aktivismus allmählich ab, nicht aber das Klimaproblem.

Auf zahlreichen Klimakonferenzen wurden seit 1988 die negativen Folgen der global steigenden Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas für das Klima und die Artenvielfalt des Planeten diskutiert. Dabei wurden Absichtserklärungen zur Reduktion des CO_2 Ausstoßes getroffen. Neu ist ein Fonds zur Hilfe der durch den Klimawandel meistbetroffenen Länder, der auf die Initiative Deutschlands im Jahr 2022 beschlossen und in Dubai 2023 mit ersten Finanzmitteln ausgestattet wurde. In Deutschland konnten die CO_2 Emissionen seit 1990 Jahr für Jahr selbst bei wirtschaftlichem Wachstum etwas gesenkt werden. Im Corona-Jahr 2020 betrug die Emissionen nur 41 Prozent gegenüber 1990 (allerdings bei eingeschränktem wirtschaftlichen Wachstum). Abgesehen davon, dass diese Senkung auf das globale Klima vernachlässigbar ist, stiegen die weltweiten CO_2 Emissionen seit 1990 stark an.

Nach der Sachlage im Referenzjahr 2022 wird der Anstieg der weltweiten CO_2 Emissionen auch für die folgenden 2-3 Jahrzehnte prognostiziert. Für diese Prognosen sind die aktuellen geopolitischen Zusammenhänge wirtschaftlicher, finanz- und machtpolitischer Art ausschlaggebend. Es wird zwar viel über den menschenverursachten Klimawandel und seine Folgen diskutiert. Vieles von dem, was werbewirksam mit dem Label „nachhaltig“ geschmückt wird, verdient dieses Qualitätsmerkmal nicht. Das gilt für einige Industrie- und Agrarerzeugnisse ebenso wie für einige finanzielle Investitionen, Förderungen und Abschreibungsmöglichkeiten. Es ist auch fragwürdig, ob jedes Jahr Klimakonferenzen der Größenordnung wie die aus den Jahren 2022 (Sharm El-Sheikh) und 2023 (Dubai) im Sinne der Nachhaltigkeit gerechtfertigt sind. Über 40.000 Menschen, darunter viele

Staatsoberhäupter, waren nach Ägypten bzw. in die Vereinigten Arabischen Emirate angereist, es wurde über mehrere Wochen lang geredet, gefilmt, interviewt und gesendet. Die krampfhaft errungenen Ergebnisse sind ausgesprochen mager. Bezeichnend dafür ist beispielsweise, dass China, der weltweit größte CO₂ Emittent, 300 neue Kohlekraftwerke plant und im Herbst 2022 mit Katar einen Vertrag für den Import von Flüssiggas LNG (*liquid natural gas*) über die nächsten 27 Jahre abschließt.

Deutschland und andere europäische Länder die wegen des russischen Angriffskrieges in der Ukraine vom Gas aus Russland abgeschlossen sind, haben im Jahr 2022 ebenfalls über kurzfristige LNG-Lieferungen aus dem gasreichsten Golfstaat verhandelt, allerdings mit schlechteren Erfolgchancen, weil sie im Energiesektor aus fossilem Naturgas möglichst rasch aussteigen möchten. Vielmehr streben sie eine Beschleunigung der Energiewende von den fossilen zu den erneuerbaren Energien an. Wenn es den reichen Industrieländern gelingt, sich als Vorreiter bei der Entwicklung und Nutzung nachhaltiger und ressourcenschonender Technologien zu behaupten, werden sich solchen Technologien auch weltweit durchsetzen.

Angesichts der aktuellen globalen Situation kann das 1,5-Grad-Ziel, d.h. die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C bis zum Jahr 2100 wahrscheinlich *nicht* eingehalten werden. Nach der Prognose des *Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC wird im günstigsten Fall, d.h. wenn es gelingt, bis 2050 der Anstieg des CO₂ Gehalts in der Atmosphäre zu stoppen, die mittlere globale Temperatur bis Ende des Jahrhunderts um ca. 1,8 °C ansteigen. Bei gleichbleibenden CO₂ Emissionen wie heute wird die Erderwärmung um 2,1 °C bis 3,5 °C zunehmen. Die Bundesregierung hat in ihrem Klimaschutzplan bereits 2019 beschlossen, den Treibhausgas-Ausstoß bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80 % bis 95 % zu senken. Wie soll das gehen?

Solarlicht - Aufstieg zur Nr.1

Der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU der Bundesregierung prognostiziert bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine starke Zunahme des Anteils an Solarenergie beim globalen Energiemix (Abb. 2).

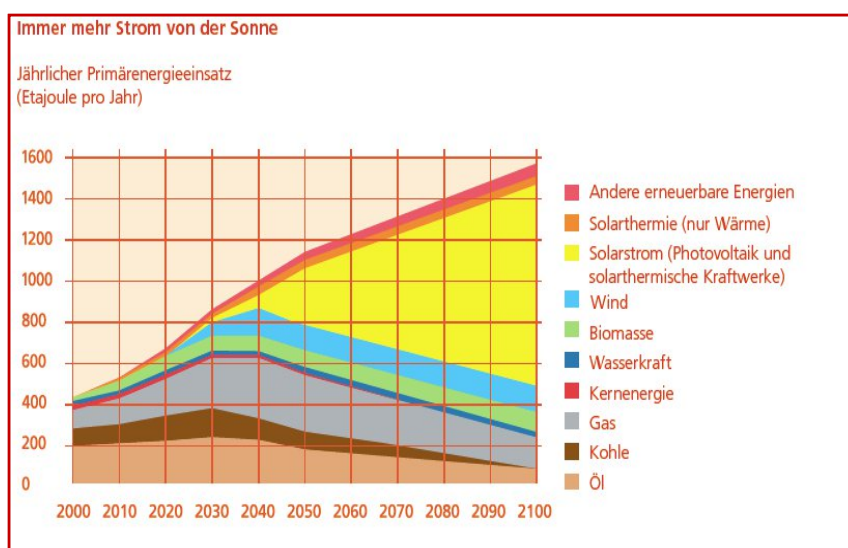


Abb. 2: Prognose zum globalen Energiemix bis zum Jahr 2100 [3]

Demnach wird die Nutzung fossiler Brennstoffe noch bis 2040 ansteigen, danach abnehmen. Die Solartechniken werden im Jahr 2100 mit ca. zwei Drittel am globalen Energiemix beteiligt sein. Auch wenn so langfristige Prognosen mit hohen Unsicherheitsfaktoren behaftet sind, wird die in Deutschland politisch eingeleitete Energiewende von der Gesellschaft und Wirtschaft befürwortet. Ihre Umsetzung ist im Gang - allerdings mit den oben angesprochenen Problemen. Das rechtfertigt so viel Optimismus bei der zukünftigen Nutzung der Solarenergie? Es ist in erster Linie die schier unfassbare Menge an Energie, die von der Sonne kommt. Die folgenden zwei Vergleiche belegen das sehr eindrucksvoll. Die Sonne liefert uns kostenlos und noch über mindestens einige Jahrtausende jeden Tag den gesamten weltweiten Energiebedarf für acht Jahre. [4]. Und in jedem Jahr beträgt die Sonneneinstrahlung etwa das 100-fache der gesamten als abbaufähig erachteten Weltreserven an Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran [5].

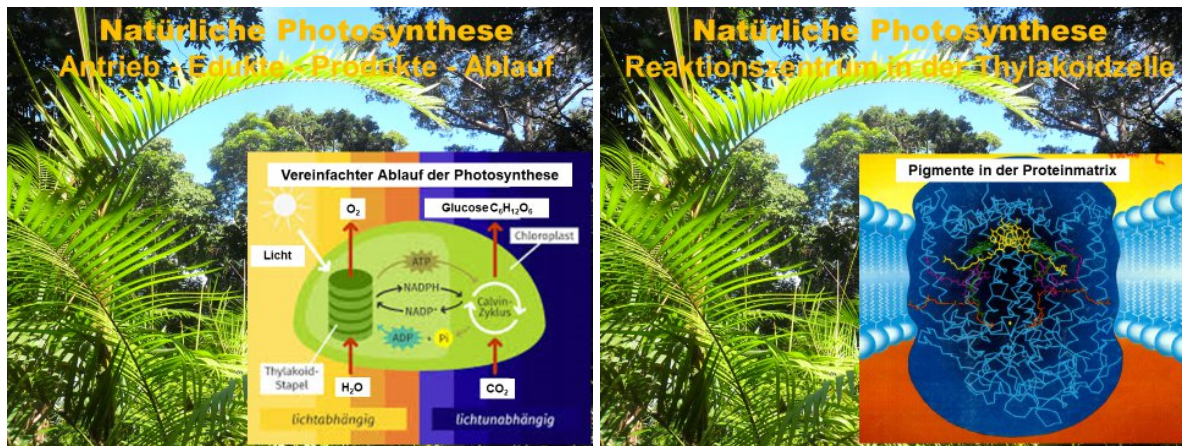
Dass Solarlicht die einzige Energieform ist, die das Leben auf diesem Planeten antreibt, haben wir bereits weiter oben erörtert. Der Mensch hat in den letzten Jahrhunderten des *Anthropozäns* die natürlichen Bedingungen für sein langfristiges Überleben auf dem Planeten massiv beeinträchtigt. Er hat zum einen riesige, Photosynthese treibende Waldflächen vernichtet und zum anderen Kohlenstoff aus den fossilen chemischen Energiespeichern als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre gebracht. Dadurch hat er die stoffliche Bilanz beim Kreislauf des Kohlenstoffs und seiner Verbindungen in doppelter Weise zuungunsten der Nutzung von Solarlicht beim Antrieb der Biosphäre beeinflusst.

Derzeit wird in der Wissenschaft auch über eine neue Ära diskutiert, in die sich die Menschheit auf ihrem Mutterplaneten Erde begeben muss, dem sogenannten *sustainocene* (von *sustainability* = Nachhaltigkeit) [6] dem Zeitalter der **Nachhaltigkeit**. Darin muss die Nachhaltigkeit in allen Bereichen menschlicher Tätigkeiten Vorrang erhalten. Das Zusammenspiel zwischen der durch die Gesellschaft, Wirtschaft und Politik geprägten *Technosphäre* und der übrigen *Biosphäre* muss in einer Weise den limitierenden Bedingungen für das Leben auf dem Planeten angepasst werden, die das Überleben über lange Zeiträume gewährleistet. Das bedeutet, dass auch die Technosphäre ebenso wie die aus der natürlichen Evolution hervorgegangene Biosphäre vorwiegend *die* Energieform nutzen müsste, die dem Planeten in kosmischen Größenordnungen, über astronomische Zeiträume zur Verfügung steht und aus der Sicht der höheren Lebewesen als sauber, ungefährlich und lebensfreundlich ist. Diese strengen Bedingungen erfüllt das Licht der Sonne am allerbesten.

Kohlenstoffverbindungen - Sprit fürs Leben aus CO₂ und Wasser

Man stelle sich zwei schwere Gewichte vor, die in einem tiefen Loch liegen. Um sie von dort heraus zu holen, braucht man viel Energie, z.B. einen starken Kran. Ähnlich liegen die Stoffe Kohlenstoffdioxid und Wasser in einem tiefen energetischen Loch, aus dem sie nur mit hohem Energieaufwand herausgeholt und zur Reaktion gebracht werden können.

Das Sonnenlicht leistet diesen Energieaufwand locker und zwar in der **natürlichen Photosynthese**. Dabei werden Kohlenstoffdioxid und Wasser unter Antrieb von Sonnenlicht zu Zuckern, z.B. Glucose, und Sauerstoff umgesetzt: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. Bei der Photosynthese in grünen Pflanzen und Algen werden allerdings nur ca. 0,02 bis 0,05% der für lichtgetriebene Reaktionen nutzbaren Energie des Solarlichts fixiert. Und dennoch bedeutet das pro Jahr den Aufbau von ca. $7 \cdot 10^{11}$ Tonnen an neuer Biomasse unter Freisetzung von ca. $0,9 \cdot 10^{12}$ Tonnen Sauerstoff und Bindung von ca. $1,2 \cdot 10^{12}$ Tonnen Kohlenstoffdioxid. Die globalen Emissionen an CO₂ betragen „nur“ ca. $3,6 \cdot 10^{10}$ Tonnen pro Jahr, also 3 Hundertstel der durch Photosynthese entnommenen und gebundenen Menge an CO₂.



Einerseits belegen diese Zahlen die enorme Leistung der natürlichen Photosynthese bei der nachhaltigen, klimaneutralen Erzeugung von energiereichen Kohlenstoffverbindungen, die der „Sprit“ für alle Lebewesen sind. Andererseits dürfen sie aber nicht zu der irrigen Schlussfolgerung verleiten, es könne gar nicht zu einem CO₂ Anstieg in der Erdatmosphäre kommen, da ja wesentlich mehr CO₂ bei der Photosynthese gebunden als weltweit emittiert wird. Die oben angegebenen Emissionen betreffen alleine die Technosphäre, d.h. Industrie, Verkehr, Haushalte etc., nicht aber das von den Lebewesen bei der Atmung freigesetzte CO₂. Stofflich gesehen läuft bei der Atmung die weiter oben formulierte Reaktion in der umgekehrten Richtung ab, was einer „Verbrennung“ von Zuckern gleichkommt.

Photosynthese und Atmung, d.h. der **Kohlenstoffkreislauf** in der Biosphäre, ist *das* Musterbeispiel für die Nachhaltigkeit auf unserem Planeten. Dabei fungiert Solarlicht als Antrieb fürs Leben. Beim heutigen Entwicklungsstand der menschlichen Zivilisation ist es dringend geboten, diese Energieressource für diverse technische Nutzungsmöglichkeiten zu erschließen. Eine davon ist die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen durch künstliche Photosynthese (vgl. weiter unten Abschnitt „Künstliche Photosynthese - Kopie der Natur?“) Das ist heute noch Zukunftsmusik, aber bis Ende des 21. Jahrhunderts durchaus möglich. Wie sinnvoll ist es unter diesen Umständen, die „Decarbonisierung“ der Technosphäre zu fordern und die Verbrenner-Motoren für Autos zu verbieten?

Verbrenner-Verbot in der EU ab 2035

Das AUS für Verbrenner ab 2035 war im März 2023 ein heiß und kontrovers diskutiertes Thema in den Medien und im öffentlichen Diskurs. Das Verbot sollte sehr zeitnah und europaweit von der EU-Kommission beschlossen werden. Der deutsche Verkehrsminister und etliche EU-Staaten wollten dem uneingeschränkten Verbot nicht zustimmen. Laut Umfragen waren fast 70% der Deutschen gegen das Verbot für Verbrenner, ich auch.

Meine Argumente *für synthetische Kraftstoffe* habe ich damals in einem Interview zu der Frage „Wo sind synthetische Kraftstoffe sinnvoll?“ das am 10. März 2023 in der Westdeutschen Zeitung abgedruckt wurde, folgendermaßen pointiert:

1. Die Bezeichnung E-Fuels ist nur die halbe Wahrheit über synthetische Kraftstoffe, weswegen die Meinungen auch geteilt sind. Die Bezeichnung E-Fuels ist eigentlich nicht passend, da sie nur eine Möglichkeit nennt, synthetische Kraftstoffe herzustellen, nämlich den *Umweg über elektrische Energie*.
2. Vielmehr ist die Chemie mit Licht, die zentrale Forderung im 21. Jahrhundert. Die wichtigste Energieressource unseres Planeten, das Sonnenlicht, kann und muss genutzt

werden, um Wasserstoff mithilfe von *Photokatalysatoren aus Leitungswasser oder Meerwasser direkt mit Solarlicht* herzustellen. In diesem Bereich wird viel geforscht.



3. Es ist nicht ratsam, die zukünftige Entwicklung nur auf eine Schiene zu setzen. Ich bin überzeugt, dass wir in der Lage sein werden, auch synthetische Kraftstoffe aus Kohlendioxid und Wasser mit Solarlicht als Antrieb herzustellen. Ich rechne damit, dass es in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts technisch so weit sein wird.
4. Elektrofahrzeuge sind wahrscheinlich nur eine Übergangslösung. Synthetische Kraftstoffe sind sinnvoller. Wir dürfen uns nicht darauf beschränken, was heute möglich ist. Die Nutzung von Solarlicht wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts global den größten Teil des Energiebedarfs decken müssen.

Im gleichen WZ-Beitrag wurden folgende Argumente *gegen* E-Fuels genannt, die von einer anderen interviewten Person abgegeben wurden:

1. Bei der Herstellung der E-Fuels wird zu viel Energie aufgewendet. Damit E-Fuels klimaneutral seien, müsste der Strom aus erneuerbaren Energien stammen. Bezahlbare erneuerbare Energien seien nicht unendlich verfügbar.
2. Daher müsse auf Effizienz geachtet werden. Wir müssen sehr genau schauen, wie man Energieträger so bereitstellt, dass man möglichst wenig Energie aufwenden muss.
3. E-Fuels sind „hinten in der Kette“. Solche flüssigen Energieträger sind nur dort sinnvoll, wo viel Leistung und Antrieb benötigt wird. Das trifft auf den Schwerlastverkehr und den Luftverkehr zu.
4. Im Autoverkehr, bei Bussen und leichten Nutzfahrzeugen haben E-Fuels nichts zu suchen.“

Es wäre an dieser Stelle unfair, Kritik an den Ansichten zu üben, die meinen Argumenten widersprechen. Es wird aber klar, dass die Gleichsetzung „synthetische Kraftstoffe = E-Fuels“ zur Verwirrung und zu Fehleinschätzungen führen muss. Es ist gut und notwendig, dass darüber kontrovers diskutiert wird. Es ist auch erträglich und sogar amüsant, wenn die E-Fuels und mit ihnen gleich auch die übrigen synthetischen Kraftstoffe in der medialen Satire verrissen, lächerlich und zu Schildbürger-Streichen deklassiert werden.

Aber vielleicht spornt das auch die eine oder den anderen zu der Frage an: Sind denn die Befürworter von E-Fuels alle blöd? Zugegeben, die Abkürzung E-Fuels ist kurz, knackig und inzwischen so populär, dass es angebracht ist, sie beizubehalten. Das „E“ darf aber nicht als „Electro“ interpretiert, sondern es muss als „Ecological“ (ökologisch) verstanden werden. Im März 2023 abgefeuerte Satiregeschosse der Moderatoren von Heute-Show, Magazine Royale & Co. gegen die Befürworter von E-Fuels treffen dann als Bumerangs auf sie zurück.

Science fiction - Exkurs in die Zukunft

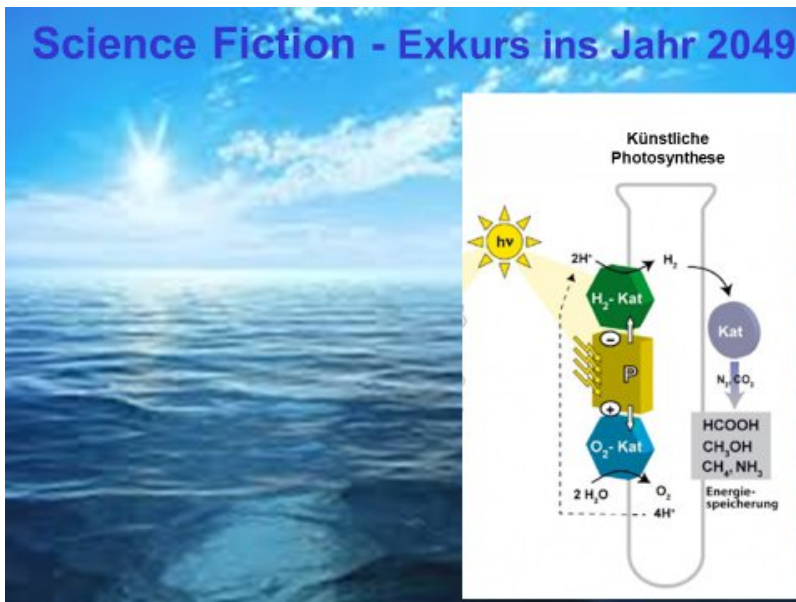
Wir schreiben das Jahr 2089. Die Elektroautos aus den letzten Jahrzehnten sind viel weniger geworden, denn man fährt und fliegt wieder mit Verbrennern. Es sind Verbrenner für synthetische Brennstoffe. Diese sind flüssig wie Benzin, Kerosin und Diesel vor 100 Jahren. Und es sind ebenfalls vorwiegend Kohlenwasserstoffe, aber auch Alkohole, Ether und andere Verbindungen des Kohlenstoffs.

Die Idee von der „Decarbonisierung“ aus den 2020-er Jahren ist also auch Schnee von gestern. Wir fragen uns, wie man nur Kohlenstoff, dieses essentielle Element des Lebens, damals aus dem Nachhaltigkeitsprinzip streichen konnte! Außer Wasserstoff und Sauerstoff ist keines der 92 in der Erdkruste vorkommenden Elemente so stark in den Kreislauf Photosynthese/Zellatmung aus der Biosphäre eingebunden wie Kohlenstoff. Sollten etwa Elemente aus der Klasse der seltenen Erden oder gar radioaktive Isotope zur Basis der Energieversorgung im Zeitalter der Nachhaltigkeit gemacht werden? Die Verbrenner in Automobilen ab 2035 auf EU-Ebene vollständig zu verbieten, ein Thema über das in den 2020-er Jahren politisch und medial in Deutschland leidenschaftlich gestritten wurde, wäre unsinnig gewesen. Weitsichtige Forschende haben schon damals für Technologieoffenheit plädiert und vorgeschlagen, im gesellschaftlichen Diskurs von „Defossilisierung“ statt von „Decarbonisierung“ der Technosphäre zu sprechen. Sie forderten, diesen Prozess durch Forschung und Entwicklung sowie adäquate Bildung der jungen Generation voranzutreiben und adäquate mediale Kommunikation voranzutreiben. Die Deutschen Akademien der Wissenschaften verfassten bereits im Jahr 2018 einen Bericht, in dem sie die **Künstliche Photosynthese** wie folgt beschrieben:

„Die Künstliche Photosynthese dient der Produktion chemischer Energieträger und Wertstoffe unter Verwendung von Sonnenlicht als einziger Energiequelle in integrierten Apparaten und Anlagen. Die besondere Stärke des Ansatzes liegt dabei in der Bereitstellung von erneuerbarer Energie in stofflich gespeicherter sowie lager- und transportierbarer Form. Hierfür wird ein zentrales Prinzip des biologischen Vorbilds nachgeahmt: die Kopplung von lichtinduzierten Ladungstrennungen mit katalytischen Prozessen für die Produktion energiereicher Verbindungen.“ [7]

In diesem Sinne wurde in den Dekaden der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Erforschung der künstlichen Photosynthese intensiviert und beschleunigt. Inzwischen wird die künstliche Photosynthese in technischem Maßstab in mehreren Ländern auf verschiedenen Kontinenten durchgeführt.

Science Fiction - Exkurs ins Jahr 2049



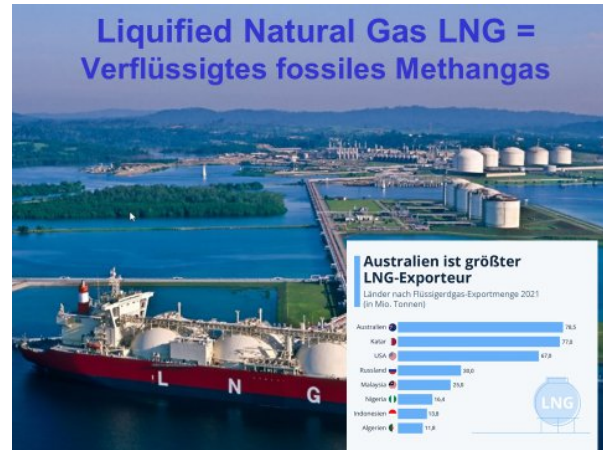
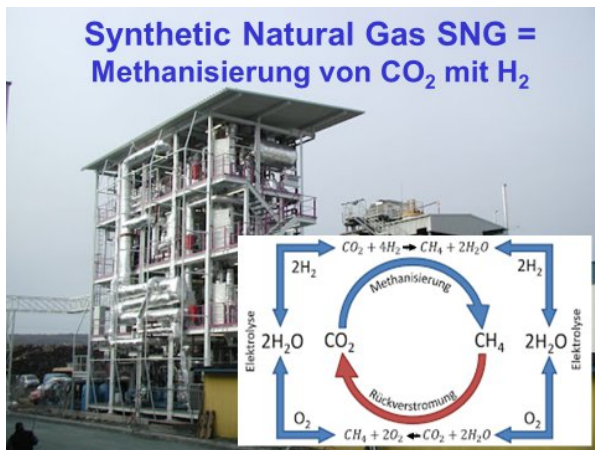
Hier soll Nicos futuristische Graphik hin. Dies ist nur ein Platzhalter.

Einige Hochtechnologieländer, darunter auch Deutschland, haben in sonnenreichen, internationalen Zonen des Atlantiks und des Pazifiks schwimmende, auf Umweltverträglichkeit geprüfte Anlagen installiert, in denen künstliche Photosynthese betrieben wird. Aus den Rohstoffen Wasser und Luft werden mit Solarlicht als einziger Energiequelle Kohlenstoffverbindungen synthetisiert. Je nach Bedarf kann eine Anlage auf die Produktion von flüssigem Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, Alkoholen etc. oder von gasförmigem Methan eingestellt werden. Die synthetischen Produkte werden entweder durch Pipelines oder mit Tankern als flüssige Brennstoffe oder synthetisches Methangas SNG (*synthetic natural gas* - vgl. die beiden folgenden Abschnitte) von den jeweiligen Produktionsorten zu den Verwendungs- und Verteilungsstandorten in Europa und in der Welt transportiert.

Methan aus Wasserstoff und CO₂ - aktuell verfügbare Technik

Kohlenstoffdioxid CO₂ kann mit Wasser zu SNG (*Synthetic Natural Gas*) „methanisiert“ werden. SNG und natürliches Erdgas haben nahezu die gleiche Zusammensetzung, sie bestehen fast ausschließlich aus Methan CH₄. Die Gesamtreaktion bei der Methanisierung von CO₂ verläuft nach dem Schema $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. Es muss vom *Liquidified Natural Gas* LNG unterschieden werden, das aus Methangas fossilen Ursprungs besteht.

Einzelheiten dazu liefert ein Artikel in dem Wissenschaftsjournal *Nature Communications*, der unter [8] online frei zugänglich eingesehen werden kann. Es ist sinnvoll, das Kohlenstoffdioxid für diese Reaktion nicht aus der Luft, sondern aus Abgasen z.B. aus Kohlekraftwerken oder aus



Zementfabriken zu verwenden, weil diese einen weitaus höheren CO₂-Anteil enthalten als die Luft. Das PtG-Verfahren beinhaltet folgende Produktionsschritte: Zunächst wird mithilfe der Photovoltaik oder der Windkraft „grüner“ Strom erzeugt. Damit wird anschließend Wasser elektrolysiert, d.h. durch Zufuhr von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Der so gewonnene Wasserstoff wird zur CO₂-Methanisierung eingesetzt. Man rechnet beim PtG-Verfahren optimistisch mit Effizienzen von:

- 22,5% für die Stromherstellung mithilfe von Solarzellen,
- 90% für den CO₂-Auffang aus den Verbrennungsgasen,
- 80% für die Wasserelektrolyse und
- 80% für die CO₂-Methanisierung.

Da keiner dieser Produktionsschritte umgangen werden kann, ergibt sich für das PtG-Verfahren bestenfalls eine Gesamteffizienz von 13% [8]. Das synthetische Methangas SNG gehört zu den so genannten *e-fuels*. Dazu zählen aber auch flüssige Kohlenwasserstoffe, Alkohole und andere organische Kohlenstoffverbindungen, die in den gleichen Schritten wie SNG synthetisiert werden. Die Gesamteffizienz liegt dort bei maximal 15% bis 20%.

Bei der künstlichen Photosynthese wird eine höhere Gesamteffizienz angestrebt, weil keine elektrische Energie aus Photovoltaik oder Windkraft und auch keine Wasserelektrolyse benötigt wird. Diese beiden Schritte sollen umgangen werden. Stattdessen soll die Energie des Sonnenlichts direkt genutzt werden, um ähnliche oder sogar die gleichen Stoffe wie bei der natürlichen Photosynthese großtechnisch herzustellen. Doch wie soll das funktionieren? Und ist diese Idee ganz neu?

Künstliche Photosynthese - Kopie der Natur?

Der Italiener Giacomo Ciamician erkannte bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts, dass mit Sonnenlicht angetriebene Reaktionen oft anders ablaufen als bei Wärmezufuhr und äußerte 1907 die Vision, dass „*solar radiation may be used for industrial purposes ... to prepare easily many substances that we can badly reproduce*“ [9]. Allerdings wurde und wird in den letzten 200 Jahren sowohl im Labor als auch in der Industrie in der Regel Wärme oder elektrische

Energie zugeführt um chemische Reaktionen anzutreiben. Dagegen sollen bei der *künstlichen Photosynthese* nach dem Muster der natürlichen Photosynthese (vgl. weiter oben Abschnitt „Kohlenstoffverbindungen - Spirit fürs Leben aus CO₂ und Wasser“) synthetische organische Brennstoffe und grüner Wasserstoff direkt und ausschließlich mit Energie aus dem Sonnenlicht hergestellt werden. Im Bericht der Deutschen Akademien der Wissenschaften wird betont:

„Es ist dabei nicht zielführend, die hohe Komplexität der biologischen Maschinerie exakt ‚nachbauen‘ zu wollen. Dies ist auch nicht nötig, da der Wissenschaft und dem Ingenieurwesen für die Künstliche Photosynthese viele alternative Materialien und Produktionsmethoden zur Verfügung stehen.“ [7]

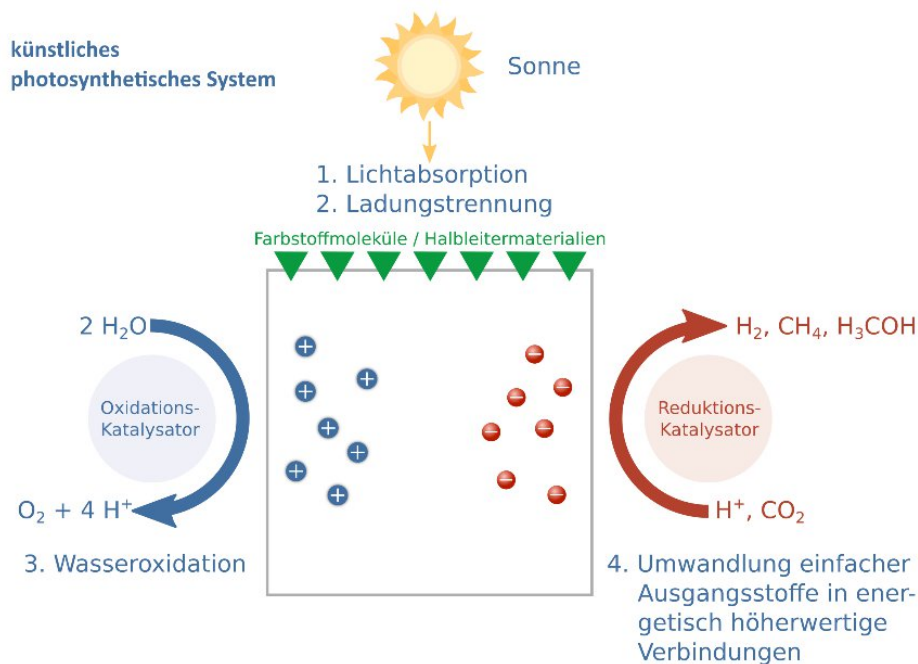


Abb. 3: Teilprozesse der künstlichen Photosynthese zur technischen Herstellung von solaren Brennstoffen und Grundchemikalien aus CO₂ mit H₂O als Wasserstoffquelle; vereinfachte Darstellung nach [7]

Es geht also nicht um eine 1:1 Kopie der natürlichen Photosynthese. Vielmehr müssen alternative Materialien erforscht, Konzepte kommuniziert und Produktionsverfahren entwickelt werden, die in den folgenden Dekaden Industriereife erreichen. Deutschland kann und sollte als Wissenschafts-, Bildungs- und Technologiestandort dabei als Globalplayer eine Vorreiterfunktion übernehmen. Tatsächlich wird auf dem Gebiet der künstlichen Photosynthese wird derzeit - Stand 2024 - intensiv geforscht. Die Abbildung 3 bringt wesentliche gemeinsame Merkmale der biologischen und der künstlichen Photosynthese auf den Punkt. Es sind die folgenden Schritte: 1. Lichtabsorption, 2. Ladungstrennung, 3. Wasseroxidation zu Sauerstoff O₂ und Wasserstoff-Ionen H⁺ und 4. Umwandlung von Wasserstoff-Ionen H⁺ und/oder CO₂ zu Energieträgern wie Wasserstoff H₂, Methan CH₄ Methanol H₃COH und anderen organischen Verbindungen.

Für die Lichtabsorption im sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums sind farbige Stoffe als *Photokatalysatoren* notwendig. Das sind in den grünen Blättern die Chlorophylle und die Carotinoide. Bei Systemen für die künstliche Photosynthese werden als Lichtabsorber neben organische Farbstoffen insbesondere Nano-Materialien aus anorganischen Halbleitern erforscht. In *Nano-Körnern* des Halbleiters mit Durchmessern von kleiner als 100 nm (1 nm = 10⁻⁹ m) bilden sich bei der Lichtabsorption so genannte Elektron/Loch Paare und es kommt unmittelbar danach zu einer Ladungstrennung der negativen Elektronen von den positiven Löchern (Elektronendefizitstellen). Die positiven Löcher bewirken die in Schritt 3. angegebene

Wasseroxidation und die negativen Elektronen die in Schritt 4. angegebenen Umwandlungen, die allesamt Reduktionen sind.

Wie wir bereits weiter oben gesehen haben, ist die Produktion von grünem Wasserstoff ein erster und essentieller Schritt auf dem Weg, auch zu anderen synthetischen Energieträgern wie Methan und andere Kohlenstoffverbindungen. Folglich ist die Wasserstoffproduktion durch Wasserspaltung direkt mit Licht ohne den Umweg über Photovoltaik und Wasserelektrolyse eine wichtige Option. *Oxidations-* bzw. *Reduktionskatalysatoren* beschleunigen diese beiden Reaktionsschritte und erhöhen die Effizienz des gesamten 4-schrittigen Prozesses aus Abb. 3. Die photokatalytische Erzeugung Wasserstoff durch vollständige Wasserspaltung mit Licht wird im Labor u.a. mit *heterogenen Photokatalysatoren* untersucht und fortlaufend optimiert. Dabei werden beispielsweise Halbleiter (Nano)Partikel eingesetzt, die an der Oberfläche mit einem Oxidationskatalysator und einem Reduktionskatalysator versehen sind. Ein Halbleiter-Korn, das mit einem solchen „make up“ dekorierten ist, wird in Abb. 6 (vgl. Abschnitt „Photokatalyse - der Königsweg zu grünem Wasserstoff“) beschrieben. Er kann alle vier Schritte aus Abb. 3 realisieren. Der entsprechende Photokatalysator liegt pulverförmig vor und ist nicht wasserlöslich. Wird er mit Wasser vermischt, so bildet sich eine Suspension, ein heterogenes Gemisch aus winzigen, festen Halbleiter-Körnern und der Flüssigkeit Wasser. Bei der Bestrahlung der Suspension mit passendem Licht werden durch Absorption von Photonen (Lichtquanten) im Halbleiter-Korn Elektronen aus dem Valenzband VB ins Leitungsband LB angehoben. Dabei entstehen so genannte Elektron/Loch Paare, aus dem ins LB angehobene Elektron und dem im LB verbliebenen „Loch“ (dem fehlenden Elektron). Die Elektron/Loch Paare trennen sich auf, wobei die Löcher im VB an den Oxidationskatalysator und die Elektronen im LB an den Reduktionskatalysator „wandern“. Am Oxidationskatalysator fangen die Löcher Elektronen von Wasser-Molekülen ein; dabei läuft die Reaktion ab, bei der sich Sauerstoff O_2 bildet (3. Schritt in Abb. 3). Am Reduktionskatalysator werden die Elektronen aus dem LB an Wasserstoff Ionen H^+ übertragen und es bildet sich Wasserstoff H_2 (4. Schritt in Abb. 3.)

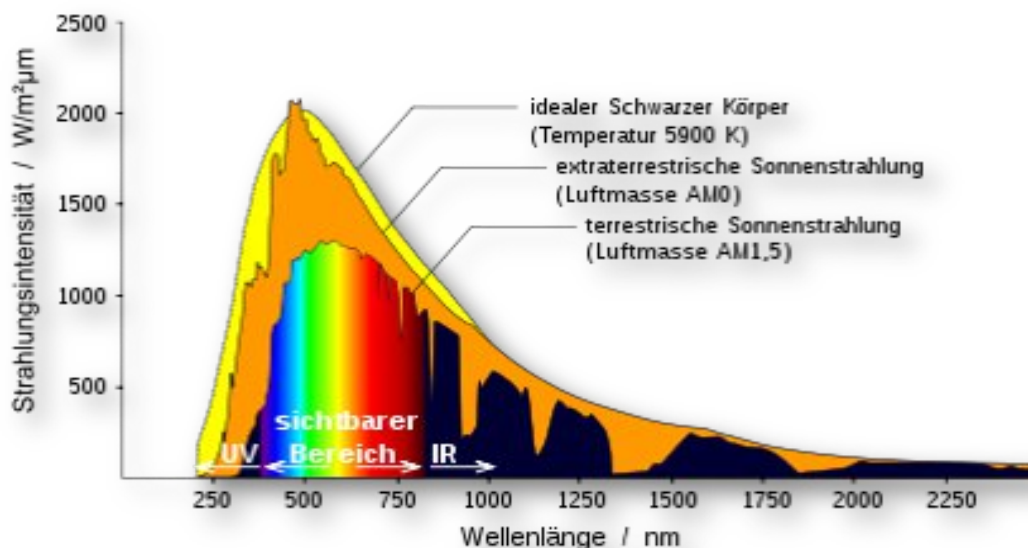


Abb. 4: Spektrum der terrestrischen Sonnenstrahlung (AM 1.5) mit farblich markiertem Teil des sichtbaren Spektrums; AM 1.5 entspricht einem Einstrahlungswinkel der Sonne von $48,2^\circ$, bei dem der Weg des Lichts durch die Luftmassen der Erde (Air Mass AM) das 1,5-fache der Atmosphäre beträgt.

Nach diesem Prinzip ist es sogar gelungen, einen Photokatalysator aus dekorierten Halbleiter-Nanopartikeln zu entwickeln, der die absorbierten Photonen mit nahezu 100%-iger Effizienz für die Wasserspaltung nutzt [10, 11]. Dieser kann allerdings nur UV-Licht mit Wellenlängen kleiner als 360 nm absorbieren und das ist in dem Sonnenlicht, das auf die Erdoberfläche

eintrifft, in nur ganz geringem Anteil enthalten (Abb. 4). Das mag für diesen Katalysator enttäuschend sein, für das Leben auf der Erde ist es eine essentielle Voraussetzung.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Photokatalysatoren so auszustatten, dass sie Solarlicht im sichtbaren Bereich zwischen 400 nm und 750 nm absorbieren. Eine naheliegende Option ist, sich bei der natürlichen Photosynthese zu inspirieren und es ihr nachzumachen. Dazu werden farbige Lichtabsorber entwickelt, die als *Photosensibilisatoren* beispielsweise an die Oberfläche von Nano-Körnern eines Halbleiters des oben diskutierten Typs gebunden werden. Mit einer solchen Dekoration sind diese auch für die Nutzung von sichtbarem Licht verschiedener Farben aus dem Solarspektrum tauglich.

Es gibt auch andere Möglichkeiten zum Design photokatalytischer Systeme für die Wasserspaltung und die Synthese von Solarbrennstoffen nach dem Schema aus Abb. 4. Außerdem sind bis zur technischen Reife und ökonomischen Rentabilität der künstlichen Photosynthese noch weitere Herausforderungen zu bewältigen. Dafür ist in den kommenden Jahrzehnten noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig. Sinngemäß wird in dem Bericht der Akademien betont, dass der Wissenschaftsjournalismus dazu beitragen kann, die gesellschaftliche Akzeptanz der Forschung und Entwicklung von zukunftsrelevanten Technologien mit künstlicher Photosynthese erhöhen [7].

Die künstliche Photosynthese muss in ihrer vollen, oben dargelegten Breite im gesellschaftlichen und politischen Diskurs zum Zuge kommen. Aktuell - im Frühjahr 2023 - ist das weder in den Medien noch in der Politik der Fall. Lediglich die so genannten E-Fuels werden thematisiert. Das ist völlig unzureichend, kann irreführend sein und wird von einigen Politikern, Journalistinnen und Autokonzernen genutzt, um das Verbot von Verbrennern in Fahrzeugen zu befürworten. (vgl. folgendes Unterkapitel).

Die von der Politik ausgerufenen *Zeitenwende* erfordert ganz im Sinne des Klimaschutzes eine *Energiewende*, die kurz- und langfristig ausgerichtet sein muss. Und damit die Generation der Wissenschaftlerinnen, Ingenieure, Technikerinnen und Handwerker von morgen motiviert und befähigt wird, künstliche Photosynthese zu entwickeln und technisch umzusetzen, ist bereits heute auch eine *Bildungswende* dringend erforderlich. Dabei geht es nicht nur um Digitalisierung des Unterrichts, Beseitigung des Lehrermangels und Sanierung von Schulgebäuden, sondern aus meiner Sicht vornehmlich um die Innovation der Lehrinhalte in den MINT-Fächern. Meine Devise lautet: „LED statt Gasbrenner - Mehr Licht für nachhaltigen Unterricht!“ [12]. Dazu werde ich in Kapitel 2 ausführlicher darlegen, worauf es ankommt.

Grüner Wasserstoff - Zwischenstation zur künstlichen Photosynthese

In der aktuell rund um den Klimawandel viel diskutierten Energiewende nimmt *grüner Wasserstoff* eine Schlüsselrolle ein. Dabei handelt es sich um Wasserstoff, der klimaneutral unter ausschließlicher Nutzung von erneuerbaren Energieressourcen und ohne CO₂-Emissionen produziert wird. Mit grünem Wasserstoff lässt sich erneuerbare Energie in entscheidende Wirtschaftsbereiche der chemischen Industrie, der Eisen- und Stahlproduktion und des Verkehrs integrieren, die anderenfalls schwer zu defossilisieren wären.

Gegenwärtig liegt der Fokus insbesondere auf grünem Wasserstoff, der mit Hilfe von erneuerbarem Strom, beispielsweise aus Photovoltaik- oder Windanlagen, durch Elektrolyse von Wasser produziert wird. Elektrische Energie wird dabei genutzt, um die sehr energieaufwändige Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff anzutreiben. Der hierbei gebildete Wasserstoff ist ein exzellenter Energiespeicher, der auch langfristig speicherbar ist. Die Energiespeicherdichte von Wasserstoff ist mit 33 kWh/kg mehr als doppelt so hoch die von Methan (14 kWh/kg) und fast dreimal so hoch wie die von Benzin oder Diesel (12 kWh/kg).

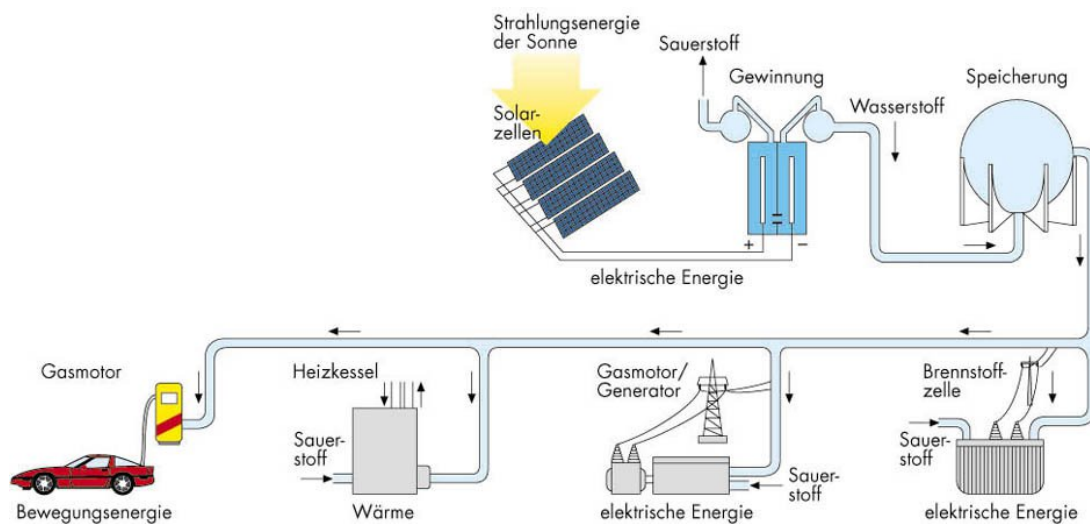


Abb. 5: Szenario mit Solarwasserstoff auf der Basis von Photovoltaik und Wasserelektrolyse [2]

Über die Erzeugung von grünem Wasserstoff und seine Einsatzmöglichkeiten wird seit mehr als 25 Jahren sogar in Schulbüchern für die Sekundarstufe I aufgeklärt. Das in Abb. 5 skizzierte Solarwasserstoff-Szenario ist ganz frei von CO₂-Emissionen. Die im unteren Teil angedeuteten Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff, in Brennstoffzellen, Gasmotoren, Generatoren und Heizkesseln wurden in den zurückliegenden Jahren schon erprobt.

Allerdings war bisher der eingesetzte Wasserstoff in der Regel nicht „grün“ (vgl. oben), sondern je nach Herstellungsverfahren „türkis“ (aus Methan-Pyrolyse, d.h. thermische Spaltung von Methan mit Einlagerung des anfallenden Kohlenstoffs), „grau“ (aus Dampfreformierung, d.h. Reaktion von Wasser mit Methan, Öl oder Kohle, wobei auch CO₂ anfällt, das emittiert wird), „blau“ (entsteht wie der graue, aber das dabei anfallende CO₂ wird abgetrennt und gelagert), „schwarz“ oder „braun“ (erzeugt mit Strom aus Steinkohle bzw. Braunkohle). Diese breite Palette von verschiedenen „Farben“ des in Wirklichkeit farblosen Gases Wasserstoff macht eigentlich deutlich, wie viele Anstrengungen unternommen werden, um sich dem Ziel „grüner“ Wasserstoff zu nähern.

Seit dem Jahr der Zeitenwende 2022 nehmen diese Anstrengungen zu. Deutschland hat diesbezüglich Kooperationsverträge mit Ländern wie Namibia, Kanada und Norwegen geschlossen.

Eine wichtige Nutzungsmöglichkeit von Wasserstoff, ganz gleich ob er grün ist oder nicht, fehlt in Abbildung 5, denn sie ist erst in den Jahren nach 2000 entwickelt worden. Es handelt sich um die künstliche Photosynthese (vgl. weiter oben), eine zukunftssträchtige Anwendung, bei der energiereiche Kohlenstoffverbindungen aus Wasserstoff und CO₂ ausschließlich unter Nutzung von Solarlicht als Energiequelle synthetisiert werden. Es ist die Technologie, die im 21. Jahrhundert entwickelt werden muss, wenn ausschließlich klimaneutrale Verfahrensschritte zum Einsatz kommen und die planetaren Rohstoffressourcen geschont, oder zumindest möglichst lang gestreckt werden sollen.

Die natürliche Photosynthese macht es uns vor, wie das geht: Im ersten Teil, der „Lichtreaktion“, treibt das Licht die Spaltung von Wasser sowie die Synthese des zellulären Energiespeichers Adenosintriphosphat (ATP) an. Es bildet sich Sauerstoff, der als „Abgas“ entweicht und Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat NADPH. Darin ist Wasserstoff zwischengespeichert. Er reagiert in der „Dunkelreaktion“ schrittweise mit CO₂ zu energiereichen Kohlenstoffverbindungen.

Grüner Wasserstoff ist also nicht nur ein hervorragender, nachhaltiger und klimafreundlicher Energiespeicher mit allen in Abb. 5 angedeuteten Nutzungsmöglichkeiten, sondern auch die wichtigste Zwischenstation bei der technischen Verwirklichung der künstlichen Photosynthese.

Der kürzeste, nachhaltigste und sauberste Weg zu grünem Wasserstoff ist die vollständige Wasserspaltung (*Overall Water Splitting*) in Sauerstoff und Wasserstoff direkt mit Licht aus der Sonne, ohne den Umweg über elektrischen Strom und Wasserelektrolyse. Dass dies prinzipiell möglich ist, zeigt uns die Natur bei der „Lichtreaktion“ der Photosynthese. Allerdings muss noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden, um dieses Verfahren zur Marktreife in der Technik zu bringen.

Photokatalyse - der Königsweg zu grünem Wasserstoff

Wenige Begriffe aus der Chemie sind so populär wie Katalysator und Katalyse. Der Grund dafür ist weniger die Tatsache, dass sie Pflichtgegenstand des Chemieunterrichts sind, sondern vielmehr, dass sie im Alltag häufig auch ganz außerhalb der Chemie gebraucht werden. Allerdings ging das so richtig erst los, nachdem Katalysatoren für die Abgasreinigung bei allen Autos mit Verbrennern gesetzlich vorgeschrieben wurden. Indessen laufen fast alle Reaktionen in Laboren und technischen Anlagen, in der Atmosphäre, den Gewässern und Böden sowie in allen lebenden Organismen nur in geeigneter Katalyse, d.h. unter Beteiligung passender Stoffe, den Katalysatoren, schnell und effizient ab.



Es ist üblich und allgemeinverständlich, die Katalyse als Vermittlungsvorgang („Heiratsvermittlung“) bei chemischen Umwandlungen von Stoffen zu umbeschreiben. Wenn die Katalyse nur mit Licht funktioniert, handelt es sich um *Photokatalyse*. Sie ist der „Königsweg“ sowohl zu „grünem“ Wasserstoff, als auch zu energiereichen Verbindungen durch künstliche Photosynthese. Weiter oben, in den Abschnitten „Künstliche Photosynthese - Kopie der Natur?“ und „Grüner Wasserstoff - Zwischenstation zur künstlichen Photosynthese“ sind die prinzipiellen Teilprozesse bei der Photokatalyse und die „Farben“ des technisch hergestellten Wasserstoffs erläutert. Weitere Details folgen in den Kapitel 2 und 3 dieses Buches.

Aktuell ist man bei der photokatalytischen Herstellung von grünem Wasserstoff durch vollständige Spaltung von Wasser in der Laborforschung und in der Lehre bereits erfolgreich unterwegs [10-18]. Um eine möglichst große *Solar-to-Hydrogen* Effizienz zu erreichen, folgt man dem Reaktionsmuster bei der natürlichen Photosynthese, das als des *Z-Schema* bezeichnet wird. Danach wird Licht in zwei räumlich getrennten Einheiten absorbiert, die durch Elektronenaustausch direkt oder über einen Redoxmediator miteinander verbundenen sind. In Abb. 5 wird dargestellt, wie das *Z-Schema* mithilfe von zwei Halbleiter-Nanopartikeln A und B realisiert werden kann. Idealerweise läuft in einem solchen System die vollständige Wasserspaltung (*Overall Water Splitting*) ab: Am Halbleiter-Korn A findet die Bildung von Sauerstoff (*Oxygen Evolving Reaction* OER) statt, am Halbleiter-Korn B die Bildung von Wasserstoff (*Hydrogen Evolving Reaction* HER). Dafür müssen die beiden Photokatalysatoren

A und B erfolgreich zusammenwirken, d.h. beide sollten sichtbares Licht absorbieren, effizient elektrische Ladungen untereinander austauschen sowie die HER- und OER-Reaktion wirksam katalysieren.

Da man insbesondere an der photokatalytischen Herstellung von grünem Wasserstoff interessiert ist, konzentriert sich die Forschung zunächst auf die Verwirklichung und Optimierung der HER-Reaktion aus Abb. 6, d.h. der Reaktion, bei der sich aus Wasserstoff-Ionen H^+ durch Reduktion (Aufnahme von Elektronen) molekularer Wasserstoff H_2 bildet. Damit die dafür notwendigen Elektronen leichter als durch die OER-Reaktion aus Abb. 6 erzeugt werden, setzt man so genannte „Opferdonoren“ (*Sacrificial Donors*) ein, beispielsweise Milchsäure [17]. Diese werden viel leichter oxidiert (Abgabe von Elektronen) als Wasser, aber sie werden irreversibel verbraucht und somit für die Herstellung von Wasserstoff geopfert.

Die fachlichen Grundlagen, experimentellen Möglichkeiten und noch zu lösenden Probleme bei der Produktion von grünem Wasserstoff durch photokatalytische Wasserspaltung werden auch in der Fachdidaktik an verschiedenen Standorten in Deutschland erforscht und für die curriculare Innovation des Chemieunterrichts und benachbarter MINT-Fächer aufbereitet [12, 14, 18].

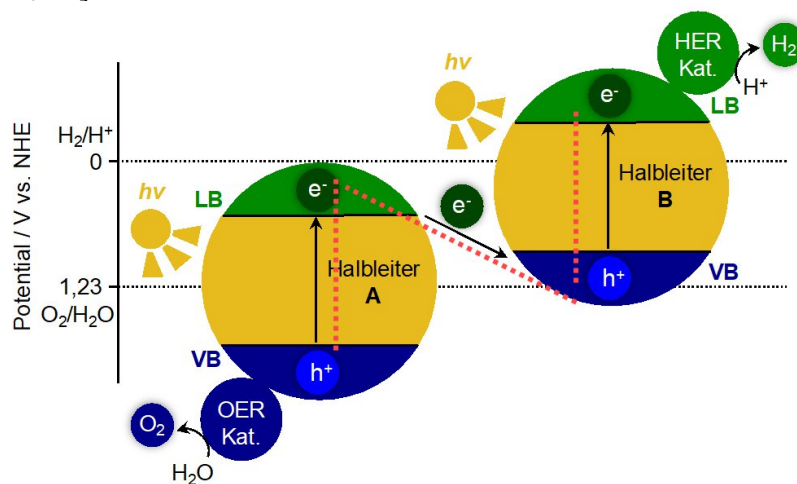


Abb. 6: Schematische Darstellung des Z Schemas (gepunktete rote Linie) bei einem Photokatalysesystem aus zwei unterschiedlichen Halbleiter-Nanopartikeln (Grafik aus Lit. [14])

Kaum ein anderes Thema ist so relevant wie dieses in der „Bildung für Nachhaltige Entwicklung“ BNE, die von der UNESCO entwickelt und als obligatorische Leitlinie in den Schulen Deutschlands und Europas deklariert wurde. Und kaum ein anderes Angebot kann die Schuljugend motivierender sein, als sich auch selbst an der Erforschung von Möglichkeiten der Nutzung von Solarlicht bei der Herstellung von grünem Wasserstoff zu beteiligen. Dafür spricht, dass noch bevor die Photokatalyse überhaupt in den Lehrplänen für Schulen erwähnt war, Experimente zur photokatalytischen Wasserstoffherstellung in Schülerlaboren an Unis, Projektkursen und Wissenschaftswochen an Schulen vorzugsweise gewählt und durchgeführt haben.

Als global Player bei solchen Experimenten hat sich dabei das **Photo-Blue-Bottle** System PBB erwiesen. Dabei handelt es sich um eine wässrige Lösung aus nur drei Chemikalien: einem Redoxmediator, einem Photokatalysator und einem Opferdonor [12].

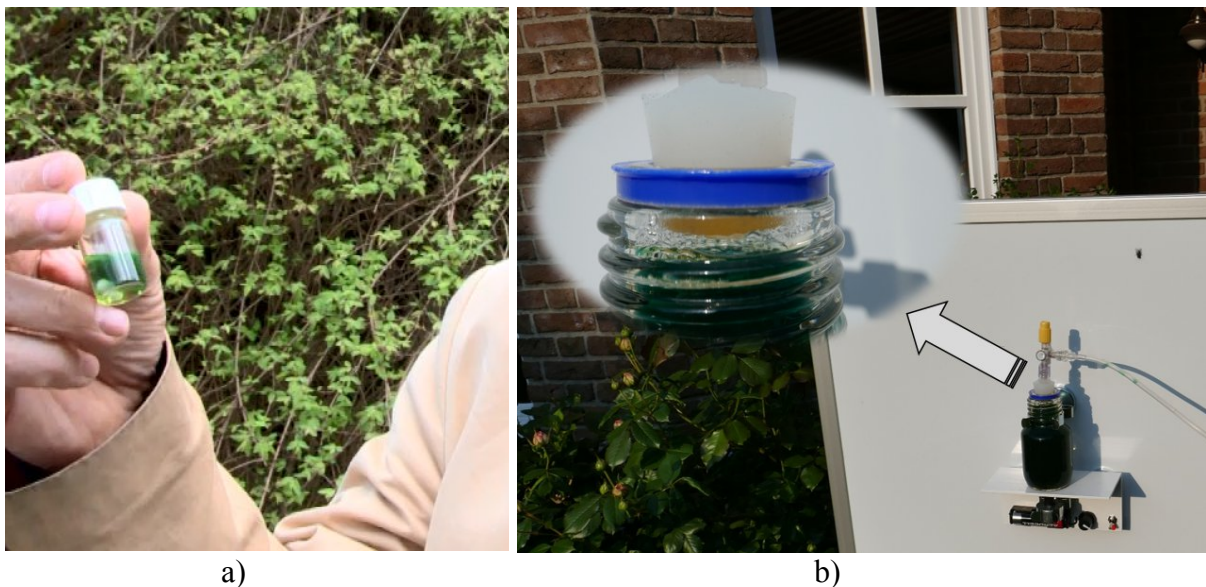


Abb. 7: Zwei Photo-Blue-Bottle Experimente: a) Die Blaufärbung der PBB-Lösung bei Bestrahlung mit Sonnenlicht geht mit der Bildung der reduzierten Form des Redoxmediators einher; b) bei Zusatz von Nano-Platin in die PBB-Lösung und weiterer Bestrahlung bildet sich Wasserstoff (Fotos aus [14])

Damit können über 20 Experimente durchgeführt werden, die sich je nach Alter und Bildungsstand der Lernenden wortwörtlich „vom Kindergarten bis zum Doktorhut“ eignen. Sie reichen vom belanglosen Kinderspiel mit faszinierendem Farbenwechsel in einer Flasche beim Bestrahlen mit Licht und beim Schütteln der Flasche bis zur Konzeption und zum Bau eines Solarreaktors für die Effizienzsteigerung bei der photokatalytischen Herstellung von Wasserstoff. In Abb. 7 sind zwei Experimente mit der PBB-Lösung dargestellt, die gleichermaßen im Freien mit Sonnenlicht oder im Labor und auch im Klassenraum ohne Laborausrüstung mit blauem (nicht aber mit grünem und rotem) Licht aus LED-Taschenlampen durchgeführt werden können. Geräte und Chemikalien für die PBB-Experimente stehen als Experimentier- und Materialiensets auf der Internetplattform <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/> zur Verfügung. Sie können einerseits zur Gestaltung von forschend-entwickelnden Unterrichtseinheiten in den Sekundarstufen I und II dienen und andererseits als Einstieg für unterrichtsbegleitende Facharbeiten und andererseits für Wettbewerbe wie Jugend forscht.

Es ist ein zeitgenössischer Imperativ, unsere heutige Schuljugend für innovative, nachhaltige Technologien mit Solarlichtnutzung zu begeistern sowie für ihre Erschließung und technische Umsetzung fit zu machen. Auf das Warum und Wie zu dieser Forderung werde ich in den folgenden Kapiteln eingehen.

Literatur

- [1] M. Tausch, M. von Wachtendonk (Hrsg.), CHEMIE 2000+, Gesamtband Sek. II, C. C. Buchner, Bamberg, **2007**
- [2] M. Tausch, M. von Wachtendonk (Hrsg.), Stoff-Formel-Umwelt, Sek. I, C.C.Buchner, Bamberg **1996**
- [3] Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderung WBGU der Bundesregierung, <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/04/daten/WBGUenergiemix.htm>; letzter Zugriff: Juli **2023**
- [4] <https://www.solargenossenschaft-essen.de/die-sonne-liefert-uns-jeden-tag-10-000-mal-mehr-energie-als-pro-tag-weltweit-benoetigt-wird/>; letzter Zugriff: Juli **2023**

- [5] D. Wöhrle, W.-D. Stohrer, M. W. Tausch, Photochemie, Konzepte, Methoden, Experimente, Wiley-VCH, Weinheim, **1998**
- [6] A. M. Ullman, D. G. Nocera, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135 (40), 15053
- [7] M. Beller, N. Lewis, M. Grätzel, A. Hagfeld, R. Rieger u.a., Künstliche Photosynthese, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München **2018**; <https://www.acatech.de/publikation/kuenstliche-photosynthese-forschungsstand-wissenschaftlich-technische-herausforderungen-und-perspektiven/>
- [8] U. Ulmer, T. Dingle, P. N. Duchesne, R. H. Morris, A. Tavasoli, T. Wood, G. A. Ozin, “Fundamentals and applications of photocatalytic CO₂ methanation”. *Nature Communications*, **2019**, 10(1), 3169; <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10996-2>
- [9] G. Ciamician, “Problemi di Chimia organica”, *Scienza*, **1907**, 1, 44
- [10] T. Takata, T., J. Jiang, Y. Sakata et al. “Photocatalytic water splitting with a quantum efficiency of almost unity”, *Nature*, **2020**, 581, 411–414
- [11] F. A. Chowdhury, M. L. Trudeau, H. Guo, Z. Mi “A photochemical diode artificial photosynthesis system for unassisted high efficiency overall pure water splitting”, *Nature Com.*, **2018**, 9,1707
- [12] M. W. Tausch, „Mehr Licht für nachhaltigen Chemieunterricht - LED statt Gasbrenner“ *Chemie in unserer Zeit*, 2022, 56, 188–196; für Lehrkräfte an Schulen *online* frei zugänglich
- [13] X. Yu, J. Xu, J. Wang, J. Qiu, X. An, Z. Wang, G. Lv, L. Liao, J. Ye ”Mimicking Photosynthesis: A Natural Z-Scheme Photocatalyst Constructed from Red Mud Bauxite Waste for Overall Water Splitting”, **2023**, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 62, e202302050
- [14] J. Schneidewind, M. W. Tausch “Mit Licht zu grünem Wasserstoff”, *Chemie in unserer Zeit*, **2024**, 58 (1), 20–28; für Lehrkräfte an Schulen *online* frei zugänglich
- [15] P. Zhou, I. A. Navid, Y. Ma¹, Y. Xiao¹, P. Wang, Z. Ye, B. Zhou, K. Sun, Z. Mi „Solar-to-hydrogen efficiency of more than 9% in photocatalytic water splitting”, **2023**, *Nature*, 61 (3), 66
- [16] H.-J. Lee, A. Abudulimu, J. C. Roldao, H. Nam, J. Gierschner, L. Luer, S. Y. Park „Highly Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution Using a Self-Assembled Octupolar Molecular System”, 2023, *ChemPhotoChem* **2023**, 7, e202200177
- [17] X.-Y. Meng, J.-J. Li, P. Liu, M. Duan, J. Wang, Y.-N. Zhou, Y Xie, Z.-H. Luo, Y.-X. Pan “Long-Term Stable Hydrogen Production from Water and Lactic Acid via Visible-Light-Driven Photocatalysis in a Porous Microreactor” *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, 62, e202307490
- [18] A. Habekost, M. W. Tausch (eds.) „Photoprocesses in Chemical Education“, *World J. Chem. Educ.*, **2021**, Special Issue containing 12 papers, 4 papers concerning green hydrogen