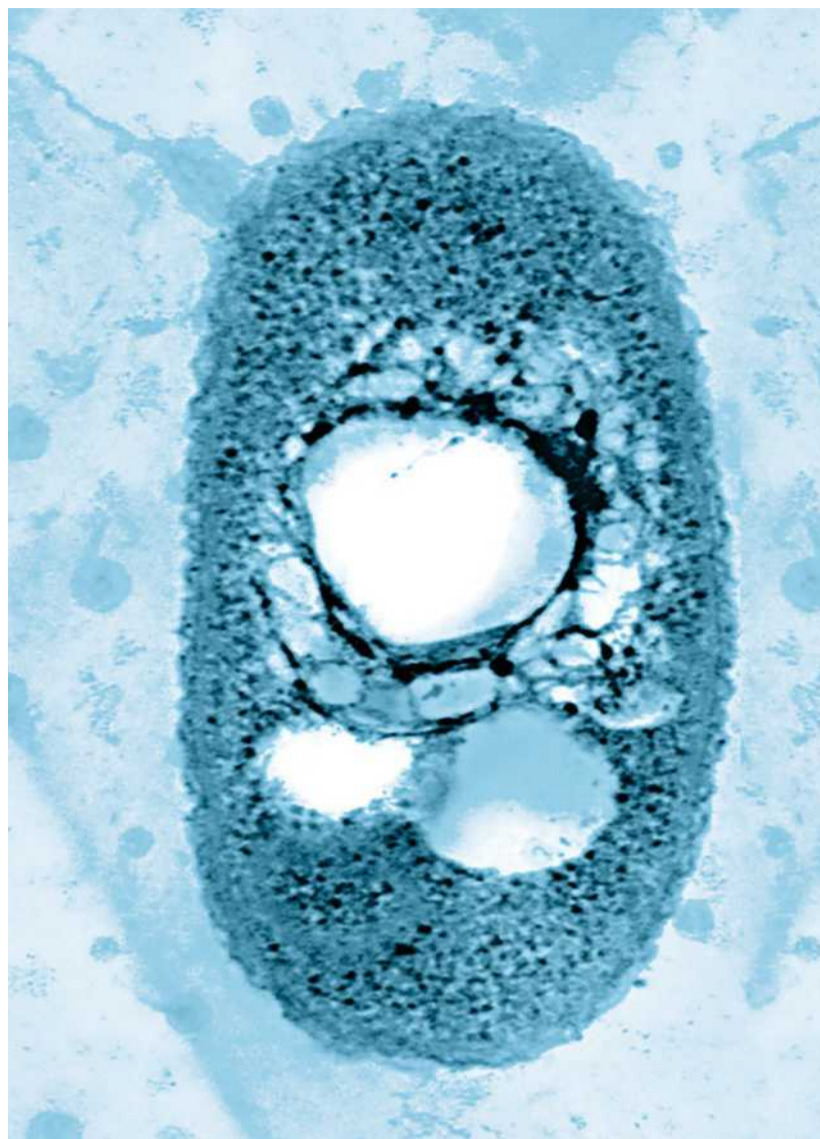


## Ökologie



Das Bakterium *Cupriavidus necator* im Verdauungszustand. Dabei erzeugt sein Stoffwechsel das Bioplastik PHA (weiße Einschlüsse)

Abb.: [M] Rastertransmissionselektronenmikroskop-Aufnahme: E. Ingolic/Felmi-ZFE/Institut für Biotechnologie u. Bioprozesstechnik/TU Graz. Dank an Dr. Martin Koller, Universität Graz

# ICH MAG MÜLL

Werden eines Tages Bakterien den Abfall der Zivilisation auffressen?  
Sie haben damit schon begonnen VON JAN GROSSARTH

**D**as Beweisfoto vom Elektronenmikroskop zeigt *Cupriavidus necator*, einen auberginenförmigen Einzeller, vollgestopft mit weißen, styroporartigen Bällchen. Fett wie eine Pute aus der Mast. Nachdem er mit Fischabfällen gefüttert worden war, zauberte der Stoffwechsel von *C. necator* daraus Bioplastik. Das Bakterium beherrscht ein Kunststück: Aus Abfall kann es einen Wertstoff machen.

Ist das nur eine Kuriosität aus dem Reich der Natur – oder die Lösung eines globalen Problems? *Cupriavidus necator* mag nicht nur Fisch, sondern fast jede Form von Kohlenstoff. Man kann ihn also mit allerhand Abfall füttern. Könnten solche Bakterien helfen, unseren Müll zu reduzieren?

Seit Jahren schwirrt diese Hoffnung durch die Labore: Bioplastik aus Bakterien statt Plastik aus Erdöl. Doch die Praxis erwies sich als mühsam. Es gab Rückschläge, Insolvenzen, Enttäuschungen. Nun aber nimmt die Geschichte Fahrt auf: Neue Gentechniken helfen, den Appetit der Einzeller enorm zu beschleunigen. Und während die Pioniere vor zehn Jahren Mais oder Zucker an *C. necator* verfütterten,

In sechsundsechzig deutschen Müllverbrennungsanlagen entsteht derzeit Strom, der als umweltfreundlich gilt, weil das Kraftwerk weder Uran noch Kohle oder Erdgas benötigt. In all diesen Anlagen geht es etwa so zu wie im Müllheizkraftwerk in der Frankfurter Nordweststadt: Lastwagen fahren vor und entladen tonnenweise Abfälle. Stinkender Haushaltsmüll ist dabei, Zitronenschalen und Windeln, Holziges – alles wird den Flammen zum Fraß vorgeworfen. Die »thermische Verwertung«, heißt es auf den Seiten des Frankfurter Energieversorgers FES, sei »gelebter Klimaschutz«. Denn aus Müll werde Elektrizität; allein dieses Heizkraftwerk liefert Strom für 60.000 Haushalte.

In der Summe fressen Deutschlands Müllheizkraftwerke rund 20 Millionen Tonnen Müll im Jahr. Das entspricht ziemlich genau der jährlichen Plastikproduktion der deutschen Kunststoffindustrie. Aber ist Müllverbrennung in diesem Maß wirklich eine gute Idee? Die Klimabilanz hängt von der verfeuerten Abfallart ab: Wird Holz verbrannt, ist der Effekt auf die Erderwärmung gewissermaßen neutral. Wird dagegen Plastik verheizt, das aus Erdöl hergestellt wurde, ist das nicht viel klimafreundlicher, als würde man das Erdöl direkt verfeuern.

Auf den Unsinn der Müllverbrennung weist zum Beispiel eine Studie des Öko-Instituts hin. Sie erinnert daran, dass es eigentlich gesetzeswidrig ist, Millionen Tonnen Abfall zu verheizen. Denn das Kreislaufwirtschaftsgesetz schreibt eine »Nutzungshierarchie« für den Abfall vor: Die Verbrennung steht erst an vierter und vorletzter Stelle – nach Vermeidung, Wiederverwertung und Recycling. Das Öko-Institut sagt: »Bis zu einer echten Kreislaufwirtschaft ist es noch ein weiter Weg.«

Vielleicht lässt er sich aber abkürzen. Vielleicht führt der Weg nur bis zum Bakterium *Cupriavidus necator* und seinen Verwandten. Denn was für die Menschheit widerwärtiger Abfall ist, sieht der Einzeller ganz anders. Für *C. necator* ist selbst stinkender Fisch mit Babywindel eine Köstlichkeit.

Lange überstieg es die Fantasie der Menschen, wie gemischte Haushaltsabfälle »wiederverwertbar« seien. Darin mischen sich Plastik und Papier mit Wirsing, Käserinde oder Pommesfett. Im Klärschlamm stecken Fäkalien und Arzneien. Solche Widerwertigkeiten taugen nicht einmal als Futter für Insekten. Aber *C. necator* mag sie.

Doch wie groß ist sein Appetit? Einer, der Genaueres weiß, ist der Biowissenschaftler Sebastian Lothar Riedel. Er sitzt in Berlin-Mitte in einem Klinkerbau aus der industriellen Gründerzeit und leitet dort für die TU Berlin zwei Forschungsprojekte: Darin geht es um die neuen, mikrobiellen Wege der Müllverwertung. Riedel führt nicht nur das Foto aus dem Elektronenmikroskop vor, sondern spricht auch von Spaltenköpfen und

Hühnergedärmen, erläutert chemische Strukturformeln – und präsentiert Bilder von hochinteressanten Fettklumpen, die sich in der Kanalisation von London gebildet haben. All das schöne Fett, sagt Riedel, Tonnenweise Nahrung für den kleinen Vielfraß.

Schon seit mehr als zehn Jahren arbeitet Doktor Riedel mit *C. necator*. »Man kann Plastik daraus machen, und man sollte«, sagt er, Polyhydroxybutyrat oder Polyhydroxyalkanoate, kurz PHB oder PHA. Für sich genommen seien die spröden, kompostierbaren Stoffe geeignet für die Produktion von Tüten, Besteck und anderen Gegenständen; gemischt mit anderem Plastik könnte man daraus nahezu jedes Industrieprodukt herstellen.

Wie geht das Verfahren? Der Vielfraß braucht Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff als Futter. Der Trick ist, einen Nährstoff zu verknappen. Ist Stickstoff oder Phosphor aufgebraucht, gerät *Cupriavidus necator* (lateinisch: Töter) in Todesangst. Und verstoffwechselt dabei Massen an Kohlenstoff zu Biopolymeren. Bis zu 90 Prozent des Bakteriums bestehen am Ende aus Plastik. Panikfressen.

#### Molkereiabfall, Altöl, Zitronenschalen – aus (fast) allem stellen Bakterien Bioplastik her

Die Bioplastikproduktion mit *C. necator* dauert 50 bis 70 Stunden im Bioreaktor. »Ich würde *C. necator* als Superbakterium bezeichnen, denn es kann extrem viel«, sagt Riedel stolz. Und auch der Bioforscher kann viel damit machen: So hätten er und seine Mitarbeiter zum Beispiel Gene ausgeknockt, um den Stoffwechsel zu beeinflussen. Mittels sogenannter Genomscheren wie Crispr-Cas9 lassen sich Stoffwechselwege gezielt verändern, um PHAs mit maßgeschneiderter Zusammensetzung und somit einstellbaren Eigenschaften herzustellen. Das ist der entscheidende Schritt, um die Produktion wirtschaftlich effizient zu machen. Auch Wissenschaftler der Uni Tübingen berichten in einer aktuellen Studie vom Fortschritt: Nachdem sie das Genom von *Synechocystis*-Bakterien verändert hatten, setzten diese bis zu 80 Prozent PHB-Plastik an, statt zuvor maximal 35 Prozent.

Doch Gentechnik ist nicht alles. Auch die Art des Futters entscheidet über die Qualität und Menge an Bioplastik. Geeignet ist jedes Futter, das Kohlenstoff enthält. Eine neue Studie von Wissenschaftlerinnen der chinesischen Universität Zhejiang in der Zeitschrift *Biotechnology for Biofuels* gibt einen globalen Überblick. Da ist zu sehen, wie kreativ die aktuelle Forschung nach dem Super-Müllfresser sucht: Bioplastik ist schon erfolgreich aus Molkereiabfällen gemacht worden, aus Altöl, aus Lebensmittelabfällen, Zitronenschalen, Brauereiabfällen oder Abfällen von Papier- und Zellulosefabriken. Auch reines CO<sub>2</sub> lässt sich

als Kohlenstoffquelle verfüttern. Als Fraßorganismen kommen verschiedene Bakterien zum Einsatz, auch genveränderte Mikroalgen. Auch Lipide für die Industrie lassen sich so erzeugen.

Am Ende, so die Idee, soll *C. necator* durch spezifische Genveränderungen und Futteroptimierung Kohlenstoffquellen effizient in Plastik umwandeln und dabei genau jene Stoffe liefern, die industrielle Kunden nachfragen.

Die Grundlagenforschung ist fortgeschritten, nun geht es um die industrielle Praxis. Die TU Berlin kooperiert mit Animox, einem Berliner Biotechnologieunternehmen, das aus Schlachtabfällen mithilfe von *C. necator* ein Plastikgranulat fertigt. Das geht dann an das Spritzguss-Unternehmen Cuba in Neuruppin. Dort entstehen maßgefertigte Plastikteile für Industriekunden.

Zwar ist Bioplastik teurer als herkömmlicher Kunststoff. Aber es gibt spezielle Nachfrager: Unternehmen etwa, die ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verkleinern wollen; oder die Produkte herstellen, in denen Plastik verboten ist (Tüten, Einweggeschirr). Allerdings schwingt stets die Gefahr des Greenwashings mit. Mitunter werden schon kleinste Beimischungen von Bioplastik großspurig als »grün« vermarktet. Doch das Interesse ist da, auch in der Textilindustrie; das zeigt das Forschungsprojekt PHAtex der TU Berlin mit dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen.

Als »Badewanne« für Bakterium und Nährsubstrat fungieren Fermenter, die zum Beispiel das Unternehmen Fritzmeier Umwelttechnik südlich von München herstellt. Dort bremsen Forschungsleiter Michael Finke die Hoffnung auf schnelle Weltrettung: Derzeit würden die meisten Abnehmer die Bakterien nicht mit Restmüll oder Klärschlamm füttern, sondern mit Mais, Raps oder Zucker. »Je sauberer und unkomplizierter ein Substrat ist, desto besser«, sagt Finke.

Ähnliches gilt auch für die bislang laufenden Bioplastik-Fabriken. Eine wurde vor zwei Jahren in Japan eröffnet, die zweite ging in den Vereinigten Staaten in Kentucky an den Start. In beiden werden die Bakterienstämme mit Abfallströmen aus Palmöl- und Rapsölfabriken gefüttert. Unsortierter Müll ist noch (zu) kompliziert.

Doch der nächste Schritt der Kreislaufwirtschaft zeichnet sich schon ab. Die Gründungswelle kommt vom Westen: Aus Restmüll und Klärschlamm soll Bioplastik werden. Full Cycle nennt sich ein amerikanisches Start-up, das kommunale Lebensmittel- und andere organische Abfälle in naher Zukunft in industriellem Maßstab in PHA verwandeln will. Das Bioplastik könnte also immer wieder in den organischen Kreislauf einfließen. Full Cycle ist Inhaber eines Patents auf einen industriellen Prozess für die mikrobielle Müllverwertung. Ein weiterer Pionier sitzt in den Niederlanden, dem Paradies der zirkulären Bio-

ökonomie. Das Start-up Paques Biomaterials will Kunden dabei helfen, industrielle Abwasserströme für die Erzeugung von Bioplastik zu nutzen. Es verspricht auf seiner Website »eine zehnfach höhere Wirtschaftlichkeit«, als sie derzeit in der Abwasser-Verwertung möglich sei.

In Deutschland ist die Emscher Genossenschaft – einer der größten Kläranlagenbetreiber – einen Schritt weiter als die meisten Abwasserbetriebe. Sie hat schon 2015 gemeinsam mit der Brain Biotech AG aus dem südhessischen Zwingenberg begonnen, die mikrobielle Nutzung von kohlenstoffreichen Abfallströmen zu testen. Dabei entstanden Lipide – Fette für die chemische Industrie. Der Schmierstoffhersteller Fuchs Petrolub machte daraus probeweise Additive. Jetzt soll das Verfahren in den industriellen Maßstab wachsen. Es werde derzeit in »einen Verwertungsmaßstab überführt«, erklärt Guido Meurer, bei Brain Biotech Abteilungsleiter für die Entwicklung von Bakterienstämmen: »Die Additive zeigen in der technischen Anwendung erstaunliche Eigenschaften.« Sie sind biologisch abbaubar.

#### Selbst alte Socken könnten ein interessanter Rohstoff sein

Bereits jetzt stellt die hessische Firma aus fermentierten Orangenschalen einen Wirkstoff her, der antimikrobiell wirkt und künftig herkömmliche Konservierungsstoffe ersetzen könnte. Eine erste Zulassung als Lebensmittelinhaltsstoff ist beantragt, zunächst für Amerika. Selbst alte Socken könnten ein interessanter Rohstoff werden, sagt Martin Langer, Leiter der Geschäftsentwicklung des Unternehmens. »In Socken steckt heute oftmals Nanosilber, das könnte man mithilfe von optimierten Mikroorganismen oder Enzymen dort wieder herausholen.«

Noch sind das alles erst Anfänge. Entscheidend für alle Produkte ist am Ende die industrielle Nachfrage. Anders gesagt: Ob unser Müll weiter verheizt oder umgewandelt wird, ist eine Frage des Preises. Je günstiger der Preis, desto größer wird die Nachfrage nach Bioplastik sein. Und nur dann werden Unternehmen in große, industrielle Fermenter investieren – sozusagen in die Massenhaltung von *C. necator* und seinen Fressfreunden.

Derzeit kostet ein herkömmliches Kilogramm Plastik aus Erdöl weniger als ein Euro, ein Kilogramm biologisch hergestelltes PHA zwischen fünf und zwanzig Euro. Jährlich produziert die Chemieindustrie weltweit mehr als 360 Millionen Tonnen Kunststoff, die Weltproduktion von PHA und PHB betrug im vergangenen Jahr 36.000 Tonnen. Noch ist der Beitrag der Bakterien also lächerlich gering.

Doch bei *Cupriavidus necator* hat das große Fressen ja gerade erst begonnen.

wird heute mit Abfall als Rohstoff experimentiert. So könnte diese Forschung einen Weg bahnen zur Kreislaufwirtschaft, die auch die EU mit ihrer Industriestrategie »Green Deal« verwirklichen will.

Es bietet sich an, diese Geschichte an der Futterquelle der Bakterien zu beginnen, beim Müll.

#### Mehr Wissen:

Der Begriff »Bioplastik« kann zweierlei bedeuten: Dass der Stoff biologisch abbaubar ist oder aus nachwachsenden Rohstoffen besteht. Es wäre allerdings ethisch fragwürdig, Mais, Weizen oder Kartoffeln in großem Umfang zu Plastik zu verarbeiten. Das spricht für Abfälle als Rohstoff.

Links und Studien zum Thema Bioplastik finden Sie unter [www.zeit.de/wq/2021-51](http://www.zeit.de/wq/2021-51)