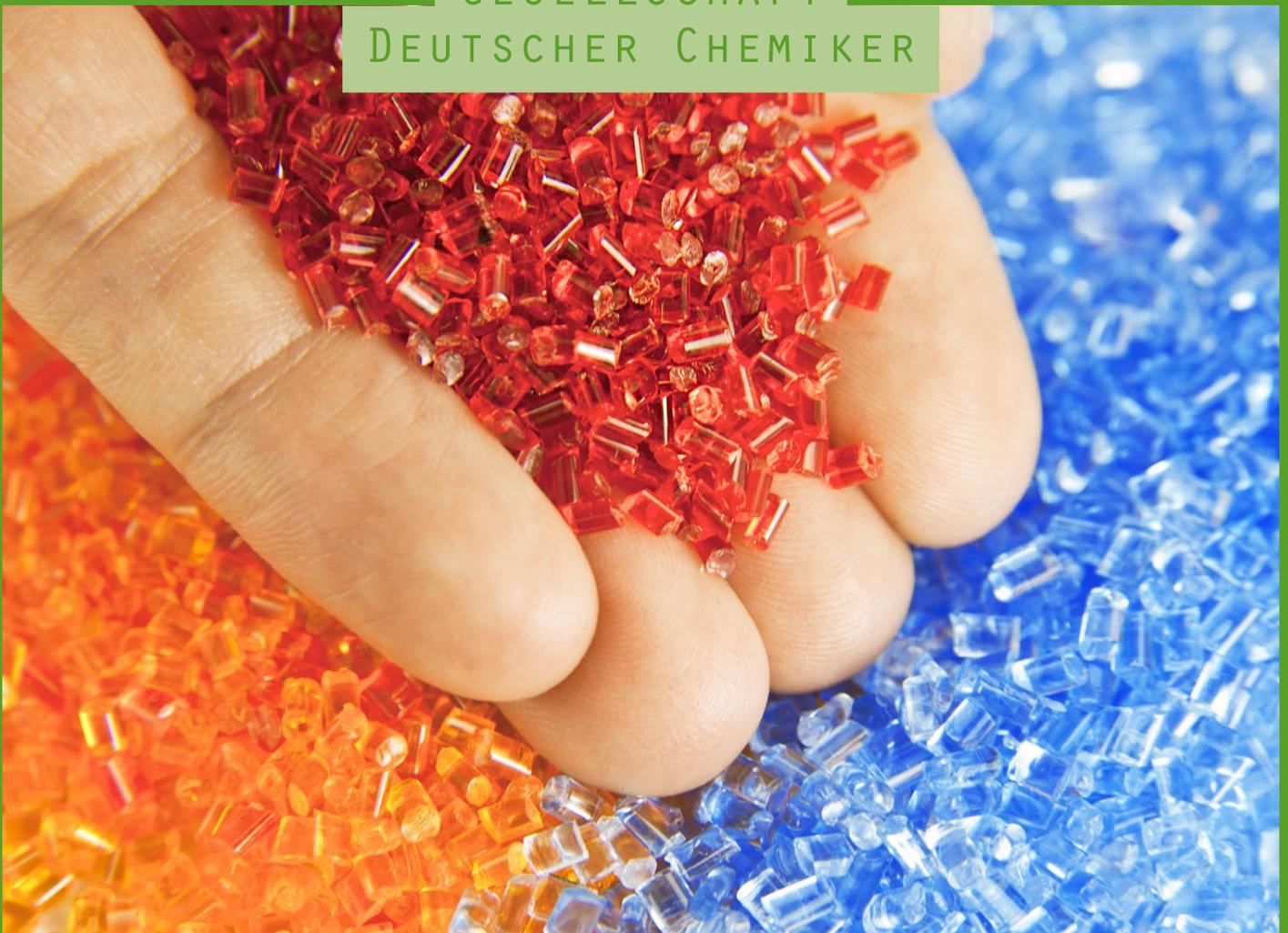


POLYMERE

ALLESKÖNNER DER MODERNE

EIN MAGAZIN DER
GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER



AUFSTIEG

DIE ENTDECKUNG
DER RIESENMOLEKÜLE

UMWELT

RECYCLING GEGEN
DIE PLASTIKVERMÜLLUNG

ZUKUNFT

KUNSTSTOFFE FÜR
NEUE TECHNOLOGIEN



Wir entdecken Chemie

für eine bessere Welt!

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit rund 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fachgruppen sowie weitere Arbeitskreise und

Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Mit 60 Ortsverbänden ist die GDCh in allen chemierelevanten Regionen Deutschlands präsent. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemikerForum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

WWW.GDCH.DE

LIEBE LESERINNEN, LIEBE LESER,

vor 100 Jahren, also im Jahr 1920, beschrieb der deutsche Chemieprofessor Hermann Staudinger erstmals eine damals vollkommen unbekannte Stoffklasse: die Makromoleküle. Dafür wurde er 1953 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt. Die Verknüpfung von kleinen Molekülen zu größeren Makromolekülen (Polymeren) hat zu einer Vielzahl von Verbindungen geführt, die wir heute meist als Kunststoffe oder Plastik bezeichnen.

So vielfältig wie die Eigenschaften der Kunststoffe, so vielfältig sind ihre Anwendungen. Ohne Kunststoffe könnten wir unser modernes Leben nicht führen: Die meisten unserer Lebensmittel, Körperpflegeprodukte und vieles mehr sind in Kunststoff verpackt, unsere Smartphones, unsere Autos und Fahrräder und viele unserer Sportgeräte enthalten Kunststoffe. Ab Seite 8 finden Sie einen Überblick, welche Arten von Kunststoffen wo eingesetzt werden.

Plastik hat jedoch auch seine Schattenseiten, nämlich dann, wenn Kunststoffabfälle durch unsachgemäße Entsorgung in die Umwelt gelangen. Ihre hohe Beständigkeit und Langlebigkeit wird zum Problem, wenn Kunststoffe mehrere hundert Jahre brauchen, bis sie sich zersetzen. Oder sie zerfallen in kleine Teilchen, die man als Mikroplastik überall, auch in Tieren und über die Nahrungskette wieder in Menschen finden kann. An Lösungen wird weltweit intensiv geforscht. Wissenschaftler arbeiten daran, Polymere zu entwickeln, die sich in kurzer Zeit zu unschädlichen Endprodukten zersetzen, oder Kunst-

stoffe zu recyceln und die Rohstoffe erneut zu verwenden. Einige Beispiele für aktuelle Forschungsprojekte finden Sie ab Seite 12.

Aber gerade in diesen Zeiten, in denen die Lungenkrankheit Covid-19 die Welt buchstäblich in Atem hält, sehen wir auch, warum wir auf Kunststoffe nicht verzichten können. Plexiglas-Scheiben, zum Beispiel an Supermarktkassen, schützen gleichermaßen Mitarbeiter und Kunden. Wir verwenden Schutzmasken und -handschuhe, um uns Viren vom Leib zu halten, und Patienten im Krankenhaus sind auf

Schläuche für Beatmungsgeräte, sterile Spritzen und geeignete Verpackungen für Medikamente angewiesen. Alle diese Materialien sind aus Kunststoffen gefertigt.

Wenn Sie mehr über Kunststoffe und ihre Anwendungen erfahren möchten, dann schauen Sie auf den Webseiten von »Faszination Chemie« vorbei. Unter <https://faszinationchemie.de/makromolekulare-chemie> finden Sie viele weitere Beiträge.

WIR WÜNSCHEN IHNEN VIEL
FREUDE BEI DER LEKTÜRE.

KATRINA FRIESE



PROF. DR. PETER R. SCHREINER
PRÄSIDENT
DER GDCH

FRAUKE ZBIKOWSKI



PROF. DR. WOLFRAM KOCH
GESCHÄFTSFÜHRER
DER GDCH

UMSCHLAGBILD

Am Anfang vieler Kunststoffprodukte steht so genanntes Granulat, eine Mischung aus Polymer, Farbstoff und anderen Zusätzen. Bei der Verarbeitung wird das Granulat zunächst aufgeschmolzen und anschließend etwa zu einer Folie geblasen oder mit Hilfe eines Werkzeugs zum Produkt ausgeformt.

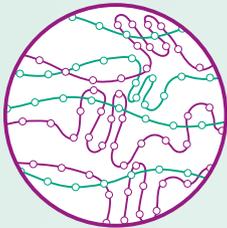
raeva / Getty Images / iStock

VIELSEITIG UND ALLGEGENWÄRTIG

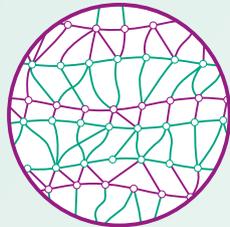
KUNSTSTOFFE AUS SYNTHETISCHEN UND NATÜRLICHEN POLYMEREN ERMÖGLICHEN UNSER MODERNES LEBEN. SIE SIND LEICHT UND BELASTBAR, LASSEN SICH ZU FASERN UND FOLIEN VERARBEITEN, AUFSCHÄUMEN UND IN JEDE ERDENKLICHE FORM BRINGEN.

PLASTISCH UND ELASTISCH

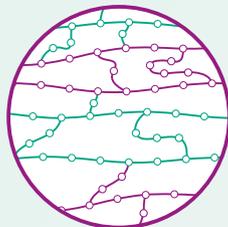
Je nach Struktur der Polymere unterscheiden sich Kunststoffe in ihren physikalischen Eigenschaften:



Thermoplaste bestehen aus unnetzten Polymeren und können durch Erhitzen beliebig oft plastisch geformt werden.

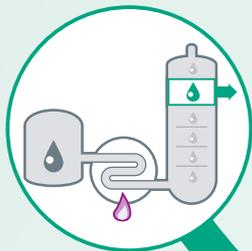


Duroplaste sind formstabile Kunststoffe aus engmaschig vernetzten Polymeren. Sie sind meist hart und spröde.



Elastomere aus schwach vernetzten Polymeren kann man ziehen oder quetschen: Sie nehmen stets wieder ihre ursprüngliche Form an.

Thermoplastische Elastomere kombinieren harte und weiche Phasen verschiedener Polymere und lassen sich warm umformen.

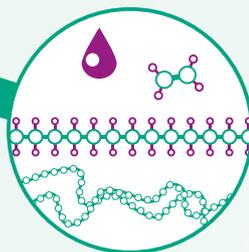


In Raffinerien wird Erdöl durch **Destillation** in mehrere Fraktionen getrennt. Für die Produktion von Kunststoffen ist das **Rohbenzin** (Naphtha) am wichtigsten. Durch **thermische Spaltung** (Cracking) entstehen daraus Ethylen, Propylen, Butylen und andere Kohlenwasserstoffe, aus denen **lange Molekülketten** synthetisiert werden können (Polymerisation).

VOM ÖL ZUM KUNSTSTOFF

Polymere bestehen aus verketteten organischen Molekülen (Monomeren). Die meisten Kunststoffe basieren auf synthetischen Polymeren aus Kohle, Erdgas und vor allem Erdöl.

Beispiele für natürliche Polymere sind Zellulose, DNA, Proteine und Naturkautschuk.



Epoxidharz: Leiterplatten, Zweikomponenten-Epoxidkleber



Polyamid: Fallschirme

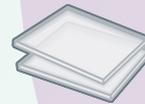
Sonstige



Polycarbonat: Autoscheinwerfer



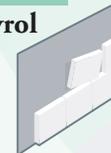
Polyurethan: Sitzpolster



Polymethylmethacrylat: Plexiglas

PS

Polystyrol



Fassaden-dämmung



Stoßstangen

PP

Polypropylen



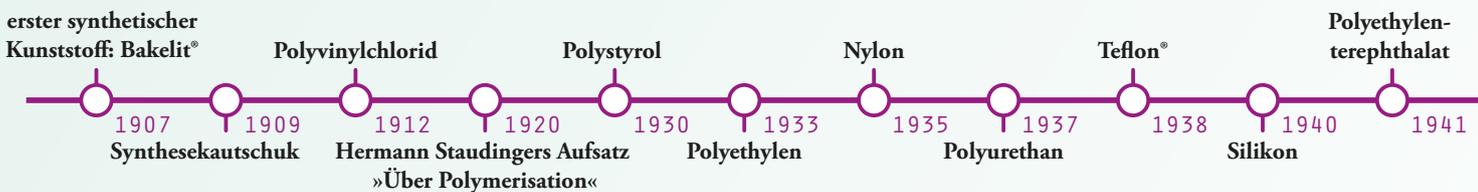
Kindersitze

31%

5%

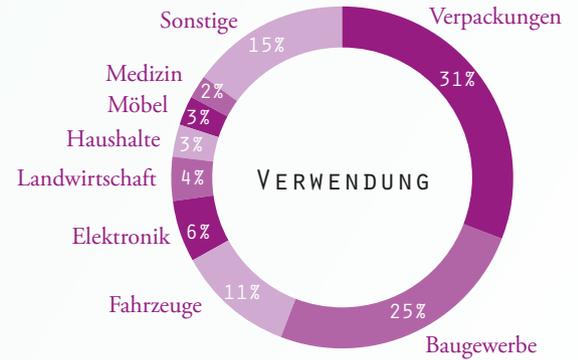
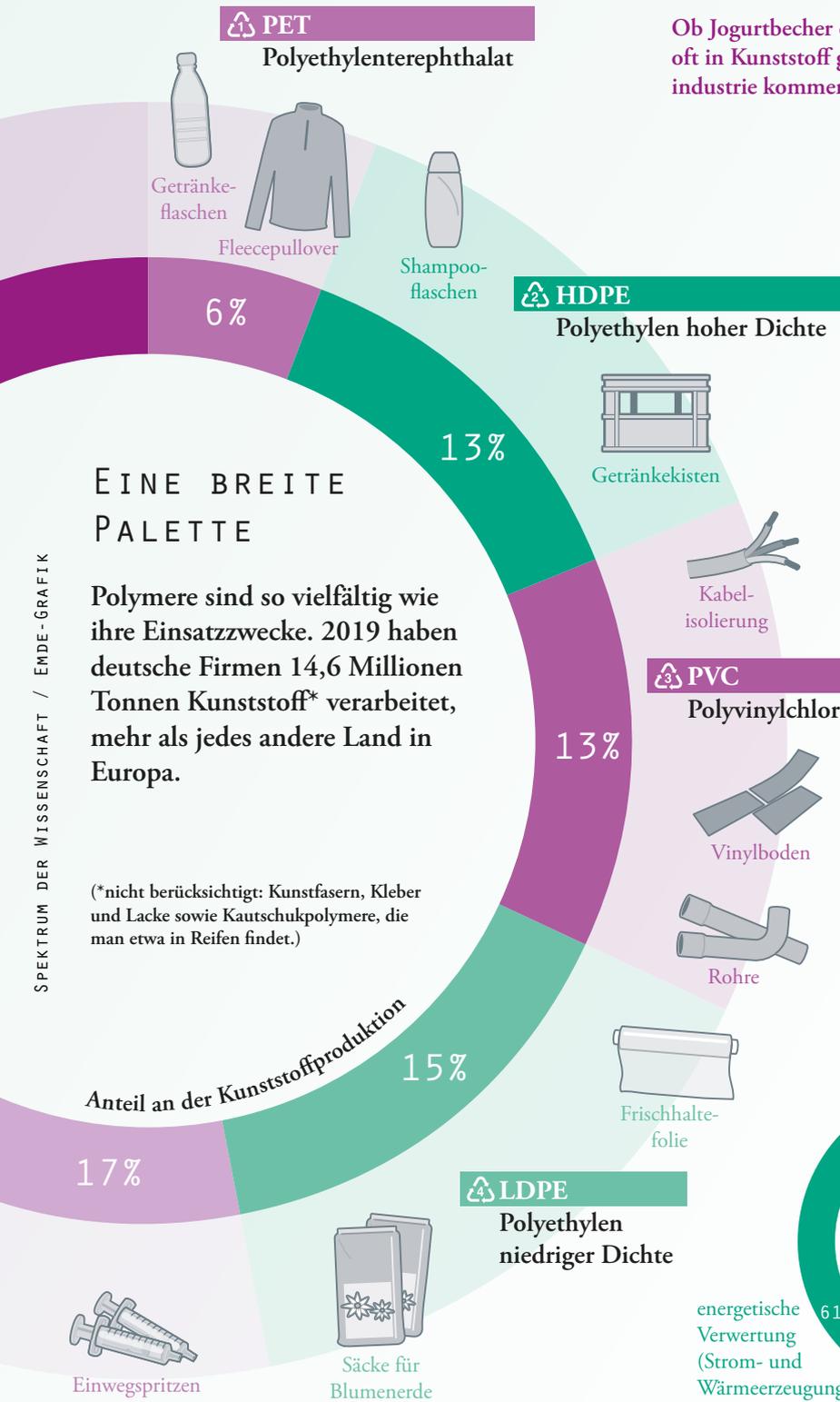
PLASTIK EROBERT DIE WELT

Viele synthetische Polymere wurden in den 1930er bis 1950er Jahren entdeckt. Seitdem ist die Produktion rasant gestiegen. Bis heute wurden weltweit mehr als neun Milliarden Tonnen Kunststoff produziert. Etwa jedes dritte Kunststoffteil stammt mittlerweile aus China. Zunehmend problematisch: Immer mehr Plastik landet in der Umwelt.



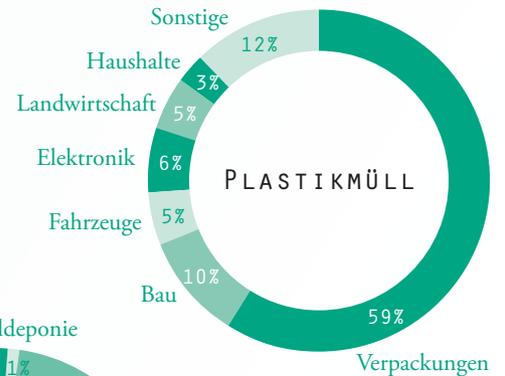
MEHR ALS NUR VERPACKUNG

Ob Jogurtbecher oder Zahnpastatube: Lebensmittel und Kosmetika sind oft in Kunststoff gehüllt. Auch auf dem Bau oder in der Auto- und Elektroindustrie kommen polymere Werkstoffe zum Einsatz.

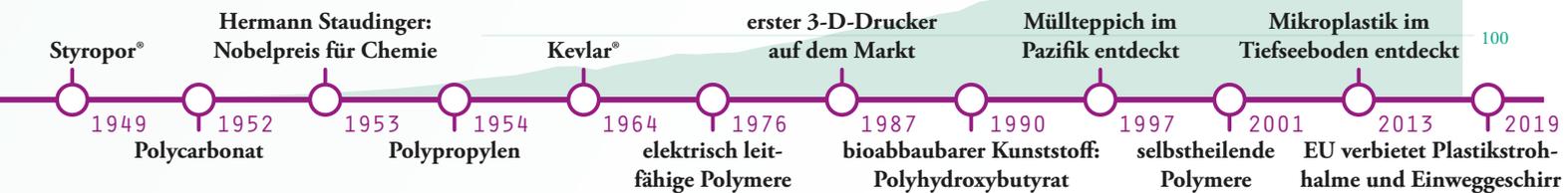


AB IN DIE TONNE

Deutschlands Bürger entsorgen pro Jahr 5,2 Millionen Tonnen Kunststoff, vor allem Verpackungen. Der Abfall wird überwiegend verbrannt, ein Teil recycelt und als Rezyklat zu neuen Produkten verarbeitet.



weltweite Plastikproduktion inkl. Kunstfasern in Mio. Tonnen pro Jahr



INS REICH DER RIESENMOLEKÜLE

VOR 100 JAHREN POSTULIERT EIN DEUTSCHER CHEMIKER
DIE EXISTENZ BELIEBIG GROBER MOLEKÜLE UND
ERNET DAFÜR VON VIELEN KOLLEGEN SPOTT UND
KRITIK. DOCH SEINE THEORIE BEWAHRHEITET
SICH UND EBNET DEN WEG FÜR DEN RASANTEN AUFSTIEG
DER KUNSTSTOFFINDUSTRIE.

Riesen gibt es nur im Märchen. Wenn man so will, galt das bis in die 1920er Jahre auch in der Chemie. Moleküle aus Hunderttausenden oder gar Millionen von Atomen hält die Fachwelt zu jener Zeit für ein Hirngespinnst. Die Grundbausteine aller Stoffe sind Atome oder kleine Moleküle, besagt die vorherrschende Lehrmeinung. Doch ein junger Chemieprofessor namens Hermann Staudinger lässt sich davon nicht beeindrucken und macht sich auf die Suche nach den molekularen Riesen.

Es ist keine Forschungsexpedition im eigentlichen Sinne. Denn auf die Frage, ob chemische Verbindungen aus derart vielen Atomen tatsächlich existieren, können ausschließlich wissenschaftliche Theorien und Experimente eine Antwort liefern. Ähnlich wie die Entdeckung manch ferner Länder jedoch entpuppt sich Staudingers Reise in die unbekanntenen Gefilde der organischen Chemie als wahre Odyssee. Aber der Reihe nach.

Wir schreiben das Jahr 1920. Der Erste Weltkrieg (1914–1918) ist seit Kurzem vorüber und Europa aus den Fugen geraten. Hermann Staudinger, der in jenem Frühjahr 39 wird, ist Professor

für Chemie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Dort erforscht er unter anderem den molekularen Aufbau von Biopolymeren wie Naturkautschuk, einem kriegswichtigen Rohstoff, aus dem Gummi hergestellt wird, und pflanzlicher Zellulose für die Papier- und Textilindustrie.

Zwar hatten Polymere in den wissenschaftlichen Sprachgebrauch bereits einige Jahrzehnte zuvor Einzug gehalten, doch über ihre Struktur oder ihr Molekulargewicht ist bis dahin noch wenig bekannt. Eingeführt wurde der Begriff im Jahr 1829 von dem schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius. Er beobachtete bei Experimenten mit Weinsäure, dass sich Stoffe trotz identischer chemischer Zusammensetzung in ihrer Erscheinungsform und bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheiden können. Berzelius nannte solche niedermolekularen Stoffe Polymere (griechisch: *poly* = viele, *méros* = Teilchen).

Die Bedeutung des Begriffs wandelte sich jedoch mit der Zeit: Im frühen 20. Jahrhundert bezeichnen Chemiker solche Materialien als Polymere, die ein vermeintlich hohes Molekulargewicht

aufweisen. Darauf deutet nämlich die geringe Flüchtigkeit von polymeren Stoffen hin. Die Wissenschaftler glauben allerdings, dass das die Existenz riesiger Moleküle nur vortäuschen würde. Stattdessen versuchen sie die Beobachtungen mit so genannten Kolloiden, einer losen Zusammenlagerung vieler kleiner Moleküle, zu erklären.

SEINER ZEIT VORAUSS

Einen Beleg für diese These liefern ihrer Meinung nach Röntgenstrukturanalysen. Damit lässt sich die Größe einzelner Kristallite in Polymeren bestimmen. Kristallite sind Kristalle, die die eigentliche Kristallform nicht oder nur teilweise ausbilden. Sie entstehen, wenn Polymere abkühlen und erstarren. Die Mehrzahl der Wissenschaftler ist überzeugt: Ein einzelnes Molekül kann nicht größer sein als ein einzelner Kristallit. Daher folgern sie aus ihren Messungen, dass kettenartige Verbindungen aus maximal 500 Atomen bestehen. Die Existenz größerer Makromoleküle lehnen sie vehement ab.

Staudinger kommt durch eigene Überlegungen und jahrelange Experimente zu einem anderen Schluss. Am 12. Juni 1920



BLACKJACK3D / GETTY IMAGES / ISTOCK

BLACKJACK3D / GETTY IMAGES / ISTOCK

veröffentlicht er seine These in den »Berichten der Deutschen Chemischen Gesellschaft«:

»Polymerisationsprozesse [...] sind alle Prozesse, bei denen zwei oder mehrere Moleküle sich zu einem Produkt mit gleicher Zusammensetzung, aber höherem Molekulargewicht, vereinigen.« Auf diese Weise könne ein chemisches Molekül »eine fast beliebige Größe erreichen«, mithin zu einem Riesemolekül anwachsen. »Immer gleiche oder ähnliche kleine Atomgruppen reihen sich in ständiger Wiederholung zu einem Muster aneinander, wodurch schließlich die enorme Größe des Makromoleküls produziert wird.«

Mit seinem Aufsatz »Über Polymerisation« wird Hermann Staudinger – in der Rückschau – zum Begründer der Polymerchemie.

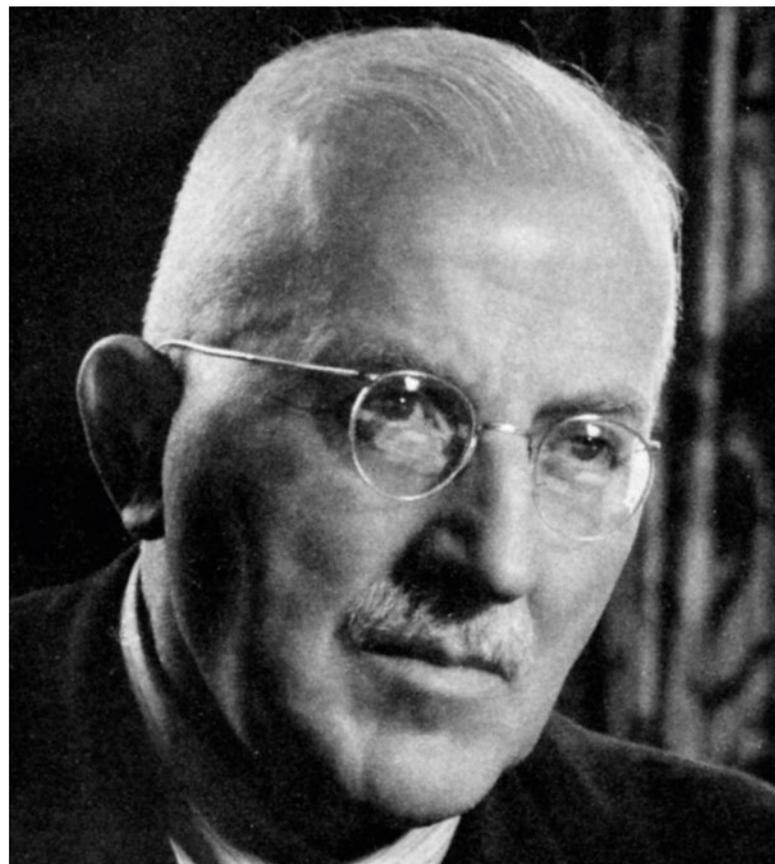
In den 1920er Jahren ist die Zeit noch nicht reif für ein neues Bild vom Mikrokosmos der Moleküle. In Deutschland ist die Monarchie Vergangenheit, und es entsteht eine neue Gesellschaftsordnung. Mitten in diesem Umbruch wagt es Staudinger auch noch, die Welt im Aller kleinsten ins Wanken zu bringen.

Seine Gegner verspotten ihn dafür. Einem Zuhörer reist bei einem Vortrag der Geduldsfaden. Er erhebt sich und brüllt in den Saal: »So etwas gibt es nicht!« Damit spricht der Kollege das aus, was praktisch die gesamte Fachwelt von Staudingers Ideen hält.

Staudingers These basiert in erster Linie auf Experimenten mit Naturkautschuk, der als Basis für die industrielle Herstellung von Gummi dient. Das dabei angewandte Verfahren der Vulkanisation geht zurück auf Charles Goodyear, der im Jahr 1839 entdeckte, dass sich klebriger

Naturkautschuk durch die Zugabe von Schwefel in einen elastischen Kunststoff umwandeln lässt.

Nach der damals vorherrschenden Lehrmeinung besteht Kautschuk aus ringförmigen Kolloiden, die von je zwei Isopren-Molekülen gebildet werden, einer ungesättigten Kohlenwasserstoffverbindung (C_5H_8). Staudinger glaubt hingegen, dass Tausende von Isopren-Molekülen im Kautschuk wie Perlen auf einer Schnur chemisch miteinander verknüpft sind. Seine These gründet sich auf Experimente, in denen er versucht,



ALAMY / MATTEO ONTIED

HERMANN STAUDINGER

Der deutsche Chemiker erkannte als Erster, dass Moleküle sich zu langen Ketten aneinanderreihen können. Für die Entdeckung der Makromoleküle erhielt er 1953 den Chemie-Nobelpreis.

die vermeintlichen Isopren-Moleküle mit Wasserstoff (H_2) zu gesättigtem Isopentan (C_5H_{12}) umzusetzen. Nach traditioneller Vorstellung würde die Kautschukmasse dadurch flüssiger werden, da sich gesättigte Kohlenwasserstoffe nicht ringförmig zusammenlagern können. Tatsächlich aber bleibt die hohe Viskosität erhalten – was Staudinger damit erklärt, dass Kautschuk aus langkettigen Makromolekülen besteht.

AMBITIEN UND TALENT

Die Ergebnisse überzeugen seine Gegner und notorische Zweifler jedoch nicht. Selbst dann nicht, als Staudinger und der Physiker Gustav Mie 1927 mit Hilfe von Röntgenaufnahmen nachweisen, dass im Polyoxymethylen nur kurze Abschnitte, aber nicht das gesamte Molekül einen Kristallit ausbilden. So schreibt beispielsweise der Chemie-Nobelpreisträger Heinrich Wieland 1928 an Staudinger: »Lieber Herr Kollege, lassen Sie doch die Vorstellung mit den großen Molekülen [...]. Reinigen Sie Ihre Produkte, wie zum Beispiel den Kautschuk, dann werden diese kristallisieren und sich als niedermolekulare Stoffe erweisen.«

Staudinger lässt sich davon allerdings nicht beirren. Nicht zum ersten Mal steht er mit seiner Meinung ziemlich allein da: Als einziger deutscher Chemiker sprach er sich während des Ersten Weltkriegs öffentlich gegen die Entwicklung und den Einsatz chemischer Massenvernichtungs-

waffen aus. Auch forderte er 1917 das deutsche Oberkommando in Berlin auf, das sinnlose Blutvergießen zu beenden. Während das Militär lediglich Soldaten und Waffen zähle, so Staudinger, sei der Krieg angesichts der hohen Wirtschaftskraft der USA nicht mehr zu gewinnen.

Mögliche Gründe für Staudingers selbstbewusste und standhafte Persönlichkeit finden sich in seiner jungen Erwachsenenzeit, als er erst über Umwege eine akademische Laufbahn einschlägt, dann aber schnell Karriere macht: 1899 legt Staudinger das Abitur in seiner Geburtsstadt Worms ab. Sein Vater Franz – so heißt es – empfiehlt ihm, zunächst einen bodenständigen Beruf zu erlernen. Also absolviert Hermann eine Lehre als Tischler. Die Schreinerarbeit erfüllt ihn jedoch nicht, stattdessen brennt er für die Pflanzenkunde. Nach seiner Handwerksausbildung bekommt er vom Vater den Segen für ein Studium und schreibt sich an der Universität Halle/Saale im Fach Botanik ein.

Kurz darauf greift der Vater erneut in die Berufswahl ein: Hermann solle sich zuerst der Chemie widmen, um die Botanik besser verstehen zu können. Und so beginnt er in Darmstadt – nachdem die Familie Staudinger dorthin gezogen

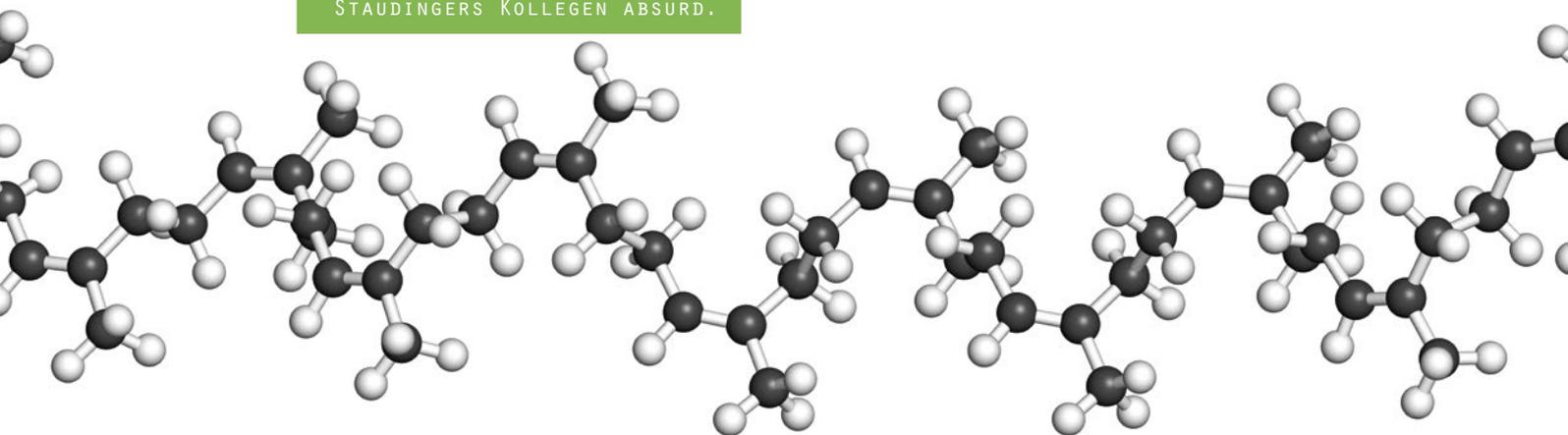
1920 VERÖFFENTLICHT
HERMANN STAUDINGER
»ÜBER POLYMERISATION«
UND LEGT DAMIT
DEN GRUNDSTEIN DER
POLYMERCHEMIE.



ist – an der Technischen Hochschule mit dem Chemiestudium. Nach zwei Semestern legt er das Verbandsexamen ab, die Voraussetzung für eine Promotion, und im Jahr 1903 verleiht ihm die Universität Halle/Saale den Dokortitel. Mit gerade einmal 27 Jahren wird er 1907 Professor für organische Chemie an der Technischen Hochschule Karlsruhe. 1912 wechselt er an die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Nach 14 Jahren Forschung in der Schweiz folgt er 1926 schließlich einem Ruf als Professor für Chemie an die Universität Freiburg.

Ende der 1920er Jahre beginnt die Front gegen die These der Makromoleküle allmählich zu bröckeln. Denn Laborversuche haben mittlerweile

KAUTSCHUKPOLYMERE AUS TAUSENDEN
ISOPREN-EINHEITEN ERSCHEINEN
STAUDINGERS KOLLEGEN ABSURD.



bestätigt, dass die Glieder der postulierten Kettenmoleküle tatsächlich Atombindungen eingehen. Staudinger selbst schreibt dazu sinngemäß und korrekterweise: Der experimentelle Beweis sei dann erbracht, wenn sich ein Stoff in Derivate (abgeleitete Verbindungen) verwandle, ohne dass sich dabei sein Polymerisationsgrad ändere. Übersetzt heißt das: Die Atombindungen der Makromoleküle werden bei einer chemischen Reaktion nicht gespalten. Dieser Nachweis gelingt für immer mehr natürliche und synthetische Polymere, etwa für Zellulose, Stärke oder Polyvinylacetat.

Die Beweise sind so erdrückend, dass Anfang der 1930er Jahre immer mehr Chemiker – zumeist kleinlaut – ins makromolekulare Lager wechseln. Für Staudinger eine große Genugtuung. Er wird zum gefeierten Star in der Chemie-szene und erfährt nun weltweit Anerkennung. Auf seinem Erfolg ausruhen kann er sich allerdings nicht. Denn schon bald sieht er sich mit einem mächtigeren Gegner konfrontiert als mit spöttischen Kollegen: den Nationalsozialisten.

EINE NEUE INDUSTRIE

Vor allem der Rektor der Universität Freiburg, der Philosoph Martin Heidegger, sieht es als NSDAP-Mitglied als seine Pflicht an, alle Kollegen auf ihre »deutsche Gesinnung« zu überprüfen. Bei Staudinger bezweifelt er diese, unter anderem wegen dessen pazifistischer Äußerungen während des Ersten Weltkriegs. Auch Staudingers Familie lässt unerwünschte politische Einstellungen vermuten: Sein Vater ist Teil der Genossenschaftsbewegung, seine Mutter Frauenrechtlerin und sein Bruder ein von den Nazis verfolgter Sozialdemokrat und USA-Emigrant. Heidegger stößt daher ein Amtsenthebungsverfahren an. Indem Staudinger bedingungslose Systemtreue an den Tag legt und vor allem, weil er eine sehr hohe Reputation in der internationalen Wissenschaftsgemeinde genießt, übersteht er auch diese Herausforderung. Er bleibt ordentlicher Professor der Chemie und Leiter des Chemi-

schen Laboratoriums der Universität. 1940 gründet er das Institut für Makromolekulare Chemie in Freiburg, das erste Polymerforschungszentrum Europas.

Parallel entwickelt sich basierend auf Staudingers Entdeckungen ein völlig neuer Industriezweig. Zwar produzieren Fabriken bereits Alltagsgegenstände wie Aschenbecher oder Telefone aus Bakelit®, dem ersten synthetischen Kunststoff, den der belgisch-amerikanische Chemiker Leo Baekeland im Jahr 1907 entdeckte. Aber ein mangelndes Verständnis des molekularen Bauprinzips von Kunststoffen erschwert weitere Fortschritte.

Staudingers theoretisches Fundament für die Polymerchemie verändert die Situation. Forschern gelingt es plötzlich, völlig neuartige Polymere mit unterschiedlichsten Eigenschaften herzustellen. In den 1930er bis 1950er Jahren erfinden Chemiker die Materialien der Zukunft: Polystyrol, Polyethylen, Polypropylen, Polyester, Polyamid und viele mehr. Sie eignen sich für eine Vielzahl von Anwendungen und können preiswert hergestellt werden. Je nach Zusammensetzung und molekularer Architektur sind die neuen synthetischen Kunststoffe weich oder stahlhart, elastisch oder formstabil. Sie lassen sich zu Fasern spinnen und in fast jede erdenkliche Form gießen.

Doch obwohl Kunststoffe rasch in viele Haushalte Einzug halten, ist

Hermann Staudinger außerhalb der Wissenschaftsgemeinde kaum jemandem ein Begriff. Das ändert sich erst 1953, als man ihm im Alter von 72 Jahren für seine Pionierarbeit auf dem Gebiet der Polymerchemie den Nobelpreis verleiht. Seinen Vortrag bei der Preisverleihung beendet er mit folgendem Satz:

»Im Licht dieser neuen Erkenntnisse der makromolekularen Chemie zeigt sich das Wunder des Lebens von seiner chemischen Seite her in der unerhörten Mannigfaltigkeit und meisterhaften molekularen Architektonik der lebenden Materie.«

Staudinger ahnte damals offenbar schon, dass der Bauplan von natürlichen Makromolekülen wie der DNA oder Proteinen den Zugang zu innovativen Werkstoffen mit vielfältigen Eigenschaften eröffnen würde. Und tatsächlich stellen Forscher heute etliche Polymere und Materialien nach biologischen Vorbildern her.

Damit ist Hermann Staudinger nicht nur der Vater der Makromolekularen Chemie, sondern gleichzeitig ein Pionier der bioinspirierten Materialforschung. 100 Jahre nach Erscheinen seines wegweisenden Aufsatzes und 55 Jahre nach seinem Tod (1965) ist die Entdeckungsreise im Reich der Riesemoleküle also noch immer in vollem Gange. 



TELEFONE AUS BAKELIT GEHÖREN
ZU DEN ERSTEN PRODUKTEN
AUS SYNTHETISCHEM KUNSTSTOFF.
NACH ENDE DES ZWEITEN
WELTKRIEGS WIRD PLASTIK ZUR
MASSENWARE.

POLYMERE: DIE MULTITALENTE

POLYMERE SIND VIELSEITIG EINSETZBAR UND HABEN
NAHEZU ALLE LEBENSBEREICHE EROBERT –
AUCH WENN SIE BISWEILEN UNSICHTBAR BLEIBEN.

Kaum ein Produkt kommt heute ohne Polymere aus. Schaut man sich in den eigenen vier Wänden um, fallen einem sofort etliche Kunststoffe auf, etwa Gehäuse von Elektrogeräten, Lebensmittelverpackungen oder diverse Küchenutensilien. Andere sind weniger offensichtlich und dennoch oft unverzichtbar.

Dass Kunststoffe omnipräsent sind, liegt vor allem an ihrer Vielseitigkeit. Jedes Polymer besitzt bestimmte Eigenschaften, die sich beim Herstellungsprozess oder durch chemische Zusätze für die jeweilige Anwendung modifizieren lassen. Das beginnt bei der Polymerisation, bei der sich die monomeren Grundeinheiten zu langen Molekülketten verbinden. Je nach Reaktionsbedingungen können dabei unterschiedlich lange

Polymere entstehen. Zusätzlich erlaubt das Anhängen funktioneller Gruppen, die Eigenschaften von Polymeren zu beeinflussen. Etwa wie flexibel, formbar, chemikalien- und hitzebeständig ein Produkt ist oder wie gut es sich recyceln lässt. Auch die Zugabe von Farbstoffen, Weichmachern, Flamm- und UV-Schutzmitteln bestimmt die Funktionalität von Kunststoffen.

Anhand ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften unterteilen sich Polymere in drei Gruppen: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere.

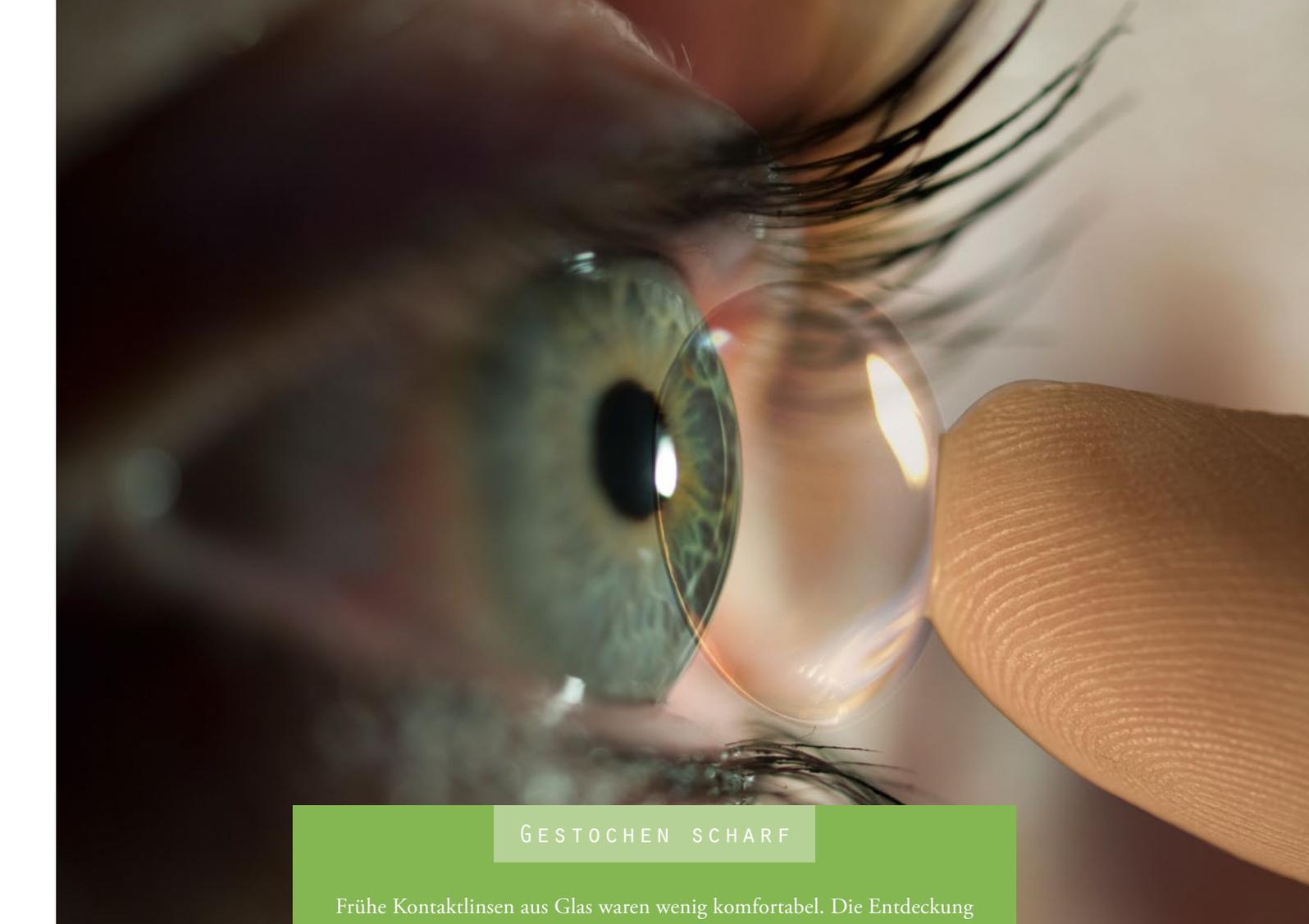
Thermoplaste findet man im Haushalt überall: Als Jogurtbecher oder Kosmetiktube, als PET-Flasche oder Kinderspielzeug, als Stoßstange oder Gehäuse der Autobatterie. Der Name beruht auf der

Eigenschaft, dass thermoplastische Polymere bei erhöhten Temperaturen einfach verformbar, sprich plastisch sind. Man kann sie aufschmelzen, in die gewünschte Form bringen und durch Abkühlen wieder erstarren lassen. Theoretisch lässt sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen, vorausgesetzt das Polymer wird nicht durch Überhitzung zerstört. Ein Beispiel für die Wiederverwertbarkeit thermoplastischer Kunststoffe sind Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET), die nach dem Recycling etwa zu Fleece verarbeitet werden. Auch das Dämm- und Verpackungsmaterial Polystyrol, besser bekannt als Styropor®, zählt zu den Thermoplasten.

Immer öfter bringt man thermoplastische Polymere mit Hilfe von 3-D-Druckern in Form. Dabei werden flüssige oder feste Materialien computergesteuert Schicht für Schicht zu einer räumlichen Struktur aufgebaut. Ein häufig verwendetes Polymer ist Polyamid 12; dank seiner hohen Zähigkeit und Flexibilität



PRÄZISIONSARBEIT: BEIM
3-D-DRUCK WERDEN KUNSTSTOFFE
SCHICHTWEISE AUFGEBAUT.
DAS ERMÖGLICHT AUCH KOMPLEXE
GEOMETRISCHE FORMEN.



GESTOCHEN SCHARF

Frühe Kontaktlinsen aus Glas waren wenig komfortabel. Die Entdeckung von Polymethylmethacrylat führte zur Entwicklung bequemer Kunststofflinsen. Weiche Linsen bestehen aus polymeren Hydrogelen.

BERNHARD RICHTER /
STOCK.ADOBE.COM

lässt es gut verarbeiten. Nützlich ist der 3-D-Druck etwa für die Produktion leichter, stabiler Auto- und Flugzeugteile. Auch Medizinprodukte wie Prothesen, künstliche Kniegelenke oder Zähne lassen sich so passgenau anfertigen. Die Weltraumforschung setzt ebenfalls auf gedruckte Kunststoffe: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat mittels 3-D-Druck den Prototyp eines Erkundungsroboters entwickelt, der in Zukunft unbemannte Flüge zum Mars begleiten könnte.

Ein außerordentlich widerstandsfähiger Thermoplast ist Polyetheretherketon (PEEK). Das Material kann hohen mechanischen Belastungen standhalten und ist wesentlich leichter als Metall. Im Flugzeugbau ersetzt PEEK immer

häufiger früher genutzte Werkstoffe wie Aluminium, Titan oder Stahl. Das spart Gewicht und Materialkosten. In der Medizin nutzt man es auf Grund seiner guten Beständigkeit gegenüber ionisierender Strahlung beim Röntgen, beim Sterilisieren von Instrumenten und in der Strahlentherapie.

STEIF ODER FLEXIBEL

Im Gegensatz zu Thermoplasten können Duroplaste – oft auch als Duromere bezeichnet – nicht aufgeschmolzen und erneut verformt werden, wenn sie einmal ausgehärtet sind. Die Polymerstränge in einem Duroplast sind durch Atombindungen chemisch miteinander vernetzt und bilden auf diese Weise unlösliche Kunststoffe. Bearbeiten kann man sie

nach Aushärtung nur noch mechanisch, etwa mit einer Säge. In der Regel werden Duroplaste jedoch gleich in die gewünschte Form gegossen. Das kann zum Beispiel ein hitzebeständiger und zugleich leichter Schutzhelm für die Feuerwehr sein.

Typische Anwendungsbereiche von duroplastischen Kunststoffen sind Leichtbau und Wärmedämmung. Als Flügel von Windkraftanlagen oder als Isoliermaterial für Häuserfassaden helfen sie, grünen Strom zu gewinnen und Heizkosten einzusparen. Darüber hinaus findet man Duroplaste in Lacken und Klebstoffen, als Schaum in Polstermöbeln und Winterbekleidung oder – dank ihrer Temperaturbeständigkeit – in Kontakten, Steckern und den Gehäusen von Elektrogeräten.

Anders als Thermo- und Duroplaste sind Elastomere nicht steif, sondern, wie ihr Name erahnen lässt, elastisch verformbar. Man kann sie ziehen oder drücken, trotzdem nehmen sie immer wieder ihre ursprüngliche Form an. Ähnlich wie die harten Duroplaste können Elastomere durch Erhitzen nicht abermals umgeformt werden. Eine Ausnahme bilden hier die thermoplastischen Elastomere. Dabei handelt es sich entweder um Polymer-Gemische (Legierungen) oder so genannte Copolymere, die aus harten und weichen Domänen bestehen.

ABDICHTEN, ABFEDERN, UND SCHALL ABSORBIEREN

Das vielleicht bekannteste und mit Abstand älteste Elastomer ist Naturkautschuk, der als Milchsaft aus der Rinde des Gummibaums gewonnen wird. In Mittelamerika nutzten ihn die indigenen Völker bereits vor Tausenden von Jahren. 1839 entdeckte der US-amerikanische Chemiker Charles Goodyear die Vulkanisation: Wenn man Naturkautschuk erhitzt und Schwefel dazugibt, wird er zu Gummi. Heutzutage wird er in großen Mengen vor allem als Beimischung für Reifen aller Art verwendet.

Weil Naturkautschuk nicht temperaturbeständig ist – bei Kälte wird er spröde, bei Hitze klebrig – und dazu empfindlich gegenüber vielen Chemikalien, wurde schon früh nach synthetischen Ersatzstoffen gesucht. Zwischen den beiden Weltkriegen entwickelten Wissenschaftler zahlreiche Synthetikgumme. Inzwischen gibt es rund 25 Klassen, die jeweils etliche Sorten umfassen. Daraus werden Elastomere für ein breites Temperaturspektrum und mit maßge-

schneiderter Chemikalienbeständigkeit hergestellt.

Elastomere kommen häufig dort zum Einsatz, wo es gilt, Holz, Metalle oder Kunststoffe miteinander zu verbinden. Als Dichtungen verhindern sie, dass Rohrleitungen Wasser verlieren, Fenster kalte Luft hereinlassen oder die Ölwanne unter dem Auto leckt. Auch sonst sind elastische Kunststoffe im Haushalt weit verbreitet: Gummistiefel, Gummibänder, Radiergummis, Haargummis – um nur ein paar Beispiele zu nennen.

Ein anderes wichtiges Anwendungsfeld ist die Schwingungstechnik. In Autos dämpfen Elastomere Vibrationen, die im Motor entstehen oder von holprigen Straßen herrühren. Auf Grund ihrer Elastizität können sie die Schwingungen aufnehmen und abfedern. Dieses Prinzip macht man sich auch bei vibrierenden Haushalts- oder Elektronikgeräten zu Nutze, indem man ihnen Gummifüße verpasst. Auf Spielplätzen federn Matten aus Elastomeren die Sprünge der Kinder

ab, in Schulen sowie in Krankenhäusern sorgen Böden aus Synthetikgummi für gedämpfte Trittergeräusche.

Neben der Verformung müssen Elastomere zum Teil aggressiven Flüssigkeiten oder extremen Temperaturen standhalten. Materialermüdung ist bei diesen Kunststoffen daher ein großes Thema. Um die Haltbarkeit von synthetischem Gummi zu verbessern, mischt man häufig mehrere Polymere. Dazu kommen – je nach Anwendung – Alterungsschutzmittel, Weichmacher, Flammenschutzmittel, Farbstoffe und andere Additive.

Auch bei Thermoplasten und Duroplasten ist die Alterung des Materials gelegentlich ein Problem. So leiden etwa billiges Kinderspielzeug oder einfache Gartenmöbel unter dauerhafter Sonneneinstrahlung. Der UV-Anteil im Licht der Sonne sorgt dafür, dass Kunststoffe allmählich verblassen und brüchig werden. Abhilfe schaffen hier so genannte hochwetterstabile Polymere mit einge-

ARTINUN / STOCK.ADOBE.COM

BIOPOLYMERE AUF
ZUCKERBASIS SORGEN DAFÜR,
DASS MEDIKAMENTE IM
KÖRPER DORT FREI WERDEN,
WO SIE WIRKEN.



bautem UV-Schutz. Sie werden zum Beispiel auch in Autolacken sowie als Werkstoffe für Windkraftanlagen verwendet.

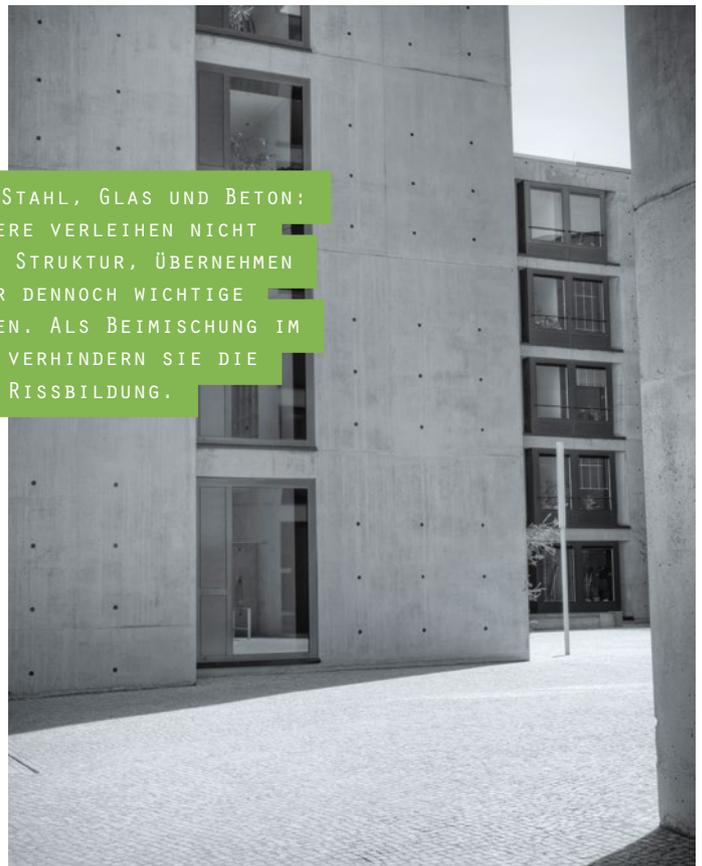
In der Medizin hingegen setzt man bewusst auf kurzlebige Kunststoffe. So werden verschiedene Wirkstoffe mit Biopolymeren aus Polysacchariden (Vielfachzuckern) wie Zellulose oder mit synthetischen Polymeren ummantelt, die sich nur ab einem bestimmten pH-Wert auflösen. Sie sind resistent gegenüber Magensäure, so dass die Kapsel ihren Inhalt erst im Darm freisetzt, wo ein leicht basisches Milieu herrscht. Das hat den Vorteil, dass ein Medikament langsam an den Körper abgegeben wird. Dadurch muss nicht alle paar Stunden eine neue Kapsel eingeworfen werden, um eine konstante Wirkstoffkonzentration aufrechtzuerhalten.

Ebenfalls in der Medizin zum Einsatz kommen Hydrogele aus dreidimensional vernetzten Polymeren. Sie können große Mengen Wasser oder anderer Flüssigkeiten einlagern. Dabei quellen sie auf, behalten ihre Struktur jedoch bei, ohne sich aufzulösen. Diese Eigenschaft nutzt man zum Beispiel für Wundpflaster. Bei Tumor-Operationen verwendet man ebenfalls solche Hydrogele: Sie geben einen Wirkstoff für die Immunabwehr nach einer Operation über Wochen ab und verhindern so, dass sich möglicherweise verbliebene Krebszellen schnell wieder ausbreiten. Bei Herzinfarkten wiederum dienen Hydrogele als Zellgerüst und unterstützen die Heilung beschädigter Gewebe.

POLYMERE FÜR GUTEN SCHLAF UND FARBECHTE WÄSCHE

Auf eine ganz andere Art wirken funktionale Polymere, auch als Enabling-Technologie bekannt (von englisch: to enable = ermöglichen, befähigen). Die Polymere bilden in diesem Fall nicht die Struktur selbst, sondern verändern die Eigenschaften anderer Materialien um sie herum. Nehmen wir das Beispiel Beton: Dem Baustoff sind heutzutage oft funktionale Polymere beigemischt. Sie sorgen dafür,

MEHR ALS STAHL, GLAS UND BETON:
POLYMERE VERLEIHEN NICHT
ZWINGEND STRUKTUR, ÜBERNEHMEN
ABER DENNOCH WICHTIGE
FUNKTIONEN. ALS BEIMISCHUNG IM
BETON VERHINDERN SIE DIE
RISSBILDUNG.



dass frischer Beton flüssig ist, ohne zu viel Wasser zu enthalten. Denn überschüssige Flüssigkeit führt beim Aushärten zur Bildung von Poren und Rissen. Durch die Zugabe funktionaler Polymere kann der Wasseranteil reduziert werden. Der Beton bleibt fließfähig, lässt sich aber trotzdem gut verarbeiten.

Auch bei der Verwendung von Polyurethan – egal ob als Elastomer für Schaumstoffmatratzen oder als hartes Duromer für Leichtbauanwendungen – kommen solche funktionalen Polymere zum Einsatz. Polyurethan wird mit Hilfe von Gasen oder Flüssigkeiten aufgeschäumt. Für die richtige Größe und die Form der Poren sorgen dabei Polyethersiloxane, siliziumhaltige Polymere aus der Gruppe der Silikone. Sie werden in sehr geringen Mengen zugesetzt, um Polyurethanschäume einer gewünschten Konsistenz zu erhalten. Dadurch lässt sich beispielsweise der Härtegrad von Matratzen variieren. Obwohl die Polyethersiloxane unsichtbar bleiben, haben sie einen großen Einfluss auf die Beschaffenheit des Kunststoffs.

Auf weitere Anwendungen funktionaler Polymere stößt man im Haushalt:

Das wasserunlösliche Polyvinylpyrrolidon etwa sorgt als Waschmittelzusatz dafür, dass Farbstoffe aus bunten Textilien die übrige Wäsche nicht verfärben. Gleichzeitig verhindern sie, dass sich Salze oder andere Rückstände in der Waschmaschine ablagern.

Bei der Papierherstellung verwendet man so genannte Polyelektrolyte, positiv geladene Polymere. Sie binden an die negativ geladenen Oberflächen der Papierfasern, so dass diese zusammenkleben. So sorgen die funktionalen Polymere für eine höhere Festigkeit von Papier oder Karton. Außerdem verdrängen sie hydrophobe (Wasser abweisende) Stoffe, welche die Papiermaschinen stören würden, und helfen bei der Entwässerung des Papiers.

Zuletzt dürften sehr viele Eltern die Eigenschaften des Superabsorbers Polyacrylsäure in Windeln schätzen: Die vernetzten Polymere der Polyacrylsäure können ähnlich wie Hydrogele erhebliche Mengen an Flüssigkeit aufnehmen, bis zum 1000-Fachen ihres eigenen Gewichts. Das Polymer-Wasser-Gemisch bildet ein festes Gel und stellt so sicher, dass der Nachwuchs trocken bleibt. ☺

RAUS AUS DER PLASTIK-SACKGASSE

KUNSTSTOFFE SIND LANGLEBIG, ABER HÄUFIG NUR KURZ
IN GEBRAUCH UND LANDEN DANN IN DER UMWELT.
DAMIT BÖDEN UND GEWÄSSER NICHT WEITER VERMÜLLEN,
MUSS PLASTIK LEICHTER ZU RECYCELN SEIN.

A

Als der US-Amerikaner Charles Moore 1997 nach einer Regatta von Hawaii nach Los Angeles segelte, fand er seine Jacht plötzlich umgeben von alten Plastikflaschen, Zahnbürsten, Tüten und anderen Kunststoffteilen. Er hatte den nordpazifischen Müllteppich entdeckt, der inzwischen eine Meeresfläche bedeckt, die mehr als viermal so groß wie Deutschland ist.

Seit den 1960er Jahren hat sich die globale Kunststoffproduktion verzwanzigfacht. 2018 wurden weltweit knapp 360 Millionen Tonnen Plastik hergestellt, dazu mehr als 60 Millionen Tonnen synthetischer Fasern. Eine Folge dieses Booms: Immer mehr Plastik häuft sich in der Umwelt an, in Böden, Seen, Flüssen und vor allem im Ozean. Eine eigentlich nützliche Eigenschaft der meisten Kunststoffe – ihre Widerstandsfähigkeit – wird dabei zum Problem, da ihr Abbau Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauert.

Rund 30 Prozent des weltweit anfallenden Kunststoffmülls, 75 Millionen Tonnen pro Jahr, landen in der Umwelt.

Einen Großteil davon transportieren Flüsse in die Meere. Besonders in Asien, wo die meisten Länder keine oder nur unzureichende Entsorgungssysteme haben – und wohin hoch entwickelte Staaten wie Deutschland ihre Abfälle teilweise verschiffen. Aber auch vom europäischen Festland gelangen jährlich mehrere hunderttausend Tonnen Plastik in die angrenzenden Küstengewässer. Zu den häufigsten Abfällen an Europas Stränden gehören Plastikflaschen, Chipstüten und Luftballons.

VOM ACKERBODEN BIS IN DIE TIEFSEE

Schätzungsweise 150 Millionen Tonnen Kunststoffmüll treiben heute bereits im Ozean, und jede Minute kommt etwa eine Lkw-Ladung hinzu.

Plastikabfälle in der Umwelt sind nicht nur ein ästhetisches Ärgernis. Vor allem in den Meeren stellen sie für viele Tiere eine tödliche Gefahr dar: Schildkröten, Delfine und Seevögel verschlucken Kunststoffteile und sterben mit verstopftem

Magen-Darm-Trakt, oder sie verheddern sich in ring- und schnurartigem Müll. Auch Korallenriffe leiden vielerorts unter der Plastikverschmutzung. Den Verlust an Naturkapital im Ozean beziffert das Umweltprogramm der Vereinten Nationen auf rund zwölf Milliarden Euro pro Jahr.

Neben größeren Müllteilen sammelt sich in Böden und Gewässern immer mehr Mikroplastik an. Das sind Fragmente, die maximal fünf Millimeter messen. Im Fokus der öffentlichen Debatte stehen meist Zusätze in Produkten wie Kosmetika und Waschmitteln. Diese stellen jedoch eine vergleichsweise kleine Quelle für Mikroplastik dar und wurden inzwischen aus vielen Produkten verbannt. Wesentlich öfter findet man in der Umwelt unter anderem Kunststoffgranulat, aus dem Plastikwaren hergestellt werden. Der Hauptanteil entfällt allerdings auf Mikroplastik, das erst durch Fragmentierung größerer Teile entsteht.

Erhebliche Mengen an Mikroplastik entstehen etwa beim Waschen von Textilien aus Kunstfasern und durch die



MIKROPLASTIK IST BIS ZU FÜNF MILLIMETER GROB – UND INZWISCHEN IN DEN ENTLEGENSTEN WINKELN DER ERDE ZU FINDEN. DIE TEILCHEN ENTSTEHEN ZUM BEISPIEL AUS VERPACKUNGSMÜLL, BEIM WASCHEN VON KUNSTFASERN ODER DURCH REIFENABRIEB.

DOTTEDHIPPO / GETTY IMAGES / IStock

Abnutzung von Autoreifen. In der modernen Landwirtschaft wachsen Erdbeeren, Salat oder Spargel häufig unter Mulchfolien aus Polyethylen, die nach der Ernte teils untergepflügt werden und im Ackerboden allmählich zerfallen. Auch Deponien, auf denen 30 Prozent des weltweiten Plastikabfalls landen, sind eine Quelle für Mikroplastik. Im Ozean gesellt sich zu dem durch Flüsse eingetragenen Mikroplastik jenes, das Wind und Wellen durch Zerreiben von Müllteilen produzieren.

Und es erreicht selbst die entlegensten Winkel. So haben Wissenschaftler

Mikroplastik im arktischen Meereis ebenso wie in Tiefseesedimenten nachweisen können. Die winzigen Teilchen reichern sich in Fischen und Muscheln an, die möglicherweise auf unseren Tellern landen. Problematisch sind nicht nur die Kunststoffe selbst, sondern auch die darin enthaltenen Additive wie Farbstoffe oder Weichmacher sowie andere potenziell giftige Substanzen, die ins Meer gelangen und die Mikroplastik magisch anzieht.

Die wachsende Weltbevölkerung und das Streben nach Wohlstand werden die

Nachfrage nach Kunststoffen unweigerlich weiter ansteigen lassen. Prognosen zufolge könnte sich die globale Produktion in den nächsten 20 Jahren noch einmal verdoppeln, das Müllaufkommen weiter zunehmen. Um zu verhindern, dass zukünftig mehr Plastik in den Meeren schwimmt als Fisch, gilt es daher zum einen, unnötigen Plastikverbrauch zu vermeiden und Müllquellen zu minimieren.

Erhebliches Potenzial zur Müllvermeidung bieten vor allem kurzlebige Einwegprodukte wie Verpackungen. Diese machen rund ein Viertel des weltweiten

GROBE MENGEN PLASTIKMÜLL LANDEN IM OZEAN UND WERDEN DORT ZUR TÖDLICHEN GEFAHR: SEEVÖGEL WIE DIESER BASSTÖLPEL ETWA BAUEN NESTER AUS KUNSTFASERN. DARIN VERHEDDERT SICH DER NACHWUCHS.



THOMAS SCHNITZLER / STOCK.ADOBE.COM

Kunststoffverbrauchs aus und etwa die Hälfte der Abfälle im Ozean. Allein in Deutschland fallen pro Kopf jährlich rund 38 Kilogramm Verpackungsmüll an. Sie sind die Folge eines Convenience-Lifestyles mit Coffee-to-go, verzehrfertigen Salaten im Supermarkt sowie Currys oder Sushi per Lieferservice.

Die Europäische Union hat im Rahmen ihrer Kunststoffstrategie ein ab 2021 geltendes Verbot von Einwegartikeln wie Strohhalmen oder Wegwerfbesteck beschlossen. Plastiktüten, Symbol des globalen Plastikproblems, sind in zahlreichen Ländern inzwischen verboten oder dürfen nicht mehr kostenlos abgegeben werden. Unverpackt-Läden, in denen Käufer ihre Waren in mitgebrachte Behälter abfüllen, sind ein weiteres Beispiel für Ansätze, das Müllaufkommen einzudämmen (wenngleich diese Läden bisher lediglich eine Nische für einkommensstarke Konsumenten besetzen).

In vielen Bereichen sind Kunststoffe auf Grund ihrer Funktionalität jedoch schlicht unverzichtbar oder haben deutliche Vorteile gegenüber anderen Materialien. So halten Kunststoffe

Lebensmittel länger frisch und sichern die Hygiene in Krankenhäusern. Sie helfen, das Gewicht von Autos und Flugzeugen und damit den Kraftstoffverbrauch zu senken. Unsere moderne Kommunikation via Smartphone und Computer wäre ohne Plastik undenkbar.

KREISLAUFWIRTSCHAFT STATT LINEARER STOFFSTRÖME

Um die Einträge von Kunststoffabfällen in die Umwelt zu verringern, ist es daher zum anderen notwendig, weltweit Recyclingquoten drastisch zu steigern. Das bedeutet nicht nur Entsorgungssysteme auf- beziehungsweise auszubauen, sondern darüber hinaus, effiziente Sortierverfahren zu entwickeln und Kunststoffe derart zu designen, dass sie recycelfähig sind. Polymergemische und Produkte aus verschiedenen und oft verklebten Kunststoffen erschweren die Wiederverwertung oder resultieren in minderwertigen Rezyklaten (so genanntes Downcycling). Auch deshalb endet heute gut die Hälfte des weltweit erzeugten Plastikmülls auf Deponien und in Verbrennungsanlagen.

Wissenschaftler suchen nach Lösungen, wie sich Kunststoffe leichter trennen und mehrfach zu neuen Flaschen, Fasern oder Folien verarbeiten lassen. Ziel ist es, lineare Stoffströme in eine Kreislaufwirtschaft zu verwandeln, in der Plastik als wertvoller Rohstoff betrachtet wird. Polymere nicht stets aus fossilen Rohstoffen neu zu synthetisieren, würde zudem die CO₂-Bilanz der globalen Kunststoffproduktion verbessern, die immerhin sechs Prozent des weltweit geförderten Öls verschlingt.

Ein großes Problem beim Recycling von Plastik sind Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe. Es reichen beispielsweise Spuren von Polyvinylchlorid (PVC) aus, einem oft für Verpackungen verwendeten Polymer, um recyceltes Polyethylen-terephthalat (PET) praktisch unbrauchbar zu machen. PVC bildet Säuren, die PET brüchig und gelblich werden lassen. Auch andere Kunststoffe genügen nach dem Recyclingprozess häufig nicht mehr den mechanischen oder optischen Ansprüchen.

Grund für Verunreinigungen ist unter anderem, dass Sortieranlagen Kunststoffe

nicht immer gut unterscheiden können, etwa zwischen PVC- und PET-Flaschen oder zwischen Polyethylen (PE) hoher und niedriger Dichte. Forscher haben dafür eine Lösung gefunden: unsichtbare Fluoreszenz-Marker, die man auf Verpackungen druckt. Die Marker können unter UV-Licht maschinell gelesen werden und verraten der Anlage, um welche Sorte Plastik es sich jeweils handelt.

Eine weitere Herausforderung ist das Trennen von Kunststoffen, die miteinander verschweißt oder verklebt sind. Viele Verpackungen bestehen aus mehreren Plastikschichten und eignen sich daher nicht für ein mechanisches Recycling. Die Firma APK in Merseburg, Sachsen-Anhalt, hat ein Verfahren etabliert, bei dem PE mit Hilfe eines wiederverwendbaren Lösungsmittels aus mehrlagigen Verpackungen gewonnen wird – in einer

Qualität, die vergleichbar ist mit neuem PE-Granulat.

Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) haben sich Forscher überlegt, wie Handys und andere Elektronikgeräte leichter repariert und recycelt werden können. Herausgekommen ist dabei ein reversibler Kleber: Dieser ist bei Raumtemperatur stabil, löst sich aber durch Erwärmen punktgenau. Die KIT-Forscher haben dafür Sollbruchstellen in die Polymerketten eingebaut, die sich je nach gewünschter Ablösetemperatur des Klebers modifizieren lassen.

RETTUNG BIOPLASTIK?

Und auch Biotechnologie könnte helfen, Kunststoffe zukünftig in größerem Maßstab wiederzuverwerten. So haben französische Forscher jüngst ein Enzym beschrieben, das mit hoher Effizienz PET in dessen Bausteine – die Monomere –

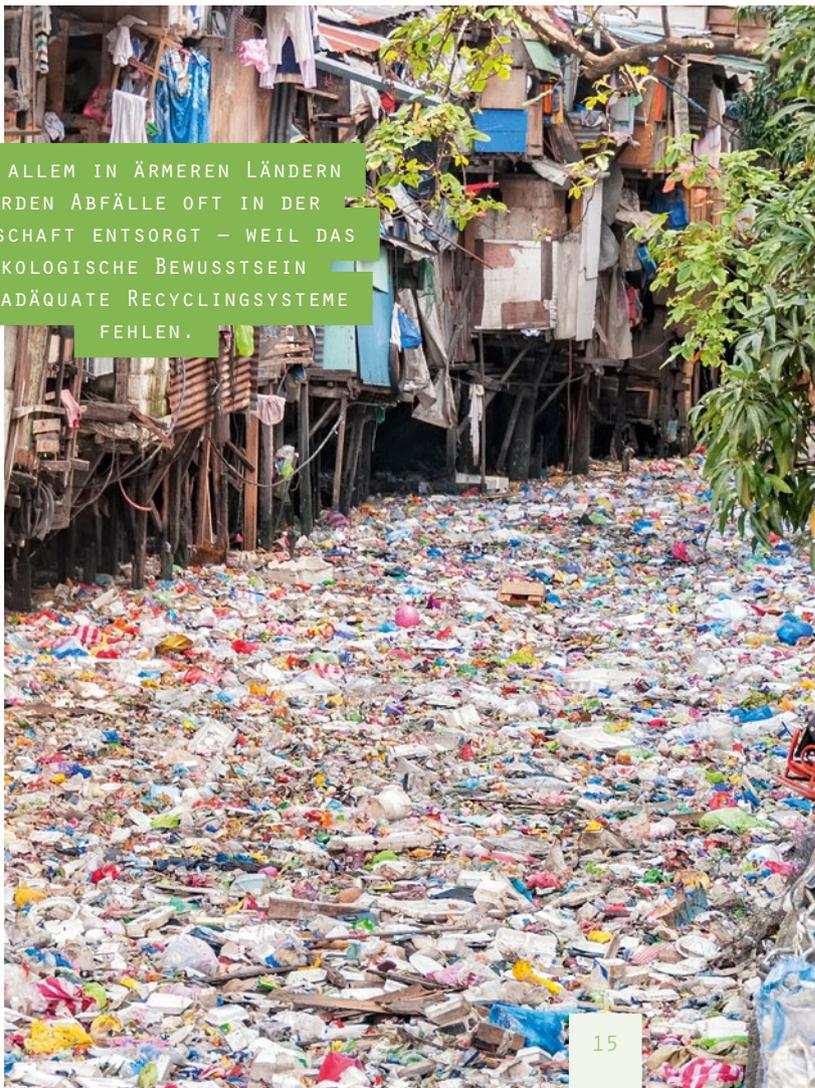
zerlegt. Diese eignen sich wieder für die Herstellung hochwertiger Polymere, die man sonst aus Erdöl synthetisieren würde.

Die Beispiele zeigen, dass der Lebenszyklus von Kunststoffen keine Einbahnstraße sein muss, die auf der Müllhalde, in der Verbrennung oder schlimmstenfalls in der Umwelt endet. Zugleich ist ein Szenario, in dem überhaupt kein Plastik in Böden und Gewässer gelangt, wenig realistisch. Selbst wenn es gelänge, diesen Müllanteil von heute 30 auf ein Prozent zu senken, wären das immer noch mehr als zwei Millionen Tonnen Abfall, die sich jährlich in der Umwelt anhäufen. Um zu verhindern, dass diese dort Jahrzehnte überdauern, sollen deshalb zukünftig vermehrt Kunststoffe eingesetzt werden, die Mikroorganismen verdauen können.

Biologisch abbaubare Kunststoffe finden insbesondere bei Verpackungen oder Ackerfolien zunehmend Verwendung. Sie können sowohl aus nachwachsenden Rohstoffen etwa aus Zuckerrohr oder Mais bestehen (biobasierte Kunststoffe) als auch erdölbasiert sein.

Allerdings werden als kompostierbar verkaufte Folien, Mülltüten oder To-go-Becher häufig nur unter bestimmten Bedingungen effektiv abgebaut, und eine vollständige Kompostierung in der freien Natur kann Monate oder Jahre dauern. Das gilt zum Beispiel für Produkte aus Polymilchsäure, die rund 25 Prozent aller biologisch abbaubaren Kunststoffe ausmachen. Auch gibt es bislang keinen marktfähigen Kunststoff, der in Meerwasser schnell verrottet.

Das Problem der Umweltbelastung durch Plastikabfälle zu lösen, ist eine große Herausforderung. Während sich Punktquellen wie synthetische Mikrofasern aus Waschmaschinen durch den Einbau von Filtern vergleichsweise leicht beseitigen ließen, sind diffuse Umwelteinträge, etwa durch Reifenabrieb, schwieriger zu verhindern. Mehr Recycling und Biokunststoffe allein werden am Ende nicht ausreichen. Ebenso notwendig ist es, weniger Plastik zu verbrauchen – und verschiedene Transportmittel intelligent zu kombinieren. 



VOR ALLEM IN ÄRMEREN LÄNDERN WERDEN ABFÄLLE OFT IN DER LANDSCHAFT ENTSORGT – WEIL DAS ÖKOLOGISCHE BEWUSSTSEIN UND ADÄQUATE RECYCLINGSYSTEME FEHLEN.

STOFFE, AUS DENEN DIE ZUKUNFT GEMACHT WIRD

KUNSTSTOFFE HABEN OFT EINEN SCHLECHTEN RUF.
ZU UNRECHT. AUF IHNEN BASIEREN VIELE DIGITALE UND
NACHHALTIGE TECHNOLOGIEN.

Wenn Plastik es in die Medien schafft, dann vor allem mit negativen Schlagzeilen. Doch trotz aller Probleme in Sachen Recycling und Umweltbelastung: Ohne Kunststoffe wäre unser heutiges, modernes Leben kaum denkbar. Und auch die großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts – die klimafreundliche Verkehrs- und Energiewende sowie die Digitalisierung – sind ohne polymere Werkstoffe wohl nicht zu bewältigen. Ihre Vorteile liegen auf der Hand: Es existiert eine beachtliche Bandbreite an Polymeren, die die verschiedensten nützlichen Eigenschaften mitbringen. Manche leiten geladene Teilchen (Ionen und Elektronen), andere lassen sich verbiegen oder härten zu einem porösen Schaum aus.

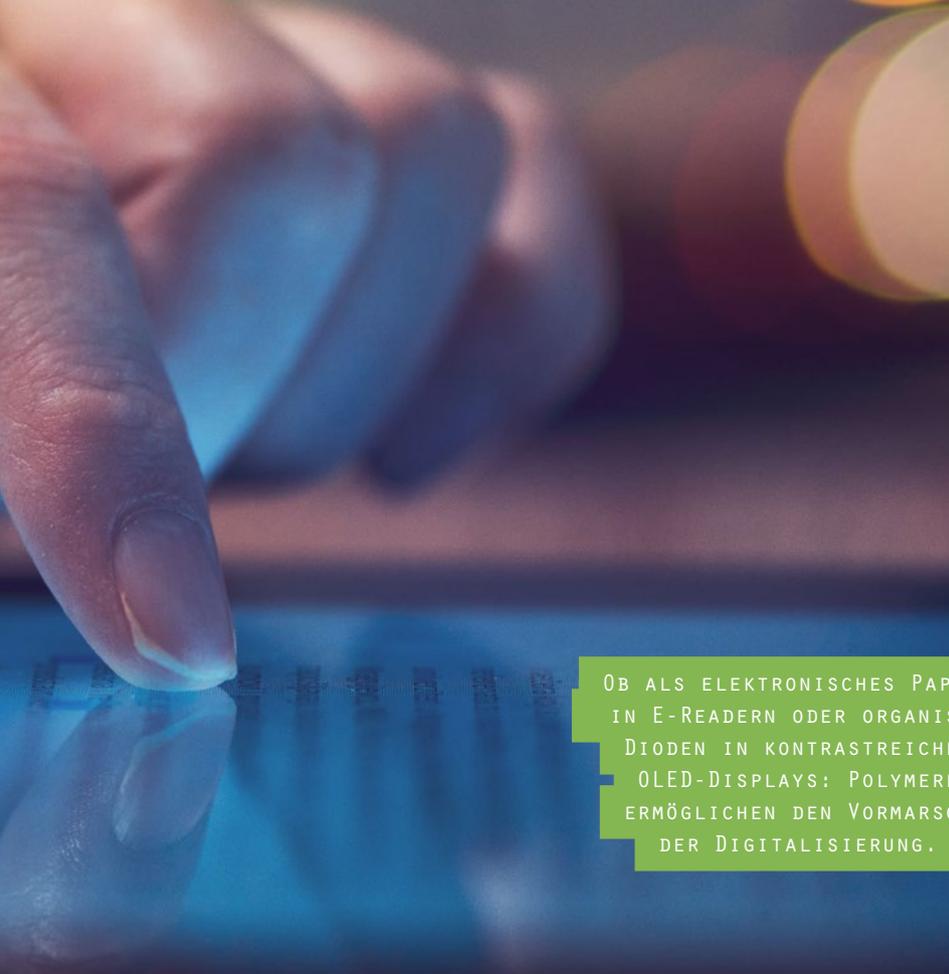
Ein immer wichtigeres Anwendungsgebiet synthetischer Polymere sind Akkumulatoren, kurz Akkus. Sie stecken in Elektrofahrzeugen, Smartphones und Laptops. Entlädt man einen Akku, setzt die Anode (Minuspol) in einer chemischen Reaktion Elektronen und Ionen frei, die über einen äußeren Stromkreis

beziehungsweise über einen Elektrolyten zur Kathode (Pluspol) wandern und dort reagieren. Chemisch gespeicherte Energie wird so in Strom umgewandelt. Beim Aufladen kehrt sich dieser Prozess um. Zahlreiche Bestandteile von Akkus bestehen schon heute aus Polymeren. Viele Hersteller verwenden zum Beispiel mikroporöse Polymerfolien als Trennmateriale zwischen den Elektroden, um Kurzschlüsse zu verhindern. Außerdem ummantelt man Batterien und Akkus gerne mit Kunststoffen, weil diese gegenüber Druckänderungen toleranter sind als Metallhülsen.

Auch als Elektrolyte und sogar als Elektrodenmaterial finden Polymere Verwendung. Sie machen Akkus flexibler und umweltfreundlicher. Ersetzt man etwa die flüssigen Elektrolyte in herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus mit gelartigen Polymeren, lassen sich sehr flache Akkus oder solche mit ungewöhnlichen geometrischen Formen produzieren. Lithium-Polymer-Akkus findet man deshalb besonders häufig in tragbaren

Elektronikgeräten wie Powerbanks, E-Zigaretten und drahtlosen Controllern für Spielkonsolen. Autohersteller bringen inzwischen ebenfalls Elektro- und Hybridfahrzeuge mit Lithium-Polymer-Akkus auf die Straße. Die Akkus der Leihwagenflotten der Firma Bolloré, die derzeit in verschiedenen Städten in den USA, Großbritannien, Frankreich sowie in Singapur unterwegs sind, enthalten etwa einen Elektrolyten aus Polyethylenglykol.

KUNSTSTOFF STATT METALL
Neben alternativen Elektrolyten ist auch ein Ersatz des Kathodenmaterials in Lithium-Ionen-Akkus erstrebenswert. Denn dieses enthält meist Kobalt und Nickel – zwei begrenzte Ressourcen, deren Abbau aus Umwelt- und Menschenrechtsperspektive mitunter problematisch ist. Hinzu kommt, dass sich die Metalle aus entsorgten Akkus nur schwer zurückgewinnen lassen. In den vergangenen Jahren sind deshalb Elektroden auf der Basis von Polymeren verstärkt in den



STEVANOVICIGOR / GETTY IMAGES / ISTOCK

OB ALS ELEKTRONISCHES PAPIER IN E-READERN ODER ORGANISCHE DIODEN IN KONTRASTREICHEN OLED-DISPLAYS: POLYMERE ERMÖGLICHEN DEN VORMARSCH DER DIGITALISIERUNG.

Fokus der Batterieforschung gerückt. Bestimmte Polymere – darunter Polysulfide, Polyimine, Polyazo-Moleküle und polymere Radikale – können Anionen oder Kationen einlagern und so elektrische Ladung speichern. Diese reichen jedoch bislang nicht an die Energiedichten von anorganischen Kathodenmaterialien heran. Darüber hinaus ist die Herstellung der Polymere sehr teuer, weshalb noch keine Akkus mit Polymer-elektroden auf dem Markt sind.

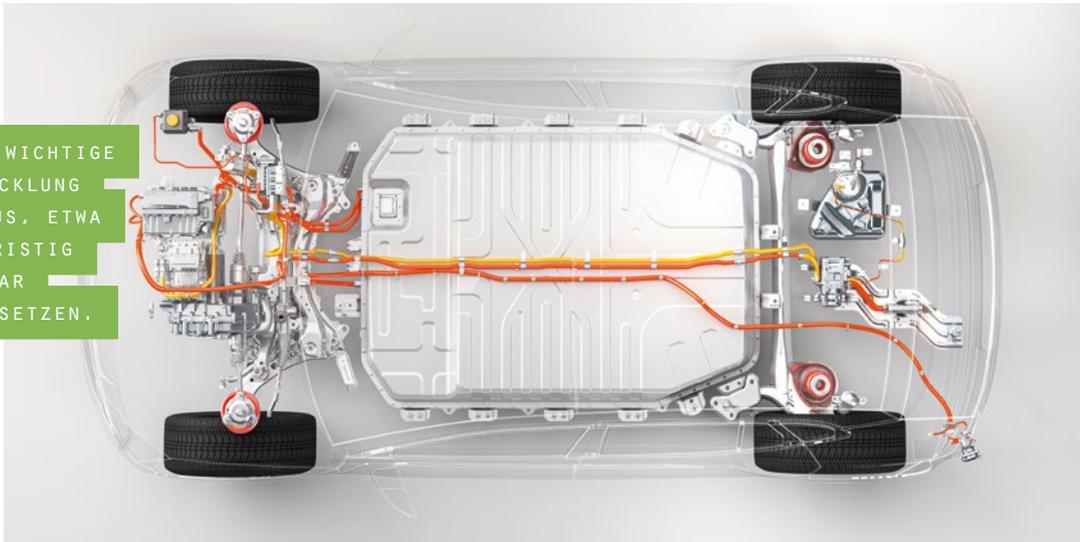
Manche Forscher träumen davon, dass man zukünftig in der Lage sein wird, Akkus herzustellen, die vollständig aus Polymeren bestehen – von der Hülle über den Elektrolyten bis hin zu den Elektroden. Solche Akkus könnten umweltschonender entsorgt werden als die heute verbauten. Bei einer thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen würden keine oder zumindest weniger toxische Gase entstehen. Und auch ein Recycling wäre denkbar.

Für die Verkehrswende spielt nicht nur die Entwicklung leistungsstarker Akkus eine Rolle. Brennstoffzellen bieten eine weitere umweltfreundliche Alternative zu klassischen Verbrennungsmotoren. Sie wandeln gespeicherte chemische Energie in elektrische um, ohne dabei Treibhausgase zu produzieren. Wie Batterien bestehen sie aus einer galvanischen Zelle. Die meisten Automobilhersteller, darunter Marktführer Hyundai und Toyota, verwenden eine Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle, kurz PEMFC, also einen Brennstoffzellentyp mit einem Polymer als Elektrolyten. An der Anode einer PEMFC spaltet ein Katalysator den Brennstoff Wasserstoffgas (H_2) in Protonen (H^+) und Elektronen (e^-). Die Protonen wandern durch den Polymer-elektrolyten zur Kathode, wo sie mit Luftsauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) reagieren, das einfach über den Auspuff ausgestoßen wird. Als Elektrolyt dient meistens so genanntes Nafion[™] – eine Modifikation des Teflons[®] –, das Protonen und Kationen, jedoch keine Anionen passieren lässt.

Weil Wasserstoffgas bei Luftkontakt explosiv und damit aufwändig zu lagern und zu transportieren ist, entwickeln Forscher auch PEMFCs mit Methanol als Brennstoff. Allerdings sind diese nur für Betriebstemperaturen von bis zu 100 Grad Celsius geeignet, dazu anfällig für Verunreinigungen des Brennstoffs und bislang recht teuer. Hier besteht also noch Optimierungsbedarf.

SVEN LOEFFLER / GETTY IMAGES / ISTOCK

POLYMERE SPIELEN EINE WICHTIGE ROLLE BEI DER ENTWICKLUNG LEISTUNGSFÄHIGER AKKUS, ETWA FÜR E-AUTOS. LANGFRISTIG KÖNNTEN SIE Sogar ELEKTRODENMETALLE ERSETZEN.





LEICHT, DÜNN UND FLEXIBEL:
SOLARZELLEN AUS
HALBLEITENDEN POLYMEREN
KÖNNTEN ZUKÜNFTIG
AN FASSADEN ODER FENSTERN
STROM ERZEUGEN.

Eine andere Möglichkeit, Energie nachhaltig zu gewinnen, bieten Solarzellen: halbleitende Materialien, die Photonen des Sonnenlichts absorbieren. Dadurch werden Elektronen frei, die durch die Zelle zu einer Elektrode wandern – Strom fließt. Der Markt wird derzeit von Solarzellen aus Silizium dominiert, weil sie witterungsbeständig sind und akzeptable Wirkungsgrade erreichen. Der Wirkungsgrad beschreibt, wie effizient die Zelle einfallende Sonnenenergie in Strom umwandelt. Allerdings eignen sich Fotovoltaikanlagen auf Siliziumbasis auf Grund des hohen Gewichts und mangelnder Flexibilität nicht für alle Gebäudeoberflächen oder für mobile Elektronikgeräte. Ihre Herstellung ist zudem energieintensiv und entsprechend teuer.

Organische Solarzellen aus halbleitenden Polymeren könnten diese Probleme womöglich lösen. Weil organische Solarzellen dünner und transparenter sind als jene aus Silizium, hofft man, sie eines Tages auf Häuserfassaden, Fenstern oder

auf Smartphones und Smartwatches anbringen zu können.

Als Strom erzeugende Schicht dient in organischen Solarzellen an Stelle von Silizium ein Polymer, welches Elektronen abgibt, und ein nichtpolymere organisches Molekül, das diese aufnimmt. In den Strukturen beider Materialien wechseln sich Doppel- und Einfachbindungen ab, was dazu führt, dass die Elektronen keinen festen Aufenthaltsort haben, sondern sich über die Moleküle verteilen. Das verleiht diesen halbleitende Eigenschaften. Lange konnten organische Solarzellen nicht mit siliziumbasierten konkurrieren. Durch geschicktes Kombinieren von Polymeren und Nichtpolymeren ist es Forschern jedoch gelungen, die Wirkungsgrade stetig zu erhöhen, auf inzwischen über 17 Prozent. Sie erreichen damit fast die Effizienz von Silizium-Solarzellen. Bis zur Massentauglichkeit organischer Solarzellen müssen allerdings noch einfachere, sprich kostengünstigere Wege gefunden werden, die organischen Komponenten zu synthetisieren.

Andere Polymere im Bereich der organischen Elektronik helfen derweil schon seit mehr als einem Jahrzehnt, Energie zu sparen. Der Einsatz leitfähiger organischer Moleküle ist immer dann interessant, wenn Dinge leicht und mechanisch flexibel sein sollen. Halbleitende Polymere lassen sich in relativ einfachen Verfahren und bei niedrigen Temperaturen großflächig auf dünne Folien aufdrucken. Das ermöglicht eine rentable und Energie sparende Massenfertigung, etwa von Chipkarten. Ein anderes Beispiel sind organische Leuchtdioden (OLEDs), die Strom in Licht umwandeln – also genau auf den umgekehrten Prozess einer Solarzelle setzen. Displays und Fernseher mit OLED-Technologie verbrauchen weniger Energie als die weit verbreiteten Flüssigkristall-Bildschirme (LCDs) – und bieten zugleich einen höheren Kontrast sowie eine bessere Farbdarstellung. OLEDs erlauben es zudem, sehr dünne Bildschirme zu bauen. Als organische Farbstoffe kommen meist Derivate des Poly(p-phenylen-vinyl) (PPV) zum Einsatz.

POLYMERE HELFEN, CO₂ UND ENERGIE ZU SPAREN

Auf Polymeren basiert auch so genanntes elektronisches Papier in Lesegeräten für E-Books. Hinter E-Papier steckt eine Technik, die ein zähflüssiges Polymer mit geladenen weißen Mikropartikeln enthält. Für jedes Pixel sind über und unter der Polymerschicht kleine Elektroden angebracht. Legt man ein elektrisches Feld an, schwimmen die Mikropartikel zur Elektrode mit der entgegengesetzten Ladung. Dadurch erscheint das Pixel entweder schwarz oder weiß. Seit einigen Jahren wird E-Papier auch für Smartwatches, Preisschilder in Supermärkten und Anzeigetafeln verwendet.

Vor allem die Kombination aus elektrischer Leitfähigkeit und mechanischer Flexibilität macht Polymere für zahlreiche Zukunftstechnologien interessant. Bisweilen nutzt man jedoch auch nur die mechanische Vielseitigkeit von

Polymeren. Von Bedeutung ist etwa das Massenprodukt Polyurethan, das aus Diisocyanaten und Diolen hergestellt wird. Indem man das Diol variiert, kann man aus Polyurethan alles von Duroplasten über Thermoplasten bis hin zu Elastomeren herstellen; außerdem Weich- und Hartschäume.

Polyurethan-Schaumstoffe und andere Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat oder Polycarbonat ersetzen seit Jahrzehnten viele Metall- und Glaskomponenten in Autos und Flugzeugen. Die leichten Kunststoffe verringern den Kraftstoffverbrauch und damit den CO₂-Ausstoß. Polyurethan-Hartschäume sind auch als Dämmstoff für Gebäude nicht mehr wegzudenken. Zwischen Putz und Mauerwerk verhindern sie, dass Wärme im Winter über die Außenwand an die Umgebung abgegeben wird und dass Hitze im Sommer von außen in die Wohnung dringt. Füllt man ein Dämmgas wie Pentan in die poröse Struktur des Schaumstoffs, kann dieser mehr als das 70-Fache der Energie einsparen, die für dessen Herstellung, Einbau und Entsorgung anfällt. In Passivhäusern erreichen Polyurethan-Schaumstoffe zusammen mit anderen Materialien eine so gute Dämmung, dass die Gebäude ohne Heizung und Klimaanlage auskommen.

Neben Dämmstoffen und Autoteilen sind Matratzen eines der häufigsten Einsatzgebiete von Polyurethan. Für die Herstellung des dafür benötigten Polyurethan-Weichschaums nutzt man Polyether-Polyole, die – wie viele Polymere – auf fossilen Rohstoffen basieren. Forschern ist es gelungen, einen Teil des Ausgangsmaterials durch CO₂ zu ersetzen, das bei der industriellen Ammoniaksynthese als Abfallprodukt anfällt. Über diese so genannte CO₂-Fixierung werden in einer Anlage in Dormagen nun Polyether-Karbonat-Polyole mit einem CO₂-Anteil von bis zu 20 Prozent hergestellt. Die daraus gefertigte klimafreundliche Schaumstoffmatratze gibt es bereits zu kaufen.

Ein viel versprechendes Anwendungsfeld, das sich erst in jüngster Zeit die

Eigenschaften von Polymeren zu Nutze macht, ist die Datenspeicherung. So wie natürlich vorkommende Makromoleküle Informationen speichern – unsere DNA etwa Baupläne für Proteine –, lassen sich auch synthetische Polymere codieren. Zum Speichern eines Binärcodes in einem Molekülstrang müssen zwei verschiedene Monomere als 0-Bit und 1-Bit definiert werden, um daraus ein Polymer mit dem gewünschten Code zu synthetisieren. Mit Hilfe der Massenspektrometrie kann man die so codierten Informationen wieder auslesen.

MOLEKULARER GEHEIMCODE

Wissenschaftler haben es bereits geschafft, 128 Bit an Daten in Polymeren zu verschlüsseln. Obwohl die Forschung hier noch in den Kinderschuhen steckt, ist es denkbar, dass diese Art der Datenspeicherung in Zukunft tatsächlich eingesetzt wird. Zum Beispiel, um Produktpiraterie bei teuren Medizinprodukten aufzudecken. Ein molekularer Barcode könnte etwa anzeigen, ob es sich bei einem Implantat um ein Originalteil handelt oder um ein billiges Imitat. Eine anderes mögliches Anwendungsfeld ist die Kryptografie: Zum Auslesen codierter

Informationen könnte man molekulare Schlüssel verwenden, die auf analogem Weg zum Empfänger transportiert werden.

Diese Beispiele illustrieren: Dank ihrer besonderen strukturellen, mechanischen und physikochemischen Eigenschaften sind Polymere für viele Zukunftstechnologien unverzichtbar. Schon heute sind sie aus zahlreichen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Ob in Brennstoffzellen, OLEDs oder Passivhäusern – Polymere helfen, den Verbrauch fossiler Rohstoffe zu senken, den Ausstoß von gesundheits- und klimaschädlichen Abgasen zu verringern sowie Energie zu sparen. Andere Technologien, die zum Klimaschutz beitragen, werden mit Hilfe von Kunststoffen immer leistungsfähiger. Dazu zählen Solarzellen, die sich als polymere Variante für die unterschiedlichsten Oberflächen eignen, und Polymer-Akkus, die nur aufwändig zu recycelnde und schwermetallbelastete Akkus ersetzen könnten. Auch die Herstellung von Polymeren verbraucht oft weniger Energie als die von anorganischen Materialien und könnte in Zukunft vermehrt auf die Fixierung von CO₂ aus Industrieprozessen setzen. 

IN MODERNEN PASSIVHÄUSERN
HELFE DÄMMSTOFFE AUS
POLYSTYROL ODER POLYURETHAN,
WÄRMEVERLUSTE UND
DAMIT DIE HEIZKOSTEN ZU
MINIMIEREN.

AH_FOTOBOX / GETTY IMAGES /
ISTOCK



MIT DEM NANOTAXI IN DIE ZELLE

DIE ARBEITSGRUPPE VON ANJA TRÄGER
ENTWICKELT POLYMERE NANOTRANSPORTER
FÜR DIE GENTHERAPIE.

ANJA TRÄGER

Die Biotechnologin
forscht am
Jena Center for Soft
Matter (JCSM).

Frau Träger, Sie und Ihr Team entwickeln Gen-Taxis. Was versteht man darunter?

Gen-Taxis sind winzige Strukturen, die genetisches Material in Zellen einschleusen können. Als Taxi kann zum Beispiel ein Virus dienen. Wir nutzen dafür jedoch Polymere. Diese legen sich wie eine schützende Hülle um den Fahrgast, das Genmaterial. Mit Hilfe von Gen-Taxis lässt sich das Erbgut von Zellen verändern, sie können neue Funktionen einbringen oder bestehende ausschalten.

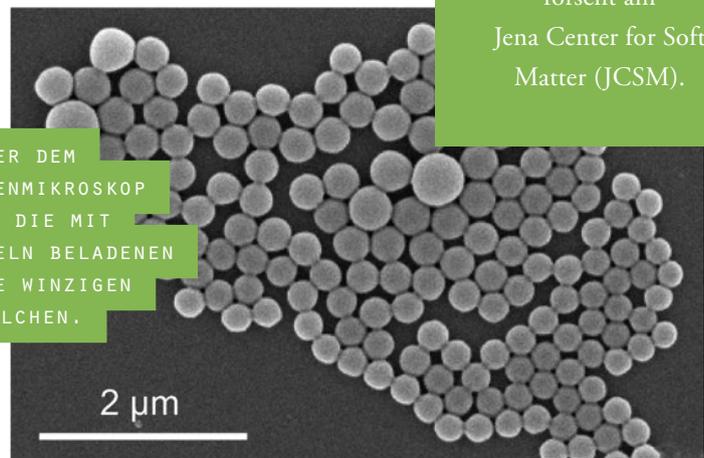
Wie sehen Ihre Taxis aus?

Man kann sie sich als winzige Kugeln vorstellen, manche sind eher wurmartig. Sie bestehen aus bis zu mehreren tausend Polymeren mit einem Durchmesser um die 100 Nanometer. Das ist etwa 500-mal dünner als ein menschliches Haar.

Wie gelangen die Genschnipsel in so einen Nanotransporter?

Die genetischen Informationen sind in Nukleinsäuren, also DNA oder RNA gespeichert. Diese Biomoleküle besitzen verschiedene chemische Gruppen. Wir nutzen einen negativ geladenen Abschnitt, die Phosphatgruppe, um die Nukleinsäure an unsere positiv geladenen Polymere zu binden. Außerdem fügen wir weitere Gruppen mit zusätzlichen chemischen Eigenschaften hinzu, die

UNTER DEM
ELEKTRONENMIKROSKOP
ÄHNELN DIE MIT
GENSCHNIPSELN BELADENEN
POLYMERE WINZIGEN
KÜGELCHEN.



die Transporter vor dem Immunsystem tarnen. Sie würden sonst vor Erreichen des Ziels beseitigt. In die einzelnen Polymere können wir zudem Sequenzen einbauen, die es dem Körper erleichtern, die Gen-Taxis nach ihrer »Fahrt« abzubauen.

Könnten die Taxis auch andere Fracht transportieren?

Im Prinzip ja. Zum Beispiel werden sie oft genutzt, um klassische Wirkstoffe zu transportieren, die nur in ganz bestimmte Zellen gelangen sollen, oder solche, die der Körper andernfalls schlecht aufnehmen würde.

Wie finden die Polymere ans Ziel?

Das ist tatsächlich eine große Herausforderung. Die Nanotransporter dürfen die genetischen Informationen nicht wahllos in alle Zellen einschleusen. Wir statten

unsere Gen-Taxis daher mit Zieleinheiten aus. Das sind Moleküle, die ausschließlich von bestimmten Zellen erkannt werden, nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip.

Was sollen Ihre Gen-Taxis zukünftig leisten können?

Unser Ziel ist es, effiziente, gut verträgliche und stabile Nanotransporter herzustellen, um damit Krankheiten zu behandeln. Sie könnten unter anderem beschädigte Zellen reparieren oder das Immunsystem unterstützen. Ein aktuelles Beispiel ist etwa die Entwicklung von RNA-basierten Impfungen, die man auch im Kampf gegen Covid-19 nutzen will. Die RNA eines solchen Impfstoffs enthält Informationen, die die körpereigene Immunabwehr auf den Kampf gegen den Erreger vorbereitet. Dazu muss die RNA in unsere Immunzellen eingeschleust werden. Hier könnten Gen-Taxis helfen. 

MIT FRDL. GEN. VON ANJA

JENA CENTER FOR SOFT
MATTER

LINKS

FACHGRUPPE MAKROMOLEKULARE CHEMIE DER GDCh

[HTTPS://MACROCHEM.ORG](https://macrochem.org)

FASZINATION MAKROMOLEKULARE CHEMIE

[HTTPS://FASZINATIONCHEMIE.DE/MAKROMOLEKULARE-CHEMIE/](https://faszinationchemie.de/makromolekulare-chemie/)

GRUNDLAGEN ZU POLYMEREN UND KUNSTSTOFF

[HTTPS://WWW.UMSICHT.FRAUNHOFER.DE/DE/UEBER-FRAUNHOFER-UMSICHT/NACHHALTIGKEIT/NATIONALE-INFORMATIONSTELLE-NACHHALTIGE-KUNSTSTOFFE/POLYMER-KUNSTSTOFF/GRUNDLAGEN.HTML](https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht/nachhaltigkeit/nationale-informationsstelle-nachhaltige-kunststoffe/polymer-kunststoff/grundlagen.html)

EUROPEAN TYRE AND RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION

[HTTPS://WWW.ETRMA.ORG](https://www.etrma.org)

POLYMERFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND

[HTTPS://MACROCHEM.ORG/POSITIONSPAPIER](https://macrochem.org/positionspapier)

DEUTSCHES KUNSTSTOFFMUSEUM

[HTTP://WWW.DEUTSCHES-KUNSTSTOFF-MUSEUM.DE](http://www.deutsches-kunststoff-museum.de)

DAS LEBEN DES HERMANN STAUDINGER

[HTTPS://WWW.K-ONLINE.DE/DE/NEWS/THEMA_DES_MONATS/THEMA_DES_MONATS_-_ARCHIV/DEZEMBER_2019_DAS_LEBEN_DES_HERMANN_STAUDINGER/DAS_LEBEN_DES_HERMANN_STAUDINGER](https://www.k-online.de/de/news/thema_des_monats/thema_des_monats_-_archiv/dezember_2019_das_leben_des_hermann_staudinger/das_leben_des_hermann_staudinger)

PLASTIKATLAS

[HTTPS://WWW.BOELL.DE/DE/PLASTIKATLAS](https://www.boell.de/de/plastikatlas)

PLASTIK IN GEWÄSSERN

[HTTPS://THEMENSPEZIAL.ESKP.DE/PLASTIK-IN-GEWAESSERTN/INHALT-9379/](https://themenspezial.eskp.de/plastik-in-gewaessern/inhalt-9379/)

THE CHEMISTRY OF BIODEGRADABLE PLASTICS

[HTTPS://WWW.COMPOUNDCHEM.COM/2019/06/26/BIODEGRADABLE-PLASTICS/](https://www.compoundchem.com/2019/06/26/biodegradable-plastics/)

END PLASTIC WASTE

[HTTPS://ENDPLASTICWASTE.ORG](https://endplasticwaste.org)

THE NEW PLASTICS ECONOMY

[HTTPS://WWW.ELLENMACARTHURFOUNDATION.ORG/ASSETS/DOWNLOADS/THE-NEW-PLASTICS-ECONOMY-RETHINKING-THE-FUTURE-OF-PLASTICS.PDF](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics.pdf)

SCIENCE TO ENABLE SUSTAINABLE PLASTICS

[HTTPS://WWW.GDCH.DE/FILEADMIN/DOWNLOADS/PUBLIKATIONEN/WEITERE_PUBLIKATIONEN/PDF/SUSTAINABILITY_CS3_WHITEPAPER2020.PDF](https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/publikationen/weitere_publikationen/pdf/sustainability_cs3_whitepaper2020.pdf)

BÜCHER

DIETRICH BRAUN

KLEINE
GESCHICHTE
DER
KUNSTSTOFFE

2013, Hanser

308 Seiten

€ 30,-



GEORG SCHWEDT

EXPERIMENTE
RUND UM DIE
KUNSTSTOFFE
DES ALLTAGS

2013, Wiley-VCH

168 Seiten

€ 29,90



MARK MIODOWNIK

WUNDERSTOFFE:
ZEHN
MATERIALIEN,
DIE UNSERE
ZIVILISATION
AUSMACHEN

2016, DVA

304 Seiten

€ 19,99



GDCh-FACHGRUPPE
HOCHSCHULFÜHRER
MAKROMOLEKULARE
CHEMIE 2018

2018, GDCh

288 Seiten

€ 39,90



THISBE LINDHORST
ET AL. (HG.)

UNENDLICHE
WEITEN: KREUZ
UND QUER
DURCHS CHEMIE-
UNIVERSUM

2017, Wiley-VCH

230 Seiten

€ 29,90





GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER E.V.
VARRENTRAPPSTRASSE 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN
PROJEKTKOORDINATION: DR. KARIN J. SCHMITZ,
DR. THOMAS FRÜH

EINE PUBLIKATION VON: SPEKTRUM CP
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH
TIERGARTENSTRASSE 15-17, 69121 HEIDELBERG
WWW.SPEKTRUM-CP.DE

LEITUNG: ANN-KRISTIN EBERT, HANNA HILLERT
REDAKTION: DR. TIM KALVELAGE
TEXTE: DR. JANOSCH DEEG, DR. ANNA CLEMENS,
DR. STEFANIE UHRIG
LAYOUT: OLIVER GABRIEL,
KARSTEN KRAMARCZIK

SCHLUSSREDAKTION: CHRISTINA MEYBERG
BILDREDAKTION: GABRIELA RABE
HERSTELLUNG: NATALIE SCHÄFER