

SERIE

Materialien der  
Zukunft



# Wandelbares Glas

Faltbare Handy-Displays, feine Isolierungen auf Mikrochips und Fenster, die sich per Knopfdruck abdunkeln lassen – all das lässt sich aus Glas herstellen. Raffinierte neue Fertigungsmethoden machen es möglich.

von FRANK FRICK

**E**in Mann will sein Auto starten. In diesem Moment fliegt ein Golfball auf die Windschutzscheibe zu. Was gleich passieren wird, scheint klar. Doch es kommt anders: An der Einschlagstelle biegt sich die Scheibe nach innen, als

wäre sie aus transparentem Gummi. Unmittelbar vor dem Gesicht des erschrockenen Mannes beginnt die Scheibe, sich zurückzuverformen. Der Ball landet vor dem Auto auf dem Rasen. So elastisch und bruchsicher wie in dieser Videoszene

des Unternehmens Schott, das damit um Ideen für sein „Opportunity-Lab“ (opportunity: Gelegenheit, Chance) wirbt, verhält sich Glas in der Realität noch nicht.

Doch die Wirklichkeit ist schon verblüffend genug. So produziert das Unter-



nehmen mit seinem Hauptsitz in Mainz Glas für Smartphone-Displays, die gefaltet werden können. Es ist seit Kurzem im Handel. Das Glas lässt sich so stark biegen, dass zwischen den beiden Rändern der gebogenen Scheibe nur zwei Millimeter liegen – ohne dass das Glas bricht oder knickt.

#### Haardünn und bruchfest

Wesentlich für die faltbarkeit des Glases ist seine äußerst geringe Dicke. Mit unter 100 Mikrometern ist es etwa so dünn wie ein menschliches Haar. Schott zieht es mittels einer selbst entwickelten Technologie direkt aus der Schmelze. Trotz der extremen Dünne kann das flexible Material einem Prozess unterworfen werden, mit dem die Industrie kratzfeste und recht bruchbeständige Gläser herstellt: Beim sogenannten Vorspannen werden an der Glasoberfläche kleine ge-

ladene Teilchen (Ionen) nachträglich gegen etwas größere ausgetauscht.

Eine Analogie veranschaulicht den Effekt: Werden in einem Beutel voller Handbälle einige davon durch Medizinbälle ersetzt, so steigt die Spannung im Beutel und er hält seine Form besser. So ähnlich erzeugen die großen Ionen in der Glasoberfläche eine Druckspannung, die der äußeren Belastung entgegenwirkt und das Glas robuster macht. Somit sind biegsame Smartphone-Displays aus vor-

#### KOMPAKT

- Seit Kurzem gibt es Mobiltelefone mit faltbarem gläsernen Display.
- Theoretisch kann sich Glas mit den festesten technischen Werkstoffen messen.
- Um Glas unzerbrechlich zu machen, versuchen Forscher, selbst winzige Materialfehler zu vermeiden.

Schreckmoment am Steuer: Ein Golfball stößt gegen die Windschutzscheibe. Doch statt zu bersten, biegt sich das Glas, federt zurück und schleudert das Geschoss vom Fahrzeug weg. Noch ist eine solche Szene reine Fiktion, doch elastisches Glas gibt es bereits.

gespanntem Glas kratzfester und weniger anfällig für Falten- und Blasenbildung als ihre Gegenstücke aus Kunststoff. Schott gibt an, der einzige Anbieter weltweit von flexiblem, vorspannbarem Ultradünnglas zu sein.

„Die Methode des Vorspannens ist recht langwierig und teuer. Da sucht man nach Verbesserungen“, sagt Lothar Wondraczek. Der Professor für Glas-Chemie an der Universität Jena ist überzeugt, dass die Möglichkeiten von Glas längst nicht ausgeschöpft sind, vor allem hinsichtlich der Zerbrechlichkeit.

„Die Wechselwirkungen der Atome in konventionellen Gläsern lassen auf eine theoretische Festigkeit schließen, die sich den Werten der stärksten technischen Materialien annähert“, schrieb der Materialforscher Ende 2019 im US-amerikanischen Fachmagazin Science. Doch selbst kleinste Materialfehler reduzieren die Festigkeit von Glas um ein Vielfaches. Daher wird in alltäglichen Glasprodukten nur ein Bruchteil des theoretisch Möglichen erreicht.

#### Große Märkte in Sicht

Ein moderner Glashersteller, der in der Praxis die theoretische Grenze für die Festigkeit erreichen würde, könnte große Märkte erschließen. Er würde sicher nicht so handeln wie der Glasmacher, von dem der römische Gelehrte Plinius der Ältere berichtete. Der ließ seine Werkstatt zerstören, nachdem er seinem Kaiser Tiberius ein flexibles und unzerbrechliches Glas präsentiert hatte: Er wollte sein Wissen nicht verbreiten, da sonst Materialien wie Kupfer, Silber und Gold wertlos wären.

„In den letzten Jahren hat die Wissenschaft viele Einsichten gewonnen in die Prozesse, die beim Brechen und Deformieren von Gläsern auf der Ebene der Atome ablaufen“, sagt Wondraczek. Diese Erkenntnisse seien in verschiedenartigs-



Ein Handy zum Knicken: Mit dem Modell „Galaxy Z Flip“ hat der südkoreanische Hersteller Samsung ein Smartphone mit biegsamem Bildschirm auf den Markt gebracht (links). Die Grundlage dafür ist ein neuartiges Glas, das sich falten und wieder gerade drücken lässt, ohne Schaden zu nehmen. Entwickelt wurde die gläserne Folie, die etwa so dünn ist wie ein menschliches Haar, in den Forschungslabors des Mainzer Unternehmens Schott (oben).

te Computermodelle eingeflossen: solche, mit denen man die chemische Zusammensetzung der Gläser optimiert, und auch solche, die das Verhalten oder die Formgebung der Gläser im Bereich von Millimetern und Zentimetern simulieren. „Bezogen auf konkrete Anwendungen konnten in der letzten Zeit deutliche Verbesserungen der Glaseigenschaften erzielt werden“, sagt Wondraczek.

Weil sich die Eigenschaften von Glas für den Einsatz in nahezu allen Lebensbereichen maßschneidern lassen, seien die Zukunftsaussichten für das Material gut, meint Christina Rettig. Die Leiterin der Technologie- und Innovationskommunikation von Schott nennt die Elektromobilität als Beispiel für ein aufstrebendes Einsatzgebiet: mit Glas als Komponente in den derzeit gebräuchlichen Lithium-Ionen-Batterien und in Batterien der nächsten Generation.

### Ende der langen Leitung

Auch im Inneren von Computern wird es künftig zunehmend glasig zugehen, ist Tobias Gotschke überzeugt. Der Schott-

Manager bezieht sich auf spezielle Zwischenstücke und Leiterplatten, sogenannte Interposer und Circuit Boards. Sie tragen verschiedene Rechen- und Grafikprozessoren sowie Speicher und verbinden diese über winzige metallische Leiterbahnen. „Die einzelnen elektronischen Bauelemente sind bereits extrem miniaturisiert. Für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Computer wird es immer wichtiger, die Komponenten mit möglichst kurzen Leitungswegen zu vernetzen“, sagt Gotschke.

Die elektrischen Ströme, die durch die metallischen Leiterbahnen am Interposer fließen, sollen sich möglichst nicht beeinflussen. Das funktioniert beim nichtleitfähigen Trägermaterial Glas besser als beim üblichen Werkstoff Silizium. Außerdem lässt sich das Maß der Ausdehnung von Glas – durch die von den Prozessoren produzierte Wärme – genau an die Anforderungen der anderen Materialien anpassen. Dadurch arbeitet das gesamte Bauteil zuverlässiger.

Schott führt aktuell Interposer-Gläser in den Markt ein. Ihre Massenproduktion

stößt an die Grenzen des derzeit Machbaren. Das Glas muss nicht nur weniger als einen halben Millimeter dünn sein, sondern auch strukturierbar: Beispielsweise sind für die Durchführung von Leiterbahnen kleinste Löcher an festgelegten Positionen erforderlich. Wie diese Strukturen aufgebracht werden, verrät Thomas Gotschke nicht – nur, dass eine Kombination verschiedener optischer Technologien im Einsatz ist.

### Gläserne Mikroreaktoren

Das Problem der Strukturierung von Glas war für Maschinenbau-Ingenieur Bastian Rapp der Ausgangspunkt, um ein Herstellungsverfahren für Gläser abseits des üblichen Schmelzens zu entwickeln. Kurz nach der Jahrtausendwende entwarf er in seiner Doktorarbeit ein System, um kleinste Mengen von Flüssigkeiten, etwa Blut, zu Sensoren zu bewegen, mit denen die Substanz dann analysiert wird. Die Beschäftigung mit der Mikrofluidik weckte sein Interesse an Mikroreaktoren – Miniaturgefäßen mit Kammern, in denen chemische Reaktionen ablaufen. „Solche Mikroreaktoren bestehen üblicher-



Gläsernes Gespinnst: Aus feinen Fasern von Spezialglas, die durch mehrere Spulen zu einem Bündel gezogen werden, lassen sich Lichtleiter für Endoskope herstellen (links). Damit können Mediziner auf schonende Art ins Innere des Körpers blicken. Oben: Bei einem neuen Fertigungsverfahren wird dünnes Glas aus der Schmelzwanne durch eine Düse und Rollen in Form gezogen.

weise aus Metall. Aber ich wollte etwas Transparentes haben. Glas erschien mir auch aufgrund seiner chemischen Beständigkeit ideal“, berichtet Rapp, inzwischen Professor am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg. Doch entsprechende Glasreaktoren mit feinsten Strukturen lassen sich auf herkömmliche Weise kaum herstellen.

Rapp leitete in der Folgezeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine Nachwuchsgruppe, die sich unter anderem wissenschaftlich mit dem 3D-Druck beschäftigte, in der Fachsprache als additive Fertigung bezeichnet. „Es lag nahe, sich zu fragen, ob man Glas auch mittels additiver Methoden strukturieren kann. Denn dann hätte man die Möglichkeit, ein digitales Modell direkt in ein physikalisches Objekt aus Glas umzuwandeln“, sagt Rapp.

### Formbar wie Kunststoff

Über Umwege erfanden der Maschinenbauer und sein Team einen Prozess, mit dem sich Glas wie Kunststoff formen lässt. Ausgangspunkt sind Nanokügelchen aus Quarzglas, die die Forscher in einen

flüssigen und lichtempfindlichen Kunststoff einrühren. Beim Drucken bestrahlt UV-Licht das einheitliche Gemisch, das die Wissenschaftler Glassomer nennen, entsprechend der digitalen Vorlage. Wo das Licht auftrifft, härtet der Kunststoff aus. Der 3D-Drucker zieht den entstandenen Rohling dann aus dem flüssigen Glassomer heraus. Anschließend kommt der

### Restaurierung historischer Fenster mit Glas-Bausteinen aus dem 3D-Drucker

Rohling in den Ofen, wo sich der Kunststoff zersetzt und die Glaskügelchen verbrennen. Nach diesem sogenannten Sintern bleibt ein Objekt aus reinem Glas zurück.

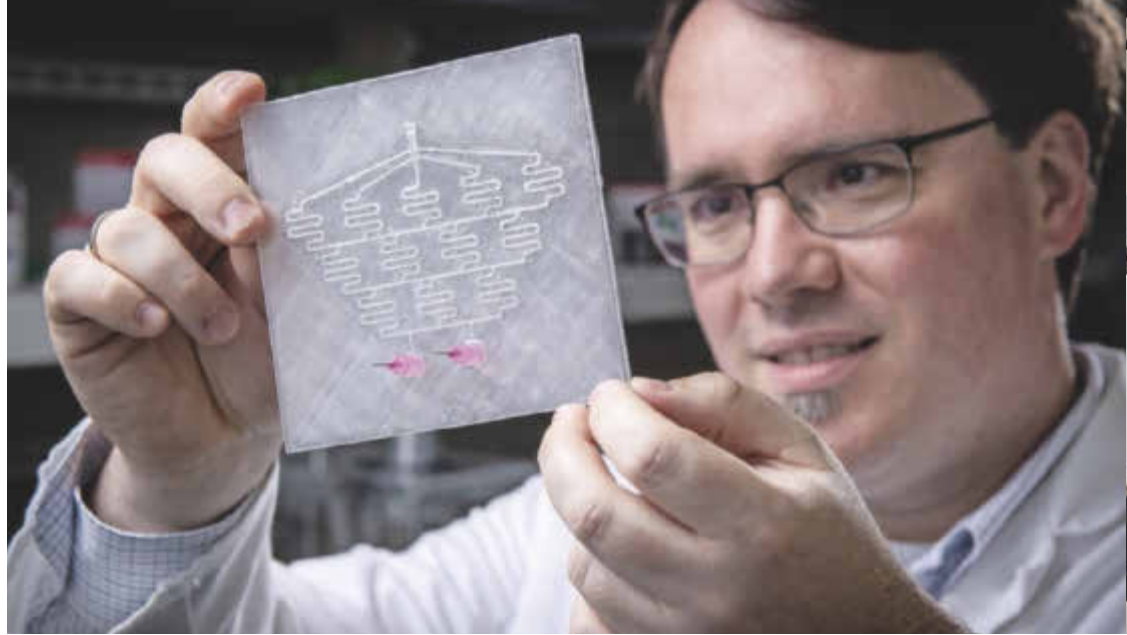
„Das ursprüngliche Glassomer hat einen Füllgrad mit perfekt kugelförmigen Glasparkeln von 85 Prozent. Deshalb schrumpft das Objekt während des Sinterns gleichmäßig in alle Richtungen und nur verhältnismäßig wenig“, erläutert Rapp. Dieses Schrumpfen lässt sich vo-

rausberechnen und somit beim Entwurf des digitalen Modells einplanen.

Bastian Rapp hat 2018 mit einigen Mitarbeitern das Unternehmen NeptunLab gegründet, um die Technologie zu vermarkten. „Wir haben inzwischen Machbarkeitsstudien und Vorserien-Entwicklungen für zahlreiche Anwendungen durchgeführt. Da ging es um Beleuchtung, Medizintechnik, chemische Glasapparaturen und sogar um die Herstellung von Teilen, die in historischen Fenstern fehlen“, berichtet der Wissenschaftler, der zugleich als Geschäftsführer des jungen Unternehmens tätig ist.

Gläser mit feinen Kanälen für die Mikrofluidik oder für Mikroreaktoren sind herstellbar: Dazu drucken die Forscher zunächst die angehenden Kanäle als Kunststoff-Fäden aus, die sie dann mit Glassomer umgießen. Später im Ofen verbrennen die Fäden. Nach dem Sintern bleiben schließlich die Kanäle zurück, umgeben von Glas.

Konkurrenzlos sind Rapps Team und das Glassomer nicht: Auch Arbeitsgruppen aus der Schweiz und aus den USA haben Methoden vorgestellt, mit denen sich



Neue Wege bei der Fertigung: Der Freiburger Forscher Bastian Rapp setzt für die industrielle Glasbearbeitung auf winzige gläserne Teilchen, die ein „Glasomer“ bilden (oben). Das lässt sich ähnlich wie Kunststoff fräsen, drehen oder mit Laserlicht modifizieren. Eine Anwendung ist die Fertigung von Mikroreaktoren, um kleine Flüssigkeitsmengen zu mischen, etwa für chemische Analysen (darunter, links). Dazu werden zunächst dünne Kanäle per 3D-Druck hergestellt und danach mit einem Glassomer umgossen. Rechts: Aus flüssigem Glas, das sich in beliebige Formen bringen lässt, kann man durch Aushärten im Ofen Bauteile wie Linsen fertigen.



Glas additiv fertigen lässt. „Doch letztlich geht es beim 3D-Druck vor allem um hochwertige Nischenprodukte. Denn Glas hat den Vorteil, dass es sich über Schmelzprozesse in großer Menge und in großen Formaten kostengünstig und schnell herstellen lässt“, ist Wondraczek überzeugt.

### Fenster mit Magneteffekt

Zu den Produkten, die wohl auch künftig nicht im 3D-Drucker produziert werden, gehören Fenster. Doch Wondraczek hat als Koordinator des ausgelaufenen EU-Projekts LaWin schon 2017 den Prototypen eines Fensters aus zwei aufeinander laminierten Glasscheiben präsentiert, in dessen großflächigen Kanalstrukturen eine Flüssigkeit zirkuliert. In einem separaten Tank kann die Flüssigkeit mit magnetischen Eisenpartikeln angereichert werden, die sich durch Anschalten eines Magneten wieder herausziehen lassen. Abhängig von der Menge der enthaltenen Eisenpartikel nimmt das Fluid entweder einen helleren

oder einen dunkleren Grauton an oder wird gar schwarz.

Bei Sonneneinstrahlung lässt sich das Fenster auf Knopfdruck abdunkeln. Das macht Jalousien überflüssig, und der Energiebedarf von Klimaanlage verringert sich. Dass sich die Flüssigkeit bei Einstrahlung erwärmt, lässt sich auch zur

### In der abgedunkelten Fensterscheibe lässt sich warmes Wasser bereiten

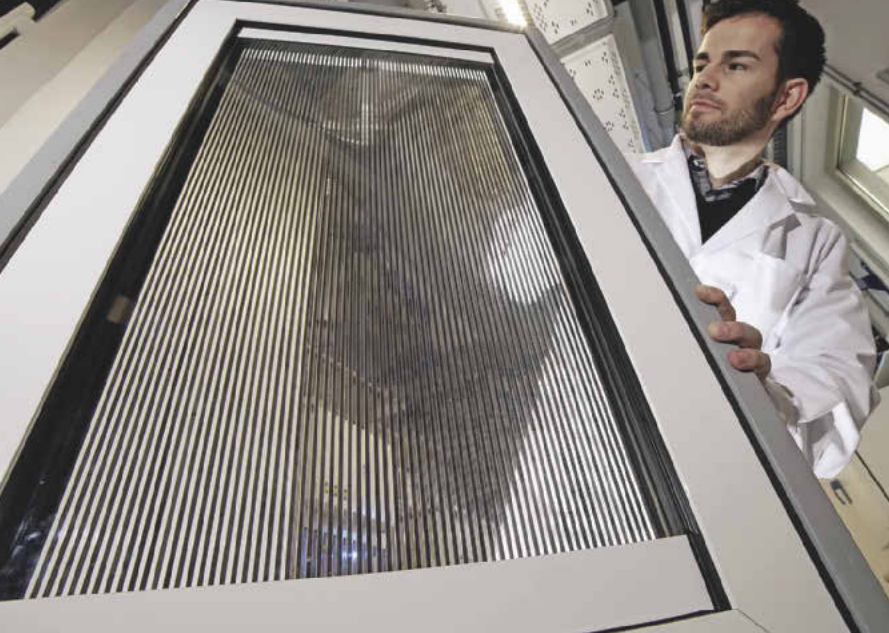
Warmwasseraufbereitung nutzen. Trotz des faszinierenden Konzepts hat das LaWin-Fenster den Weg vom Forscherlabor in die Praxis bisher nicht gefunden. Genauso wenig wie es gelungen ist, sogenannten Smart Windows zum Erfolg zu verhelfen, deren Energie- und Strahlungsdurchlässigkeit sich an die Wetterverhältnisse anpasst. „Man muss einfach sehen,

dass Fenster wegen ihrer Transparenz eingebaut werden und man mit einer Dreifachverglasung den Energieverlust schon sehr gut begrenzen kann“, kommentiert Wondraczek das Problem.

### Das Ziel: Fenster mit Köpfchen

Dass sich smarte Fenster bislang nicht durchgesetzt haben, hält John Fahlteich vom Dresdener Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) vor allem für eine Frage der Kosten: „Solche Fenster sind bislang etwa zehnmal so teuer wie heutige Standard-Fenster.“ Fahlteich ist Koordinator des vor einem Jahr angelaufenen EU-geförderten Projekts Switch2Save (bedeutet: Schalten, um zu sparen). Die zehn beteiligten Partner aus Forschung und Industrie haben sich vorgenommen, bis 2024 intelligente Fenster zu entwickeln, die unter 300 Euro pro Quadratmeter Fensterfläche kosten.

Das wäre zwar immer noch deutlich teurer als heutige Dreifach-Fenster.



Schaltbare Scheiben: Doktorand Benjamin Heiz von der Universität Jena untersucht den Prototyp eines Fluidikfensters (oben links). Es dient zum Sonnenschutz, denn seine Lichtdurchlässigkeit lässt sich per Knopfdruck variieren. Intelligente gläserne Fassaden sollen künftig selbstständig auf Umwelteinflüsse reagieren, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu verbessern. Zugleich lassen sich damit Strom, Wärme oder Algen aus Sonnenlicht produzieren (oben rechts). Darunter: Forscher arbeiten an Techniken, um elektrochromes Fensterglas, das sich eigenständig verdunkelt, großflächig herzustellen.



„Doch diese Investition rechnet sich für den Nutzer aufgrund der Energieeinsparung“, sagt Fahlteich. Um das zu zeigen, werden die Forscher zunächst ein Jahr lang den Energiebedarf eines Bürogebäudes in Schweden und eines Krankenhauses in Griechenland exakt erfassen. Dann werden sie die herkömmlichen Fenster durch selbst entwickelte, smarte Exemplare ersetzen und den Energieverbrauch der Gebäude erneut messen. Das Ergebnis fließt in Datensätze ein, mit denen Architekten oder Energieberater ihre Computerprogramme füttern können, um bei Bauten in anderen Klimazonen die möglichen Einsparungen zu berechnen.

### Folien aus ultradünnen Glas

Bei den smarten Fenstern setzt das Switch2Save-Konsortium auf eine Kombination von zwei verschiedenartigen Folien, die auf die Innenseite der äußeren Scheibe einer Dreifachverglasung laminiert werden. Die erste Folie besteht aus ultradünnem Glas. Dessen Beschichtung

verändert die Reflexionseigenschaften der Folie im Infrarot-Bereich des Lichtes, sobald sich ihre Oberfläche auf eine bestimmte Temperatur – beispielsweise 30 Grad Celsius – aufgeheizt hat. Oberhalb dieser Temperatur reflektieren solche thermochromen Gläser die Wärmestrahlung, während die Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Bereich nahezu unverändert bleibt.

Anders bei der zweiten Folie, die aus Kunststoff mit einer ultradünnen, elektrochromen Beschichtung besteht: Legt man per Knopfdruck eine elektrische Spannung an, so finden in dieser Schicht chemische Vorgänge statt, aufgrund derer sich die Folie abdunkelt. „Die zunehmende Vernetzung und die App-Fernsteuerung von Haustechnik und Haushaltsgeräten, also das sogenannte Smart Home, eröffnet solchen schaltbaren Fenstern neue Marktchancen“, ist Projektkoordinator Fahlteich überzeugt. „Denn damit können die Fenster von Hand per App oder automatisch anhand

von Wetterdaten und der Raumtemperatur verdunkelt werden.“

„Wir im Switch2Save-Konsortium werden die beide Folien in einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess herstellen. Dadurch können kostengünstig großflächige Folien produziert werden, die den Fenstern ihre smarten Eigenschaften verleihen“, sagt Marco Schott vom Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (ISC) in Würzburg. Der Elektrochromie-Experte sieht neben dem Architektur-Sektor einen weiteren Zukunftsmarkt für intelligente Gläser: Elektrofahrzeuge. Erfüllt sich seine Hoffnung, dann würden deren Windschutzscheiben künftig nicht nur schadlos den Aufprall von Golfbällen auffangen, sondern auch auf Zuruf der Fahrzeuginsassen das Sonnenlicht dimmen. ■



„Glück und Glas, wie leicht bricht das“, ist ein Spruch, den Wissenschaftsjournalist **FRANK FRICK** während seiner Promotionszeit im Chemielabor oft gehört hat.