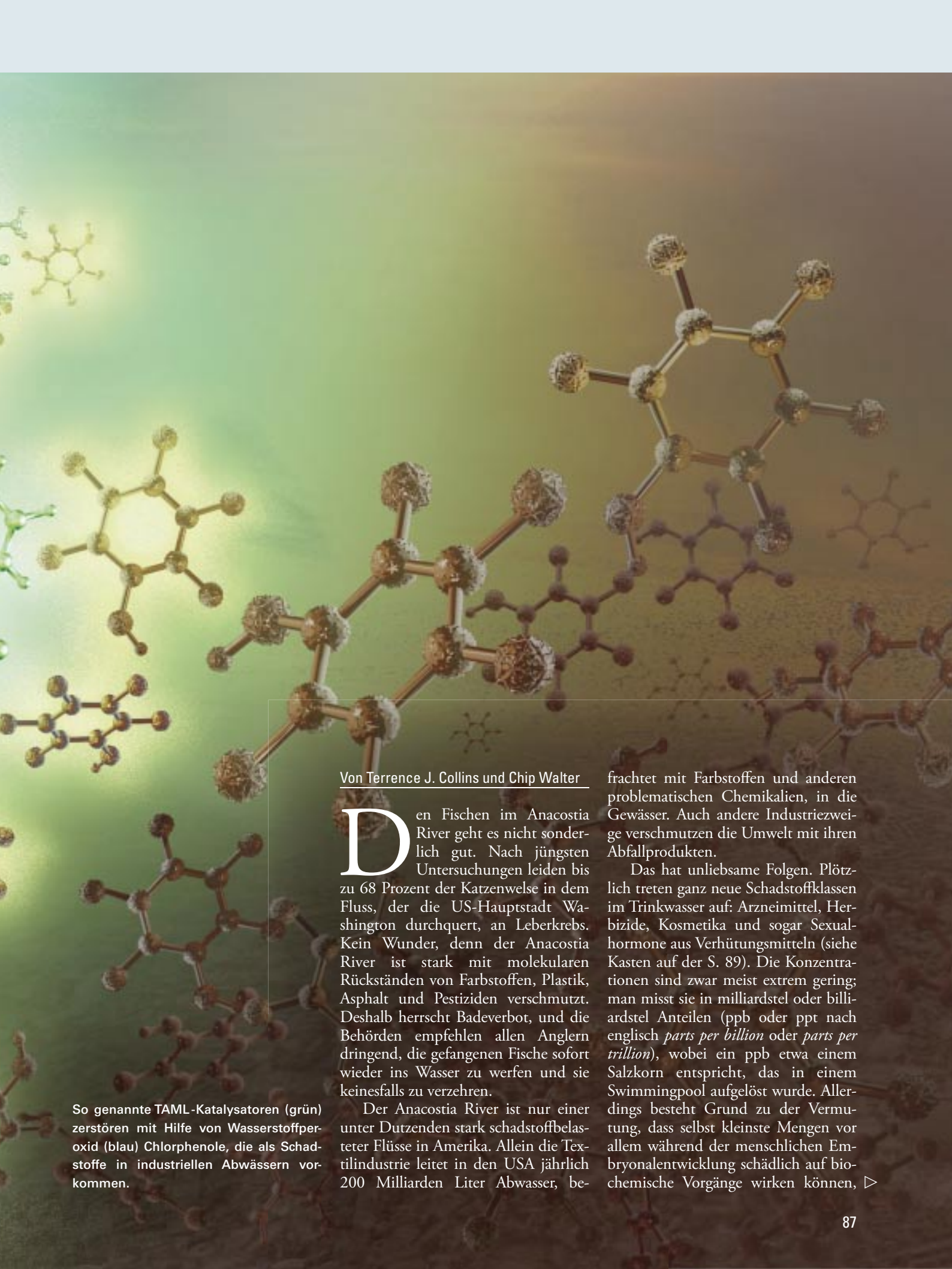


Diesen Artikel können Sie als Audiodatei  beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Kleine künstliche Schadstoffkiller

Eine neue Klasse von Katalysatoren kann selbst hartnäckigste Verunreinigungen in industriellen Abwässern zerstören, bevor sie in die Umwelt gelangen.



Von Terrence J. Collins und Chip Walter

Den Fischen im Anacostia River geht es nicht sonderlich gut. Nach jüngsten Untersuchungen leiden bis zu 68 Prozent der Katzenwelse in dem Fluss, der die US-Hauptstadt Washington durchquert, an Leberkrebs. Kein Wunder, denn der Anacostia River ist stark mit molekularen Rückständen von Farbstoffen, Plastik, Asphalt und Pestiziden verschmutzt. Deshalb herrscht Badeverbot, und die Behörden empfehlen allen Anglern dringend, die gefangenen Fische sofort wieder ins Wasser zu werfen und sie keinesfalls zu verzehren.

Der Anacostia River ist nur einer unter Dutzenden stark schadstoffbelasteter Flüsse in Amerika. Allein die Textilindustrie leitet in den USA jährlich 200 Milliarden Liter Abwasser, be-

frachtet mit Farbstoffen und anderen problematischen Chemikalien, in die Gewässer. Auch andere Industriezweige verschmutzen die Umwelt mit ihren Abfallprodukten.

Das hat unliebsame Folgen. Plötzlich treten ganz neue Schadstoffklassen im Trinkwasser auf: Arzneimittel, Herbizide, Kosmetika und sogar Sexualhormone aus Verhütungsmitteln (siehe Kasten auf der S. 89). Die Konzentrationen sind zwar meist extrem gering; man misst sie in milliardstel oder milliardstel Anteilen (ppb oder ppt nach englisch *parts per billion* oder *parts per trillion*), wobei ein ppb etwa einem Salzkorn entspricht, das in einem Swimmingpool aufgelöst wurde. Allerdings besteht Grund zu der Vermutung, dass selbst kleinste Mengen vor allem während der menschlichen Embryonalentwicklung schädlich auf biochemische Vorgänge wirken können, ▷

So genannte TAML-Katalysatoren (grün) zerstören mit Hilfe von Wasserstoffperoxid (blau) Chlorphenole, die als Schadstoffe in industriellen Abwässern vorkommen.

▷ durch die Verhalten, Intelligenz, Immunsystem und Reproduktionsfähigkeit beeinflusst werden.

Immerhin gibt es intensive Bemühungen um Abhilfe. Eine erste Maßnahme war der Bau von Kläranlagen, in denen Bakterien einen Großteil der Schadstoffe im Abwasser zersetzen. Dadurch ließ sich die Gewässerqualität in den letzten Jahrzehnten schon erheblich verbessern. Außerdem ist das junge Gebiet der grünen Chemie entstanden. Hier haben Forscher in den vergangenen zehn Jahren damit begonnen, chemische Produkte und Prozesse umweltfreundlicher zu gestalten. Dabei suchten sie Wege, schädliche Farb- und Kunststoffe durch harmlose Substanzen zu ersetzen, und entwickelten neue Herstellungsverfahren, bei denen weniger Schadstoffe anfallen – getreu der Maxime des Instituts für Grüne Chemie der American Chemical Society: »Abfall zu vermeiden ist besser, als ihn nachträglich zu beseitigen.« Daneben wurden aber auch Möglichkeiten erforscht, Abwasser kostengünstig von schwer abbaubaren Schadstoffen zu reinigen.

Anleihe bei Enzymen

Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung einer Gruppe von Designer-Katalysatoren am Institut für Grüne Oxidationschemie der Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh (Pennsylvania), das einer von uns (Collins) leitet. Sie tragen die Bezeichnung TAML – *tetra amide macrocyclic ligands* (makrozyklische Tetraamid-Liganden) – und können in Verbindung mit Wasserstoffperoxid und anderen Oxidationsmitteln eine breite Palette hartnäckiger Schadstoffe knacken. Dabei ahmen sie Enzyme nach, die Wirbeltiere im Verlauf der Evolution zum Abbau toxischer Verbindungen entwickelt haben.

Im Labor wie in realen Industrietests haben sich die TAML-Verbindungen als fähig erwiesen, Pestizide, Farbstoffe und andere schädliche Chemikalien zu vernichten, Geruch und Farbe des Abwassers aus Papiermühlen stark zu verringern und bakterielle Sporen abzutöten, die dem tödlichen Milzbranderreger ähneln. Diese »grünen« Moleküle können also entscheidend dazu beitragen, Umweltbelastungen durch die traditionelle Chemie zu reduzieren. Bei breiter Anwendung ließen sich zudem Millionenbeträge für die Abwasserreinigung einsparen.

Die chemische Industrie verschmutzt die Umwelt hauptsächlich deshalb, weil sie eine völlig andere Chemie betreibt als die Natur. Biochemische Prozesse haben sich über Jahrtausende hinweg auf der Basis von Elementen entwickelt, die allgegenwärtig und leicht zugänglich waren – wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Kalzium und Eisen. Daraus entstand alles, vom Pantoffeltierchen bis zum Mammutbaum, vom Anemonenfisch bis zum Menschen.

Die Industrie dagegen holt sich auch noch die seltensten Elemente von überall her und verteilt sie dann auf eine Weise in der Umwelt, wie natürliche Prozesse das nie zu Stande brächten. Blei kam zum Beispiel früher nur in so isolierten, unzugänglichen Lagerstätten vor, dass die Natur nie darauf verfiel, es in Lebewesen aufzunehmen. Jetzt aber findet sich das Schwermetall überall – vor allem weil Anstrichfarben, Autos und Computer es verbreitet haben. Dadurch kann es in die Körper von Kindern gelangen, wo es bereits in geringsten Dosen schädlich wirkt. Dasselbe gilt für Kadmium, Quecksilber, Arsen, Uran und Plutonium.

Manche der neuen, synthetischen Moleküle in Arzneimitteln, Kunststoffen

und Pestiziden unterscheiden sich so sehr von Produkten natürlicher chemischer Vorgänge, dass man meinen könnte, sie kämen aus einer anderen Welt. Vielfach sind sie nicht oder nur schwer biologisch abbaubar, und selbst unter denjenigen Verbindungen, die leicht von Bakterien vernichtet werden können, haben sich einige inzwischen überall angereichert, weil wir sie in derart riesigen Mengen einsetzen.

Deformierte Geschlechtsorgane

Manche dieser Stoffe stehen im Verdacht, die Entwicklung des Reproduktionssystems zu beeinträchtigen. So weiß man schon länger, dass männliche Nagetiere mit deformierten Geschlechtsorganen geboren werden, wenn ihre Mütter mit Phthalaten in Berührung kamen, die unter anderem als Weichmacher in Kunststoffen sowie als Trägersubstanzen für Duftstoffe in Kosmetika vorkommen. Im vergangenen Jahr berichtete Shanna H. Swan von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York) über ähnliche Missbildungen bei menschlichen Säuglingen. Eine weitere Studie unter ihrer Leitung ergab, dass der Urin von Männern mit niedriger Spermienzahl aus ländlichen Gegenden in Missouri ungewöhnlich große Mengen an Herbiziden wie Arachlor und Atrazin enthielt. Ausgehend von Fabriken und Feldern können sich biologisch nicht abbaubare Schadstoffe durch die Luft und mit dem Wasser ausbreiten und entweder direkt oder über die Nahrungskette in unseren Organismus gelangen.

Ziel der grünen Chemie ist es, das Übel an der Wurzel zu packen (siehe Kasten auf S. 92). Die Arbeit der Gruppe an der Carnegie-Mellon-Universität reicht bis in die 1980er Jahre zurück, als sich die Gesundheitsbedenken gegenüber Chlor mehrten. Das Gas diente damals wie heute im großen Stil zur Reinigung und Desinfektion – so auch zur Behandlung von Trinkwasser. Sein Einsatz ist zwar preiswert und effizient, erzeugt aber teils unliebsame Nebenprodukte. Aus der Zellstoffbleiche mit elementarem Chlor in Papierfabriken stammte bis vor Kurzem ein großer Teil der Krebs erregenden Dioxine. Deren Ausstoß ist zwar geringer geworden, seit die meisten Papiermühlen Zellstoff mit Chlordioxid bleichen, aber nicht gänzlich unterbunden. Auch bei der Chlorierung von Trinkwasser entstehen Nebenprodukte, die mit der Entste-

IN KÜRZE

- ▶ Viele schädliche Substanzen – darunter **Farbstoffe und Pestizide** – haben die Umwelt mittlerweile in einem Ausmaß großflächig verseucht, dass unsere Gesundheit bedroht ist.
- ▶ Chemikern gelang kürzlich die Entwicklung enzymähnlicher Katalysatoren, die sogar hartnäckige Schadstoffe zerstören können, indem sie deren **Reaktion mit Wasserstoffperoxid** beschleunigen.
- ▶ In Abwässern von Papierfabriken können diese »Metallkomplexe mit makrozyklischen Tetraamid-Liganden« die Verunreinigung durch färbende und **gefährliche Chemikalien** drastisch verringern.
- ▶ Das Potenzial der neuartigen Katalysatoren reicht jedoch viel weiter – von der **Trinkwasseraufbereitung** bis zur Dekontamination nach einem Angriff mit biologischen Waffen.

Verunreinigung der Gewässer



Die Schadstoffbelastung der Gewässer stammt aus vielen Quellen. TAML-Katalysatoren könnten einige der schlimmsten Verunreinigungen beseitigen, bevor diese in Flüsse und Seen gelangen. So ließen sich damit reaktive Farbstoffe, Organochlorverbindungen und andere gefährliche Chemikalien in Abwässern aus Textil- und Papierfabriken zerstören. TAML-Katalysatoren könnten aber auch dazu dienen, den Ablauf von Jauchegruben und Kläranlagen zu reinigen. Dieser enthält unter anderem Farbstoffe aus Buntwäsche und Medikamente, die mit dem Urin ausgeschieden werden.

hung gewisser Krebsarten in Zusammenhang gebracht wurden.

In der Natur kommt Chlor in harmlosen Chloridverbindungen wie Kochsalz vor. In elementarer Form ist es dagegen extrem aggressiv und reagiert bereitwillig mit anderen Molekülen. Dabei können Verbindungen entstehen, die störend in die Biochemie von Lebewesen eingreifen. Dioxine zum Beispiel beeinträchtigen die Zellentwicklung, indem sie ein Rezeptorsystem durcheinander bringen, das die Bildung wichtiger Proteine steuert.

Milliardenfache Beschleunigung

Deshalb fragten wir uns, ob man statt Chlor nicht die der Natur eigenen Reinigungsmittel – Wasserstoffperoxid und Sauerstoff – verwenden könne, um Wasser zu desinfizieren, Papier zu bleichen

und Industrieabfälle zu zerstören. Mit diesen beiden Substanzen lassen sich viele Schadstoffe sicher und wirksam vernichten; allerdings benötigen die betreffenden Abbaureaktionen in der Natur normalerweise ein Enzym, um mit messbarer Geschwindigkeit abzulaufen. Ein solcher Katalysator agiert dabei wie eine altmodische Kupferlin.

Anstelle von zwei Menschen bringt er allerdings bestimmte Moleküle zusammen und sorgt dafür, dass es zwischen ihnen »funkelt«. Einige natürliche Katalysatoren können chemische Reaktionen dadurch milliardenfach beschleunigen. Ein Beispiel ist das Enzym Pryalin: Hätten wir es nicht in unserem Speichel, bräuhete unser Körper mehrere Wochen, um Nudeln in ihre Zuckerbestandteile zu zerlegen. Ohne solche Reaktionsbe-

schleuniger wäre die Biochemie von lähmender Langsamkeit und Leben, wie wir es kennen, schlicht nicht möglich.

In der Natur katalysieren so genannte Peroxidasen Umsetzungen mit Wasserstoffperoxid, dem wohlbekanntesten Hausmittel zum Bleichen von Haaren und Entfernen von Flecken auf dem Teppich. Auf diese Weise zerlegen zum Beispiel Pilze auf vermodernden Waldbäumen das Lignin im Holz in kleinere Bestandteile, die sie dann verzehren können. Eine andere Enzymfamilie mit dem Sammelbegriff Cytochrom-p450 beschleunigt Reaktionen, bei denen Sauerstoff im Spiel ist – und sorgt so etwa für die Entgiftung eingatmeter oder eingenommener Schadstoffe in der Leber.

Jahrzehntelang mühten sich Chemiker, kleine Moleküle herzustellen, die ▷

▷ ähnlich wirksam sind wie diese Enzyme – böten sie doch einen willkommenen Ersatz für herkömmliche Oxidationsverfahren auf Basis von Chlor oder Metallen, die viele Schadstoffe produzieren. Reagenzglas-Versionen von Enzymen zu fabrizieren wollte in den frühen 1980er Jahren jedoch niemandem glücken. In Jahr-milliarden der Evolution hat die Natur ein höchst elegantes und äußerst komplexes Räderwerk katalytischer Prozesse entworfen, gegen das sich unsere Anstrengungen im Labor klobig und unbeholfen ausnehmen. Gleichwohl können wir unser Ziel der Schadstoffverringerung nur erreichen, wenn wir diesen Tanz der Moleküle irgendwie nachahmen.

Eine molekulare Brandmauer

Eine grundlegende Schwierigkeit beim Entwurf künstlicher Abbauenzyme ist, dass sie robust genug sein müssen, um die zerstörerischen Reaktionen, die sie katalysieren sollen, selbst zu überstehen. Mit Sauerstoff zu arbeiten ist immer riskant; denn dieses Element verbindet sich begierig mit vielen anderen Atomen. Und weil das Wasserstoffperoxid-Molekül (H_2O_2) chemisch zwischen Wasser (H_2O) und molekularem Sauerstoff (O_2) angesiedelt ist, wirkt es ähnlich oxidierend. In Wasser löst es, wenn es aktiviert wird, eine Art kaltes Feuer aus, das die organischen, also kohlenstoffhaltigen Moleküle in der unmittelbaren Umgebung »verbrennt«.

Peroxidasen, die wir uns zum Vorbild nahmen, enthalten ein Eisenatom, das in der Mitte eines Quadrats aus vier Stickstoffatomen sitzt (siehe Kasten rechts). Diese sind mit ihm durch kovalente Bindungen verknüpft, das heißt, beide teilen sich je ein Elektronenpaar, das in diesem Fall vom Stickstoff stammt. Außerdem sind sie untereinander über organische Reste zu einem großen äußeren Ring verbunden, einem »Makrozyklus«. Bei einer solchen Struktur nennen Chemiker die kleineren Atome, die das Metall im Zentrum umgeben, samt den daran hängenden Gruppen Liganden.

Ein ähnliches Gebilde versuchten wir künstlich zu schaffen. Dabei mussten wir die Liganden in Aufbau und Verknüpfungsgart so gestalten, dass sie wie eine Art Brandmauer dem von den TAML-Molekülen ausgelösten kalten Feuer widerstanden. Je länger ein Katalysator durchhielte, desto nützlicher wäre er. Andererseits sollte er aber auch nicht unzerstörbar sein; denn dann könnte er in

die Gewässer gelangen und dort selbst zum Problem werden.

Die Liganden feuerfest zu machen war nicht ganz einfach. Es gelang uns schließlich mit einem vierstufigen Verfahren. Zunächst überlegten wir uns eine Konstruktion, die uns robust schien, und synthetisierten sie. Als Nächstes unterwarfen wir den damit ausgerüsteten Katalysator oxidierenden Bedingungen, bis die Brandmauer bröckelte. Als Drittes lokalisierten wir die Stelle, wo die Zerstörung begann. Sobald wir diese Achillesferse ausgemacht hatten, ersetzten wir sie durch Atomgruppen, die wir für widerstandsfähiger hielten, und begannen den Zyklus von vorn.

Nach fünfzehn Jahren Forschung hielten wir so um die Jahrtausendwende schließlich den ersten funktionsfähigen TAML-Katalysator in der Hand. Der Erfolg war uns klar, als Colin Horwitz, ein Forschungsprofessor an unserem Institut, eines Morgens der versammelten Mannschaft ein Experiment vorführte: Er spritzte dunklen Farbstoff in eine Lösung, die Wasserstoffperoxid und unser neuestes TAML-Modell enthielt, und wir konnten zusehen, wie die Farbe jedes Mal gleich wieder verschwand. Offenbar waren die Brandmauern nun so stabil, dass sich der Katalysator nicht selbst zerstörte, bevor er seine Aufgabe erledigt hatte. Das Molekül verhielt sich wie ein Enzym, war aber viel kleiner; sein Molekulargewicht betrug nur rund 500 Dalton – gegenüber zum Beispiel 40 000 Dalton bei der Meerrettich-Peroxidase, einem der kleinsten bekannten Enzyme.

Seit jenem denkwürdigen Morgen haben wir nach unserem vierstufigen Schema mehr als zwanzig verschiedene solche katalytisch aktiven Moleküle entwickelt. Wegen ihrer geringen Größe sind unsere TAML-Aktivatoren nicht nur leichter und billiger herzustellen, sondern auch vielseitiger anwendbar als ihre natürlichen Gegenstücke. Jedes hat seine eigene Reaktionsgeschwindigkeit und Lebensdauer, sodass wir je nach Aufgabe das passende Exemplar aussuchen können.

Die meisten unserer Katalysatoren enthalten Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Eisen, die nur eine geringe Toxizität haben. Einige nennen wir »Torpedo-TAMLs«, weil sie wie magnetische Minen, die vom Metallrumpf von Schiffen angezogen werden, gezielt bestimmte Schadstoffe aufspüren und daran ando-

cken. Andere wirken eher wie Feuerwerfer – verbrennen sie doch so gut wie alle oxidierbaren Stoffe, mit denen sie in Berührung kommen. Wieder andere sind ziemlich wählerisch und greifen nur gewisse Molekülteile oder die leichter oxidierbaren Moleküle in einer Gruppe an.

Wir sehen noch viele Möglichkeiten, TAML-Katalysatoren an die unterschiedlichsten Bedürfnisse der grünen Chemie anzupassen. Zwar sind weitere Toxizitätstests nötig, aber die bisherigen Untersuchungen hatten ermutigende Ergebnisse. Demnach zerlegen unsere TAML-Katalysatoren Schadstoffe in nichttoxische Bestandteile und hinterlassen selbst keine nachweisbare Kontamination; denn alle zersetzen sich in Gegenwart von Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid innerhalb von Minuten bis Stunden. Wir halten inzwischen über neunzig internationale Patente auf solche Moleküle, und weitere sind in Vorbereitung. Außerdem haben wir diverse kommerzielle Lizenzen.

Hungrig auf Elektronen

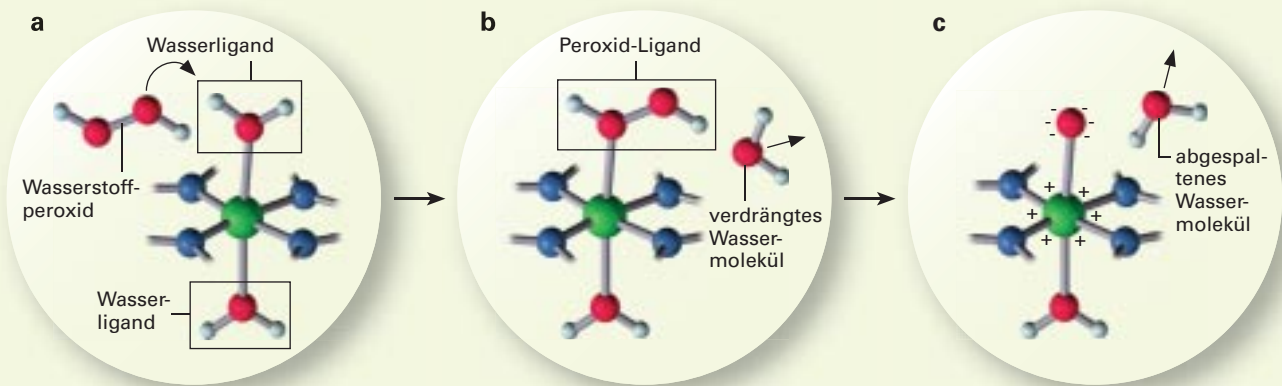
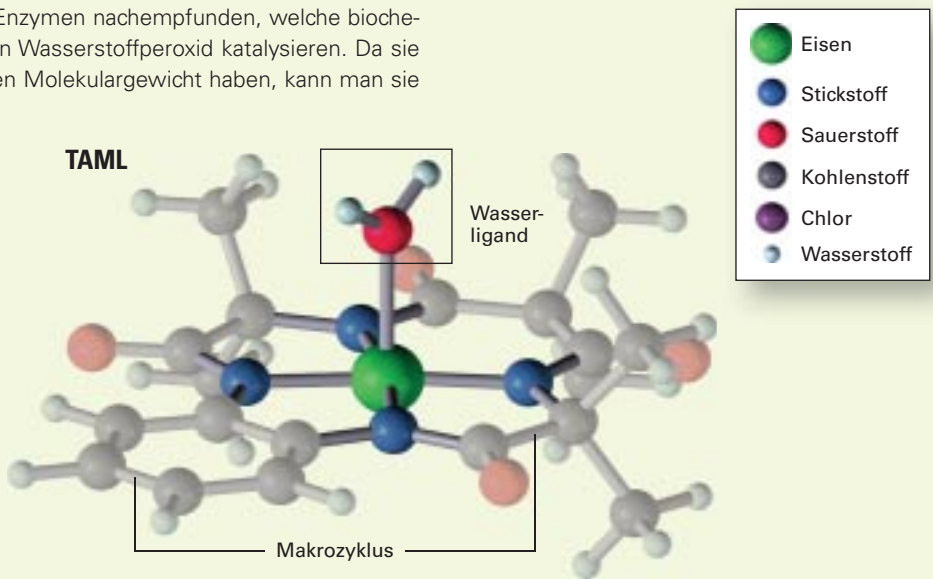
Paradoxerweise kennen wir die Wirkungsweise der TAML-Katalysatoren noch nicht in allen Details. Jüngste Untersuchungen haben jedoch Einblicke in die Schlüsselreaktionen geliefert. Im festen Zustand sitzt gewöhnlich ein Wassermolekül senkrecht zu den vier Stickstoffliganden als zusätzlicher Ligand am Eisen. In Lösung gesellt sich ein weiteres auf der gegenüberliegenden Seite hinzu. Diese Wassermoleküle sind nur sehr lose gebunden. So kann eines davon leicht durch Wasserstoffperoxid ersetzt werden, das sich gleichfalls in der Lösung befindet. Dieses stößt dann sehr schnell zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom ab, die als Wassermolekül (H_2O) entweichen. Zurück bleibt ein Sauerstoff- am zentralen Eisenatom im Katalysator, der damit zum reaktiven Zwischenprodukt (RZ) wird.

Ein einzelnes Sauerstoffatom als Ligand ist viel stärker elektronegativer als ein Wassermolekül und zieht deshalb die äußeren Elektronen vom Eisen-Atomkern zu sich herüber. Dessen positive Ladung nimmt folglich zu. Dadurch ist das RZ reaktiv genug, um oxidierbaren Molekülen in der Lösung Elektronen zu entreißen. Wir konnten noch nicht ermitteln, wie es dabei die Bindungen seiner Zielmoleküle aufbricht; die Antwort erhoffen wir uns von aktuellen Untersuchungen. Eines aber wissen wir: Die Zerstörungskraft un-

Eine molekulare Waschmaschine

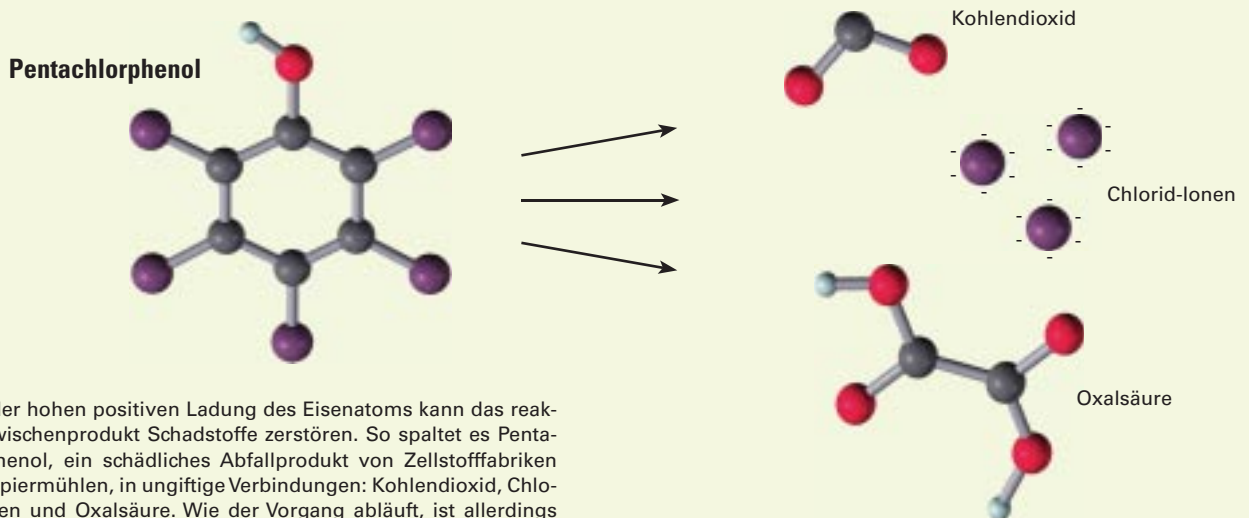
Die TAML-Katalysatoren sind natürlichen Enzymen nachempfunden, welche biochemische Reaktionen unter Beteiligung von Wasserstoffperoxid katalysieren. Da sie aber nur knapp ein Hundertstel von deren Molekulargewicht haben, kann man sie sehr viel leichter und billiger herstellen.

Im Zentrum jedes TAML-Katalysators sitzt ein Metallatom – in der Regel Eisen. Es ist an vier Stickstoffatome gebunden, die ihrerseits über ein Kohlenstoffgerüst zu einem großen Ring verknüpft sind. Dieser so genannte Makrozyklus wurde chemisch sehr robust gestaltet, sodass er wie eine Brandmauer wirkt, die das Molekül vor den von ihm selbst ausgelösten heftigen Reaktionen schützt. In festem Zustand hat das Eisen noch ein Wassermolekül (H_2O) angelagert. Chemiker bezeichnen die an das Metall gebundenen Gruppen als Liganden.



In wässriger Lösung heftet sich ein zweites Wassermolekül an das Eisenatom im Zentrum des TAML-Katalysators (a). Ist auch Wasserstoffperoxid (H_2O_2) zugegen, kann es einen der nur lose gebundenen Wasserliganden verdrängen (b). Anschließend spaltet das



Peroxid selbst ein Wassermolekül ab, sodass von ihm nur ein Sauerstoffatom am Metall zurückbleibt (c). Dieses zieht Elektronendichte vom Eisenatom ab und verwandelt das TAML so in ein reaktives Zwischenprodukt.



Dank der hohen positiven Ladung des Eisenatoms kann das reaktive Zwischenprodukt Schadstoffe zerstören. So spaltet es Pentachlorophenol, ein schädliches Abfallprodukt von Zellstofffabriken und Papiermühlen, in ungiftige Verbindungen: Kohlendioxid, Chlorid-Ionen und Oxalsäure. Wie der Vorgang abläuft, ist allerdings noch nicht vollständig geklärt.

Die Chemie wird grün

Die TAML-Katalysatoren sind nur eine von mehreren Errungenschaften der »grünen« Chemie, die Produkte und Verfahren so gestalten will, dass weniger oder gar keine gefährlichen Substanzen eingesetzt oder erzeugt werden. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt.

Errungenschaft	Protagonisten	Stand
Synthese biologisch abbaubarer Poly-Milchsäuren aus Pflanzenzuckern als Ersatz für traditionelle Kunststoffe auf Petroleumbasis	Patrick Gruber, Randy L. Howard, Jeffrey J. Kolstad, Chris M. Ryan und Richard C. Bopp, NatureWorks LLC (eine Tochtergesellschaft von Cargill)	NatureWorks LLC hat in Nebraska eine Fabrik zur Produktion von Kügelchen aus Poly-Milchsäure gebaut, aus denen man Wasserflaschen, Verpackungsmaterial und andere Produkte herstellen kann. 
Entdeckung von Synthese-Reaktionen, die statt in teils Krebs erregenden organischen Lösungsmitteln in gewöhnlichem Wasser ablaufen	Chao-Jun Li, McGill-Universität	Chemieunternehmen, die Arzneimittel und Gebrauchsgüter herstellen, prüfen die Eignung der Verfahren für den großtechnischen Einsatz.
Entwicklung der Metathese, einer organischen Synthesemethode, mit der sich Arzneimittel, Kunststoffe und andere Chemikalien schonender und mit höherer Ausbeute sowie mit weniger schädlichen Nebenprodukten herstellen lassen	Robert H. Grubbs, California Institute of Technology, Richard R. Schrock, Massachusetts Institute of Technology; Yves Chauvin, Institut Français du Pétrole	Das Verfahren findet breite Anwendung in der chemischen, biotechnologischen und Nahrungsmittelindustrie; die drei Protagonisten erhielten 2005 den Chemie-Nobelpreis. 
Ersatz von Lösungsmitteln auf Petroleumbasis durch überkritisches Kohlendioxid, das bei hoher Temperatur und hohem Druck entsteht und die Eigenschaften einer Flüssigkeit und eines Gases in sich vereint	Martyn Poliakoff, Michael George and Steve Howdle, Universität Nottingham	Thomas Swan & Co., ein britischer Hersteller von Spezialchemikalien, hat eine Fabrik gebaut, in der überkritische Fluide zum Einsatz kommen.
Erfindung einer neuen Methode zur Herstellung des Antidepressivums Sertralin	James Spavins, Geraldine Taber, Juan Colberg und David Pfisterer, Pfizer	Das Verfahren senkt den Schadstoffausstoß sowie den Wasser- und Energieverbrauch; zugleich erhöht es die Arbeitssicherheit und die Produktausbeute.

▷ seres Katalysators lässt sich durch Austausch der Atome an seinem Vorder- und Hinterende erhöhen. Wenn wir hier stark elektronegative Elemente anbringen, ziehen diese weitere Ladungsdichte vom Eisen ab, was das RZ aggressiver macht.

Von Laborexperimenten zum großräumigen kommerziellen Einsatz ist es ein weiter Schritt. Doch konnten wir in etlichen Feldversuchen schon viel versprechende Resultate erzielen – etwa bei Tests zur Abwehr von bioterroristischen Angriffen. Wenn wir einen bestimmten TAML-Katalysator mit Tertiär-Butyl-Wasserstoffperoxid kombinieren – in dem ein Wasserstoff- durch ein Kohlenstoffatom mit drei Methylgruppen (CH_3) ersetzt ist –, tötet die resultierende Lösung binnen fünfzehn Minuten

99,99999 Prozent der Sporen von *Bacillus atrophaeus* ab, das dem Milzbrand-erreger stark ähnelt. Aber auch Alltagsanwendungen haben wir im Visier. So wollen wir ein billiges Desinfektionsmittel entwickeln, das infektiöse Mikroben in Wasser vernichtet – die Ursache vieler Todes- und Krankheitsfälle weltweit.

Klärung von Abwässern

In drei Feldversuchen haben wir außerdem erforscht, wie TAML-Katalysatoren die Umweltverschmutzung durch die Papier- und Zellstoffindustrie verringern können. Diese produziert jedes Jahr mehr als 100 Millionen Tonnen gebleichte Zellulosefasern, aus denen weißes Papier hergestellt wird. Beim traditionellen Bleichen bilden sich Dioxine, Chlorphenole

und andere gefährliche Organochlorverbindungen. Viele Zellstofffabriken leiten außerdem kaffeebraunes Abwasser in Bäche, Flüsse oder Seen und färben sie dadurch dunkel. Das beeinträchtigt die Photosynthese der Wasserpflanzen, worunter auch alle Organismen leiden, die sich von ihnen ernähren.

Die Färbung stammt von großen Fragmenten des Polymers Lignin, das die Zellulosefasern im Holz zusammenhält. Es wird beim chemischen Aufschließen der Holzschnitzel und beim anschließenden Bleichen des Zellstoffs mit Chlordioxid entfernt und teilweise aufgespalten. Bakterien und andere Mikroorganismen in Klärteichen können nur die kleineren Fragmente abbauen; die größeren Bruchstücke gelangen in Flüsse und Seen.

In zwei Papiermühlen in den USA und einer in Neuseeland haben wir geprüft, wie gut eisenhaltiges Fe-TAML mit Lignin belastete Abwässer entfärbt. In Neuseeland behandelten wir eine Charge von 50000 Litern mit dem Katalysator und Peroxid. In den USA injizierten wir ihn dagegen mehrere Tage lang direkt in eine Zellstoffverarbeitungsanlage oder ein Abflussrohr. Insgesamt verringerte Fe-TAML die Färbung des Wassers um bis zu 78 Prozent und vernichtete 29 Prozent der Organochlorverbindungen.

Kein Verfärben von Wäsche mehr

Aber auch andere Anwendungen unserer Katalysatoren zeichnen sich ab. Eine hat Eric Geiger von der Firma Urethane Soy Systems in Volga (Süddakota) entdeckt. Demnach lassen sich mit Fe-TAML aus Sojabohnenöl nützliche Polymere herstellen, deren Eigenschaften mindestens so gut wie die von herkömmlichen Polyurethanprodukten sind. Ein weiteres Einsatzgebiet könnte Waschpulver sein: Setzt man ihm winzige Mengen TAML zu, erübrigt sich – so das Ergebnis unserer eigenen Versuche – die Trennung von Bunt- und Weißwäsche. Die Katalysatoren verhindern das Abfärben, indem sie den von einer bunten Faser abgelösten Farbstoff zersetzen, bevor er sich an weiße Textilien anheften kann. Schließlich arbeiten wir an einer neuen Familie von TAMLs, welche die äußerst festen Bindungen brechen kann, durch die manche Arzneimittel und Agrochemikalien stabil genug sind, um intakt bis ins Trinkwasser zu gelangen.

Trotz der beschriebenen Erfolge bedarf es weiterer Versuche im industriellen Maßstab – vor allem, um sicherzustellen, dass die TAML-Katalysatoren nicht neue, bisher unbemerkte Umweltprobleme schaffen. Zu oft schon schienen innovative chemische Technologien bei der Einführung völlig harmlos, und Jahrzehnte später kamen die verheerenden Folgewirkungen ans Licht. Wir wollen alles tun, was in unserer Macht steht, um derartige Überraschungen zu vermeiden.

Schließlich spielen auch die Kosten eine Rolle. Bei den meisten Anwendungen scheinen TAML-Katalysatoren konkurrenzfähig, aber in der Regel haben die Firmen viel Geld in die existierenden chemischen Verfahren gesteckt. Ein Wechsel zu neuen Systemen und Techniken ist gewöhnlich mit bedeutenden In-

vestitionen verbunden. TAML-Katalysatoren haben jedoch den großen Vorteil, dass sie kein völliges Umrüsten erfordern. Außerdem bieten sie einen preisgünstigen Weg, den immer schärfer werdenden Umweltsetzen in den USA, Europa und anderswo zu genügen, und dürften den Firmen damit letztlich sogar helfen, Geld zu sparen.

So erfreulich die bisherigen Erfolge der grünen Chemie sind, bilden sie allerdings nur kleine Schritte auf dem Weg zur Lösung der Umweltprobleme des 21. Jahrhunderts. Die grundlegende Frage lautet: Wollen wir auch in Zukunft bloß Notfall- oder aber Präventivmedizin betreiben? Die meisten Chemiker werden im Studium immer noch darauf getrimmt, elegante Lösungen und Verbindungen für ein gestelltes Problem zu finden, ohne die weiteren Auswirkungen zu bedenken. Die grüne Chemie will das ändern. De facto führen wir mit den überkommenen Produktionsweisen globale Experimente an unseren Ökosystemen und uns selbst durch – mit möglicherweise katastrophalen Folgen, wenn diese Versuche misslingen. Die industrielle Revolution hat die Menschheit einst planlos und blind in ein neues Zeitalter katapultiert. Vielleicht können wir heute unsere Kreativität einsetzen, um Fehlentwicklungen rückgängig zu machen und einen wohlgedachten Kurs zu steuern, der die Welt und unsere Zukunft nicht gefährdet. ◁



Terrence J. Collins (oben) ist Chemieprofessor an der Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh (Pennsylvania), wo er das Institut für Grüne Oxidationschemie leitet, und Honorarprofessor an der Universität Auckland (Neuseeland). **Chip Walter** ist Wissenschaftsjournalist und Buchautor von »Space Age« und »I am Working on That« (mit William Shatner). Er lehrt an der Carnegie-Mellon-Universität wissenschaftliches Schreiben und ist Vizechef der Presseabteilung am Medizinischen Zentrum der Universität Pittsburgh.



Rapid total destruction of chlorophenols by activated hydrogen peroxide. Von Sayam Sen Gupta et al. in: Science, Bd. 296, S. 326, 12.4. 2004

Toward sustainable chemistry. Von T. J. Collins in: Science, Bd. 291, S. 48, 5.1. 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

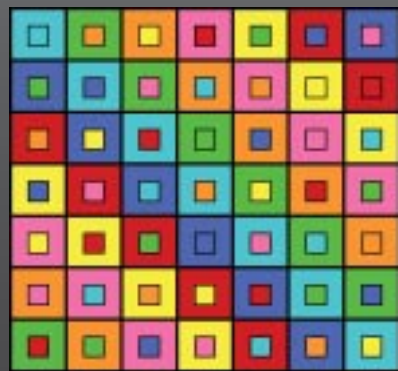
AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Unser original Rubik's-Cube im **Spektrum-Design** hat nicht nur sechs unterschiedliche Seiten – diese müssen auch noch in sich stimmig sein, da sie jeweils ein wissenschaftliches Motiv tragen. Der Cube besitzt eine Kantenlänge von 5,7 cm und kostet € 14,90 zzgl. Versand.

Zu beziehen über den Beihefter oder:

www.spektrum.de/lesershop



Wenn es Ihnen gelingt, jedem der Quadrate zwei Farben (innen & außen) zuzuweisen und dabei die äußerst strengen Regeln für Euler'sche Quadrate einzuhalten, dann heißt es »Gewonnen, Herr Euler«. Das Spiel finden Sie

k o s t e n l o s

unter www.spektrum.de/euler