

# Plastik – gut verträglich

Kunststoffe sind praktisch – nicht zuletzt weil sie sehr langlebig sind. Doch wenn sie in die Umwelt gelangen, wird genau das zum Problem: Dort nimmt die Menge an Plastikmüll immer weiter zu. Das Team von **Frederik Wurm** entwickelt am Mainzer **Max-Planck-Institut für Polymerforschung** daher Polymere, die von Mikroorganismen zerlegt werden, sobald sie ihren Zweck erfüllt haben. Die Forscher setzen dabei auf Erfahrungen, die sie mit abbaubaren Polymeren für die Medizin gesammelt haben.

TEXT **KARL HÜBNER**

Jahr für Jahr kommen 380 Millionen Tonnen Kunststoff neu in den Umlauf. Würde man 40-Tonner-Lastwagen damit beladen, wände sich ihre Schlange fast viermal um die Erde. Kunststoffe für Tüten, Lebensmittelverpackungen und Kosmetikfläschchen, Zahncremetuben und Strumpfhosen gehören ebenso dazu wie für das Bildschirmgehäuse von Computer oder Smartphone, die Musik-CD oder den Fußboden aus PVC oder Laminat. Und auch Auto- und Flugzeughersteller erhöhen kontinuierlich den Anteil von Kunststoffen – um Gewicht zu reduzieren und damit Treibstoff zu sparen.

Kunststoffe sind allgegenwärtig, weil sie mit vielen Vorzügen punkten können: Sie sind nicht nur leicht und stabil, sie sind auch sehr vielseitig und langlebig. Chemisch ist für sie kennzeichnend, dass sich bestimmte Grundbausteine, Monomere, zu riesigen Kettenmolekülen aneinanderreihen, manchmal tausendfach. Über die Art der Monomere steuern Chemiker die Eigenschaften der Polymere, etwa ihre Härte, Verformbarkeit, Reißfestigkeit, ihre thermische Beständigkeit und vieles mehr.

Einmal gebildet, sind die meisten Polymere kaum kleinzukriegen. Selbst

Witterung und Licht lassen sie allenfalls vergilben. Und auch Mikroorganismen, die viele andere Materialien als Nahrungsquelle nutzen, können mit den meisten Kunststoffen wenig anfangen. So dauert es, je nach Art des Polymers und den Umgebungsbedingungen, Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte, ehe die Riesenmoleküle geknackt und vollständig in Kohlendioxid, Wasser und andere Restsubstanzen umgewandelt worden sind. Erst dann wäre aber sichergestellt, dass die Polymere keine Gefahr mehr etwa für Fische und Seevögel darstellen.

## 4,9 MILLIARDEN TONNEN KUNSTSTOFFE ALS MÜLL

Und so zählt die Langlebigkeit der Kunststoffe zwar bei vielen Einsatzgebieten zu ihren Vorteilen, gilt heute aber zugleich auch als ihr größter Nachteil. So veröffentlichten Forscher aus den USA erst vor knapp einem Jahr erschreckende Zahlen zum Verbleib des Plastiks. Zwischen 1950 und 2015 seien weltweit 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoff produziert worden, so ihre Kalkulation. Davon seien 6,3 Milliarden Tonnen bereits wieder zu Abfall

Leichte Kost für Einzeller: Mikroorganismen können solche Polymerplatten auf Phosphatbasis abbauen – derartige Kunststoffe würden sich nicht in der Umwelt ansammeln.





Kaum kleinzukriegten: Plastikmüll kann Jahrhunderte überdauern. Wenn er wie hier auf den Malediven in einer Deponie landet, dann ist es schon gut gelaufen. Denn vor allem in Ländern ohne funktionierende Abfallentsorgung gelangen gewaltige Mengen an Kunststoffen in der Umwelt.

geworden. Von dieser Menge wiederum sei aber nur gut ein Fünftel wiederverwertet oder verbrannt worden. Die übrigen 4,9 Milliarden Tonnen seien als Müll irgendwo auf Deponien oder direkt in der Umwelt gelandet. Die entsprechende Lkw-Kette würde fast 50-mal um die Erde reichen.

Zwar gibt es auch biologisch recht gut abbaubare Kunststoffe, aber ihr Anteil an der gesamten Plastikmenge ist derzeit noch sehr gering. Polymilchsäure etwa findet zwar Einsatz bei Beuteln für Kompostabfälle oder in Partygeschirr für Straßenfeste. Aber um am Ende wirklich abgebaut zu werden, muss das Material auch richtig entsorgt werden. „Wenn die Bierbecher aus Polymilchsäure am Ende im normalen Abfall oder im gelben Sack landen, ist nicht viel gewonnen“, sagt Frederik Wurm, Leiter einer Forschungsgruppe in der Abteilung von Katharina Landfester am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Nur über die Biotonne oder den Kompost gelange die Polymilchsäure dorthin, wo Mikroorganismen sie auch zerlegen können.

Frederik Wurm und seine Mitarbeiter entwickeln Polymere mit maßgeschneiderten Eigenschaften. Eine davon ist die biologische Abbaubarkeit. Dabei müssten übrigens nicht zwangsläufig nachwachsende Rohstoffe im Spiel sein, räumt der Chemiker direkt mit einem verbreiteten Irrtum auf: „Erstens ist nicht alles, was biobasiert ist, automatisch biologisch abbaubar“, so Wurm. „Und zweitens muss nicht alles, was am Ende abbaubar ist, biologischer Herkunft sein.“ Seine Gruppe etwa setzt derzeit vor allem auf Phosphate und Phosphonate. Und obwohl deren chemischer Ursprung in bestimmten Gesteinen liegt, lassen sich daraus gewonnene Polymere biologisch abbauen.

### PE-MOLEKÜLE MIT EINGEBAUTEN SPALTSTELLEN

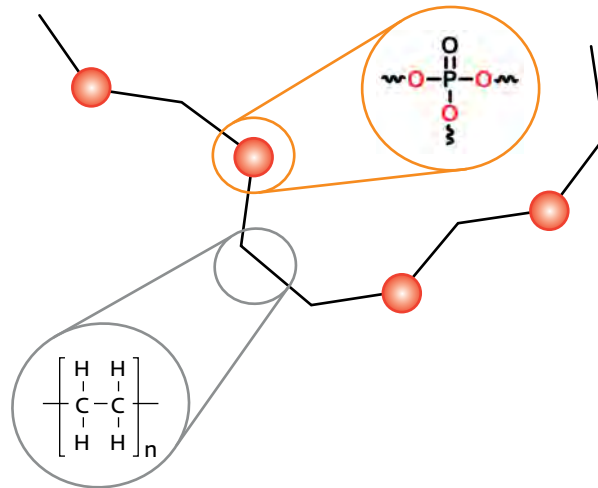
„Die Idee ist eigentlich ganz einfach“, sagt der Chemiker zu einem der aktuellen Projekte. „Wir machen normale PE-Moleküle, in die wir ein paar Phosphatgruppen als Spaltstellen einbauen.“ PE steht für Polyethylen, einen der verbreitetsten Kunststoffe überhaupt. Aus ihm werden Folien für Lebensmittel und die Landwirtschaft ebenso gefertigt wie Einkaufstüten oder Flaschen für Shampoo, Reinigungsmittel oder Kosmetik.

Phosphatbausteine in den PE-Ketten wecken den Appetit bestimmter Mikroben, weil sie ihnen Punkte zum Anbei-

ßen bieten. Ein PE-Molekül mit eingebauten Phosphatgruppen würde in der Umwelt daher leicht gespalten. Zurück blieben die vielen kleinen PE-Abschnitte, die sich im Polymer jeweils zwischen zwei Phosphatgruppen befanden. Sind diese kurz genug, seien auch sie – im Gegensatz zu den riesigen Ketten im normalen Polyethylen – gut abbaubar, so Frederik Wurm.

Bleibt die Frage, ob der Einbau der Phosphate die anderen Eigenschaften des Polyethylens verändert. „Wir wollen hier natürlich Materialien machen, die sich wie PE nutzen lassen – und zusätzlich eben noch abbaubar sind“, so Wurm. Entscheidend sind dabei vor allem die mechanischen Eigenschaften. Und für diese ist ausschlaggebend, wie sich die Polymerketten zueinander anordnen. Von reinem PE beispielsweise weiß man, dass die langen Moleküle sich wie der Balg eines Akkordeons auf-falten. Die Mainzer Chemiker stellten sich also die Frage, ob sich auch das Polymer mit den Phosphatgruppen so verhält. Im Hinblick auf die angestrebte Abbaubarkeit war für die Forscher noch etwas wichtig: „Die Phosphatabschnitte müssen gerade an den äußeren Knickstellen liegen, damit sie für Mikroorganismen und deren Enzyme zugänglich sind“, so Wurm.

Dass ihre beiden Wünsche erfüllt wurden, sahen die Wissenschaftler im Transmissions-Elektronenmikroskop.



**Oben** In gewöhnlichem Polyethylen wiederholen sich tausendfach Einheiten, die nur aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) bestehen. Um den Kunststoff biologisch abbaubar zu machen, fügen die Mainzer Chemiker an den Knickpunkten des Polymers Phosphatbausteine ein – chemische Gruppen aus Phosphor (P) und Sauerstoff (O).

**Unten** In der Gruppe von Frederik Wurm (rechts) entwickelt Hisachi Tee mithilfe der Phosphorchemie neue Polymere. Die Forscher versuchen auch, Eigenschaften von gängigen Kunststofffolien nachzuahmen.

Demnach fächerten sich ihre Polymere genauso auf wie reines Polyethylen. Und die Phosphatgruppen saßen, wie gehofft, an den Knickstellen.

Noch sind die Mainzer allerdings nicht ganz zufrieden. „Für die meisten praktischen Einsatzgebiete reicht unser Molekulargewicht noch nicht aus“, räumt Wurm ein. Mit anderen Worten: Noch sind die Molekülketten, die die Chemiker im Labor erzeugen, nicht so lang wie sonst bei PE üblich.

Das liegt daran, dass sie ihr Polymer für den Einbau der Phosphatgruppen anders herstellen, als die Industrie Polyethylen produziert.

### FÜR DEN ÖKOLOGISCHEN NUTZEN ETWAS MEHR ZAHLEN

Aber immerhin: Einen prinzipiellen Ansatz für abbaubare PE-Materialien haben die Mainzer damit schon in der Schublade. Frederik Wurm weiß natürlich, dass nicht alle PE-Verwender sofort auf das PE-Phosphat-Polymer umstellen werden. Reines PE ist derzeit schließlich konkurrenzlos günstig. Die wenigsten Hersteller können sich da Mehrkosten erlauben und diese an ihre Kunden weitergeben – vor allem wenn es um Massenprodukte wie Verpackungen geht. Frederik Wurm kann sich aber vorstellen, dass manche Kunden vielleicht doch bereit wären, für den ökologischen Nutzen etwas mehr zu zahlen. Etwa solche, die in Bioläden oder anderen einschlägigen Ladenketten einkaufen.

Praktisch gar keine Rolle spielen die Materialkosten dagegen bei medizinischen Anwendungen. Und genau dafür hatte Frederik Wurms Team auch die ersten abbaubaren Polymere auf Phosphatbasis entwickelt. Weil die Chemiker dabei so erfolgreich waren, sind sie überhaupt erst auf die Idee gekommen, Phosphatbausteine auch in gängige Kunststoffe wie PE einzubauen. >

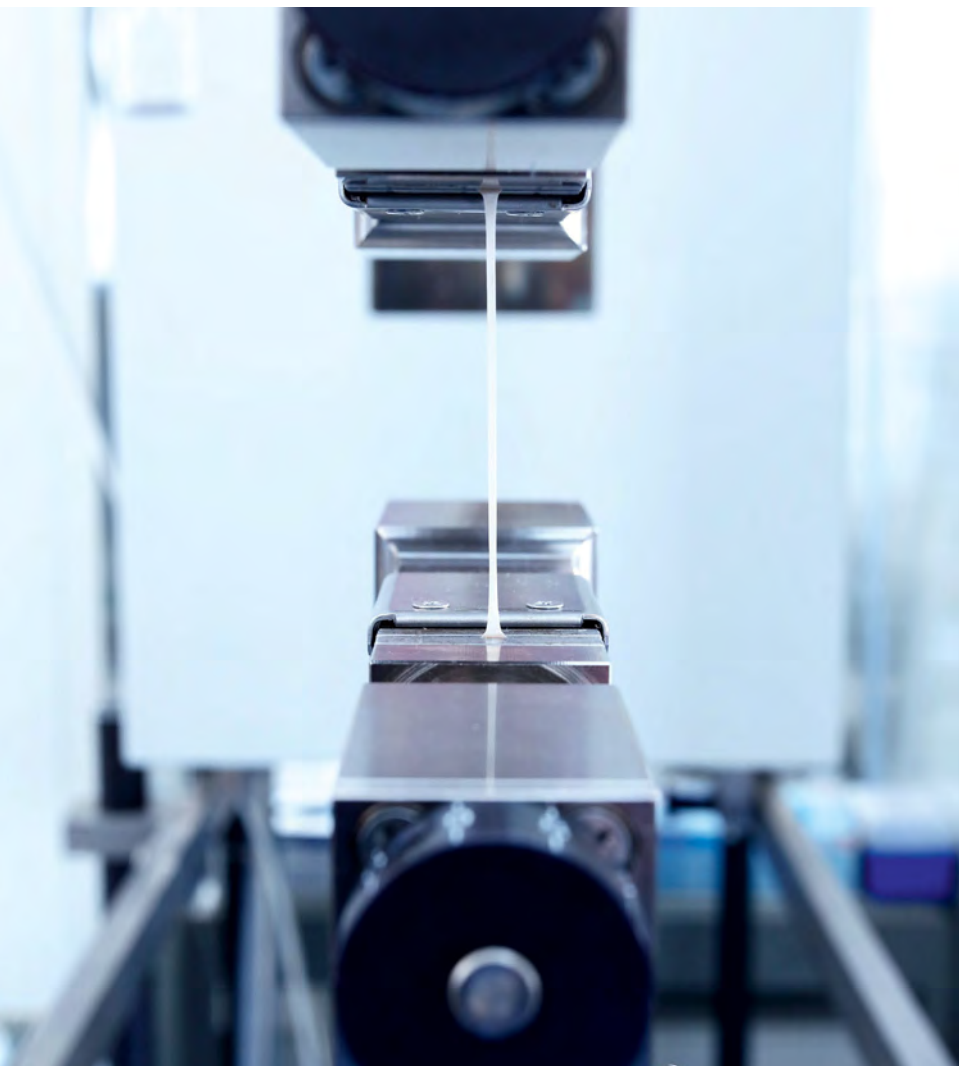




Bei medizinischen Anwendungen geht es vor allem um sogenannte Polymer-Wirkstoff-Konjugate: Darin werden Wirkstoffe, etwa solche gegen einen Tumor, zunächst meist in Nanopartikel eingebettet. Die Teilchen, aber manchmal auch die Wirkstoffe selbst werden dann mit zahllosen Ketten aus Polyethylenglykol (PEG) eingehüllt, die wie Fransen um das Konjugat herumflattern. Diese Ketten wirken wie eine Tarnkappe, die das Vehikel für die Immunabwehr unsichtbar macht und dessen vorzeitigen Abbau auf diese Weise verhindert. Daher zirkulieren die Konjugate deutlich länger im Blut als der reine Wirkstoff. Damit erhöht sich zugleich dessen Wirkdauer.

Zudem sind die meisten Konjugate chemisch so programmiert, dass sie den Arzneistoff gezielt zu bestimmten Zellen bringen. So wird dessen gewünschte Wirkung verstärkt, während sich Nebenwirkungen eindämmen lassen.

„Solche Konjugate sind bereits ein Milliardenmarkt“, sagt Frederik Wurm. Allerdings sei derzeit noch nicht ganz geklärt, was mit den PEG-Einheiten langfristig geschieht. Im Organismus gelten sie als nicht abbaubar, was auch gut sei, so der Chemiker, da der Einzelbaustein, Ethylenglykol, gesundheitlich nicht unbedenklich sei. „Wenn die PEG-Ketten kurz genug sind, werden sie über die Niere ausgeschieden“, sagt Wurm. Von längeren Ketten müsste



Polymere für den Prüfstand: In einem Reaktionsgefäß, das im Wasserbad erhitzt wird, lassen die Max-Planck-Forscher Monomere, die sie über die türkisfarbenen Spritzen hinzufügen, polymerisieren (oben). Wie dehnbar ihre Kunststoffe sind, testen sie in Zugexperimenten (unten).



Enthüllter Tarnkappeneffekt: Volker Mailänder (links) und Frederik Wurm haben durch die Analyse von Daten der Massenspektrometrie herausgefunden, dass sich an ihre winzigen medizinischen Wirkstofftransporter körpereigene Proteine anlagern. Die Immunabwehr erkennt die Frachter deshalb nicht als Fremdkörper.

aktuelles Ziel der Forscher sind Frachter, die einen Wirkstoff zu Immunzellen liefern. Die Substanz soll diese dann so umprogrammieren, dass sie sich für einen Angriff auf Zellen des schwarzen Hautkrebses eignen.

Doch ehe PEEP auch in der medizinischen Praxis überhaupt zum Einsatz kommt, gilt es für Wurm und Mailänder, noch eine Reihe von Fragen zu beantworten. Zum Beispiel, ob Polymere wie PEEP auch den Tarnkappeneffekt gewährleisten, sodass Polymer-Wirkstoff-Konjugate im Blutstrom unbehelligt ihr Ziel erreichen. Testweise haben die Forscher stellvertretend für spätere Wirkstoffeinheiten Nanotransporter kreiert – kleine Partikel, an die sie dann ihre PEEP-Fransen gekoppelt haben. „Damit konnten wir schon zeigen, dass auch diese lange im Blut zirkulieren, also nicht von Zellen des Immunsystems attackiert werden“, sagt Wurm.

Mithilfe einer besonderen Variante der Massenspektrometrie haben die Mainzer Wissenschaftler mittlerweile auch geklärt, worauf der Tarnkappeneffekt eigentlich beruht. „Die Polymerketten, egal ob PEG oder PEEP, rekrutieren aus dem Blut bestimmte Proteine, die sich an das Konstrukt anlagern“, erklärt Mailänder. Diese Hülle aus körpereigenen Eiweißen verleiht den Konjugaten eine Art Freifahrtschein, mit dem sie ungehindert zirkulieren. >

man allerdings annehmen, dass sie sich im Körper anreichern. Wenn es sich um ein Medikament für chronische Krankheiten handele, könne das ein potenzielles Problem darstellen. Denkbar sei etwa, dass PEG-Ketten an bestimmten Stellen im Körper Kristalle bilden.

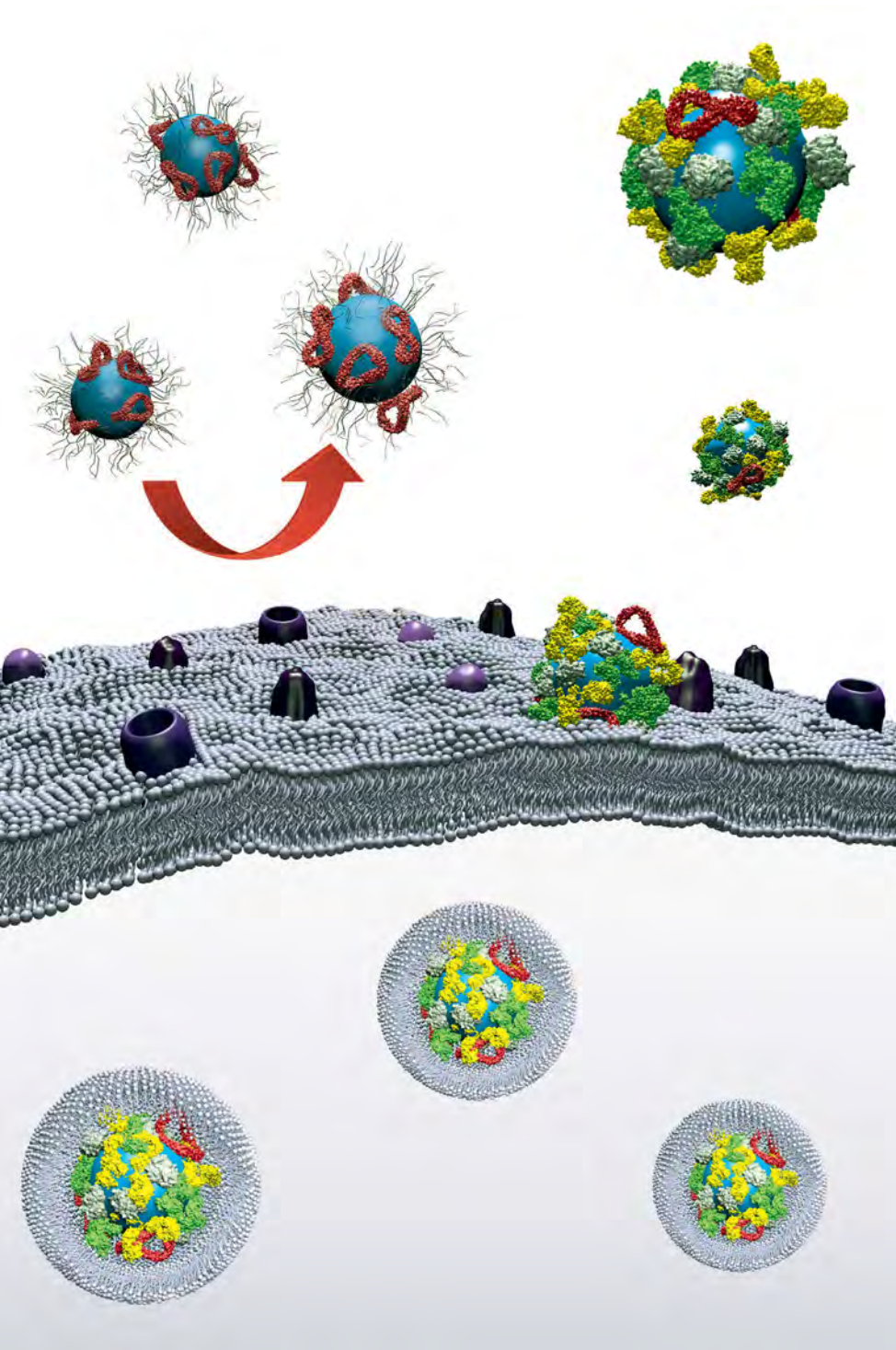
### POLYPHOSPHATE WERDEN IM ORGANISMUS ZERLEGT

Derzeit untersucht Frederik Wurm in einer Kooperation mit der Unimedizin Mainz, ob die phosphorasierten Polymere eine Alternative zum Polyethylenglykol bieten können. Anders als beim PE, in dem die Chemiker das Phosphat nur vereinzelt in die Ketten einfügen, setzen sie hier auf Polymere, die fast ausschließlich aus Phosphateinheiten aufgebaut sind. „Von den Polyphosphaten wissen wir ganz sicher, dass sie im Organismus von Enzymen in Phosphate zerlegt werden können, die dann unproblematisch sind“, erklärt Frederik Wurm, warum sich gerade diese Substanzen gut für medizinische Polymere eignen. Als ein in puncto Wasser- und damit Blutlöslichkeit sowie Abbaubarkeit besonders geeignetes Polyphosphat

hat sich dabei Polyethylethylenphosphat, kurz PEEP, erwiesen. Für dieses Polymer hat Frederik Wurms Gruppe auch schon einen trickreichen Syntheseweg entwickelt.

Anders als im Polyethylen, wo sich die Ethyleneinheiten endlos aneinanderreihen, befindet sich im PEEP jeder Ethylenbaustein zwischen einem Phosphor- und einem Sauerstoffatom. Enzyme haben es dort viel leichter als bei reinem PE, Bindungen zu knacken. Und so spalten sie, nachdem der Wirkstofftransporter seine Fracht am Zielort abgeliefert hat, mit der Zeit eine Ethylenphosphat-Einheit nach der anderen von den PEEP-Ketten ab. „Diese kleinen Phosphatmoleküle werden problemlos über die Niere ausgeschieden“, so Frederik Wurm.

„Die Abbaubarkeit in Organismen und auch in einzelnen Zellen ist besonders wichtig und macht diese Polymere interessant für die weitere Entwicklung“, betont der klinische Kooperationspartner Volker Mailänder von der Universitätsmedizin in Mainz. Der Arzt forscht derzeit an Möglichkeiten, PEG durch gut abbaubare Polymere zu ersetzen. Und er kooperiert dazu mit Frederik Wurm. Ein



Die Mischung macht's: Wenn sich an Partikel, die mit Polymerfransen getarnt sind, verschiedene Proteine des Körpers anlagern, werden die potenziellen Wirkstofftransporter wie im rechten Teil des Bildes von Zellen aufgenommen und, in Membranen eingehüllt, ins Zellinnere befördert. Ziehen die Teilchen dagegen nur einen Typ von Proteinen an, bleibt ihnen die Zelle verschlossen.

len die Mainzer Forscher noch für weitere Einsatzgebiete nutzen. In einem Projekt mit einem Industriepartner entwickeln sie etwa eine Art Knochenkleber, wie er von Chirurgen unter anderem bei kleineren Reparaturmaßnahmen an Knochen eingesetzt wird. In der medizinischen Praxis dienen aktuell vor allem Acrylsäure-Polymere als Klebstoff für solche Zwecke. Schön wäre ein Kleber, der nach einer gewissen Zeit spurlos verschwindet.

### MIT PHOSPHORCHEMIE ZU NEUEN FLAMMSCHUTZMITTELN

Für solch ein Einsatzgebiet muss das Material natürlich eine gewisse Stabilität aufweisen. „Die ersten Materialien, die wir gemacht haben, waren aber brüchig wie kaltes Kerzenwachs“, erinnert sich Wurm schmunzelnd. Die Forscher mussten daher noch mal in die chemische Trickkiste greifen, um ihre Phosphorpolymere zum Knochenkleber weiterzuentwickeln. „Zum einen galt es, das Molekulargewicht hochzubringen“, sagt Wurm. Die Ketten mussten also viel länger werden als die Fransen für das Wirkstoffvehikel, die maximal etwas über hundert Phosphatbausteine enthalten. Zum anderen mussten die Chemiker aber auch in das Design der Seitenketten eingreifen, um den späteren Kleber sowohl elastischer als auch härter zu machen.

Diese Möglichkeiten des Eingreifens sind genau das, was Frederik Wurm an der Phosphorchemie so begeistert. Im Vergleich zum Kohlenstoff, dem klassischen Baustein für Polymere, können Phosphoratome aufgrund ihrer Natur

Mit der langen Verweilzeit im Blut allein ist medizinisch allerdings noch nicht viel gewonnen. Wichtig ist auch das chemische Adressschild, damit die PEEP-Nanotransporter-Konjugate ausgewählte Ziele im Körper erreichen. In der Kooperation mit der Mainzer Uniklinik dienen Zuckergruppen als Zustell-etikett, weil sie sich an ganz bestimmte

Immunzellen heften. Doch noch immer tüfteln die Wissenschaftler an Details. Es sei zum Beispiel gar nicht so leicht, so Wurm, „eine gute Balance zwischen genügend Tarnkappeneffekt einerseits und ausreichender Zielgenauigkeit andererseits zu erreichen“.

Dass Polymere auf Phosphatbasis biologisch so gut abbaubar sind, wol-

eine Bindung mehr eingehen. Das gibt Synthesechemikern wie Wurm mehr Spielraum. Bei den Polyphosphaten etwa lässt sich an die Phosphoratome eine chemische Gruppe mehr anhängen als an die Kohlenstoffatome vergleichbarer Polymere, die auf Kohlenstoff basieren. „Diese Gruppe können wir beliebig so gestalten, wie wir es für eine bestimmte Funktion, also etwa Klebrigkeit, benötigen“, schwärmt Wurm und spricht von einer „riesigen Spielwiese“.

Ihre Fähigkeiten in der Phosphorchemie wollen die Mainzer Max-Planck-Forscher auch einsetzen, um neue Flammenschutzmittel zu entwickeln. Phosphorverbindungen spielen schon heute eine gewisse Rolle als Flammenschutzzusätze, weil sie im Feuer brandhemmende Substanzen freisetzen und selbst lediglich verkohlen. Bisher werden solche Zusätze bestehenden Kunststoffrezepturen in der Regel einfach beigemischt. „Wir arbeiten daran, solche Phosphoreinheiten chemisch direkt in andere Polymere einzubauen und diese so flammgeschützt zu machen“, sagt Wurm.

Der Chemiker räumt allerdings ein, dass diese Lösung dort, wo kostengünstige Kunststoffe gefragt sind, einstweilen wohl nicht zum Zuge kommen könnte, einfach weil sie zu teuer sei. Anders sehe das bei den sogenannten Epoxidharzen und -klebstoffen aus, mit denen etwa Fußböden verklebt werden. Dort könnten die Kunststoffe aus dem Mainzer Labor schon eine Rolle spielen. „Wir untersuchen derzeit, ob wir den Flammenschutz in solchen Produkten verbessern können“, sagt Wurm. Ein Nebeneffekt wäre dabei auch, Bisphenol A zu ersetzen. Diese Substanz ist derzeit noch ein wichtiger Ausgangsstoff für Epoxidharze. Allerdings ist sie umstritten, weil sie gesundheitsschädlich sein kann.

Da auch flammgeschützte Produkte irgendwann ihren Dienst getan haben und auf dem Müll landen, wäre es natürlich schön, wenn sie dann unter

üblichen Umweltbedingungen leicht abbaubar wären. Bisherige Flammschutzmittel sind das eher nicht und darüber hinaus mitunter sogar toxisch. Vor diesem Hintergrund hätten neue Lösungen auf Basis von Phosphaten oder verwandten Phosphorverbindungen einen gewissen Charme.

### VIELE ALTERNATIVEN ZU LANGLEBIGEN KUNSTSTOFFEN

Wie schnell sich ihre Verbindungen wirklich zerlegen lassen, testen die Forscher mit einschlägigen Enzymen, wie sie auch Mikroorganismen in der Umwelt freisetzen. Dazu zählen etwa Lipasen, Proteasen, Depolymerasen, aber auch die auf Phosphorgruppen spezialisierten Phosphatasen und Phospho-

diesterasen. „Wir testen sowohl mit einzelnen Enzymen als auch mit Mischungen“, so Wurm. Und auch ganz realitätsnahe Flüssigkeiten wie Blutplasma oder Schlamm aus Kläranlagen bringt sein Team zum Einsatz.

Frederik Wurm ist sich bewusst, dass die Ansätze seiner Gruppe kaum ausreichen, die gesamte Welt der Kunststoffe zu revolutionieren. Aber sie bieten ein paar Möglichkeiten unter vielen weiteren, die zusammen dafür sorgen könnten, dass Plastik eines Tages kein Umweltproblem mehr darstellt. „Es wird nicht die eine Lösung geben“, sagt Frederik Wurm. Vielmehr erfordere das Problem langlebiger Kunststoffe in der Umwelt viele Alternativen zu den Materialien. Immerhin: Seine Gruppe arbeitet an einigen davon. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Seit 1950 wurden mehr als 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoffe produziert. Davon sind inzwischen 4,9 Milliarden Tonnen auf Deponien oder anderweitig in die Umwelt gelangt. Der größte Teil der Materialien ist biologisch schlecht abbaubar.
- Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Polymerforschung entwickeln biologisch abbaubare Polymere. Dabei bauen sie in Polyethylen (PE) Phosphateinheiten ein. Diese bieten Angriffspunkte für Enzyme, die in der Umwelt vorkommen und die Polymermoleküle spalten.
- Auf Basis von Polyphosphaten stellen die Mainzer Forscher zudem Polymere für medizinische Anwendungen her. Sie arbeiten aber auch an abbaubaren Polymeren mit Flammschutz-, Klebe- und anderen Eigenschaften.

### GLOSSAR

**Massenspektrometrie:** Eine Methode, um unbekannte Substanzen zu identifizieren. Große Moleküle wie etwa Polymere werden dabei in oft charakteristische Bruchstücke gespalten, die elektrisch geladen und durch die Ablenkung in einem elektrischen Feld entsprechend ihrem Verhältnis von Masse zu Ladung sortiert und zu einem Spektrum aufgefächert werden.

**Polymer:** Ein Kettenmolekül, dessen Bausteine (Monomere) manchmal tausendfach aneinandergereiht werden. Bei Polyethylen (PE) werden Ethylenmoleküle miteinander verkettet, bei Polyethylethylenphosphat (PEEP) reihen sich Ethylethylenphosphat-Einheiten aneinander.

**Polymer-Wirkstoff-Konjugat** heißt ein Konstrukt, in dem ein medizinischer Wirkstoff – meist in einen Nanopartikel eingebettet – zur Tarnung vor dem Immunsystem in Polyethylenglykol (PEG) oder Polyethylethylenphosphat eingehüllt wird. Die Konjugate erhöhen die Verweildauer des Wirkstoffs im Organismus und sind zudem mit chemischen Zustelletiketten versehen, sodass sie gezielt gewünschte Zellen ansteuern.