



biomax

Ausgabe 37 // Frühjahr 2022



Grünes Tuning – auf dem Weg zur künstlichen Fotosynthese

Eine Herausforderung des 21. Jahrhunderts ist die Eindämmung des Klimawandels. Und das heißt, dass es uns gelingen muss, den Anteil von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu reduzieren. Kohlenstoffdioxid aus der Luft mithilfe von Sonnenenergie nutzbar machen – diesen Prozess beherrschen Pflanzen bereits seit Jahrmillionen. Eröffnet die künstliche Fotosynthese einen Weg, um aus Kohlenstoffdioxid mithilfe von Licht nachhaltig Rohstoffe zu produzieren? Ein Team um Tobias Erb, Direktor am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg, arbeitet daran, diesen Prozess so zu „tunen“, dass er mehr Kohlenstoff binden kann. Mit ihrem synthetisch-biologischen Ansatz wollen die Max-Planck-Forschenden biologische Prozesse jedoch nicht nur schrittweise verbessern, sondern auch ganz neue Lösungen umsetzen, die in dieser Form in der Natur nicht zu finden sind – eine Idee mit vielversprechendem Potenzial.

Jedes Jahr holen **Fotosynthese** treibende Organismen rund 400 Gigatonnen Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Luft. Im natürlichen Kohlenstoffkreislauf entsprach das genau der Menge an CO₂, die durch geologische und biologische Prozesse wieder freigesetzt wurde – bis mit Beginn des Industriezeitalters (etwa um 1750) der Mensch anfang, zunehmend fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas, in denen der Kohlenstoff aus Jahrtausenden bis Jahrmillionen unterirdisch gespeichert war, zu verbrennen. Dadurch bringen wir den Kohlenstoffkreislauf zunehmend aus dem Gleichgewicht: Aktuell emittieren wir jährlich 38 Gigatonnen CO₂ zusätzlich, also knapp ein Zehntel des natürlichen Kreislaufs ([siehe GEOMAX 22](#)).

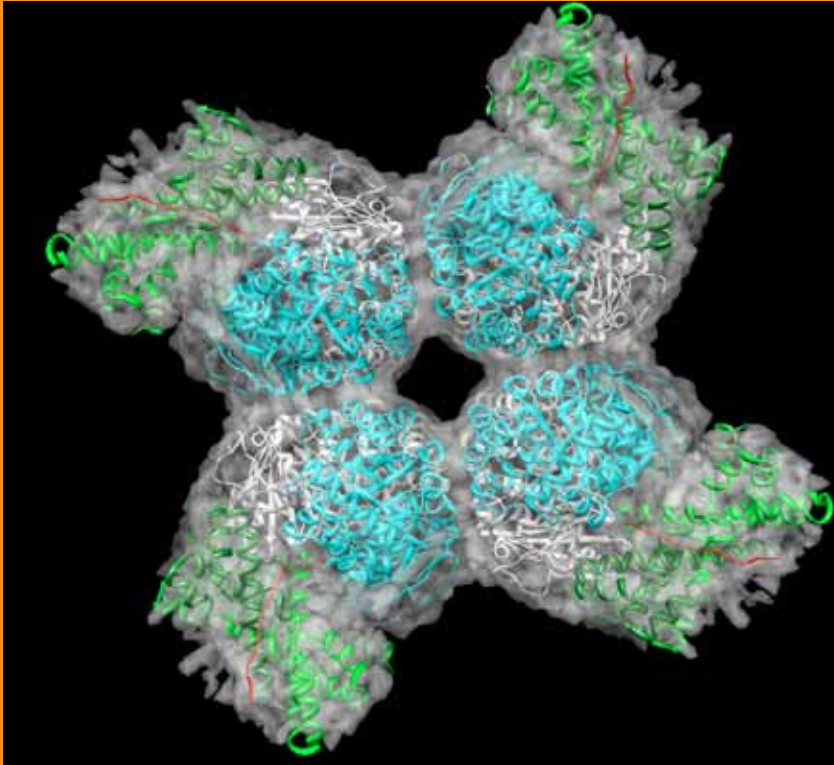
Ein Verfahren, welches das überschüssige **Kohlenstoffdioxid** wieder aus der Atmosphäre entfernt und gleichzeitig noch sinnvoll nutzt, wäre also hochwillkommen. Tobias Erb, Direktor am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie treibt aber nicht primär der Kampf gegen den Klimawandel an. Zunächst einmal will er verstehen, wie sich Kohlenstoffdioxid in organische Moleküle umwandeln lässt. „Wenn wir das Treibhausgas mit biologischen Methoden als Kohlenstoffquelle erschließen und dabei aus der Atmosphäre entfernen könnten, wäre das natürlich ein toller Nebeneffekt“, sagt der Max-Planck-Forscher.

ZENTRAL FÜR DAS LEBEN

Evolutionär betrachtet ist die Fotosynthese ein ausgesprochen erfolgreicher biochemischer Prozess und sehr gut in der Lage, die Anforderungen der biologischen Funktionen zu erfüllen: Einfach zusammengefasst, wandelt sie das CO₂ aus der Luft mithilfe von Sonnenenergie und Wasserstoff in Kohlenhydrate um. Um Wasserstoff zu gewinnen, müssen Pflanzen dabei Wassermoleküle spalten. Den überschüssigen Sauerstoff gibt die Pflanze an die Umwelt ab. Ein Teil der Kohlenhydrate liefert die nötige Energie zum Leben, der andere Teil wird zum Grundbaustein für die Produktion großer Biomoleküle. Mit diesen wächst die Biomasse an – die Pflanze speichert so den Kohlenstoff aus der Atmosphäre.

Der Prozess hat aber auch seine Grenzen. So beträgt die Effizienz der Umwandlung von eingestrahltm Sonnenlicht in Biomasse bei der biologischen Fotosynthese (ohne den Eigenverbrauch der Pflanze)

ABB. A: DAS HÄUFIGSTE ENZYM AUF UNSEREM PLANETEN



Das CO₂-bindende Enzym des Calvin-Zyklus heißt Rubisco. Es ist sehr komplex gebaut und besteht aus 16 Untereinheiten. Auf jeden Menschen kommen etwa fünf Kilogramm Rubisco. Aus dem Kohlenstoffdioxid, das im Volumen eines gewöhnlichen Wohnzimmers vorhanden ist, kann die Pflanze mithilfe des Enzyms eine Prise Zucker produzieren.

tete Nachschub. „Natürliche Ökosysteme und auch die Landwirtschaft operieren schon nah an ihrer Leistungsgrenze, substanzielle Steigerungen sind hier kaum zu erwarten“, betont Kleidon daher.

Die Biologie lässt sich nicht weiter optimieren, wenn die Physik ihr Grenzen setzt. Aber die heute gut erforschten fotosynthetischen Prozesse in Pflanzen, Algen und Bakterien können als Vorbild dienen für die Entwicklung einer **künstlichen Fotosynthese**. Der künstliche Nachbau der Fotosynthese gilt dabei als eine Art „Apollo-Projekt“ unserer Zeit: Damit ließen sich Kohlenstoffverbindungen nachhaltig mithilfe von Licht aus Kohlenstoffdioxid herstellen. Sonnenlicht wäre dafür die ultimative Ressource, denn die Sonne sendet ungefähr 15.000-mal mehr Energie zur Erde als die Menschheit verbraucht. Die technische Umsetzung der beiden Teilprozesse der Fotosynthese, der **Primär-** und der **Sekundärreaktion**, befindet sich dabei in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Für die Primärreaktion wurden fotovoltaische Lösungen realisiert, die hinsichtlich der Photonenausbeute dem natürlichen Prozess entsprechen. Für die technische Umsetzung der Sekundärreaktion konnte bisher keine mit dem natürlichen System konkurrierende katalytische Lösung gefunden werden. Doch genau das ändert sich gerade – dank der Forschungsarbeiten von Tobias Erb.

gerade mal ein Prozent. Das ist nichts im Vergleich zu gängigen Fotovoltaikanlagen, die rund 20 Prozent der eingesammelten Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln. Ein Flaschenhals für die Effizienz ist die **Transpiration** der Pflanzen. Über die Spaltöffnungen der Blätter, die sogenannten **Stomata**, nehmen Pflanzen nicht nur das CO₂ aus der Luft auf, sondern verdunsten dabei gleichzeitig auch Wasser. Die Verdunstung verbraucht jedoch wesentlich mehr Wasser als die Fotosynthese-Reaktion. Indem die Pflanze den Verlust an Wasser begrenzt, schränkt sie auch den Gasaustausch und die **Fotosyntheseleistung** ein.

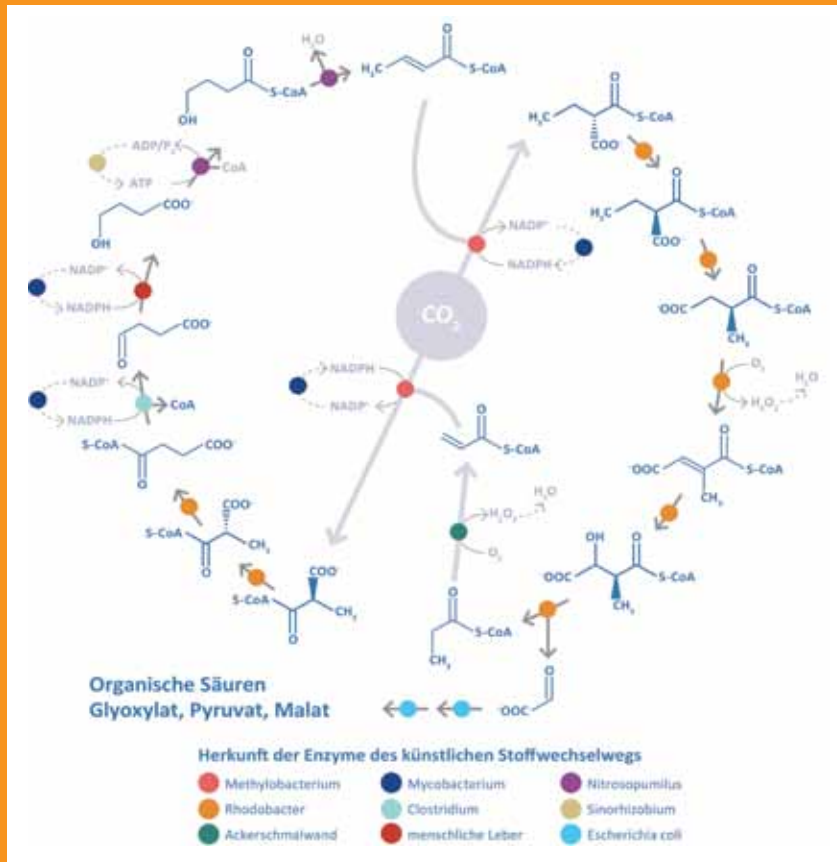
BEGRENZTE LEISTUNG

Als einen weiteren limitierenden Faktor hat Axel Kleidon, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Biogeochemie, die **Thermodynamik** ausgemacht. Als Erdsystemforscher untersucht er wichtige chemische, geologische und physikalische Prozesse und Stoffkreisläufe auf der Erde. Das erfordert einen Blick auf das Große und Ganze: „Der CO₂-Transport an die Blätter erfolgt durch die große Umwälzanlage der Thermik, indem erwärmte, befeuchtete und CO₂-ärmere Luft vom Boden aufsteigt und kühlere, trockenere und CO₂-reichere Luft absinkt“, erklärt Kleidon. Der Motor dafür ist die Erwärmung der Erdoberfläche durch die Sonnenstrahlung. Dadurch entsteht ein Temperaturunterschied, der eine atmosphärische Wärmekraftmaschine antreibt. „Diese Maschine leistet so viel wie möglich, sie begrenzt aber auch die Verdunstung und damit den Nachschub an CO₂ für die Fotosynthese“, so der Physiker. Denn der Wärmefluss, der die Maschine antreibt, baut auch den Temperaturunterschied wieder ab und reduziert so ihren Wirkungsgrad. Die biologische Fotosynthese ist also immer nur so effektiv, wie der thermodynamisch geleis-

Die Umwandlung von atmosphärischem CO₂ in energetisch höherwertige Kohlenstoffverbindungen erfolgt in Pflanzen über den nach seinem Entdecker benannten **Calvin-Zyklus**. Der US-amerikanische Biochemiker Melvin Calvin verfolgte mit seiner Arbeitsgruppe an der University of California in Berkeley Ende der 1940er Jahre, wie aus radioaktiv markiertem Kohlenstoffdioxid in einem Kreisprozess Kohlenhydrate hergestellt wurden. 1961 erhielt er für diese Arbeiten den Nobelpreis für Chemie. Für den Ablauf der chemischen Reaktionen, die im Stroma der **Chloroplasten** stattfinden, werden als Voraussetzung lediglich ATP als Energiequelle und NADPH/H⁺ als Reduktionsmittel benötigt. Das zentrale Enzym, das die Bindung von CO₂ katalysiert, heißt *Ribulose-1,5-bisphosphatcarboxylase/-oxygenase*, kurz **Rubisco** (**Abb. A**). Es ist eines der häufigsten Proteine der Natur. „Nimmt man das Proteom, also alle Proteine zusammengefasst in einem Blatt, so besteht das zu fünfzig Prozent aus Rubisco“, erklärt Tobias Erb.

Dabei ist Rubisco keine optimale Lösung, wenn es um die Effizienz der Kohlenstofffixierung geht. Denn trotz seiner wichtigen Rolle arbeitet Rubisco relativ langsam: Ein Molekül kann nur etwa fünf bis zehn CO₂-Moleküle in der Sekunde umsetzen. Und es ist sehr ineffizient, da es nicht nur CO₂ bindet, sondern auch Sauerstoff. Als Rubisco vor rund drei Milliarden Jahren entstand, war das noch kein Problem – da gab es nämlich noch keinen Sauerstoff in der Atmosphäre. Als sich dieser jedoch mehr und mehr anreicherte, konnte sich das Enzym dieser Veränderung nicht anpassen. Zwanzig Prozent der Reaktionen laufen unerwünscht mit dem Sauerstoff ab. Die Pflanzenzelle kann mit dem daraus entstehenden toxischen Produkt nichts anfangen. Sie muss es in einem aufwändigen Prozess, der sogenannten Photo-

ABB. B: AM REISSBRETT ENTWICKELT



Entwurf und die Realisierung künstlicher Stoffwechselwege zur effizienteren CO_2 -Reduktion mithilfe der synthetischen Biologie: Der CETCH-Zyklus besteht aus 17 verschiedenen Enzymen, die aus insgesamt neun verschiedenen Organismen (farblich gekennzeichnet) stammen. Drei dieser Enzyme wurden mit Computerunterstützung maßgeschneidert, um eine entsprechende Reaktion zu katalysieren.

tem aufbauen.“ Dazu suchte das Team Enzyme zusammen, die jeweils ihre Aufgabe im „Betriebsystem“ möglichst optimal erledigen (Abb. B). Sie fanden sich in so unterschiedlichen Organismen wie Purpurbakterien, Gänserauke und sogar der menschlichen Leber. Einige Enzyme mussten auch chemisch umgebaut werden.

Das Ergebnis nennt sich „**CETCH-Zyklus**“. Es ist der erste künstliche Stoffwechselweg zur biologischen CO_2 -Fixierung. Mit 15 bis 17 Einzelschritten ist er vergleichbar komplex wie sein natürliches Vorbild, arbeitet aber wesentlich effizienter und zudem fehlerfrei: Theoretische Berechnungen zeigen, dass der CETCH-Zyklus lediglich 24 bis 28 Lichtquanten pro fixiertem, also gebundenem CO_2 -Molekül benötigt. Verglichen mit der natürlichen Sekundärreaktion in Pflanzen (ca. 34 Lichtquanten pro CO_2 -Molekül) braucht der künstliche Stoffwechselweg damit bis zu 20 Prozent weniger Lichtenergie. Im Reagenzglas sei der Designer-Stoffwechselweg bereits funktionsfähig, so der Max-Planck-Forscher. Zu den aufgereinigten Proteinen, die beteiligt seien, müsse man noch ATP als Energielieferant hinzugeben, und der CETCH-Zyklus laufe los.

FOTOSYNTHESE IM REAGENZGLAS

Praktisch musste das Marburger Team dies erst einmal in einem künstlichen Fotosynthesystem beweisen. Doch wie konstruiert man eine künstliche fotosynthetisch aktive Zelle? „Als allererstes benötigten wir ein Energiemodul, das es uns erlaubt, chemische Reaktionen nachhaltig zu betreiben. Bei der Fotosynthese liefern Chloroplasten-Membranen die Energie für die Kohlenstoffdioxid-Fixierung. Ihre Fähigkeiten wollten wir nutzen“, erklärt Erb. Der aus der Spinatpflanze isolierte Fotosynthese-Apparat zeigte sich robust genug, um auch im Reagenzglas die Energie aus dem Licht, die Elektronen und den Wasserstoff bereitzustellen. Für die Sekundärreaktion setzten die Forschenden den von ihnen selbst entwickelten CETCH-Zyklus ein (Abb. D). Nach mehreren Optimierungsrunden gelang dem Team tatsächlich die lichtgesteuerte Fixierung des Treibhausgas Kohlenstoffdioxid in vitro.

respiration, umwandeln, wobei wiederum CO_2 freigesetzt wird. Dieser Prozess verpulvert bis zu einem Drittel der durch die Fotosynthese eingefangenen Energie – was die Pflanzen sich aber angesichts der unbegrenzten Verfügbarkeit von Sonnenenergie leisten können.

STOFFWECHSEL 2.0

Tobias Erb setzt derzeit auf eine effizientere Alternative zu Rubisco, die er vor einigen Jahren mit seinem Team im Bodenbakterium *Kitatospora setae* entdeckt hat. Das betreibt zwar keine Fotosynthese, musste aber lernen, seinen Bedarf an Kohlenstoff in einer kohlenstoffarmen Umwelt zu decken. Dazu entwickelte dieses Bakterium eine höchst wirksame Klasse von Enzymen mit dem Namen Enoyl-CoA Carboxylase/Reduktase, kurz ECR. Sie können das Kohlenstoffdioxid etwa zwanzigmal schneller verarbeiten als das pflanzliche Rubisco – nicht zuletzt deshalb, weil dabei auch kaum Fehler auftreten.

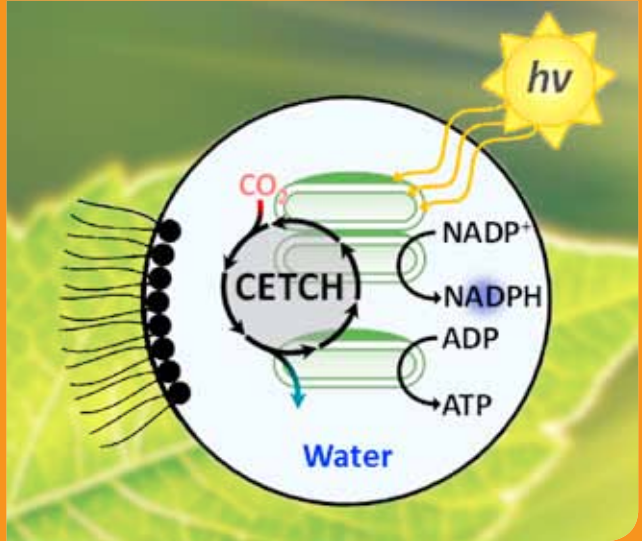
Dieser Fund brachte Erb auf die Idee, eine künstliche, hocheffiziente Alternative zum Calvin-Zyklus quasi neu zu erfinden und dabei Hochleistungsenzyme wie ECR zu nutzen. Die Herausforderung bestand darin, dass an dem Prozess noch ein gutes Dutzend anderer Enzyme beteiligt sind, die fein aufeinander abgestimmt sein müssen. Entfernt man auch nur eines davon, dann bricht der biochemische Prozess zusammen. „Das Enzym ist eigentlich nur so etwas wie ein neues Computerprogramm“, erklärt Erb. „Damit es aber funktioniert, müssen wir – um im Bild zu bleiben – ein komplettes neues Betriebssystem

ABB. C: ALLES IN VITRO



Diese Tröpfchen haben 90 Mikrometer Durchmesser und sind ein Beispiel für halb künstliche Chloroplasten aus Marburg. Sie enthalten bereits Thylakoidmembranen aus echten Chloroplasten, in denen die Primärreaktion der Fotosynthese abläuft.

ABB. D: KÜNSTLICHE CHLOROPLASTEN



„Mit der Plattform können wir neuartige Lösungen umsetzen, die die Natur während der Evolution nicht beschritten hat“, sagt Erb. Nach seiner Einschätzung bergen die Ergebnisse großes Zukunftspotenzial. So konnten die Forschenden zeigen, dass der **künstliche Chloroplast** mithilfe der neuartigen Enzyme und Reaktionen Kohlenstoffdioxid 100-mal schneller bindet als bisherige synthetisch-biologische Ansätze. „Langfristig könnten lebensechte Systeme in praktisch allen technologischen Bereichen Anwendung finden, einschließlich Materialwissenschaften, Biotechnologie und Medizin“, hofft der Max-Planck-Forscher.

Noch sind die künstlichen Chloroplasten nur feine Wassertropfchen von knapp 100 Mikrometern Durchmesser, die in einer Ölemulsion schwimmen (Abb. C). Sie sind nur zwei Stunden lang stabil. Trotzdem können sie erstaunlicherweise selbstständig aus dem gebundenen Kohlenstoff messbare Mengen der Verbindung Glykolat herstellen. Daraus lassen sich bereits eine Vorstufe des Antibiotikums Erythromycin oder ein Duftstoff auf Terpen-Basis herstellen, wie Erbs Team zeigen konnte.

GRÜNE FABRIKEN

Alternativ zum rein künstlichen Fotosynthesesystem forscht das Team auch daran, die Enzyme für den CETCH-Zyklus gentechnisch in lebende Zellen einzubauen. „In *E. coli*-Bakterien ist uns das bereits zu neunzig Prozent gelungen“, berichtet Tobias Erb. Der nächste Schritt ist der gentechnische Einbau des CETCH-Zyklus in den Stoffwechsel einzelliger Algen – eine viel größere Herausforderung, da sie weitaus weniger erforscht sind als *E. coli* und deutlich komplexere Zellstrukturen besitzen. Außerdem ist die Entwicklung synthetischer Algenstämme durch ihre niedrigere Wachstumsrate langwieriger. Gelingt der Einbau, so wären große „Algenfabriken“ denkbar, die CO₂ besonders effektiv in Biomasse umwandeln können. Das wäre dann tatsächlich ein Schritt hin zur Bewältigung einer der größten Herausforderungen unserer Zeit: die Reduktion der ständig steigenden Konzentration von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid.

Der heutige Chloroplast (oben links) hat sich in 3,5 Milliarden Jahren zu einer effizienten molekularen Maschine entwickelt. Der künstliche Chloroplast (oben rechts) wurde in weniger als 7 Jahren entworfen und realisiert (grün: Thylakoidmembranen).

Schlüsselbegriffe

Calvin-Zyklus, CETCH-Zyklus, Chloroplasten, Fotosynthese, Fotosyntheseleistung, Kohlenstoffdioxid, künstlicher Chloroplast, künstliche Fotosynthese, Primärreaktion, Rubisco, Sekundärreaktion, Stomata, Thermodynamik, Transpiration

Link-Tipps

- **Künstliche Chloroplasten**
www.mpg.de/b371 > QR
- **CO₂ als Kohlenstoffquelle**
www.mpg.de/b372
- **Thermodynamik und Fotosynthese**
www.mpg.de/b373
- **Experimente zur Fotosynthese**
www.mpg.de/b374 > QR
- **Künstliche Fotosynthese: Herausforderungen und Perspektiven**
www.mpg.de/b375



Video-Tipps

- **Künstliche Chloroplasten** (Engl./OmdtU)
www.mpg.de/b376 > youtube
- **Entwicklung CETCH-Zyklus** (Engl.)
www.mpg.de/b377

Audio-Tipp

- **Turbo-Fotosynthese**
www.mpg.de/b378 > QR



www.max-wissen.de

der Link zur Forschung
für Lernende und Lehrkräfte



Hier finden Sie Hintergrundinformationen und Materialien für den Unterricht zu den Ausgaben von **BIOMAX**, **GEOMAX** und **TECHMAX**. Weitere Exemplare können Sie auf der Webseite kostenfrei bestellen.

CC-Lizenztexte finden Sie unter <https://creativecommons.org/licenses> und im Detail bei den einzelnen Heften auf der Webseite www.max-wissen.de.

