

So schön kann "Recycling" sein: Blumen aus Plastiklöffeln, Korken und Trinkbechern schmücken einen Wald in der westenglischen Grafschaft Gloucestershire.

ie uns das Kupferbeil von "Ötzi" zeigt, hat die Mensch-heit schon in der präfossilen Kupferzeit chemische Stoffe in erstaunlichen Mengen umgewandelt, was enorme Folgen für Gesellschaft, Kultur und Handel hatte. Vor etwa 150 Jahren begann mit dem Übergang von Alchemie zur Chemie der Siegeszug der Chemie als Wissenschaft und als Industriezweig. Die Folge war eine ungeheure Zunahme an Vielfalt und Komplexität von Stoffen, Materialien und Produkten. Selbst vermeintlich einfache Kunststoffe, die heutzutage zum Verpacken von Lebensmitteln verwendet werden, enthalten oft mehrere unterschiedliche Bestandteile. Ganz zu schweigen von Materialien, wie sie für die Energiewende (Rotorblätter von Windrädern oder Photovoltaikzellen), für die Mobilitätswende (Batterien und Hochleitungskunststoffe) und für die moderne Kommunikation (Touchscreens oder Speichermedien) benötigt werden. Die Chemie wie auch die Pharmazie sind zu einem der wesentlichen Pfeiler geworden, auf dem unsere Gesundheit und unser Wohlstand beruhen. Materialien und Stoffe, die lange als inkompatibel galten, sind heute Bestandteile von komplexen Verbundmaterialien. Gleichzeitig werden chemische Verbindungen immer spezifischer in ihrer

Die Spuren der bisherigen Erfolgsgeschichte der Chemie sind vielfältig und global sichtbar. Die enorme Zunahme der Nutzung von Rohstoffen aller Art – mittlerweile nutzen wir die Elemente des gesamten Periodensystems – und der daraus hergestellten Stoffe, Materialien und Produkte sowie die enormen Tonnagen, die über die ganze Welt bewegt und verteilt werden, sind nicht ohne Folgen geblieben. Am Ende ihres Lebens begegnen uns die Produkte weltweit wieder als Abfälle, etwa in Form von Elektroschrott oder "wertlosen" Kunststoffen in den Ozeanen oder als Verunreinigung in Gewässern oder Böden, verursacht von Arzneimitteln, Flammschutzmitteln, Produkten der Körperhygiene und Kosmetik, Weichmachern, Pestiziden, Bioziden, Tensiden, Korrosionsschutzmitteln oder UV-Absorbern. Einhergehend mit ihrer zunehmenden Nutzung, trifft man vermehrt auch auf Metalle, die vor zehn Jahren selbst bei vielen Chemikerinnen und Chemikern kaum bekannt waren oder als Laborkuriositäten galten. Die "grüne Chemie" und ihre Grundprinzipien sind eine wichtige Voraussetzung dafür, umweltfreundlichere Stoffe weniger umweltbelastend zu pro-

Grünes Design allein reicht nicht mehr

Noch jagen viele in der Chemie falschen Leitbildern hinterher. Statt Kreisläufen brauchen wir zielgerichtete, sparsame Prozesse. Von Klaus Kümmerer

duzieren. Aber wann ist eine Verbindung tatsächlich "grün"? Genügt es, eines der Grundprinzipien zu erfüllen, oder müssen es alle sein? Wird die Chemie dadurch allein schon nachhaltig? Und wie werden die Prinzipien gegeneinander gewichtet? So wäre es möglich, dass sogar ein chemischer Kampfstoff alle Prinzipien der "grünen Chemie" erfüllt.

Eines dieser Grundprinzipien ist das zielgerichtete Design von Stoffen, damit sie nach der Nutzung natürlich abgebaut werden können, ohne der Umwelt zu scha-



den. Chemikalien, die nach ihrem Eintrag in die Umwelt schnell und vollständig abgebaut werden, sind in der Zukunft unabdingbar: Sie verhindern nicht nur die Verschmutzung von Gewässern und machen damit große Investitionen in die Aufrüstung von Kläranlagen und die intensive Aufbereitung von "Rohwasser" etwa zu Trinkwasser unnötig. Von vollständig abbaubaren Stoffen profitierten massiv auch jene Länder, die über keine eigene Abwasserreinigung verfügen. Das würde hier nicht nur die Wasserqualität verbessern, sondern auch die Ernährungssituation, da immer mehr Abwässer aufgrund der wachsenden Bevölkerung und der Wasserverknappung (in)direkt wiederverwendet werden müssen. Allerdings, wenn viele chemische Stoffe gar nicht erst verwendet würden, bedürfe es auch keines Substituts. Darüber hinaus wären alle Ressourcen, die man zu deren Synthese benötigt, nicht notwendig, und die mit

der Synthese einhergehenden Abfälle würden nicht entstehen. So kann sich durch kluge Planung die Anwendung eines Fungizides für den Holzschutz erübrigen. In einer Klinik könnte man den Hygienestandard auch ohne vermehrten Gebrauch von Desinfektionsmitteln erhöhen, indem man etwa verstärkt auf Ausbildung und auf das Wissen in der medizinische Mikrobiologie setzt. Natürlich sind hier Grenzen gesetzt, denn ganz ohne Chemie wird es nicht gehen, aber deutliche Verbesserungen sind möglich.

Die wenigen Beispiele demonstrieren die Limitierung der "grünen Chemie". Damit diese im wahrsten Sinne des Wortes nachhaltig erfolgreich ist, braucht es auch einen viel weiter gefassten Blick. der weit über die eigentliche Chemie hinausgeht: den der nachhaltigen Chemie. Eine Definition von nachhaltiger Chemie wäre aber hinderlich, denn die Chemie selbst, ihre Anwendung und ihre Produkte sind so vielfältig, dass immer ein spezifischer Aspekt nicht oder nicht richtig oder nicht vollständig getroffen würde. Vielmehr ist die nachhaltige Chemie ein Leitbild. Sie geht von einer Funktion oder einem Zweck aus, der in einem gegebenen Kontext benötigt wird, und fragt zuerst, ob bestimmte Stoffe in einer bestimmten Anwendung oder in einem Produkt notwendig sind. Davor steht die Frage, ob es nicht chemische Alternativen gibt. Ein Beispiel ist ein spezielles architektonisches Design, das Holzschutzmittel überflüssig macht. Erst wenn klar ist, dass eine chemische Verbindung für einen bestimmten Zweck benötigt wird, stellt sich in der nachhaltigen Chemie die Frage, welche chemische Verbindung die benötigte Funktion am besten bereitstellen kann und wie sie am nachhaltigsten verwirklicht werden kann. Dabei werden alle Aspekte entlang des gesamten Lebenswegs auch über den eigentlichen chemischen Kontext hinaus betrachtet.

Auch gilt es, allgegenwärtige Fallen

und falsche Leitbilder – auch innerhalb der grünen und nachhaltigen Chemie zu identifizieren und zu vermeiden. Geschlossene Stoffkreisläufe (Circular Economy) beispielsweise haben wir lange noch nicht vollständig verstanden. Das "Vorbild Natur" führt uns hier auf den falschen Weg. Die vielen zirkulierenden kritischen Stoffe wie die Stoff-, Materialund Produktströme werden dadurch nicht automatisch kleiner oder besser zu recyclen. Das vielfach als Ausweg gepriesene "Upcycling", bei dem Abfallprodukte oder scheinbar nutzlose Stoffe in neuwertige Produkte umgewandelt werden, gibt es nicht. Wir werden immer etwas von den Bestandteilen unwiederbringlich verlieren, die dann als Rohstoffe fehlen und (oder) die Umwelt belasten. Wir können nach den Gesetzen der Thermodynamik lediglich den Umfang der unvermeidlichen Verluste minimieren und zahlen dafür einen Preis. Je weniger Bestandteile eines Produkts wir verlieren wollen, desto mehr Energie müssen wir aufwenden, und desto mehr Entropie entsteht. Das zeigt sich an Umwelt- und Gesundheitsbelastungen, am Verlust von Rohstoffen und Materialien oder an deren geringerer Qualität. Hierzu zwei Beispiele: Alte PET-Getränkeflaschen lassen sich zu Textilien verarbeiten. Durch die Zugabe von Farbstoffen und Additiven wie UV-Stabilisatoren oder UV-Schutz sinkt aber die Materialreinheit, die das weitere Recycling erschwert. Moderne Kunststoffe sollen unter anderem durch Gewichtsreduktion den Kraftstoffverbrauch von Autos reduzieren und damit die CO₂-Bilanz verbessern. Solche und viele andere

Kunststoffe bestehen schon lange nicht mehr nur aus einem Polymer, sondern oft aus einer physikalischen oder chemischen Mischung vieler unterschiedlicher Polymere und aus einer Vielzahl von Ad-ditiven, was die Wiedergewinnung außerordentlich erschwert oder gar unmöglich macht. Eine chemische De-Polymerisation hat ebenfalls mit den unterschiedlichen Bestandteilen heutiger Kunststoffe zu kämpfen – von der Energiebilanz ganz abgesehen. Das beim Autofahren durch Gewichtsreduktion eingesparte CO2 wird wie die Entropieproduktion lediglich in andere Bereiche oder in spätere Zeiten (zum Beispiel ans Lebensende des Autos) transferiert. Müssten wir also nicht zuerst über Mobilität nachdenken und dann fragen, was die Chemie nachhaltig dazu beitragen kann? Die "Industrie 4.0" könnte hier eine Chance bieten, wenn wir sie umfassend genug verstehen, sie gemäß der nachhaltigen Chemie nutzen und dabei nicht vergessen, dass auch sie eine materielle Basis benötigt. Die vierte industrielle Revolution darf auch nicht dazu führen, dass durch sie Stoff-, Material- und Produktströme, weiter verringerte Produktionskosten und immer kürzere und schnellere Innovationzyklen zu weiter steigenden Stoff-, Produkt- und Materialströmen führen. Die hier nur exemplarisch angedeuteten, weit über das "Kerngeschäft" der herkömmlichen Chemie, der Synthese und des Verkaufs chemischer Produkte hinausgehenden Gesamtbetrachtungen sind das Kennzeichen einer nachhaltigen, auch künftig erfolgrei-

chen Chemie. Im Jahr 2015 haben die Vereinten Nationen die sogenannten "Sustainable Development Goals" (SDGs) verabschiedet. Sie zeigen Ziele auf, welche die Menschheit bis 2030 erreichen muss, um langfristig für alle ein menschenwürdiges Leben und einen gewissen materiellen Wohlstand zu ermöglichen. Ein genauer Blick zeigt, dass die meisten Ziele mit Chemie zu tun haben. Die angedeutete neue und breitere Sichtweise der nachhaltigen Chemie ist Voraussetzung und Garant gleichzeitig für einen nachhaltigen Beitrag der Chemie. Dazu bedarf es aller Akteure, beginnend mit den Studenten, der Forschung, den kleineren Unternehmen bis hin zu den global tätigen Konzernen sowie den Nutzern chemischer Produkte.

Klaus Kümmerer ist Professor für Nachhaltige Chemie und Stoffliche Ressourcen sowie Leiter des Instituts für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie an der Leuphana Universität Lüneburg.

Kleine oder große Happen?

Nahrungsangebot bestimmt die Evolution von Aalen

Der Europäische Aal (Anguilla anguilla) kommt in zwei Varianten daher: zum einen als Spitzkopfaal mit schmaler Schnauze und schwach ausgeprägter Kiefermuskulatur, zum anderen als Breitkopfaal, der mit seiner breiteren Schnauze kräftig zubeißen kann. Dass sich diese Spezialisierung schon viel früher herausbildet als bisher angenommen, haben kürzlich Zoologen von der Universität Gent entdeckt. Die Forscher um Jens De Meyer fingen an der Mündung des Leopold-Kanals durchsichtige Glasaale, die nach ihrer langen Wanderung quer durch den Atlantik gerade erst den Weg ins Süßwasser gefunden hatten.

Im Dienst der Wissenschaft wurden diese Jungaale in zwei Gruppen aufgeteilt und jeweils unterschiedlich ernährt: Die eine erhielt winzige Würmer und andere

Häppchen, die sich einfach in die Mundhöhle saugen und schlucken ließen. Die Fische der anderen Gruppe mussten sich an größeren Happen festbeißen und mit vollem Körpereinsatz einzelne Bissen herausreißen. Nach fünf Monaten hatten sich die Jungaale der ersten Gruppe zu typischen Spitzkopfaalen entwickelt, die der zweiten Gruppe zu typischen Breitkopfaalen, wie De Meyer und seine Kollegen im "Journal of Experimental Biology" (doi: 10.1242/jeb.131714) berichten. Ähnliche Unterschiede, wenngleich nicht ganz so ausgeprägte, fanden sich auch in einer dritten Gruppe, in der den Jung-

aalen sowohl mundgerechte Häppchen als auch größere Brocken zum Fressen angeboten wurden. Trotz freier Auswahl wurden die jugendlichen Aale zu Spezialisten für ein ganz bestimmtes Nahrungsangebot. Vermutlich vermindert sich in freier Natur auf diese Weise die Konkurrenz zwischen den Artgenossen.

Mittlerweile sind Aale in ganz Europa rar geworden. Von der IUCN ("International Union for Conservation of Nature") listet sie als eine vom Aussterben bedrohte Art ein. Kein Wunder, denn in fast jedem Fluss wurde den wanderlustigen Fischen mit Wasserkraftwerken der Weg verbaut. Wenn erwachsene Aale wieder zurück ins Meer streben, geraten sie allzu leicht in eine Turbine und werden dort zerstückelt. Zudem machen ihnen auch Parasiten zu schaffen sowie diverse Giftstoffe, die sie mit fetter Beute aufnehmen und dann im eigenen Fettgewebe ablagern. Womöglich, so die belgischen Forscher, ist die Version mit dem breiten Kopf und dem kräftigen Biss dabei besonders gefährdet. Denn solche Aale stehen recht weit oben in der Nahrungskette, in der sich Giftstoffe wie zum Beispiel Polychlorierte Biphenyle nach und nach an-DIEMUT KLÄRNER reichern.

Wissen in Kürze

Der Meeresspiegel steigt im Zuge der Erderwärmung keineswegs mit einer konstanten Geschwindigkeit. Vielmehr beschleunigt sich der Anstieg offenbar sukzessive. In den vergangenen 25 Jahren liege die jährliche Beschleunigung zwar bei lediglich 0,08 Millimetern, wie eine Auswertung diverser Satelliten- und Pegelaufzeichnungen durch Steve Nerem von der University of Colorado in Boulder ergeben hat. Aber im Ergebnis könnte diese stete Beschleunigung dazu führen, dass sich der Meeresspiegel zum Ende des Jahrhunderts nicht mehr um drei Millimeter wie derzeit noch, sondern um zehn Millimeter jährlich erhöhen wird. Um das Jahr 2100 liege damit der weltweite Anstieg im Schnitt bei 65 Zentimetern. Das berichtet der Forscher in den aktuellen "Proceedings" der amerikanischen Nationalen Akademie der Wissenschaften. Die Beschleunigung sei in den zurückliegenden Jahren fast ausschließlich auf das Abschmelzen vieler Eisschilde auf Grönland und der Antarktis zurückzuführen. (jom)

Auch ohne Sex kann man evolutionär extrem erfolgreich sein. Der Amazonenkärpfling ("Molly"), Poecilia formosa, der erstmals 1932 beschrieben wurde und von dem es nur Weibchen gibt, hat entgegen der gängigen Thesen sehr wenige schädliche Mutationen angehäuft und erweist sich auch nicht als genetisch verarmt, sondern zeigt eine bemerkenswerte Vielfalt speziell der immunologisch relevanten Gene. Die internationale Gruppe um Manfred Schartl von der Universität Würzburg, der die Sequenzierung des Molly-Genoms vorgenommen hat, glaubt, dass der Fisch die enorme Vielfalt und Widerstandskraft durch die ursprüngliche Hybridisierung zweier Kärpfling-Arten erhalten hat und sich seither bewährt hat. Evolutionär noch durchschlagender ist der Siegeszug des asexuellen Marmorkrebses, über den ebenfalls in der Zeitschrift "Natur Ecology & Evolution" berichtet wird. Frank Lyko und seine Kollegen vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg haben das Erbgut der Krebsart entziffert, die mutmaßlich erst vor etwa dreißig Jahren durch eine Mutation im Aquarium entstanden war. Diese Genveränderung erlaubt es den Marmorkrebsen, sich selbst zu klonen und so rasend schnell auszubreiten. Inzwischen haben sich die Klone zu Abermillionen auf vielen Kontinenten - auch in Europa etabliert, ohne dass die bei asexueller Fortpflanzung erwartete genetische Verarmung und Anhäufung schädlicher Mutationen stattgefunden hätte. (jom)

Migräne erhöht das Risiko für Herzinfarkt und Schlaganfall. Rauchen Sie? Bluthochdruck? Cholesterin? Gewicht? Sport? Mit so einer Checkliste bestimmen Ärzte das Risiko für Herzinfarkt oder Schlaganfall. "Dazu gehört nun auch die Frage nach Migräne", sagt Thomas Lüscher, Professor für Kardiologie in London. Denn Leute mit Migräne haben ein höheres Risiko für Herz-Kreislauf-Krankheiten, wie eine neue Studie zeigt. Die Forscher hatten Daten von 51 032 Migränepatienten und 510 320 gesunden Menschen analysiert. Im ersten Jahr war das Risiko für Schlaganfälle achtfach erhöht, das für Herzinfarkt, Thrombosen und Rhythmusprobleme etwa doppelt so hoch. Nach 19 Jahren waren die Risiken immerhin noch mehr als anderthalbmal so groß. "Es gibt viele Erklärungen, aber eine große Rolle spielen Verkrampfungen der Blutgefäße", so Lüscher. Leute mit Migräne könnten von Medikamenten profitieren, die solche Verkrampfungen verhindern. (fewi)

Schwere Depressionen mit Nasenspray wegzusprühen, das könnte funktionieren. Bei jedem dritten Menschen mit schwerer Depression helfen Antidepressiva nicht gut. Dann versuchen die Ärzte manchmal, Ketamin zu verabreichen, was allerdings über die Vene gegeben werden muss. Ketamin wirkt allerdings auch gut als Nasenspray, wie eine Studie in der Zeitschrift "Jama Psychiatrie" zeigt. 67 Patienten sprühten entweder Ketamin oder ein Placebo. Bei den Spray-Patienten besserten sich die Symptome schon nach einer Woche deutlich. "Das Spray ist eine gute Alternative zur Elektrokrampftherapie", sagt Peter Falkai, Chef-Psychiater an der LMU München. "Der Vorteil ist, dass der Patient es selbst sprühen kann." Man müsse allerdings etwas üben, sonst rinne das Ketamin den Rachen hinunter, und abgesehen vom schlechten Geschmack wirke es dann nicht so gut. Leute mit Psychosen oder Abhängigkeitserkrankungen sollten Ketamin lieber nicht sprühen, denn die genauen Effekte auf das Hirn sind noch nicht geklärt. (fewi)

Die Härte und Steifigkeit von Holz lässt sich dank einer Spezialbehandlung mit Chemikalien, Hitze und Druck deutlich erhöhen. Das berichten Wissenschaftler von der University of Maryland in College Park in der Zeitschrift "Nature". Jianwei Song und seine Kollegen tauchten quaderförmige Hölzer verschiedener Sorten zunächst in ein heißes Bad aus Ätznatron und Natriumsulfit. Dadurch wurden die beiden Bestandteile der Zellwände, Lignin und Hemizellulose, herausgelöst und entfernt. Danach wurden die Holzstücke auf hundert Grad erhitzt und komprimiert. Zellwände und Poren wurden so zusammengequetscht, wodurch sich die Dichte des Materials um das Dreifache erhöhte. Belastungstests zeigten, dass Steifheit und Härte der behandelten Hölzer um das Elffache zugenommen hatten. Damit könnten sie mit vielen Metallegierungen und einigen Stählen konkurrieren. schreiben die Forscher. Die Hölzer verloren auch bei hoher Luftfeuchtigkeit kaum an Festigkeit und Stabilität. (mli)