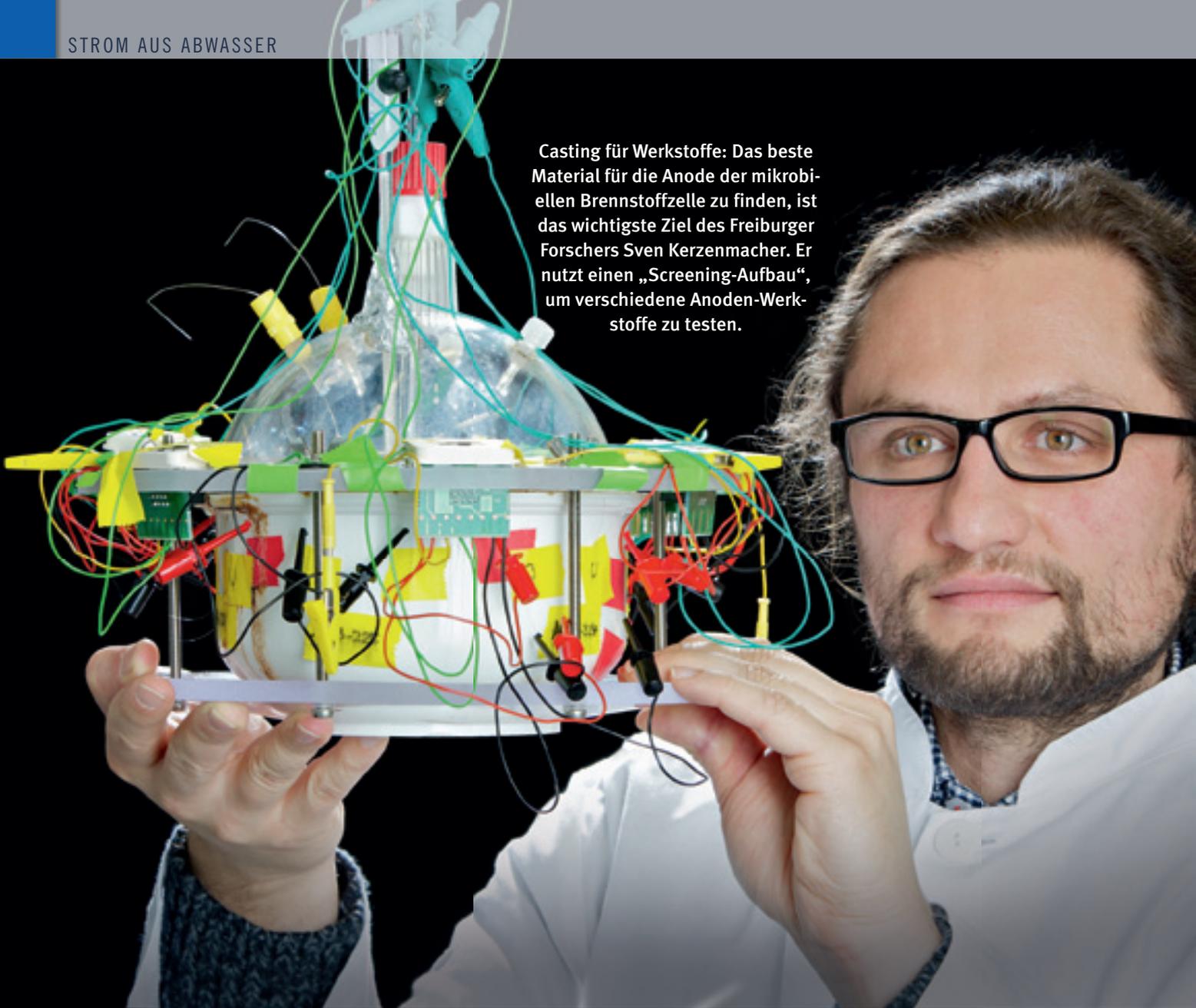


Casting für Werkstoffe: Das beste Material für die Anode der mikrobiellen Brennstoffzelle zu finden, ist das wichtigste Ziel des Freiburger Forschers Sven Kerzenmacher. Er nutzt einen „Screening-Aufbau“, um verschiedene Anoden-Werkstoffe zu testen.



von Klaus Jacob

# Der Schatz im Schmoddersee

Im Abwasser steckt reichlich Energie. Forscher aus Baden-Württemberg wollen sie nutzen, um elektrischen Strom zu erzeugen.

**TÄGLICH FLIEßEN** rund 10 Millionen Kubikmeter Abwasser durch die deutschen Kanalnetze zu den Kläranlagen – das entspricht etwa der Durchflussmenge des Neckars an der Mündung in den Rhein. Das Schmutzwasser muss mit erheblichem Aufwand gereinigt werden. Ausgerechnet dieser Unrat, der nichts als Ärger macht, soll nun dabei helfen, das Weltklima zu stabilisieren. Denn er enthält eine wertvolle Fracht: Energie. Warum diesen Schatz nicht heben, fragen sich immer mehr Wissenschaftler. Was klingt, als wolle jemand Stroh zu Gold spinnen, könnte schon bald Wirklichkeit werden. Auch in Freiburg und Karlsruhe arbeiten Experten an einem interdisziplinären Projekt, das bereits

beim Ideenwettbewerb Bioenergie des Bundesforschungsministeriums gewonnen hat. Die Baden-Württemberg Stiftung finanziert die Forschungen.

Die Energie steckt in der organischen Fracht, die im Abwasser treibt. Alles, was gärt und stinkt, kann letztlich genutzt werden. Die größeren Partikel setzen sich bereits im Sedimentationsbecken der Kläranlage ab, wo das Wasser erstmals zur Ruhe kommt. Am Grund reichern sie sich zu einem dunklen Schlamm an, der in den Faulturn wandert und schon heute den gasförmigen Brennstoff Methan liefert. Die feinen Partikel und gelösten Schmutzstoffe schwimmen aber weiter im Wasser. Da sie nicht in die Flüsse gelangen dürfen, werden sie derzeit im biologischen Trakt der Kläranlage abgebaut: Im „Belüftungsbecken“ drücken Pumpen mit erheblichem Aufwand an Energie durch unzählige Düsen Sauerstoff, der den Unrat unschädlich macht.

Doch auch aus diesem Treibgut lässt sich Energie herauspressen. Die Ausbeute kann zwar kein Großkraftwerk ersetzen, liefert aber genug Strom, um die Kläranlage zu betreiben. Außerdem spart man die teure Belüftung. Vorbild für einen solchen Bio-Generator ist die Brennstoffzelle. Sie liefert mithilfe von Wasserstoff elektrischen Strom – zum Beispiel in Öko-Autos, die es seit einigen Jahren als Prototypen gibt. Die Rolle des Wasserstoffs als Energiequelle übernehmen in der Kläranlage die organischen Moleküle. Der Clou dabei: Bakterien führen Regie. Es handelt sich um Mikroben, die eigentlich im Erdreich und in Sedimenten leben, wo sie in einem sauerstoffarmen Milieu Eisen und andere Metalle reduzieren und dabei Elektronen abgeben. Es sind weitverbreitete Organismen, die sich ideal zur Stromgewinnung einspannen lassen. Experten sprechen von exoelektrogenen Bakterien. Sie brauchen nicht unbedingt Eisen, sondern geben sich auch mit den Verunreinigungen im Abwasser zufrieden. Angedockt an eine

Elektrode, die in das Abwasser ragt, speisen sie ohne weiteres Zuthun Elektronen ein. Die Ionen – elekt-

risch geladene Atome –, die dabei im Abwasser verbleiben, wandern zur Gegenelektrode, wo sie mit Sauerstoff zu Wasser reagieren. Verbindet man Anode und Kathode miteinander, kann man den Strom abgreifen.

Das Prinzip ist lange bekannt. Im Labor konnten die Forscher bereits zeigen, dass so eine Anlage tatsächlich Strom liefert. Allerdings bereiten etliche Details noch Probleme, zum Beispiel die Langzeitstabilität und der Abstand der Elektroden voneinander. Vor allem aber dürfen die Kosten nicht aus dem Ruder laufen. Im Abwasser kommt ein Luxusgerät wie etwa in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug nicht infrage. Es wäre mit seinen Platin-Elektroden nicht zu bezahlen. Denn eine Abwasser-Brennstoffzelle ist kein handliches Paket, das unter eine Motorhaube passt. Es hat die Ausmaße eines Schwimmbads: „200 bis 400 Kubikmeter sollten es schon sein“, sagt Sven Kerzenmacher. Der Experte für Brennstoffzellen vom Institut für Mikrosystemtechnik an der Universität Freiburg forscht seit vier Jahren am Abwasser-Generator.

#### EXPERIMENTE IM ABWASSER-MIX

In seinem Labor ist von diesem Gigantismus allerdings nichts zu sehen. Im Gegenteil: Der ganze Versuchsaufbau erinnert an ein Elektrolyse-Experiment im Schulunterricht. Die benutzten Gefäße enthalten gerade mal 100 Milliliter Abwasser. Genau genommen handelt es sich nicht einmal um echtes Abwasser, denn das würde jeden Wissenschaftler rasch zur Verzweiflung bringen. Der Grund: Die stinkende Brühe, die in der Kläranlage landet, ändert ständig ihre Zusammensetzung. Morgens, wenn viele Menschen duschen, hat sie eine andere Zusammensetzung als mittags zur Essenszeit, im Industriegebiet sammelt sich anderer Dreck als im Wohnviertel. Bei Regen ist das Abwasser verdünnt und im Winter kalt. Reproduzierbare Versuche sind da-

mit nicht möglich. Die Wissenschaftler mixen sich deshalb ein synthetisches Abwasser, das alle wesentlichen Bestandteile in genormter Konzentration enthält, etwa Hefeextrakte, Salze und Eiweiß-Bestandteile. Anders als sein Vorbild ist es steril, sodass es sich selbst nach Wochen nicht verändert.

Mithilfe dieser standardisierten Flüssigkeit hat Sven Kerzenmacher mit seinem Team zunächst nach einer geeigneten – also vor allem preiswerten – Elektrode gesucht. „Das Material darf nicht mehr als 10 Euro pro Quadratmeter kosten.“ Nun zeichnet sich ein Ergebnis ab. „Kohlefaser-Gewebe steht ganz oben auf der Liste“, sagt Ker-

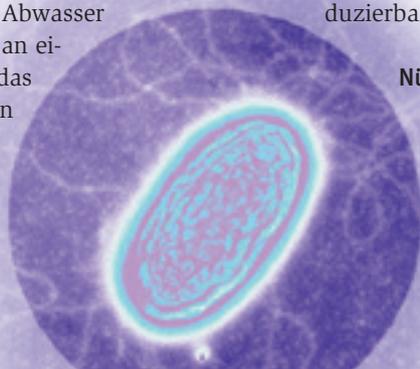
#### Die eingefärbte Elektronenmikroskop-Aufnahme zeigt eine Gruppe von Bakterien.

zenmacher Das Material fühlt sich an wie Baumwollstoff, ist auch genauso weich und dehnbar. Mit seiner porösen Struktur hat es eine sehr große Oberfläche – genau das Richtige für eine Brennstoffzelle. Außerdem siedeln sich die exoelektrogenen Bakterien, die den Strom liefern sollen, gerne dort an.

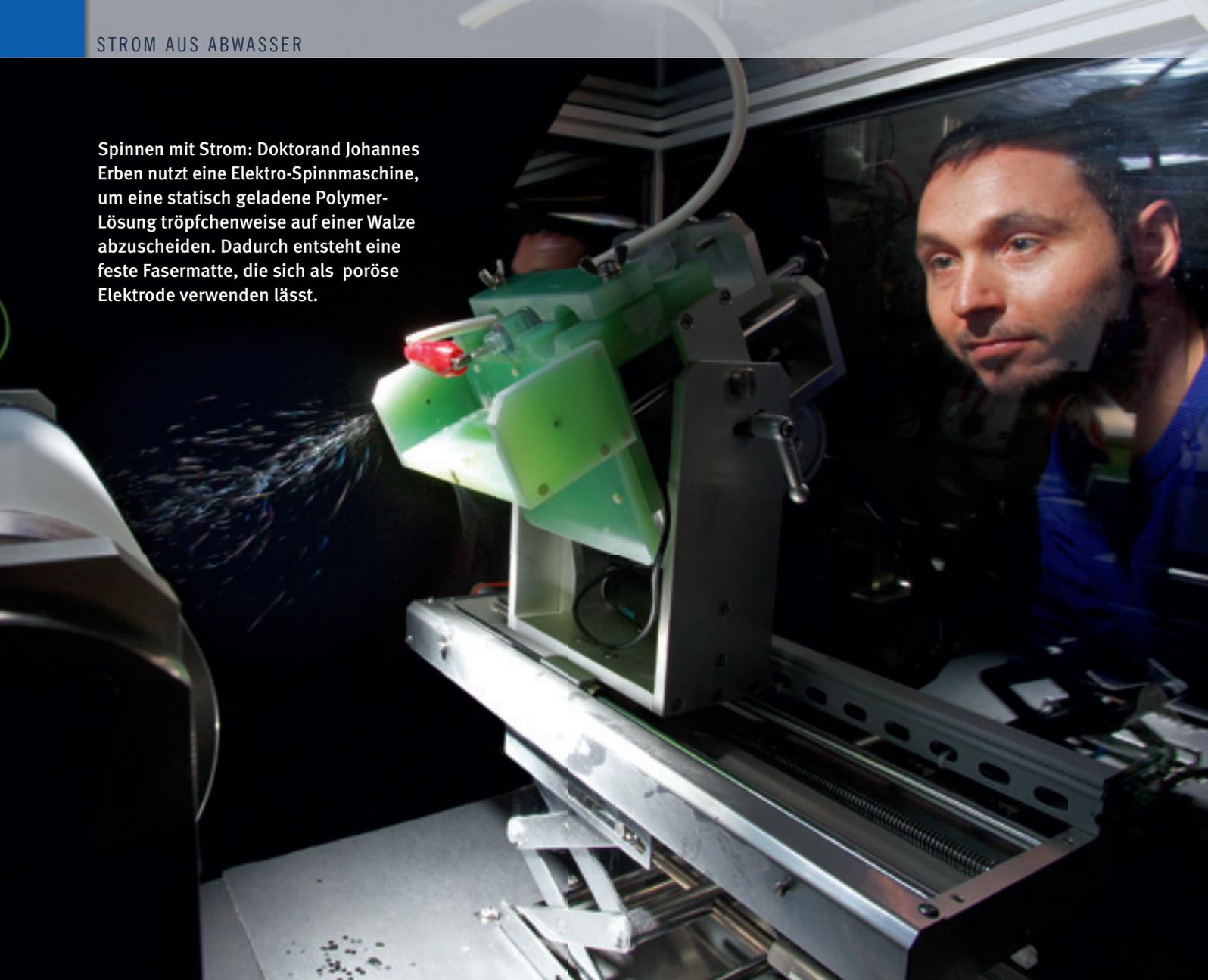
Vor allem aber stimmt der Preis. Denn die Herstellung ist denkbar einfach: Aus Kunststoff-Fasern wird zunächst ein Stoff gewebt, ähnlich dem Kleiderstoff. Der wandert in den Ofen, wo die Temperatur ohne Sauerstoff auf mehr als 1000 Grad Celsius hochgefahren wird. Dabei wandelt sich der Kunststoff komplett in Graphit um – fertig ist das Elektrodenmaterial.

Doch damit ist es nicht getan. Für einen optimalen Betrieb braucht die Kathode der Brennstoffzelle auch einen Katalysator. Der wirkt wie ein Turbo im Auto und steigert die Leistung erheblich. Als geeignet hat sich das Enzym Laccase erwiesen. Allerdings, das haben Langzeitversuche gezeigt, muss man die Substanz alle ein bis zwei Wochen ersetzen, sonst geht die Wirkung verloren. Die Forscher mussten deshalb einen Weg finden, wie man Laccase möglichst preiswert produzieren kann – und das in der schlichten Umgebung einer Kläranlage.

**Nützliche Gefräßigkeit: Solche Bakterien verwandeln organische Verbindungen in Kohlendioxid.**



Spinnen mit Strom: Doktorand Johannes Erben nutzt eine Elektro-Spinnmaschine, um eine statisch geladene Polymer-Lösung tröpfchenweise auf einer Walze abzuschneiden. Dadurch entsteht eine feste Fasermatte, die sich als poröse Elektrode verwenden lässt.



In der Natur geben Baumpilze das Enzym ab. Mithilfe von Gentechnik wäre es ohne Weiteres möglich, Hefezellen in kleine Laccase-Fabriken zu verwandeln. Doch dann wäre in jeder Kläranlage eine teure Deaktivierungsstufe nötig, damit die veränderten Organismen nicht in die Umwelt gelangten. Die Freiburger Forscher haben einen anderen Weg gefunden: Sie lassen den Pilz in einer Nährlösung wachsen. Diese Flüssigkeit enthält rasch so viel Laccase, dass sie ohne weitere Aufbereitung als Katalysator dienen kann. Das ist ein simples und wirtschaftlich lohnendes Verfahren – und für die Arbeitsgruppe der bislang größte Erfolg.

Natürlich ist auch die Wahl der exoelektrogenen Bakterien wichtig. Für

diesen Teil des Projekts ist der Biologe Johannes Gescher zuständig, der als Professor am Institut für angewandte Biowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) forscht. Er hat die Wahl zwischen zahllosen Arten von Mikroben. Sie alle haben unterschiedliche Vorlieben bei der Nahrung, manche stehen auf Acetat, andere bevorzugen Ethanol oder Lactat.

Inzwischen zeichnet sich ab, wie eine mikrobielle Brennstoffzelle für ein mittelgroßes Klärwerk aussehen könnte: Die Elektroden bestehen aus rund 500 Quadratmeter Kohlefaser-Gewebe, wobei die Anode mit dem ausgewählten Biofilm geimpft ist. Einmal ins Klärbecken gesenkt, sollte alles – abgesehen vom Zusatz des Katalysators – von alleine

ablaufen: Die exoelektrogenen Bakterien fischen aus purem Eigennutz die organische Fracht aus dem Abwasser heraus. Andere Bakterien, die ohnehin im Abwasser treiben, arbeiten ihnen zu, indem sie komplizierte Moleküle in verdauliche Stücke zerkleinern. Die Brennstoffzelle muss mit der gesamten biologischen Fracht des Abwassers fertig werden, denn sie soll schließlich das Belüftungsbecken ersetzen.

#### **DIE MIKROBEN BRAUCHEN ZEIT**

Die Vorgaben sind klar: Der Sauerstoffbedarf, Maß für die Biofracht, darf beim Verlassen des Klärwerks nicht mehr als 20 Milligramm pro Liter betragen, um Gesundheitsgefahren auszuschließen. Im kommunalen Abwasser liegt der Wert

um die 300 Milligramm. „Die exoelektrogenen Bakterien schaffen das“, ist Gescher überzeugt. Allerdings brauchen sie dafür Zeit: nach ersten Schätzungen rund 24 Stunden. Derzeit bleibt das Abwasser nur 6 Stunden im biologischen Trakt der Kläranlage.

Sven Kerzenmacher geht davon aus, dass eine erste Pilotanlage innerhalb der nächsten fünf Jahre ihren Dienst aufnehmen wird. Er will noch in diesem Jahr bei seinen Labor-Experimenten von synthetischem auf echtes Abwasser umsteigen und anschließend die Versuchsaufbauten schrittweise vergrößern. Eine mikrobielle Brennstoffzelle für ein mittelgroßes Klärwerk, also mit einem Einzugsgebiet von etwa 100 000 Einwohnern, werde etwa 200 Kilowatt Strom liefern: 2 Watt pro Einwohner.

Bleibt die Frage, wie man einen solchen Koloss ohne großen Aufwand in ein bestehendes Klärwerk integrieren kann. Am einfachsten wäre es, das Aggregat fix und fertig als Kassette in das Belebungsbecken zu hieven. Das würde kaum Umbauten nötig machen. Denkbar wäre aber auch ein Röhrenreaktor, der im Bypass-Betrieb liefe.

Künftig könnte nicht nur Abwasser Strom liefern. In manchen Fabriken fallen große Mengen Abfall an, die noch viel mehr Energie enthalten. So verspricht die Melasse aus der Zuckerproduktion reiche Ernte. Die Brennstoffzellen-Experten haben aber auch Ideen für bescheidenere Anwendungen. US-Amerikaner wollen den Saft lebender Bäume nutzen, um damit in entlegenen Gebieten automatische Waldbrand-Melder mit Strom zu versorgen. In dem Freiburger Institut wird seit einigen Jahren an einem anderen Projekt geforscht: an einer Miniatur-Brennstoffzelle, die im

Fotos: T. Klinik für baw



**Gierige Mikroben:** Der Karlsruher Biologe Johannes Gescher züchtet in einer Schutzgas-Atmosphäre Bakterien, die sich von Schmutz im Abwasser ernähren.

menschlichen Körper arbeitet und ihre Energie aus der Körperflüssigkeit zieht. Sie könnte die Batterie eines Herzschrittmachers ersetzen, die derzeit noch alle 8 Jahre bei einer Operation ausgetauscht werden muss. Kerzenmacher: „Bis wir so weit sind, wird es aber noch 10 bis 15 Jahre dauern.“

**Bunte Technik:** In einer Mikro-Brennstoffzelle (hier ein Labormuster) lässt sich mithilfe von Bakterien aus organischen Schmutzstoffen in Kläranlagen elektrische Energie gewinnen.

