

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.

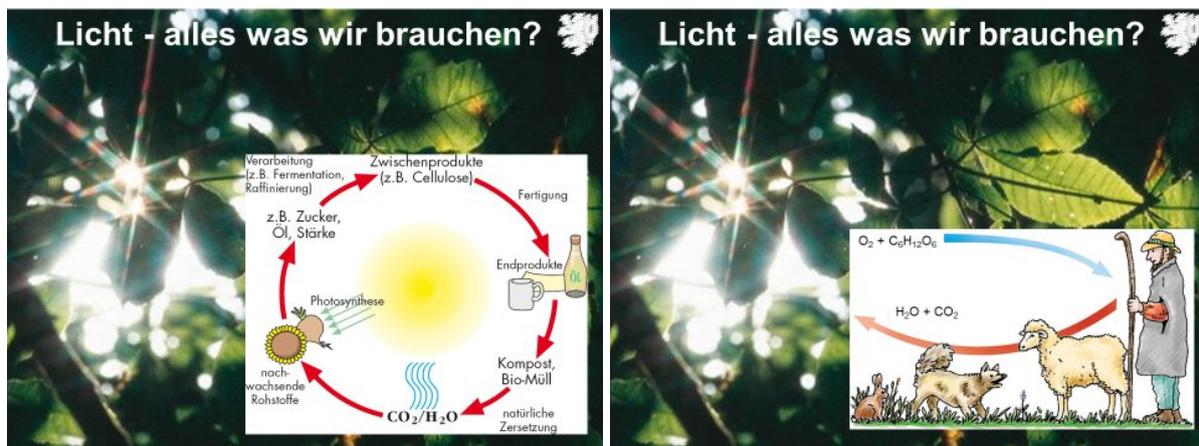


All We Need Is Light und Titel des Beatles Songs *All You Need Is Love* sind eigentlich Variationen zu einem sehr allgemeinen Thema. Die Überschrift des Kapitels deklariert Licht zur wichtigsten Energieform für das menschliche Leben auf diesem Planeten, der Titel der Beatles hebt Liebe als die schönste 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.

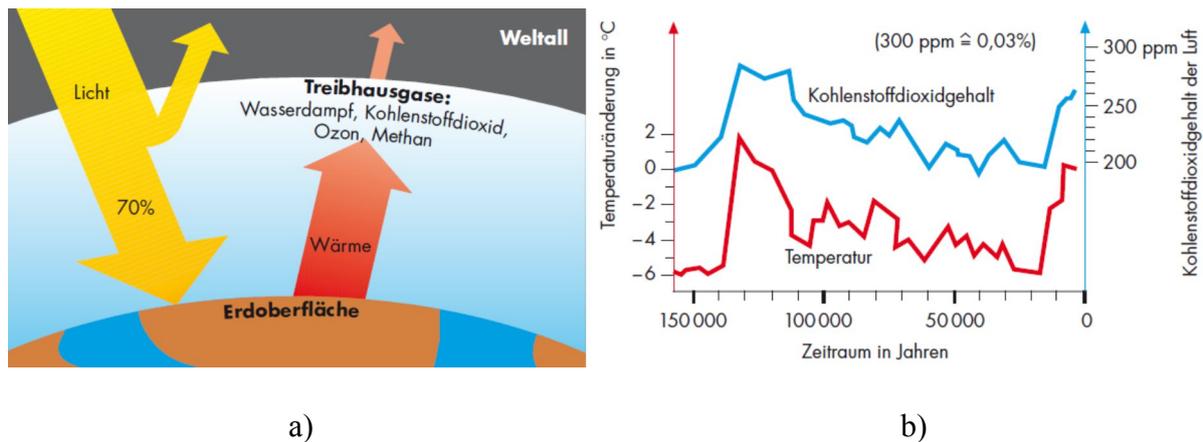


Abb. 1: Modell zum Treibhauseffekt (a) und Zusammenhang zwischen der mittleren Temperatur in Bodennähe und CO₂ Gehalt in der Luft (b) [1, 2].

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 °C im Vergleich zum vorindustriellen Mittelwert, ein Jahr später waren es schon fast 1,5 °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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ Emissionen seit 1990 stark an.

Nach der Sachlage im Referenzjahr 2022 wird der Anstieg der weltweiten CO₂ 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).

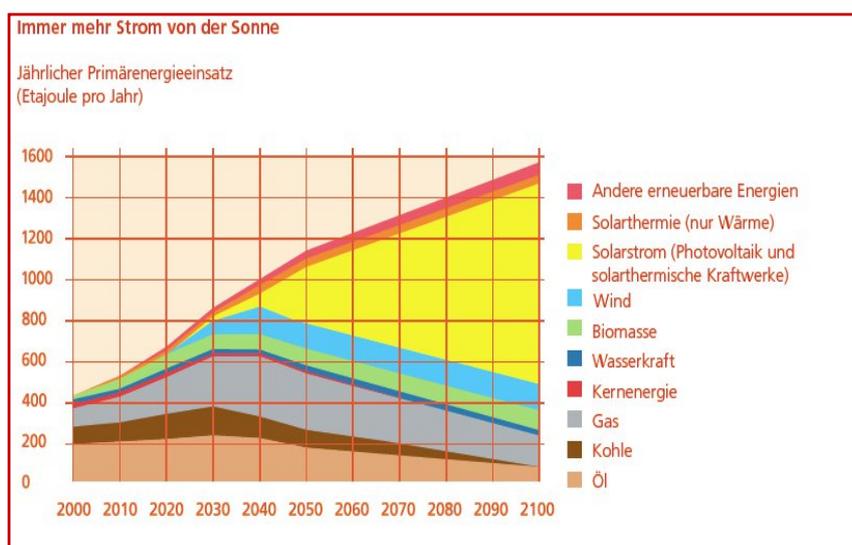


Abb. 2: Prognose zum globalen Energiemix bis zum Jahr 2100 [3]

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].

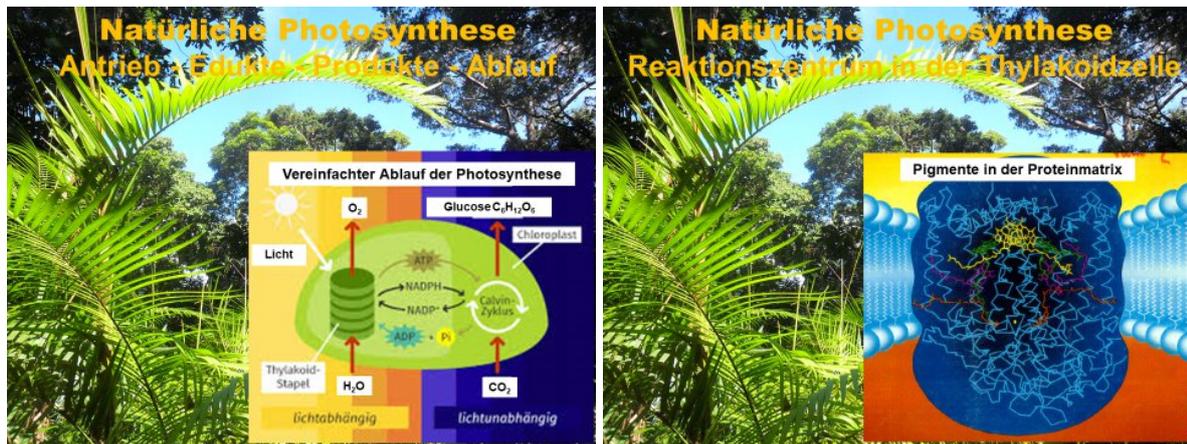
Dass Solarlicht die einzige Energieform ist, die das Leben auf diesem Planeten antreibt, haben wir bereits weiter oben erörtert. Der Mensch hat in den letzten Jahrhunderten des *Anthropozäns* die natürlichen Bedingungen für sein langfristiges Überleben auf dem Planeten massiv beeinträchtigt. Er hat zum 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 abgefeuerten 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

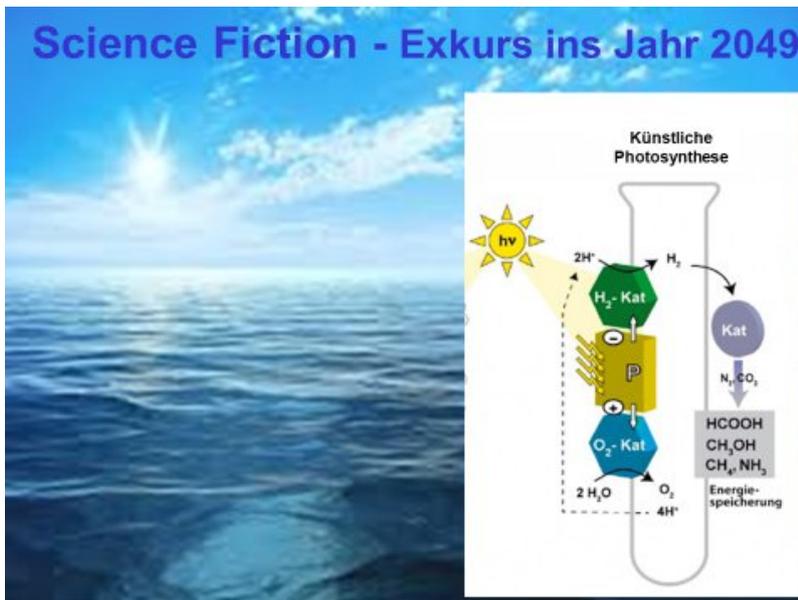
Wir schreiben das Jahr 2089. Die Elektroautos aus den letzten Jahrzehnten sind viel weniger geworden, denn man fährt und fliegt wieder mit Verbrennern. Es sind Verbrenner für synthetische Brennstoffe. Diese sind flüssig wie Benzin, Kerosin und Diesel vor 100 Jahren. Und es sind ebenfalls vorwiegend Kohlenwasserstoffe,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



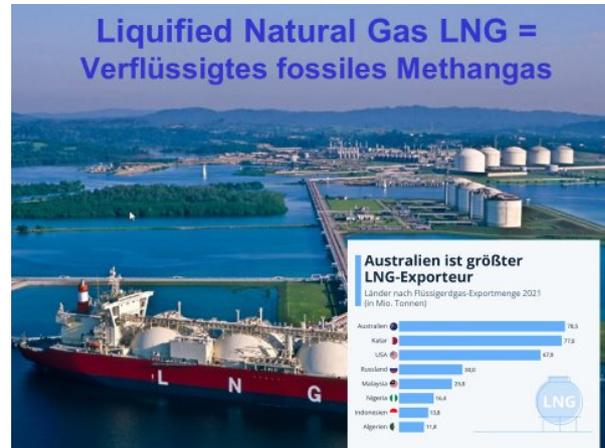
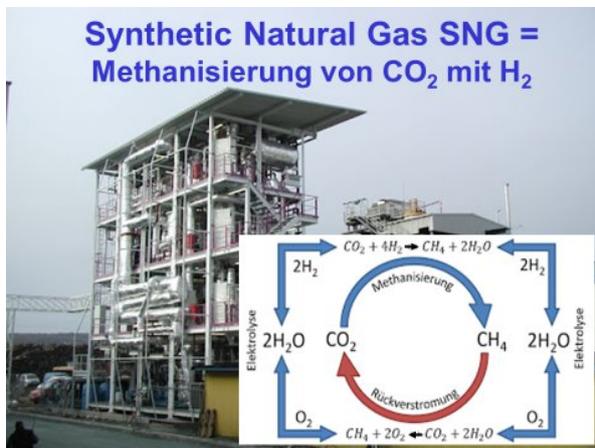
Hier soll Nicos futuristische Graphik hin. Dies ist nur ein Platzhalter.

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 *Liquified 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]

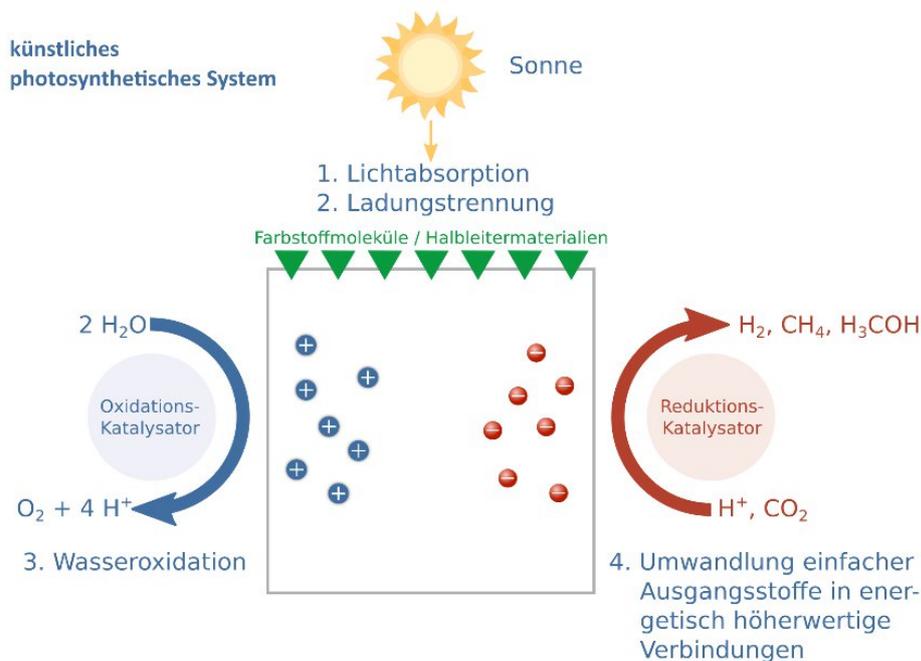


Abb. 3: Teilprozesse der künstlichen Photosynthese zur technischen Herstellung von solaren Brennstoffen und Grundchemikalien aus CO₂ mit H₂O als Wasserstoffquelle; vereinfachte Darstellung nach [7]

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.)

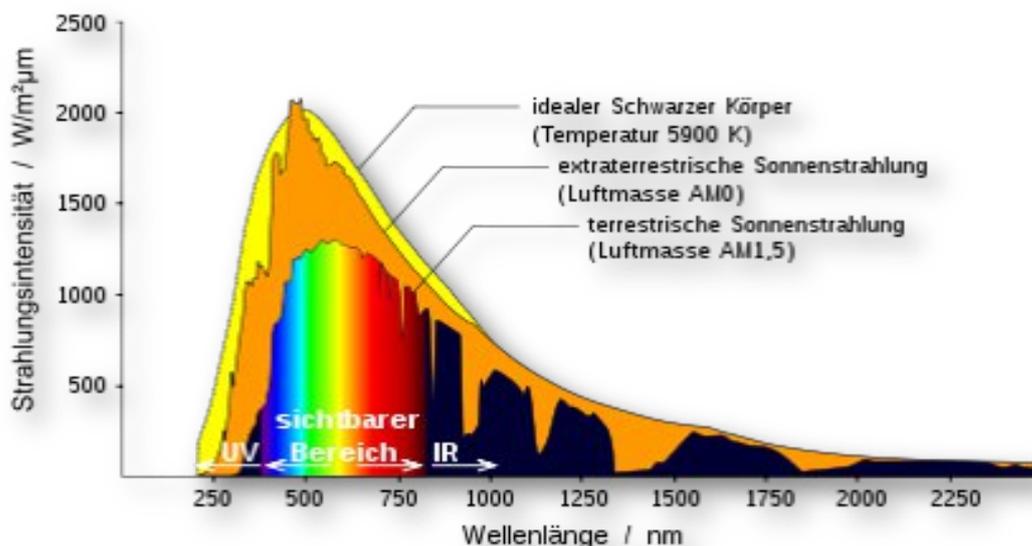


Abb. 4: Spektrum der terrestrischen Sonnenstrahlung (AM 1.5) mit farblich markiertem Teil des sichtbaren Spektrums; AM 1.5 entspricht einem Einstrahlungswinkel der Sonne von $48,2^\circ$, bei dem der Weg des Lichts durch die Luftmassen der Erde (Air Mass AM) das 1,5-fache der Atmosphäre beträgt.

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).

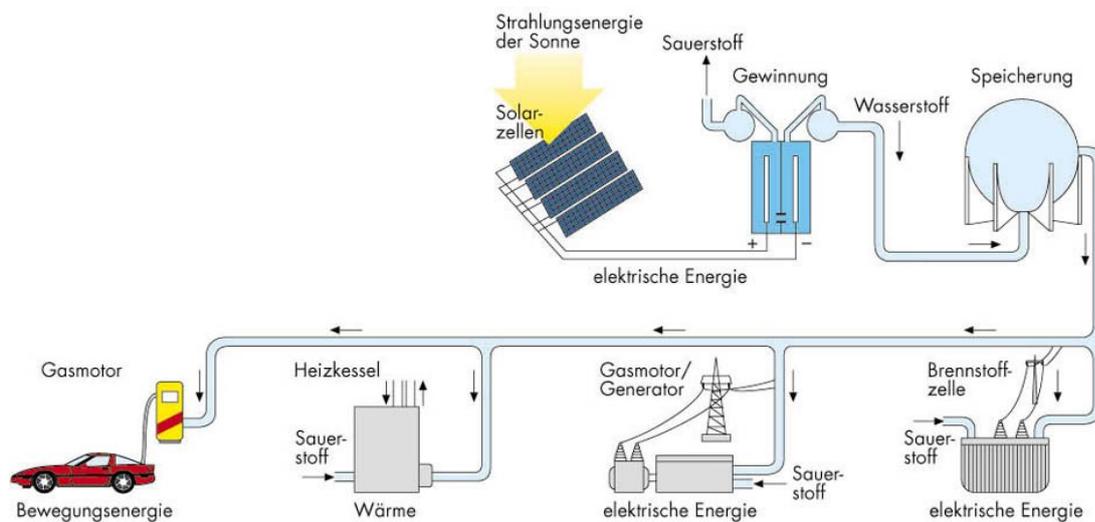


Abb. 5: Szenario mit Solarwasserstoff auf der Basis von Photovoltaik und Wasserelektrolyse [2]

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].

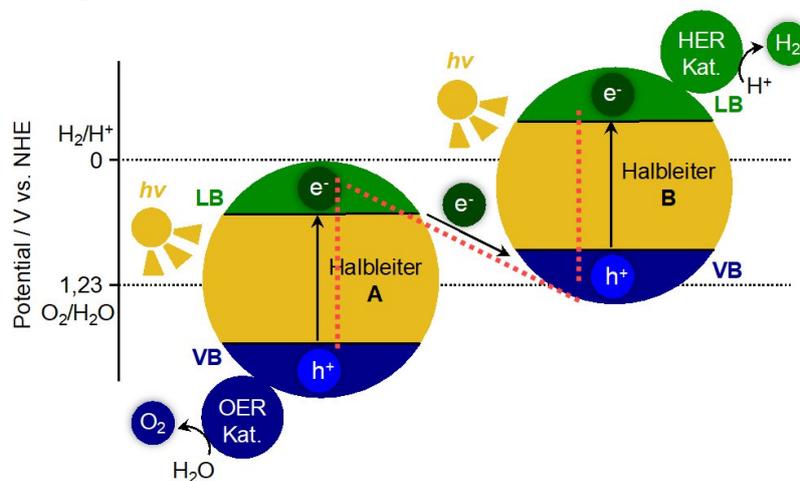


Abb. 6: Schematische Darstellung des Z Schemas (gepunktete rote Linie) bei einem Photokatalysesystem aus zwei unterschiedlichen Halbleiter-Nanopartikeln (Grafik aus Lit. [14])

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].

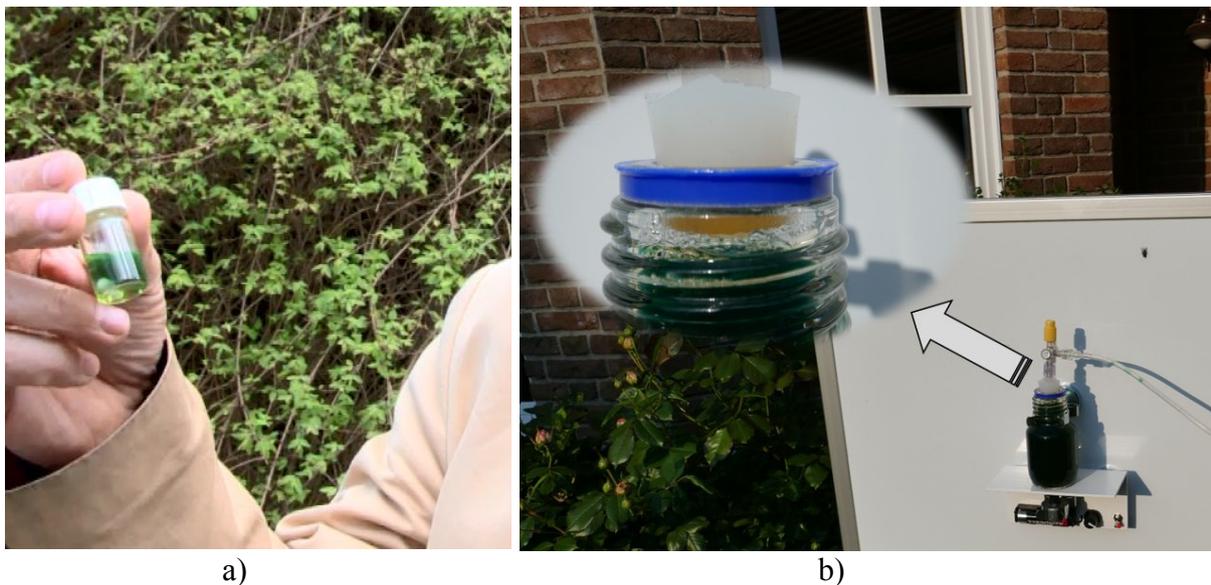


Abb. 7: Zwei Photo-Blue-Bottle Experimente: a) Die Blaufärbung der PBB-Lösung bei Bestrahlung mit Sonnenlicht geht mit der Bildung der reduzierten Form des Redoxmediators einher; b) bei Zusatz von Nano-Platin in die PBB-Lösung und weiterer Bestrahlung bildet sich Wasserstoff (Fotos aus [14])

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 Laborausstattung 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

Licht für Nachhaltigkeit

Michael W. Tausch

Kapitel 2

Was ist Licht?

Zu dieser Frage habe ich in einem Lehrbuch für Studierende und Lehrende der Chemie einleitend folgenden metaphorischen Vergleich entworfen [1]:

“Die Suche nach einer eindeutigen Antwort auf die Frage „Was ist Licht?“ würde uns in ein Labyrinth führen, aus dem wir den richtigen Ausgang nicht finden könnten. Auf den Wänden dieses Irrgangs würden wir Bilder und Ideen aus Religionen und Zivilisationen, Geistes- und Naturwissenschaften, literarischen und anderen Kunstwerken erkennen, die in Bezug auf die Frage „Was ist Licht?“ spannend und anregend, bildend und aufschlussreich erscheinen. Doch Vorsicht! Was den Ausgang aus dem Labyrinth anbetrifft, also die endgültige Antwort auf die Titelfrage, wäre jeder dieser Gedanken am Ende unvollkommen und verführerisch. Um uns nicht in diesem Labyrinth zu verirren und dennoch einige seiner interessantesten Stellen zu erkunden, greifen wir diese auf und zoomen sie jeweils heran. Es ist nicht zwingend notwendig, aber sinnvoll, in historischer Reihenfolge vorzugehen, handelt es sich doch dabei auch um Meilensteine in der menschlichen Zivilisation“.



Anders als in dem Lehrbuch werde ich die „Bilder und Ideen von den Wänden des Labyrinths“ hier nicht in historischer Reihenfolge darstellen. Stattdessen werde ich sie nach Kriterien aufschlüsseln, bei denen die Wahrnehmung des Phänomens Licht sowie seine Deutung und Erklärung durch die Menschen kennzeichnend sind. Dabei werden zwar auch einige geschichtsträchtige Daten und Namen, an denen Hypothesen und Theorien zum Licht verankert sind, vorkommen. Bestimmend sind aber wissenschafts- und erkenntnistheoretische Aspekte, Vorstellungen, Weltanschauungen und Denkmuster, ja sogar Phantasien, Illusionen und Mythen über das Licht, die sich als historisch unabhängige Konstanten erweisen.

Gegen Ende des Kapitels greife ich zwei Ideen und deren Verwirklichung auf, die in den Jahren 2014 und 2023 mit Nobelpreisen ausgezeichnet wurden. Sie betreffen Einblicke in den räumlichen und zeitlichen Mikrokosmos der Materie mithilfe von ultrakurzen Lichtimpulsen aus Lasern. Die ultimative Grenze messbarer Ereignisse mit Licht ist damit erreicht. Aber hinter dem Horizont des Messbaren gibt es noch Denkbare. Auch das ist ein unverzichtbarer Bestandteil für die vollständige Antwort auf die Titelfrage dieses Kapitels. Als Naturwissenschaftler begibt man sich dabei auf rutschiges Terrain, aber man muss es wagen.

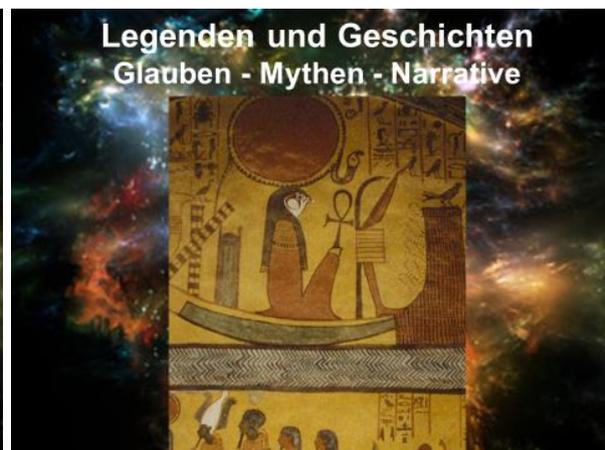
Legenden und Geschichten: Glaube - Mythen - Narrative

„Und Gott sprach: ‚Es werde Licht‘. Und es ward Licht.
Und Gott sah, dass das Licht gut war.“

So steht es ganz am Anfang der Bibel, in den Versen 3 und 4 im Ersten Buch Mose, der Schöpfungsgeschichte (Genesis). Wieso glaubten die Schreiber des Alten Testaments, dass Licht eine Urschöpfung sein musste, die *vor* den nachfolgenden Schöpfungen, den Pflanzen, den Tieren und Menschen, da gewesen sein muss? Stimmt das überhaupt?

Es stimmt. Denn nach heutiger wissenschaftlicher Erkenntnis entstand Licht kurz nach dem Urknall des Universums, der sich vor 13,7 Milliarden Jahren ereignete. Bereits kurz danach, 380 000 Jahre später, entstand Licht durch die so genannte Entkopplung von Strahlung und Materie. Die ersten Galaxien bildeten sich erst 100 Millionen Jahre nach dem Urknall. In der weiteren Geschichte des Weltalls, insbesondere bei der chemischen und biologischen Evolution auf unserem Planeten war das Licht entscheidend beteiligt.

Von diesen heute vielfach belegten und allgemein anerkannten Erkenntnissen der Wissenschaft waren die Urheber des Alten Testaments noch weit entfernt. Aber sie glaubten an den Vorrang des Sonnenlichts bei der Entstehung des Lebens und des Menschen, der „Krone der Schöpfung“. Wir haben allerdings Grund anzunehmen, dass die Autoren der eingangs zitierten Verse gar nicht die ersten waren, die diesem **Glauben** anhängen.



Die Quellen der biblischen Schöpfungsgeschichte sind mit großer Wahrscheinlichkeit in der vorbiblischen ägyptischen Antike im zweiten und dritten Jahrtausend vor Christus anzusiedeln. Die Menschen am Nil huldigten in jenen fernen Zeiten über viele Jahrhunderte hinweg dem Sonnengott *Re*. In der ägyptischen Mythologie verehrte man zwar mehrere Gottheiten, doch unter ihnen nahm *Re* den höchsten Rang ein und wurde zeitweilig - immerhin über einige Jahrhunderte hinweg - als einzige Gottheit anerkannt. Während mehrerer Dynastien glaubte man, dass *Re* jeweils einen Pharaon für die Dauer eines Menschenlebens auf die Erde entsandte und ihn nach seinem Tod wieder zu sich zurücknahm, um „mit ihm wieder eins zu werden“ - wie *Thomas Mann* in seinem Roman „Josef und seine Brüder“ geschichtstreu in der ihm

einzigartigen literarischen Kunst auszumalen weiß [2]. Diesen *Re* verehrten die Ägypter in Heliopolis, der „*allerseltsamsten Stadt, die Joseph bis dahin gesehen, vorwiegend aus Gold gebaut, wie dem Geblendeten schien, dem Haus der Sonne*“ [2].

Solche und ähnliche **Mythen** wurden bis zur Niederschrift der biblischen Schöpfungsgeschichte von Generation zu Generation weitererzählt. Der gemeinsame Kern dieser **Narrative** liegt in der Bedeutung des Sonnenlichts für die Entstehung und den Fortbestand des Lebens auf unserem Planeten. Was aber Licht „an sich“ ist, blieb noch für weitere Jahrtausende in einer Aura von Mystik und Magie verborgen, bis zum Zeitalter der Alchemie und darüber hinaus - teilweise bis heute.

Die Alchemie im 17. und 18. Jahrhundert nach Christus ist die Vorgängerin der heutigen Naturwissenschaft Chemie. Sie wurde zwar oftmals als unwissenschaftlich apostrophiert, verdient hier aber einen kurzen Einblick, denn sie war eine sehr interessante und produktive Periode - auch im Zusammenhang mit unserer Frage „Was ist Licht?“.



Abb. 1: Der Hamburger Alchemist und Apotheker *Hennig Brand* entdeckte 1669 einen „*phosphorus mirabilis*“ (geheimnisvollen Lichtträger“).

Auf der Suche nach dem alleskönnenden „Stein der Weisen“ haben Alchemisten Labortechniken erfunden und perfektioniert, neue Stoffe entdeckt und Vorstellungen über ihren Aufbau und ihre Umwandlungen entwickelt. Als *Hennig Brand* im Jahr 1669 den Rückstand aus eingedampftem Urin weiter erhitze, erhielt er einen geheimnisvollen Stoff, der im Dunkeln kaltes Licht ausstrahlte (Abb. 1). Einige Zeitgenossen vermuteten euphorisch, der lang gesuchte „Stein der Weisen“ sei endlich gefunden. Doch zur Enttäuschung der goldhungrigen Fürsten erwies sich Brands neuer Stoff „nur“ als das chemische Element Phosphor. Für die Wissenschaft war diese Entdeckung jedoch bahnbrechend. Besonders die Tatsache, dass Phosphor aus „lebender Materie“ (Urin) gewonnen wurde und dass er an der Luft kaltes Licht aussendet, führte über mehrere Jahrzehnte zu teilweise wilden Spekulationen und Verwirrungen. Denn man befand sich im ausklingenden Zeitalter der Alchemie und in der Blütezeit Phlogistontheorie wonach aus einem verbrennenden Stoff eine hypothetische Substanz entweicht, die *Georg Ernst Stahl* (1660-1734) Phlogiston nannte. Diese Annahme erscheint auch heute noch durchaus logisch, denn die Erfahrung zeigt, dass beim Verbrennen vieler Stoffe wie Kohle, Holz oder Öl etwas aus ihnen entweichen muss, weil sie weniger und leichter werden. Es ist also nicht verwunderlich, dass alle Chemiker von Ruf noch 100 Jahre nach der Entdeckung des Phosphors der Phlogistontheorie anhängen.

Das Ende dieser irrigen Annahme und damit eine wissenschaftliche Revolution in der Chemie [3] leitete *Antoine L Lavoisier* in seinem „*Mémoire sur la combustion en général*“ ein [4]. Er stellte fest, dass Stoffe beim Verbrennen nicht an Gewicht verlieren, sondern sogar

dazugewinnen und schloss daraus, dass sie sich mit „etwas“ aus der Luft verbinden. Dieses „etwas“ nannte er *oxygène* (Sauerstoff) und begründete so die auch heute noch gültige Sauerstofftheorie der Verbrennung. *Lavoisier* erklärte auch das kalte Leuchten des Phosphors hundert Jahre nach dessen Entdeckung (Abb. 1) zutreffend und einwandfrei. Es handelt sich um eine Begleiterscheinung bei der Oxidation von Phosphor, also seiner Reaktion mit dem Sauerstoff aus der Luft. Für das kalte Leuchten beim Ablauf einer chemischen Reaktion wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts der Begriff Chemolumineszenz geprägt und wenn die Reaktion innerhalb eines lebenden Organismus erfolgt, spricht man von Biolumineszenz.

Ganz gleich ob außerhalb oder innerhalb von Lebewesen, kaltes Licht als Erscheinung bei einer Oxidation blieb weiterhin mysteriös. Es unterscheidet sich grundlegend von dem heißen Licht in der Flamme eines brennenden Stoffs. Könnte das kalte Licht so etwas wie das „Elixier des Feuers“ sein, also das, was übrigbleibt, wenn man dem heißen Feuer die Wärme entzieht? Wir suchen nach einer möglichen Antwort durch folgenden Perspektivenwechsel von den Mythen und Legenden zu den Methoden wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung.

Dreiklang wissenschaftlicher Erkenntnis: Vermutung - Wissen - Zweifel

„Die Farben sind Taten des Lichts“.

mit dieser poetischen Umschreibung bringt *Johann Wolfgang Goethe* in seiner Farbenlehre [5] auf den Punkt, was im weiteren Verlauf dieses Abschnitts weniger romantisch, aber gleichermaßen leidenschaftlich und überzeugend vermittelt werden will. Goethe lag mit dieser **Vermutung** auch nach heutiger Erkenntnis goldrichtig. Das kann tatsächlich so knapp und klar behauptet werden, obwohl es weniger bekannt ist als der Irrtum, dem der Dichterrfürst unterlag, als er 1815 schrieb:

„Auf alles, was ich als Poet geleistet habe, bilde ich mir gar nichts ein... Dass ich aber in meinem Jahrhundert in der schwierigen Wissenschaft der Farbenlehre der einzige bin, der das rechte weiß, darauf tue ich mir etwas zugute, und ich habe das Bewusstsein der Superiorität über viele ...“ [6]

In dieser Selbsteinschätzung übertrieb *Goethe* nicht nur, sondern lag im Kern völlig falsch. Er vertrat irrtümlicherweise die Meinung, weißes Licht sei „rein“, es ließe sich nicht in andere Farben zerlegen.



Das ist umso bemerkenswerter, als *Isaac Newton* zu Beginn des 18. Jahrhunderts, also bereits hundert Jahre vor dem Erscheinen von Goethes „Farbenlehre“, in einem bahnbrechenden Experiment genau das Gegenteil herausgefunden hatte. Er hatte nicht nur weißes Licht mit

einem Prisma in die Regenbogenfarben zerlegt, sondern auch beobachtet, dass das herausgetrennte Licht einer bestimmten Farbe, z. B. grünes Licht, durch ein zweites Prisma nicht weiter zerlegt wird. Wenn er aber zwei Lichtstrahlen verschiedener Farben, z. B. grünes und rotes Licht übereinanderlegte, erhielt er eine neue Farbe, in diesem Fall Gelb. Damit hatte er auch die additiv zusammengesetzten Farben experimentell erzeugt, die uns heute als Farbpixel von den Displays der Smartphones anleuchten.

Das **Wissen** aus Newtons experimentellen Fakten hat *Goethe* Zeit seines Lebens vehement bestritten und in mehreren polemischen Schriften verpönt. Es ist aber einzuräumen, dass seine „Farbenlehre“ auch einige zutreffende Gesichtspunkte enthält, beispielsweise den, dass verschiedene Farben unterschiedliche chemische Reaktionen auslösen können. Denn Farben sind das Resultat der Wechselwirkung von Licht mit Stoffen. Unser heutiges Wissen darüber steht in voller Übereinstimmung mit Goethes Vermutung, dass Farben „Taten des Lichts“ sind.

Zurück zu *Newton*: Aus der Summe seiner Beobachtungen entwickelte er die so genannte *Korpuskeltheorie* des Lichts [7]. Danach besteht ein Lichtstrahl aus winzigen, sich geradlinig bewegenden Teilchen, die man heute - nicht aber zu *Newtons* Zeit - *Photonen* (oder *Lichtquanten*) nennt. Weißes Licht besteht aus einem Mix von unterschiedlichen Photonen. Enthält ein Lichtstrahl nur eine ganz bestimmte Art von identischen Photonen, so hat er eine ganz bestimmte Spektralfarbe - es handelt sich um *monochromatisches* Licht. Weißes Licht ist niemals monochromatisch, sondern immer *polychromatisch*. Licht einer bestimmten Farbe kann - muss aber nicht! - monochromatisch sein. Eigentlich handelt es sich bei Newtons Korpuskeltheorie um eine Teilchen*hypothese*, also eine **Vermutung** über die Natur des Lichts. Sie beherrschte die Naturwissenschaften bis ins 19. Jahrhundert, als sie durch neues Wissen aus experimentelle Fakten ins Wanken geriet, durch die „Wellentheorie“ ersetzt wurde, um mit dieser im 20. Jahrhundert in der „Quantentheorie“ zu verschmelzen (vgl. dazu auch folgenden Abschnitt „Erhellender Vergleich: Licht und Photonen versus Stoffe und Moleküle“).

Im Gegensatz zu *Goethe*, der von seiner Farbenlehre uneingeschränkt überzeugt schien, war *Newtons* Verhältnis zu seiner Teilchenhypothese trotz der experimentellen Fakten, die sie unterstützen, eher skeptisch. Er hatte **Zweifel** an ihrer uneingeschränkten Gültigkeit. *Frank Wilczek* (Nobelpreis für Physik, 2004) kommentiert das so: „*he flirted with it, but did not commit himself to it exclusively*“ [8].

Selbst *Albert Einstein*, der für seine 1905 publizierte Erklärung des photoelektrischen Effekts im Jahr 1921 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet worden war, bekannte in seinem letzten Lebensjahr 1955:

„Fünfzig Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage: Was sind Lichtquanten? nicht nähergebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich.“

Dieses Kaleidoskop aus Daten, Namen und Zitaten belegt das Wechselspiel zwischen Vermutungen, durch experimentelle Fakten belegtes Wissen und Zweifeln bei der Beantwortung der Frage „Was ist Licht?“. Die eingeblendeten erkenntnistheoretischen Spots aus den letzten drei Jahrhunderten verdeutlichen, dass auch in den als „harte“ Naturwissenschaften geltenden Disziplinen Physik und Chemie die Theorien lediglich den Rang von Vermutungen (Hypothesen) haben, die man ersetzt, wenn sie durch neues Faktenwissen und/oder tiefere Überlegungen in Zweifel geraten oder gar falsifiziert werden. Das steht im Einklang mit den philosophischen Ansichten der Wissenschaftstheoretiker *Thomas Kuhn* und *Karl Popper* [3, 9].

Zudem zeugen die obigen Ausführungen auch davon, dass Geistesgrößen, im Vergleich zu denen wir „Wichte“ sind, zweifeln und scheitern, wenn sie die Frage „Was ist Licht?“ eindeutig und endgültig beantworten müssen. Als ein solcher Wicht, der ich auch bin, schließe ich den

vorliegenden Abschnitt über die Frage nach dem Wesen des Lichts, indem ich einen bekannten und vielzitierten Aphorismus von *Berthold Brecht* [10] geringfügig geändert paraphrasiere:

„*Wir stehen selbst enttäuscht und sehn betroffen / Den Vorhang zu und diese Frage offen.*“

Da ich an dieser Stelle aber weder wissen will „was die Welt im Innersten zusammenhält“, noch „was Lichtquanten wirklich sind“, beantworte ich die Titelfrage des gesamten Kapitels aus Sicht eines pragmatischen Chemikers, indem ich mich im Sinne meines Faches mithilfe eines Vergleichs auf sicheres Terrain zu retten versuche.

Erhellender Vergleich: Licht und Photonen *versus* Stoffe und Moleküle

Was ist *Licht*? Im Alltag empfinden wir Licht als die Erscheinung von Helligkeit, als den Gegensatz von Dunkelheit. Physikalisch verbinden wir Licht mit einer Form von *Energie*, die sich in andere Energieformen wie Wärme, elektrische und chemische Energie umwandeln lässt. Beherrzt und kaltschnäuzig, ohne tiefere philosophische Hinterfragung, kann man behaupten: Das für uns Menschen sichtbare Licht ist ein sehr schmaler Ausschnitt aus dem Spektrum der *elektromagnetischen Strahlung*, also einer Existenzform der Materie, für deren allergrößten Teil wir blind sind (vgl. Abb. 2). Erstaunlicherweise reicht das sichtbare Licht der Sonne in diesem schmalen Bereich des Spektrums elektromagnetischer Strahlen für uns Menschen aus, um mithilfe der Augen und des Gehirns in der Lage zu sein, alle Farben des Regenbogens in feinsten Auflösung (in mehreren Tausend Farbtönen) zu unterscheiden. Von eminenter und höchster Bedeutung ist aber die Tatsache, dass dieser schmale Bereich des sichtbaren Lichts ausreicht, um alles höhere Leben auf diesem Planeten anzutreiben (vgl. Kap. 2, Abschnitt „Licht - alles was wir brauchen?“).

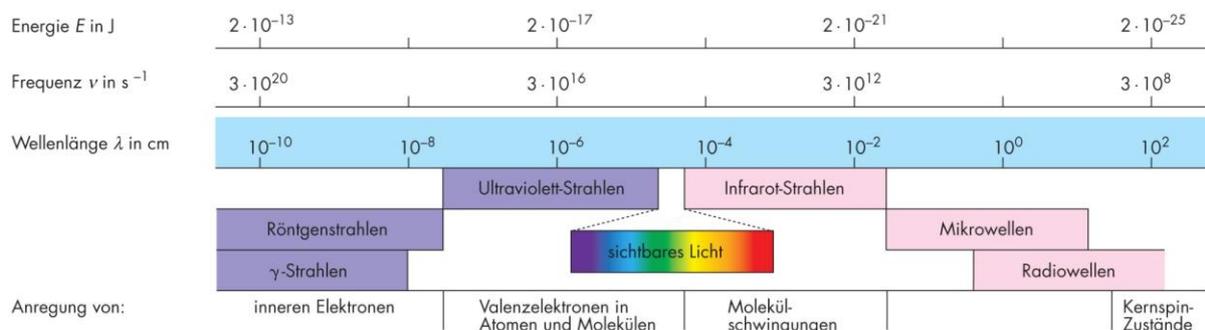


Abb. 2: Energieskala zum Spektrum der elektromagnetischen Strahlung. Wellenlänge λ , Frequenz ν und Energie E sind über folgende Gleichungen miteinander verknüpft: $E = h \cdot \nu$ und $\nu = c/\lambda$ (h ist die Planck'sche Konstante mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c ist die Lichtgeschwindigkeit mit $c = 2,99793 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); (Bild aus © Tausch/von Wachtendonk, CHEMIE 2000+, Gesamtband, C. C. Buchner, 2007)

Und was sind *Lichtquanten* oder *Photonen*? Aus Sicht eines pragmatischen Chemikers erweist es sich als erhellend und nützlich, die Lichtquanten (Photonen) als kleinste „Energiepäckchen“ elektromagnetischer Strahlung zu interpretieren. Sie unterscheiden sich in ihrem Energiegehalt E , der direkt proportional zur Frequenz ν und umgekehrt proportional zu ihrer Wellenlänge λ ist (vgl. Gleichungen und Konstanten in der Legende zu Abb. 2).

Es mag wundern, dass die Energie der Photonen (Lichtquanten) mithilfe von Größen charakterisiert wird, die für Wellen charakteristisch sind, nicht für Teilchen. Photonen sind ebenso wie Elektronen *Quantenobjekte*, die sich nach *Nils Bohr* (Nobelpreis für Physik, 1922) durch eine bizarr anmutende Eigenschaft auszeichnen, dem *Teilchen-Welle-Dualismus* basierend auf dem *Komplementaritätsprinzip*. Danach ist ein Quantenobjekt weder Teilchen noch Welle. Es kann aber Teilchen- oder Welleneigenschaften zeigen, je nachdem, welches

Experiment damit durchgeführt wird. In Abb. 3 sind Beobachtungen aus zwei aufschlussreichen Experimenten dargestellt. In dem einen (Abb. 3 a) verhält sich der grüne Lichtstrahl bei der Reflexion an Spiegeln wie ein Strahl aus winzigen elastischen Kügelchen, die auf eine Wand treffen und zurückgestoßen werden.



Abb. 3: a) Experiment zur Reflexion eines Laserstrahls aus grünem Licht; b) Experiment zur Beugung und Interferenz eines grünen Laserstrahls; (Screenshots aus dem Film: <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/einfuehrende-videos/was-ist-ein-photon/>; (© M. W. Tausch et al.)

In dem anderen Experiment (Abb. 3 b) verhält sich der Lichtstrahl wie ein Paket aus Wellen, die sich an einem Hindernis (hier ein schmaler Spalt in einer Blende) brechen und neue, sich überlagernde Wellen erzeugen (Beugung und Interferenz).

Als auflockernde Einführung in den Teilchen-Welle-Dualismus habe ich zusammen mit meiner Wuppertaler Arbeitsgruppe den in Abb. 3 verlinkten Lehrfilm mit dem Titel „Was ist ein Photon?“ konzipiert, produziert und *online* gestellt. Darin interessiert sich ein naturwissenschaftlicher Laie für die Antwort auf die Titelfrage dieses Kapitels und sucht sie bei einer jungen Wissenschaftlerin. Diese unterrichtet ihn über die komplementären, d.h. nach unserer gewohnten Denkweise sich logisch ausschließenden Eigenschaften des Photons und veranschaulicht sie mithilfe der beiden Experimente aus Abb. 3. Der besondere Reiz des Films liegt in der metaphorischen Szene, mit der er endet: Die beiden Protagonisten besuchen im Wuppertaler Skulpturengarten eine Plastik mit dem Namen „Photon“. An diesem Meisterwerk des Künstlers *Tony Cragg* geben sie ihrer Fantasie freien Lauf und entdecken in dem originellen Kunstwerk eine sinnbildliche Analogie zum Teilchen-Welle-Dualismus des Photons.

Es muss zuzugeben werden, dass diese Analogie (und andere) einer exakten und abschließenden Antwort auf die Frage „Was ist ein Photon?“ eigentlich aus dem Weg geht. Da es aber keine eindeutige, allgemein anerkannte Antwort auf die Frage „Was ist ein Photon?“ gibt (vgl. dazu voranstehenden Absatz „Dreiklang wissenschaftlicher Erkenntnis: Vermutung - Wissen - Zweifel“), können solche Analogien nützlich sein, um Laien, Schüler und Studierende für den Teilchen-Welle-Dualismus der Photonen zu sensibilisieren und für die Möglichkeiten, die in der Nutzung von Licht liegen, neugierig zu machen. Das ist insbesondere für die heutige Schul- und Studienjugend ein dringender Auftrag. Von dieser Generation ist zu hoffen, dass sie innovative Verfahren mit Licht wie die künstliche Photosynthese (vgl. Kap. 2) in den folgenden Dekaden des 21. Jahrhunderts erforscht, zur technischen Reife bringt und ihre Anwendung vorantreibt.

In der Chemie, der „Lehre über die stofflichen Metamorphosen der Materie“ [11], nehmen die kleinsten Teilchen, aus denen Stoffe bestehen, also Begriffe wie Atome, Moleküle und Ionen, einen obligatorischen Platz im Denken, Forschen und Argumentieren ein. Es ist nicht nur nützlich, sondern sogar unverzichtbar, diese Teilchen als winzige Körner „cum grano salis“ zu betrachten. Um einen direkten Bezug zu diesen Grundbausteinen der Chemie herzustellen, ist es zweckmäßig, die Photonen ebenfalls als *Teilchen* zu deuten, wie es auch *Newton* in seiner *Korpuskeltheorie* des Lichts tat. Allerdings wollen, können und dürfen wir nicht darauf

verzichten, ihre Energie mithilfe von Welleneigenschaften zu definieren ($E = h \cdot \nu$). Wir deuten ein Photon also als ein winziges Korn („cum grano salis“), behalten aber im Hinterkopf, dass das nur die halbe Wahrheit ist.

Salopp können wir jetzt sagen: Die Photonen oder Lichtquanten sind im „Zoo“ der Lichtstrahlen ungefähr das, was die Atome, Ionen und Moleküle im „Zoo“ der Stoffe sind, eben die kleinsten Teilchen aus dem Licht bzw. die kleinsten Teilchen aus dem Stoff. So redend und denkend haben wir das Begriffspaar „Licht und Photonen“ dem Begriffspaar „Stoff und Moleküle“ semantisch angepasst. Wir werden im weiteren Verlauf die Wechselwirkung von Licht mit Stoffen auf der Ebene der Elementarteilchen als Interaktion von Photonen mit Molekülen auffassen und beschreiben. Genaueres dazu folgt im übernächsten Abschnitt „Eine kurze Ehe - die Vereinigung zwischen Photon und Molekül“.

Vorher wollen wir aber noch klären, was jene Bereiche der elektromagnetischen Strahlung sind, für die unser menschliches Auge blind ist. Der schmale Ausschnitt mit den Regenbogenfarben aus Abb. 2 umfasst die elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 370 und 740 Nanometern (ein Nanometer nm ist ein Milliardstel Meter, d.h. $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Diesen Bereich bezeichnet *Frank Wilczek* (Nobelpreis für Physik, 2004) als „*Rohmaterial für den menschlichen Sehprozess*“ [8]. Er weist darauf hin, dass zwischen den Wellenlängen der Photonen vom energiereichsten und dem energieärmsten Rand, des für uns visuell erfassbaren Bereichs der elektromagnetischen Strahlen, also von Photonen mit $\lambda = 370 \text{ nm}$ und solchen mit $\lambda = 740 \text{ nm}$, das Verhältnis 1:2 besteht. Interessanterweise ist auch das Verhältnis der Wellenlängen bei den Tönen einer musikalischen Oktave ebenfalls 1:2. Unser Hören und Sehen ist so „designt“, dass wir Töne, also Schallwellen, über mehrere Oktaven wahrnehmen, wir aber nur für Farben innerhalb einer „Oktave“ von Lichtwellen empfänglich sind. Und auch innerhalb dieser „Oktave“ nutzen wir nicht das ganze „Rohmaterial“ an Photonen. Die Farbrezeptoren in unseren Augen sind auf die Farben Rot, Grün und Blau RGB beschränkt. Dass wir dennoch alle anderen Farben wahrnehmen können, liegt an der Zusammenarbeit von Augen, Sehnerven und Gehirn. Was für Strahlung gibt es aber bei größeren Wellenlängen als 740 nm jenseits von Rot und bei kleineren Wellenlängen als 370 nm jenseits von Violett?

Ein Blick ins Unsichtbare: Infrarot, Ultraviolett & Co.

Es gibt in der Geschichte der Naturwissenschaften herausragende „historische“ Experimente, die aus heutiger Sicht bahnbrechende Meilensteine in der Entwicklung mehrerer naturwissenschaftlichen Disziplinen darstellen. Herausragende Beispiele sind die Experimente aus dem Jahr 1895 von *Wilhelm Conrad Röntgen* (Nobelpreis für Physik 1901) mit der nach ihm benannten Röntgenstrahlung und die Experimente aus dem Jahr 1896 von *Henry Becquerel* (Nobelpreis für Physik 1903 zusammen mit *Marie* und *Pierre Curie*) bei der Entdeckung der radioaktiven Strahlung. Diese Experimente lösten in der Physik und Chemie regelrechte Lawinen von Folgeexperimenten und Entwicklungen aus, die letztlich alle Naturwissenschaften samt ihren Auswirkungen in der Technik und in der Gesellschaft nachhaltig mitbestimmt haben. Historische Experimente dieser Art sind die „Nobelpreisträger“ unter den Experimenten, haben sie doch in der Regel zu Nobelpreisen für ihre Urheber geführt - allerdings erst seit es diese Auszeichnung gibt, also erst ab Beginn des 20. Jahrhunderts.

Zu den weniger bekannten Experimenten, die das Prädikat „historisch“ verdienen, gehören auch die Nachweise der infraroten und der ultravioletten Strahlung aus denjenigen Teilen im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, die an den Bereich des sichtbaren Lichts angrenzen (vgl. Abb. 2). Dafür gab es auch keine Nobelpreise, denn sie datieren aus den ersten Jahren des damals angehenden 19. Jahrhunderts.

Im Jahr 1800 stellte der deutsch-britische Astronom und Musiker *Friedrich Wilhelm Herschel* fest, dass ein Thermometer, das im Dunkelbereich jenseits von Rot außerhalb des sichtbaren Bereichs des Spektrums platziert wird, eine höhere Temperatur anzeigt als im roten Bereich des Spektrums. Damit hatte er die **infrarote Strahlung (IR-Strahlung)**, entdeckt und nachgewiesen, dass es sich dabei um *Wärmestrahlung* handelt. Die Sonnenstrahlung, die den Erdboden erreicht, besteht zu fast 50% aus unsichtbarer IR-Strahlung (vgl. Abb. 5 in Kap. 1). Von der Erdoberfläche wird ebenfalls IR-Strahlung erzeugt und abgestrahlt, wenn beim Treibhauseffekt sichtbares Sonnenlicht absorbiert und in Wärmestrahlung umgewandelt wird (vgl. Abb. 1 in Kap. 1). Der Wellenlängenbereich der Infrarotstrahlung reicht von $\lambda = 740 \text{ nm}$ bis $\lambda \approx 1 \text{ mm}$ ($1 \text{ mm} = 1.000.000 \text{ nm}$) und ist damit wesentlich breiter als der des sichtbaren Bereichs. Elektromagnetische Strahlen mit noch größeren Wellenlängen als die IR-Strahlen sind die *Mikrowellen* (bis $\lambda \approx 30 \text{ cm}$) und die *Radiowellen* (bis $\lambda \approx 10 \text{ km}$). Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Energie der Photonen ab. So zum Beispiel beträgt die Energie eines Photons aus den Radiowellen ca. ein Millionstel der Energie eines Photons aus dem sichtbaren Licht (vgl. Abb. 1). Dennoch haben auch die Photonen aus den Bereichen Infrarot, Mikrowellen und Radiowellen wichtige Anwendungen sowohl in Alltagsgeräten (Mikrowellenherd, Rundfunk, Telefon) als auch in wissenschaftlichen und medizinischen Instrumenten und Apparaturen (Infrarotspektroskopie, Kernspinresonanzspektroskopie, Magnetresonanztomographie, Elektroenzephalographie).



Bereits im Jahr 1801, also kurz nach der Entdeckung der IR-Strahlung, wurde die **ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung)** von *Johann Wilhelm Ritter* in einem scharfsinnig konzipierten und ausgeführten Experiment nachgewiesen. Er vermutete, dass sich das Strahlenspektrum nicht nur jenseits von Rot, sondern auch jenseits von Violett fortsetzen musste und war sich sicher, dass er nicht durch Temperaturmessung, sondern anders vorgehen musste, um das nachzuweisen. *Ritter* verwendete ein chemisches Reagenz, das bei Lichteinstrahlung geschwärzt wird, allerdings unterschiedlich stark je nach Farbe des Lichts. Bei dem Reagenz handelt es sich um Silberchlorid, zu jener Zeit als „Hornsilber“ bekannt. Damit führte er ein Experiment durch, in dem er nachwies, dass die Schwärzung des Reagenzes Silberchlorid bis zum violetten Bereich des sichtbaren Lichts immer stärker wird und jenseits des violetten Bereichs, also dort, wo man keine Farbe mehr sieht, noch stärker ist. *Ritter* beschreibt dieses Experiment in dem er die UV-Strahlung durch ihre chemische Wirkung nachwies, wie folgt:

„Einen etwa acht Zoll langen Streifen starkes weißes Papier überstrich ich mit feuchtem aber erst bereiteten Hornsilber, und ließ im dunklen Zimmer das reinliche Spectrum des Prisma's, in der Entfernung von fünfzig bis sechzig Zoll von diesem, auf dessen Mitte fallen. Das Hornsilber fing zuerst, und äußerst schnell, in einer beträchtlichen Entfernung vom äußersten Violett nach außen, an, schwarz zu werden; erst darauf folgte das im Violett selbst nach, und ganz zuletzt that es die schwächste nach innen gelegene Nuance des sich ins Grün

verlierenden Blaues. Durch das Gelb hindurch bis ins Roth und darüber hinaus aber, blieb das Hornsilber weiß, wie lange es auch diesem Lichte ausgesetzt bleiben mochte. Beym Herausnehmen des Streifens ..., fand ich die stärkste Schwärzung in der Entfernung eines guten halben Zolles vom äußersten Violett...“ [12]

Dieser Originaltext in der verziert dekorativen Ausdrucksweise der Romantik vom Anfang des 19. Jahrhunderts beschreibt das Experiment so klar und präzise, dass es 200 Jahre nach seiner Verschriftlichung von meinen Studierenden problemlos reproduziert werden konnte. *Ritter*, der nicht nur Entdecker der UV-Strahlung, sondern auch Mitbegründer der damals sehr jungen Elektrochemie ist, hatte regen Gedankenaustausches mit Schriftstellern und Philosophen wie *Novalis* und *Schelling* und war einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler der Romantik. Stilistisch wird das noch deutlicher als in dem Text zum Nachweis der UV-Strahlung, wenn *Ritter* folgendermaßen ins romantische Schwärmen gerät [13]:

„Licht ist die Quelle jeglicher Kraft, die Leben schafft und Thätigkeit; der zeugende Samen alles Guten, was die Erde trägt Licht.“

Schöner kann man die fundamentale Bedeutung des Lichts für unser Dasein auf dem Planeten Erde nicht in Worte fassen.

Der gesamte UV-Bereich im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung wird in UV-A (mit Wellenlängen $\lambda = 320 \text{ nm}$ bis 380 nm), UV-B ($\lambda = 280 \text{ nm}$ bis 320 nm) und UV-C ($\lambda = 100 \text{ nm}$ bis 280 nm) unterteilt. Während die kurzwelligen UV-C und UV-B Anteile der Solarstrahlung fast vollständig in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre absorbiert werden, enthält das Sonnenlicht in Bodennähe je nach Höhe über dem Meeresspiegel auch einen kleinen Teil UV-A Strahlung (Abb. 4). Beim Einwirken auf die Haut führt sie je nach Hauttyp zur Bräunung. Allerdings ist „knackig braun“ nur in Maßen gesund. Zu starke Exposition im Sonnenlicht oder in UV-Bräunungsröhren hat auch negative Folgen: Es drohen Sonnenbrand, Augenschäden, frühzeitige Hautalterung und langfristig die Gefahr der Bildung von Hautkrebs.

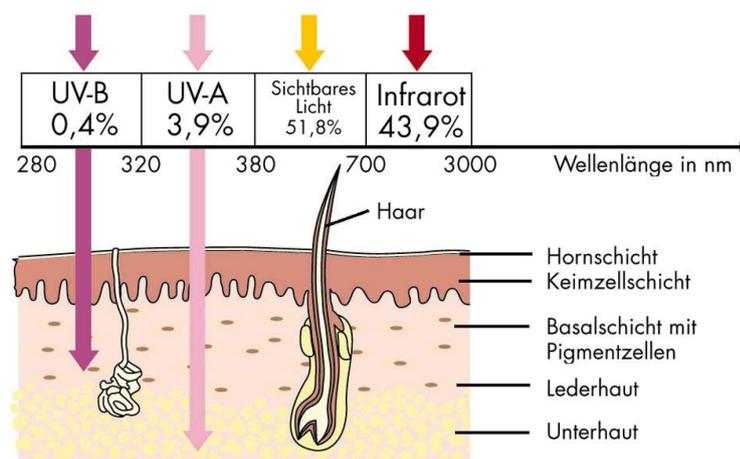


Abb. 4: Strahlungsanteile im Sonnenlicht in Meereshöhe und Eindringtiefen in die Haut (Bild aus © Tausch/von Wachtendonk, CHEMIE 2000+, Qualifikationsphase, C. C. Buchner, 2014)

Hier ist abschließend noch festzuhalten, dass die zu Beginn dieses Abschnitts erwähnten Röntgenstrahlen (oder X-Strahlen) mit Wellenlängen von einem Hundertstel Nanometer bis 100 Nanometer ($\lambda = 0,01 \text{ nm}$ bis 100 nm) und eine bestimmte Art radioaktiver Strahlen, die γ -Strahlen mit noch kleineren Wellenlängen, auf der energiereichsten Seite des Gesamtspektrums elektromagnetischer Strahlung angesiedelt sind (Abb. 2). Die Energien der Photonen aus Röntgenstrahlen und γ -Strahlen sind so groß, dass sie von nahezu allen Molekülen und Atomen aus der Atmosphäre absorbiert werden und daher nicht an die Erdoberfläche gelangen. Sie sind

aber gut untersucht und finden vielfache Anwendungen. Brillante Fotos und pointierte Infotexte dazu, aber auch zu den anderen Strahlenarten aus Abb. 2, haben die beiden NASA-Forscherinnen *Kimberly Arcand* und *Megan Watzke* zusammengetragen und einem opulenten Bilderband mit dem Titel „Licht - mehr als wir sehen“ [14] publiziert. Darin zu schmökern ist ein Genuss für Auge und Verstand.

Eine kurze Ehe: Die Vereinigung zwischen Photon und Molekül

„Es ist nun klar, dass elektronisch angeregte Zustände von Molekülen das Herz aller Photoprozesse sind.“ [15]

Dieser Satz aus dem Lehrbuch der Photochemie von *N. J. Turro* [15] kennzeichnet genau das, was bei der Vereinigung eines Photons mit einem Molekül passiert. Für das Zustandekommen der „Ehe“ zwischen einem Photon und einem Molekül müssen die beiden zueinander passen. Das ist der Fall, wenn das Photon eine ausreichende „Mitgift“ (Energie) mitbringt und das Molekül dem Photon „attraktiv“ erscheint (eine geeignete Struktur hat). Bei der Heirat wird das Photon vom Molekül vollständig geschluckt. Es ist jetzt im elektronisch angeregten Zustand, dem „Herz aller Photoprozesse“. Die Ehe dauert aber nicht lange. Sie ist in der Regel sehr kurz, viel kürzer als eine Sekunde. Wir fragen aber zunächst, warum sie so wichtig sein soll?

Einfach deswegen, weil bei allen Vorgängen, die durch Licht ausgelöst und angetrieben werden, die Bildung des elektronisch angeregten Zustands von Molekülen der erste und zwingend notwendige Elementarschritt ist. Das gilt beispielsweise für die Photosynthese in grünen Blättern ebenso wie für die Erzeugung von elektrischer Energie in Solarzellen oder für die Reaktionen in der Netzhaut unserer Augen beim Sehvorgang.

Wenn wir in dem oben verwendeten Sinnbild von der Ehe zwischen Photon und Molekül bleiben, ist das Phänomen der **Fluoreszenz**, d.h. die Leuchtfarbe, die ein Stoff im Licht einer UV-Lampe erzeugt, als evidentestes und einleuchtendes Beispiel am besten geeignet und experimentell einfach zu demonstrieren [16]. Dazu dienen die beiden farbigen Hauptakteure bei der Photosynthese in grünen Blättern. Das Chlorophyll funktioniert als Photokatalysator für die chemisch und energetisch sehr anspruchsvollen Reaktionen, während das β -Carotin bei schwachem Licht die Nutzung von möglichst viel Licht aus dem kargen Angebot unterstützt und bei starkem Licht dem Chlorophyll als Sonnenschutz dient. Licht einer LED-Taschenlampe ($\lambda = 400$ nm) generiert das grüne Chlorophyll eine rote Fluoreszenz, das β -Carotin fluoresziert nicht (Abb. 4 b).

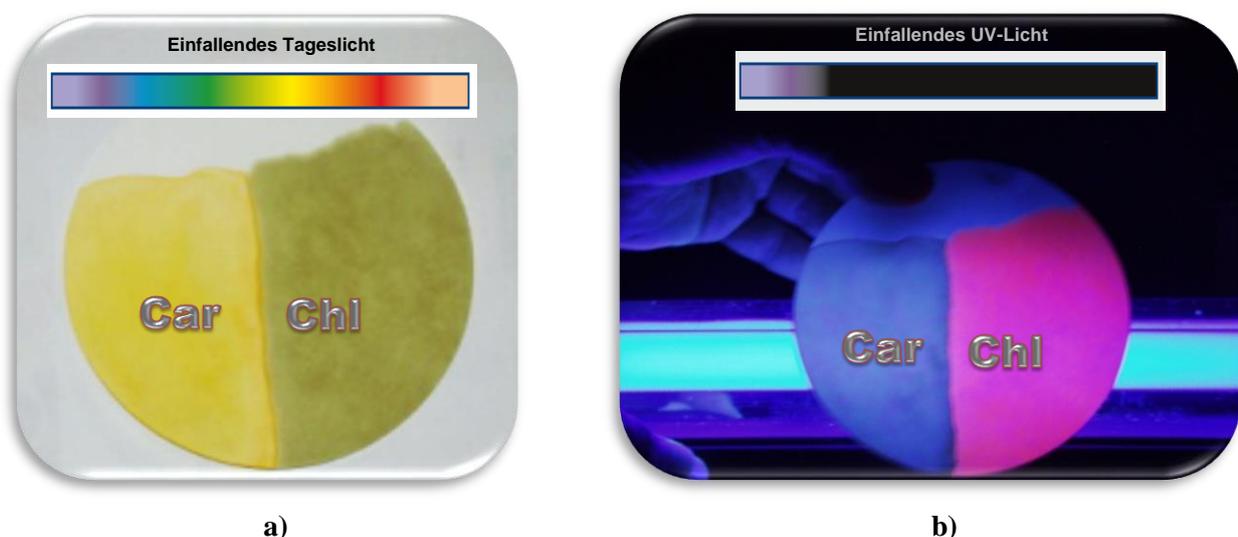


Abb. 4: Farben von β -Carotin und von Chlorophyll bei Tageslicht (a) und im UV-Licht (b): Chlorophyll zeigt eine rote Fluoreszenz, β -Carotin fluoresziert nicht (Bilder © eigene Aufnahmen)

Die beiden Stoffe können aus Blattgrün isoliert werden und zeigen bei Tageslicht die bekannte gelbe bzw. grüne Farbe (Abb. 4 a). Im UV-A Licht einer Schwarzlichtröhre ($\lambda = 280 \text{ nm}$ bis 380 nm) und sogar im violetten Wichtig dabei ist zu beachten, dass die rote Farbe bei der Fluoreszenz des Chlorophylls im einfallenden UV-Licht gar nicht enthalten ist - ganz im Gegenteil zu dem Grün, das Chlorophyll im Tageslicht zeigt. Kaum ein anderer Stoff zeigt so deutlich wie Chlorophyll, dass seine Farbe von dem Licht abhängt, das auf ihn fällt. Die rote Fluoreszenz wird im Chlorophyll selbst erzeugt und ausgestrahlt (emittiert), allerdings nur dann, wenn es mit UV-Licht oder violettem Licht bestrahlt wird, nicht jedoch mit grünem oder rotem Licht.

Auf molekularer Ebene erklären wir die Entstehung des roten Lichts bei der Fluoreszenz von Chlorophyll durch den Zerfall (*Desaktivierung*) des *elektronisch angeregten Zustands*, der bei der Vereinigung zwischen einem Chlorophyll-Molekül und einem Photon aus dem violetten Licht (mit $\lambda = 400 \text{ nm}$) entstanden war. Beim Zerfall des elektronisch angeregten Chlorophyll-Moleküls bildet sich wieder das ursprüngliche Chlorophyll-Molekül (im *elektronischen Grundzustand*) zurück und es wird ein Photon ausgestrahlt (*emittiert*), allerdings eines aus dem roten Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 600 \text{ nm}$ bis $\lambda = 740 \text{ nm}$) - es ist also energieärmer als das absorbierte Photon. Das elektronisch angeregte Chlorophyll-Molekül hat einen Teil seiner Energie durch Schwingungen in Wärme umgewandelt und als solche an die Umgebung abgegeben (*Schwingungsrelaxation*). Bei der Fluoreszenz von Chlorophyll wird also energiereiches, kurzwelliges Licht in energieärmeres Licht mit größeren Wellenlängen umgewandelt, Chlorophyll liegt danach unverändert vor. Die Lebensdauer des elektronisch angeregten Zustandes des Chlorophyll-Moleküls - das entspricht der Dauer seiner „Ehe“ mit dem Photon aus violetten Licht - beträgt gerade mal wenige Nanosekunden. Daher erlischt die rote Fluoreszenz des Chlorophylls für unser Auge im gleichen Moment, in dem das UV-Licht bzw. die violetten LED-Lampe ausgeschaltet wird.

Es kann sein, dass die Beschreibung dieser Vorgänge mit „Heirat“, „Ehe“ und „Zerfall“ von Molekülen und Photonen etwas langweilig, schwer verständlich und verkrampt erscheint, denn ich habe versucht, auch die fachlich korrekten Begriffe einzustreuen. Nun, es wäre viel kürzer gewesen, statt mit den vielen Worten aus dem vorigen Absatz die Fluoreszenz einfach mit den in der Chemie und Physik gängigen Symbolen folgendermaßen zu schreiben:



In dem Schema der beiden aufeinander folgenden Prozesse steht A ganz allgemein für ein Molekül im Grundzustand, A* kennzeichnet das Molekül im elektronisch angeregten Zustand, $h \cdot \nu_1$ und $h \cdot \nu_2$ sind die Energien des absorbierten bzw. emittierten Photons.

Fluoreszierende Stoffe werden bei der Anfertigung von Kreditkarten, Geldscheinen und Dokumenten (Personalausweise, Pässe etc.) eingesetzt um diese möglichst fälschungssicher zu machen. Im UV-Licht werden Pixel und andere Zeichen sichtbar, die bei Tageslicht nicht zu sehen sind. Sicherheitstextilien, die bei Dunkelheit im Licht der Scheinwerfer z.B. gelb oder orange leuchten, enthalten ebenfalls fluoreszierende Stoffe. Diese werden bereits durch den Blauanteil des Lichts zum fluoreszieren angeregt. Fluoreszenzmikroskopie und -spektroskopie sind etablierte Methoden in der Medizin- Umwelt- und Lebensmittelanalytik.

Bei der Fluoreszenz wird in wahrstem Sinne der Worte deutlich, dass die Farben „*Taten des Lichts*“ sind, wie bereits *Goethe* vermutete (vgl. Abschnitt „Dreiklang wissenschaftlicher Erkenntnis: Vermutung - Wissen - Zweifel“). In diesem Zusammenhang ist es angebracht, einen Blick in den *zeitlichen Mikro- und Makrokosmos* zu werfen und Ereignisse, die darin ablaufen, vergleichend gegeneinander zu stellen: Eine Nanosekunde ist der Milliardstel Teil einer Sekunde ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). Diese Zeit ist charakteristisch für die Dauer eines Fluoreszenzvorgangs und der wird durch die Lebensdauer des elektronisch angeregten

Zustands A^* eines Moleküls bestimmt. Eine Gigasekunde ist das milliardenfache einer Sekunde ($1 \text{ Gs} = 10^9 \text{ s}$) und bedeutet ca. 32 Jahre. Die Dauer eines Fluoreszenzvorgangs (ca. 3 ns) ist demnach auf einer Zeitachse von dem Bezugspunkt, der bei einer Sekunde angelegt wird, etwa so weit in Richtung des zeitlichen Mikrokosmos entfernt, wie die Dauer eines Menschenlebens (ca. 3 Gs bzw. ca. 96 Jahre) auf der anderen Seite der Achse in Richtung des zeitlichen Makrokosmos liegt.

Können auch Ereignisse, die noch schneller als ein Fluoreszenzvorgang sind, untersucht und sinnvoll genutzt werden? Ist es überhaupt sinnvoll, danach zu fragen, wo unser Auge doch damit nichts anfangen kann? Ja, es ist sinnvoll. Denn die wissenschaftliche Neugier kennt keine Grenzen. Übrigens hat die Erforschung dieser Frage in jüngster Zeit zu sensationellen Erkenntnissen und Anwendungen geführt.

Photonen und Moleküle am Limit messbarer Ereignisse

Im Jahr 2014 erhielt der deutsche Physiker *Stefan Hell* zusammen mit zwei amerikanischen Kollegen den Nobelpreis für Chemie. *Hell* hatte ein physikalisches Gesetz, wonach im Lichtmikroskop Gegenstände, die kleiner als 200 Nanometer sind, nicht mehr scharf abgebildet werden können, mithilfe der Chemie ausgetrickst. Zur Erinnerung: 200 nm ist die Hälfte der Wellenlänge von Photonen aus dem violetten Licht mit $\lambda = 400 \text{ nm}$, das am kurzwelligen Rand des sichtbaren Lichtspektrums angesiedelt ist (vgl. Abb. 2). *Hell* wollte in lebende Zellen hineinschauen und einzelne Biomoleküle im Lichtmikroskop scharf sichtbar machen. Dafür mussten die gesuchten Biomoleküle zunächst mit „Antennen“ aus fluoreszierenden Struktureinheiten (*Fluorophoren*) versehen werden. Dies gelang ihm und seinem Team indem sie geeignete Fluorophore an Biomoleküle chemisch anknüpften. Das reicht aber nicht. *Hells* nobelpreisträchtige Idee war, unter den markierten Molekülen noch viel genauer zu unterscheiden und zwar so, dass für den Zeitpunkt und den Ort der Messung zwei Arten von Molekülen kreiert werden, helle und dunkle. Hierfür setzte er zwei Laserstrahlen ein, mit denen er die Fluoreszenz *an-* und *ausschalten* konnte. In seinem Nobel-Aufsatz schreibt *Hell* [17]:

„Ich hatte einen Weg gefunden, wie Fluorophore nicht-fluoreszent gemacht werden können, ganz normale Fluorophore, wie sie routinemäßig in der Mikroskopie Verwendung finden. Jetzt kann man sich leicht ausmalen, wie das Mikroskop, das ich im Kopf hatte, funktioniert: durch „stimulated emission depletion“, also „Leerräumen (des angeregten Zustands) durch stimulierte Emission“ oder: STED-Mikroskopie.“

Das „Leerräumen“ des angeregten Zustands gelingt nur, weil der Fluoreszenzvorgang sich aus Teilschritten zusammensetzt, die noch viel weniger Zeit beanspruchen als einige Nanosekunden. Sowohl die Absorption eines Photons $h \cdot \nu_1$ durch ein Molekül A im Grundzustand als auch die Emission eines Photons $h \cdot \nu_2$ aus dem elektronisch angeregten Molekül A^* verlaufen innerhalb von wenigen Femtosekunden ($1 \text{ Fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Diese beiden Teilschritte und auch der von *Hell* erdachte und realisierte Schritt des „Leerräumens“ des angeregten Zustands verlaufen also ca. eine Million Mal schneller als der Fluoreszenzvorgang als Ganzes. Innerhalb eines Jahrzehnts ist die hochauflösende STED-Nanoskopie eine etablierte Methode der *Femtosekunden*-Messtechnik mit Lasern geworden.

Noch näher an der Grenze des messbar Möglichen ist die *Attosekunden*-Messtechnik. Dafür hat der ungarisch-österreichische Physiker *Ferenc Krausz* im Jahr 2023 zusammen mit einer französisch-schwedischen Kollegin und einem französisch-amerikanischen Kollegen den Nobelpreis für Physik erhalten.

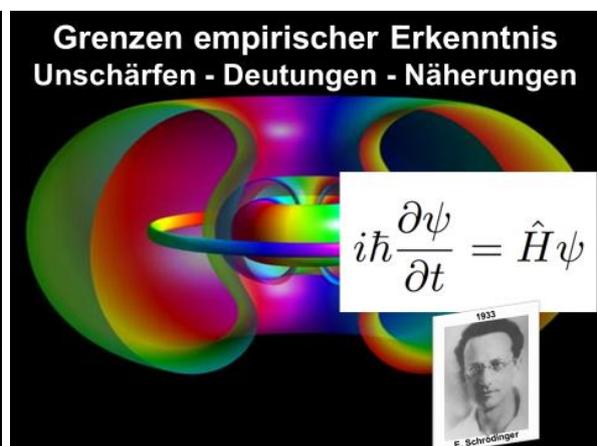


Eine Attosekunde ($1 \text{ As} = 10^{-18} \text{ s}$) ist im zeitlichen Mikrokosmos das ultimative Limit für messbare kurze Lichtimpulse. Zum Vergleich: Im zeitlichen Makrokosmos ist das Alter des Universums (13,7 Milliarden Jahre) kürzer als eine Exasekunde ($1 \text{ Es} = 10^{18} \text{ s}$). *Krausz* gelang es als erstem, Lichtimpulse von wenigen Attosekunden zu erzeugen und zu messen. Mit der Attosekunden-Messtechnik kann man beispielsweise in die Moleküle „hineinschauen“ und verfolgen, wie sich Elektronen darin bewegen. Zahlreiche und breit gestreute Anwendungen tun sich auf, von der Frühdiagnose von Krankheiten aus Blutbildern bis zur Entwicklung effizienter Photokatalysatoren für künstliche Photosynthese.

Grenzen empirischer Erkenntnis: Unschärfen - Deutungen - Näherungen

Zunächst lade ich Sie, liebe Leserin und lieber Leser, dazu ein, das *Einstein*-Zitat über die Lichtquanten (vgl. Abschnitt „Dreiklang wissenschaftlicher Erkenntnis: Vermutung - Wissen - Zweifel“) und die Ausführungen rund um den Teilchen-Welle-Dualismus sowie das Komplementaritätsprinzip (vgl. Abschnitt „Erhellender Vergleich: Licht und Photonen versus Stoffe und Moleküle“) nachzuschlagen und aufzufrischen.

Einsteins Zitat über sein (Nicht)Verständnis der Natur von Lichtquanten belegt die tiefen Vorbehalte, die der große Physiker für die Akzeptanz des Komplementaritätsprinzips und des Teilchen-Welle-Dualismus von Photonen und anderen Quantenobjekten hatte. Genau diese Denkweise wurde von anderen großen Physikern, *Nils Bohr* (Nobelpreis für Physik, 1922) in Kopenhagen, *Werner Heisenberg* (Nobelpreis für Physik 1932) und *Wolfgang Pauli* (Nobelpreis für Physik 1945) in Göttingen sowie von *Erwin Schrödinger* (Nobelpreis für Physik 1933) in Berlin, Graz und Wien vertreten und theoretisch ausgebaut.



Es bestand ein reger Gedankenaustausch insbesondere zwischen den beiden „Schulen“ aus Kopenhagen und Göttingen. Das im Jahr 1927 von *N. Bohr* formulierte **Komplementaritätsprinzip** ist ein prägendes Merkmal der Denkweise in der Quantenmechanik (vgl. Abschnitt „Erhellender Vergleich: Licht und Photonen versus Stoffe und Moleküle“). Die darauf aufbauende Logik hat mit der Logik, an die wir gewöhnt sind, wenig gemeinsam. Dies wird noch deutlicher, wenn wir die im gleichen Jahr 1927 von *W. Heisenberg* aufgestellte **Unschärferelation** betrachten. Danach ist es prinzipiell unmöglich, gleichzeitig den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons oder eines anderen Quantenobjekts absolut genau zu bestimmen, selbst wenn man dafür die notwendige Messvorrichtung hätte. Für die Elektronen in Atomen und Molekülen lassen sich aber mithilfe der **Schrödingergleichung** Aufenthaltswahrscheinlichkeiten berechnen. Sie stammt ebenfalls aus dem sehr ergiebigen Jahr 1927. Mit der Schrödingergleichung lassen sich Wellenfunktionen berechnen und räumliche Bereiche visuell deuten, in denen Elektronen mit einer bestimmten Energie im Atom bzw. Molekül am wahrscheinlichsten anzutreffen sind. Die so ermittelten Orbitale sind nützliche modelltheoretische Werkzeuge insbesondere bei der Erschließung der Wechselwirkung von Photonen mit Molekülen. Sie leisten bei der Erklärung von Messergebnissen und Planung von neuen Experimenten gute Dienste. Allerdings beruht die Berechnung von Orbitale in Molekülen auf einer weitreichenden Näherung und zwar der ebenfalls im Jahr 1927 veröffentlichten **Born-Oppenheimer-Approximation**. Danach ist es näherungsweise zulässig, in Molekülen die Bewegung der Elektronen getrennt von der Bewegung der Atomkerne zu betrachten. Genau genommen wäre das unzulässig, denn Systeme aus Quantenobjekten, also auch Moleküle, sind holistische, ganzheitliche Systeme. Darin stehen alle konstituierenden Elemente in prinzipiell untrennbarer Wechselwirkung. Wir können aber vereinfachend annehmen, dass sich die kleinen, flinken Elektronen viel schneller bewegen als die vergleichsweise großen, trägen Atomkerne.

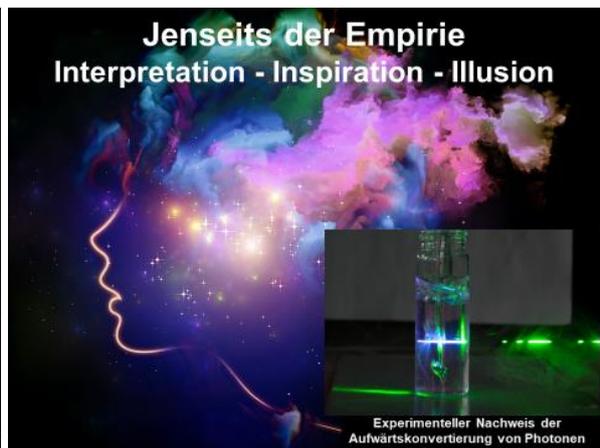
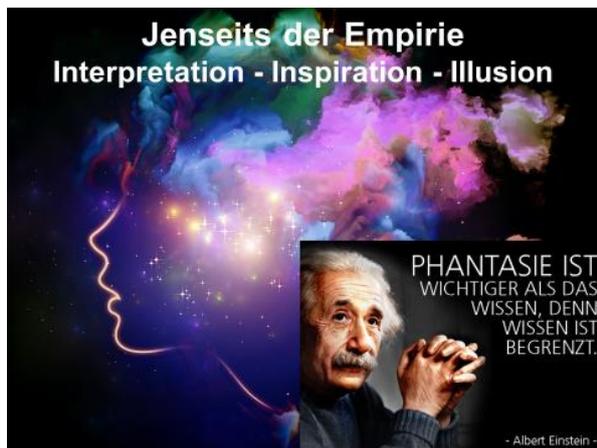
Diese tragenden Säulen der quantenmechanischen Denkweise aus dem besonderen Jahr 1927 haben im Verlauf der darauffolgenden hundert Jahre richtungsweisende Erkenntnisse und bahnbrechende Anwendungen in den Naturwissenschaften ermöglicht. Mit der im Jahr 2023 nobelpreisgekrönten Attosekunden-Technik (vgl. voranstehenden Abschnitt „Photonen und Moleküle am Limit messbarer Ereignisse“) ist man mit Photonen und Molekülen tatsächlich bis zum Limit des empirisch Messbaren vorgestoßen.

Jenseits der Empirie: Interpretation - Inspiration - Illusion

Ich habe lange hin und her überlegt, ob ich diesen Abschnitt schreiben soll. Es besteht das Risiko, die oben dargelegten Erkenntnisse über das Licht und die darauf basierenden Anwendungen schmälern. Der Vollständigkeit halber will ich aber auch einen Blick hinter den wissenschaftlich gesicherten Horizont werfen. Sodann gehe ich das Risiko ein.

Die quantenmechanische Denkweise sowie ausgeklügelte Mess- und Rechenmethoden in den letzten 100 Jahren haben auf die Titelfrage „Was ist Licht“ befriedigende (Teil)Antworten geliefert und enorme Fortschritte in vielen Bereichen bewirkt. Davon profitieren wir alle, ganz gleich, ob wir uns auch beruflich mit Naturwissenschaften befassen oder uns eher als naturwissenschaftliche Laien verstehen. Letztere seien damit getröstet, dass bis heute eine eindeutige, vollständige, widerspruchsfreie und allgemein verwendete Antwort auf die Frage nach dem Wesen des Lichts aussteht.

Jenseits der Empirie ist *Phantasie* zweckmäßig und sinnvoll, denn sie kann auch zu neuem *Wissen* führen. Das muss allerdings durch experimentelle Fakten überprüfbar sein, auch wenn die erst viel später erfolgten, wie es beispielsweise mit *Einsteins* Formel $E = mc^2$ der Fall war.



Phantasievolle Überlegungen waren auch die Ausgangspunkte für die experimentelle Verwirklichung von Phänomenen, die man vorher für unmöglich hielt, z.B. die hochauflösende Mikroskopie von S. Hell (vgl. Abschnitt „Photonen und Moleküle am Limit messbarer Ereignisse“) und die Möglichkeit der Aufwärtskonvertierung von Photonen, d.h. aus energieärmeren Photonen energiereichere zu machen.

Ausgehend von den Erfolgen der Quantenmechanik philosophieren *Christine Mann* (Werner Heisenbergs Tochter) und *Frido Mann* (Thomas Manns Enkel) in ihrem Buch mit dem Titel „Es werde Licht - Die Einheit von Geist und Materie in der Quantenphysik“ [18] über elektromagnetische Strahlen, Licht und Photonen, Energie und Materie, mathematische Abstraktionen und menschliches Bewusstsein. Sie interpretieren Methoden der medizinischen Diagnostik wie Ultraschalluntersuchung, Elektroenzephalographie und Computertomographie im Sinne der Deutung von Photonen als „Träger des Bewusstseins“ [18]. Ihre Ausführungen beinhalten einschlägige Fachbegriffe und aus naturwissenschaftlicher Sicht nachvollziehbare Argumentationsketten. Allerdings schweifen sie stellenweise ins Esoterische ab. Das ist der Fall, wenn immer wieder Photonen auch für die Erklärung von *Intuition*, *Inspiration* und *Illusion*, *Fernwahrnehmung* und *Fernwirkung*, *religiöse Eingebungen* und *kosmische Verbindungen* herhalten müssen.

Es ist unbestreitbar, dass solche Denkweisen und Weltanschauungen viele Menschen berühren und beschäftigen. Das gilt nicht nur für die Vergangenheit, sondern auch für heute und wohl auch für die Zukunft. Allerdings sind sie nicht mit naturwissenschaftlichen Denkweisen vereinbar, sondern vielmehr mit den Stichworten *Glauben*, *Mythen* und *Narrative* (vgl. die Überschrift des ersten Abschnitts in diesem Kapitel).

In unserer heutigen Zeit wiederholen sich besonders in den hochtechnisierten Zivilisationen der westlichen Demokratien aus Europa und Amerika ähnliche Verhaltens- und Denkweisen wie vor ca. 200 Jahren in der Epoche der Romantik. Damals verzeichnete man eine Renaissance von althergebrachter Mystik und Esoterik, weil Kreise des Bürgertums und des Adels durch die im Zeitalter der Aufklärung (ca. 1700 bis ca. 1800) entwickelten Interpretationen und Grundlagen quer durch die Künste, Sozial-, Geistes- und Naturwissenschaften nur unzulänglich überzeugt waren oder sich sogar getäuscht fühlten.

Das ist auch nicht verwunderlich, denn beispielsweise in der Chemie war man trotz bahnbrechender wissenschaftlicher Fortschritte seit *A. Lavoisiers* Sauerstofftheorie der Verbrennung (vgl. ersten Abschnitt in diesem Kapitel) im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts noch fest davon überzeugt, dass organische Substanzen nur in lebenden Organismen erzeugt werden können und dafür die *vis vitalis*, eine magische „Lebenskraft“ unvermeidlich sei. Diese irrige Annahme hat der Chemiker *Friedrich Wöhler* zwar im Jahr 1828 mit seiner Laborsynthese von Harnstoff aus dem anorganischem Salz Ammoniumcyanat widerlegt. Der von ihm hergestellte organische Stoff ist identisch mit dem in tierischen Organismen

produzierten Harnstoff und eine *vis vitalis* ist dafür nicht erforderlich. Nichtsdestotrotz gab es noch viele Zweifler und Leugner solcher Erkenntnisse. Sie organisierten teilweise in obskuren Geheimbünden, in denen sie okkultistische Praktiken exerzierten und esoterische Weltanschauungen propagierten.

Soziale Medien: Spielwiese für Influencer und Follower

Solchen Geheimbünden von vor 200 Jahren können heute bestimmte Sekten gleichgesetzt werden, in denen nicht nur ähnliche Praktiken und Weltanschauungen, sondern auch ein starkes Maß an bewusster Betrugerei, politischer Einflussnahme und geschäftlicher Scharlatanerie vorherrschen. Zum Austausch solcher Ideen und Praktiken trifft man sich nicht mehr ausschließlich an irgendwelchen geheimen Orten. Vielmehr und vorwiegend werden dafür die modernen digitalen Medien genutzt. In den so genannten „sozialen“ Medien generieren „Influencer“ in ihren Netzauftritten Gemeinschaften von zahlreichen „Followern“, in denen unter anderem auch skurrile Auswüchse von Mystik, Irreführung und Aberglaube verbreitet werden - grundsätzlich ähnliche wie vor 200 Jahren.

Besonders erfolgreich verlaufen solche Täuschungsmanöver, wenn sie mit naturwissenschaftlichen Fachbegriffen und kurzen - in der Regel zu kurzen - Argumentationsketten gespickt sind. Auf diese Weise lassen sich vorwiegend Menschen mit mangelnden naturwissenschaftlichen Grundkenntnissen beeinflussen und verführen.



In diesem Zusammenhang ist es arrogant und töricht, wenn ein Buchautor und Hochschullehrer zu Beginn des 21. Jahrhunderts behauptet „naturwissenschaftliche Kenntnisse ... gehörten nicht zur Bildung“ [19] oder wenn ein populärer Philosoph und Medienliebling die Revolutionierung der Schule durch Abschaffung des Fachunterrichts fordert [20].

In einer demokratischen Gesellschaft müssen auch die naturwissenschaftlichen Laien und insbesondere die jungen Menschen mit naturwissenschaftlichen Grundkenntnissen ausgestattet werden. Denn sie gehören sehr wohl zur der Bildung, die eine Person haben muss, um gegen die Fakes aus (un)sozialen Medien gewappnet zu sein. Fakt ist, dass Menschen umso leichter auf medial vorgegaukelte Behauptungen, beispielsweise über „intelligenzförderndes“ Mineralwasser, reinfallen, je mangelhafter ihre chemischen Grundkenntnisse sind.

Wer bei der Entwicklung von Lösungen für die globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts mitreden und sich aktiv daran beteiligen will, muss sich auch eine naturwissenschaftliche Grundbildung in den Schulfächern Physik, Chemie und Biologie aneignen. Naturwissenschaftliche Bildung ist besonders dann unverzichtbar, wenn es um nachhaltige Entwicklung geht.

Das 1x1 an Grundwissen zum Kontext „Licht für Nachhaltigkeit“ werde ich in Kapitel 3 aus und mit der Perspektive „Solarlicht - Antrieb für Leben und Technik“ ergänzen.

Literatur

- [1] M. W. Tausch, Chemie mit Licht - Innovative Didaktik für Studium und Unterricht. Lehrbuch, Springer, Heidelberg **2019**; Internetplattform: <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/>
- [2] T. Mann, Joseph und seine Brüder, Fischer, Frankfurt **1991**
- [3] T. S. Kuhn, Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp, Frankfurt **1979**
- [4] A. L. Lavoisier, Mémoires de l'academie francaise , Paris, **1777**
- [5] J. W. Goethe, Zur Farbenlehre, Cotta, Tübingen **1810**
- [6] J. P. Eckermann, Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens. Bd. 2. Leipzig **1836**
- [7] I. Newton, Opticks Or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflactions and Colours of Light, Royal Society, London **1730**
- [8] F. Wilczek, A Beautiful Question - Finding Natur's Deep Design, Penguin Press, New York **2015**
- [9] U. K. Popper, Logik der Forschung, Mohr, 11. Aufl., Tübingen **2005**
- [10] B. Brecht, Der gute Mensch von Sezuan, Epilog (Der Spieler), Ausgewählte Werke in sechs Bänden, Zweiter Band, Frankfurt, Suhrkamp **1997**
- [11] F. A. Kekulé, Lehrbuch der Organischen Chemie oder der Chemie der Kohlenstoffverbindungen, F. Enke Verlag, Stuttgart **1859**
- [12] Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 2 Johann Wilhelm Ritter: Die Begründung der Elektrochemie. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, **1968**
- [13] J. W. Ritter, Intelligenzblatt der Erlanger Literatur-Zeitung, **1801**
- [14] K. Arcand, M. Watzke, Licht - mehr als wir sehen, Fackelträger Verlag GmbH, **2016**
- [15] N. J. Turro, Modern Molecular Photochemistry, Menlo Park, California, The Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., **1978**
- [16] R. Zückert, N. Meuter, M. W. Tausch, Lehrfilm Photosynthese - ein Fall für zwei, Teil 2 <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photoredoxreaktionen/photosynthese-ein-fall-fuer-zwei-teil-2-von-2/> **2017**
- [17] S. W. Hell, Nanoskopie mit fokussiertem Licht (Nobel-Aufsatz), Angew. Chem., 127, 8167 – 8181, **2015**
- [18] F. Mann, C. Mann, Es werde Licht - Die Einheit von Geist und Materie in der Quantenphysik, Fischer Verlag, Frankfurt a.M., **2017**
- [19] D. Schwanitz, Bildung - Alles was man wissen muss. Goldmann Verlag, München **2002**
- [20] D. R. Precht, Stellt die Schule auf den Kopf, Die ZEIT, 11.04.2013