

# FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 ||

## 1 Implantierter Infektionsschutz

Klinikkeime können tödlich sein, da sie resistent sind gegen Antibiotika. Alternative Methoden zur Bakterienabwehr sind gefragt. Einem deutsch-französischen Forscherteam ist es gelungen, Knochenimplantate zu entwickeln, die Keime auf Distanz halten.

## 2 Die Brennstoffzelle für zu Hause

Sie wandelt chemische direkt in elektrische Energie um. Doch der Marktdurchbruch der Brennstoffzelle blieb bisher aus. Zu komplex waren die Systeme. Fraunhofer und Vaillant haben ein einfaches Gerät für den Hausgebrauch entwickelt.

## 3 Immer gut gelüftet

Etwa 80 Prozent ihrer Lebenszeit verbringen die Bewohner Mitteleuropas in Gebäuden. Mit ausgetüftelten Lüftungssystemen sorgen Forscher für angenehmes Klima in Wohnungen und Büros.

## 4 Effizient thermisch kühlen und heizen

Thermische Anlagen nutzen Wärme, um Kälte zu produzieren und umgekehrt. Benötigt wird dafür ein Material, das Wasserdampf besonders gut und schnell abführen kann. Ein neues Verfahren bringt dieses einfach als Schicht auf die verwendeten Bauteile auf.

## 5 Konzepte für einen sicheren Hafen

Vor allem im Güterverkehr ist der Seeweg eine der wichtigsten Verbindungen ins Ausland. Forscher bewerten die Sicherheit per Simulation, um so auch bei steigendem Verkehrsaufkommen eine reibungslose Schifffahrt zu gewährleisten.

## 6 Solarmodule in Glas gebettet

Organische Solarmodule haben gegenüber Silizium-Solarzellen Vorzüge. Ein Knackpunkt sind jedoch ihre kürzere Lebensdauer. Forscher arbeiten an einer viel versprechenden Lösung: Sie nutzen flexibles Glas als Trägersubstrat, wodurch die empfindlichen Bauteile besser geschützt sind.

## 7 Kollisionen mit Robotern – ohne Verletzungsrisiko

Teamwork von Mensch und Roboter lautet die Devise der Zukunft. Der Roboter darf den Menschen dabei aber auf keinen Fall verletzen. Doch wann resultiert eine Berührung in eine Verletzung? Dies untersuchen Forscher erstmals in einer Studie.

## 8 Kurzmeldungen

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die führende Organisation für angewandte Forschung in Europa. Unter ihrem Dach arbeiten 67 Institute und Forschungseinrichtungen an Standorten in ganz Deutschland. Mehr als 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erzielen das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

---

#### **Impressum**

FORSCHUNG KOMPAKT der Fraunhofer-Gesellschaft | Erscheinungsweise: monatlich | ISSN 0948-8375 | Herausgeber und Redaktionsanschrift: Fraunhofer-Gesellschaft | Unternehmenskommunikation | Hansastraße 27c | 80686 München | Telefon +49 89 1205-1302 | [presse@zv.fraunhofer.de](mailto:presse@zv.fraunhofer.de) | Redaktion: Beate Koch, Britta Widmann, Tobias Steinhäuser, Janine van Ackeren, Tina Möbius | Abdruck honorarfrei, Belegexemplar erbeten. Alle Pressepublikationen und Newsletter im Internet auf: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse). FORSCHUNG KOMPAKT erscheint in einer englischen Ausgabe als RESEARCH NEWS.

## Implantierter Infektionsschutz

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 1

Die Zahlen sind alarmierend: Hunderttausende von Patienten infizieren sich jährlich in deutschen Krankenhäusern mit Keimen, die resistent sind gegen alle gängigen Antibiotika. Die Folge: Wunden bleiben offen, Entzündungen breiten sich aus, schwächen den Organismus und führen mitunter sogar zum Tod. Pharmazeutisch ist das Problem kaum in den Griff zu bekommen: Die Entwicklung neuer Antibiotika ist teuer, aufwändig und langwierig. Kommt der Wirkstoff dann endlich auf den Markt, dauert es nicht lange, bis die Keime mutieren und neue Resistenzen bilden.

Auch wenn Chirurgen Knochenimplantate einsetzen, kann es passieren, dass Keime in den Körper eindringen. Infektionen am Knochen sind besonders problematisch, weil sie sich nur schwer behandeln lassen – Antibiotika, die vom Blut durch den Körper transportiert werden, erreichen die Implantate nur in sehr geringen Konzentrationen. »Am besten wäre es, Infektionen von vornherein zu vermeiden, indem man die Implantate mit einem antimikrobiellen Schutzschild versieht«, sagt Dr. Iris Trick, Mikrobiologin vom Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB in Stuttgart. Zusammen mit Materialwissenschaftlern am französischen Institut Carnot CIRIMAT in Toulouse hat das Fraunhofer-Team einen Knochenersatzstoff mit integriertem Infektionsschutz entwickelt.

### Keine Chance für Bakterien

Auf den ersten Blick erinnert das feinkörnige Implantat an Mehl. Erst unter dem Mikroskop erkennt man, was in ihm steckt: Die einzelnen Körnchen des Granulats bestehen aus Apatit-Kristallen. Diese gleichen in Aufbau und Struktur dem natürlichen Knochenmaterial, das aus denselben chemischen Elementen gebildet wird – Kalzium und Phosphor. Das Granulat ist damit ein idealer Stoff für Implantate. Um Komplikationen zu verhindern, beschichten einige Hersteller ihre Knochenersatzstoffe mit Antibiotika. Ein hundertprozentiger Schutz ist das freilich nicht, denn resistente Keime können sich dennoch ausbreiten.

Die interdisziplinäre Forschergruppe ging einen anderen Weg. Ziel war es, mit natürlichen Stoffen Bakterien auf den Kalziumphosphat-Kristallen zu vermindern, zu unterdrücken oder abzutöten. Im Projekt »Biocapabili« – die Abkürzung für »Biomimetic Calcium Phosphate Anti-bacterial Bone Implants for Local-infection Inhibition« – hat das internationale Team mit verschiedenen Stoffen und Verbindungen experimentiert: Mit Silber-, Kupfer- und Zinkionen beispielsweise, aber auch mit Enzymen und Peptiden, die Bakterien zersetzen. Den französischen Forschern ist es gelungen, Metallionen in die Apatit-Kristalle einzubauen. Den Nachweis, dass das fertige Pulver tatsächlich vor Infektionen schützt, konnten die Biologen in Stuttgart bereits erbringen: Im Labor des IGB hat Iris Trick die Proben auf Mikrotiterplatten in voneinander isolierten Nöpfchen mit Bakterien infiziert und anschließend mehrere Tage wachsen lassen. Darunter waren

verschiedene Staphylococcus-Arten, die zu den häufigsten Klinikkeimen gehören. Ergebnis: In unmittelbarer Umgebung des Apatits war die Bakterienzahl um mehr als 90 Prozent reduziert.

Als ebenso wirkungsvoll entpuppte sich eine Peptid-Beschichtung: »Apatit-Granulate und -Pellets lassen sich mithilfe von Peptiden vor Bakterien schützen«, sagt Dr. Michaela Müller, die die Beschichtungen im IGB aufbringt. Der Härte- und mikrobiologische Prüfung wurde bereits bestanden: Die gefährlichen Bakterien konnten sich an der Oberfläche der Pellets und Granulate nicht vermehren. Mit der Peptidbeschichtung lassen sich also antibakterielle Knochenimplantate herstellen.

»Die antibakterielle Wirksamkeit allein ist in der Medizin jedoch nicht alles«, erklärt Dr. Anke Burger-Kentischer, Gruppenleiterin Molekulare Zelltechnologie am IGB. »Bevor ein Produkt in der Praxis eingesetzt werden darf, muss sichergestellt sein, dass es dem Patienten nicht schadet.« Den ersten Schritt haben die Forscher schon gemacht: Auf Mikrotiterplatten wurden menschliche Zellkulturen den Implantatproben beigemischt. »Mithilfe dieser Zytotoxizitätstests konnten wir ermitteln, wie viel Metallionen, Enzyme oder Peptide im Granulat die Zellen vertragen«, resümiert Burger-Kentischer. Die klinischen Untersuchungen, die als nächstes anstehen, will das deutsch-französische Forscherteam in Zusammenarbeit mit der Industrie durchführen.



**Ob und wie stark Substanzen antimikrobiell wirken, haben die Forscher in einem Screening untersucht. Das Knochenersatzmaterial wird dabei mit verschiedenen Bakterienarten versetzt.**

**(© Fraunhofer IGB) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)**

## Die Brennstoffzelle für zu Hause

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 2

»Man spricht immer von einem Brennstoffzellensystem«, sagt Dr. Matthias Jahn vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden. Eine einzelne Zelle erzeugt nicht genug Spannung, um eine ausreichende elektrische Leistung zu erreichen. In einem Brennstoffzellenstapel sind mehrere Zellen hintereinander geschaltet. Jede davon hat etwa die Größe einer CD. Wir nennen die Stapel Stacks«, so Jahn. Brennstoffzellen wandeln Erdgas direkt in elektrische Energie um. Ihr Wirkungsgrad ist um ein Vielfaches höher als bei Verbrennungsmaschinen, wie zum Beispiel dem Automotor. Diese benötigen noch einen Zwischenschritt. Sie wandeln zunächst die chemische in thermische (Wärme) und mechanische Energie (Kraft) um. Mit der Kraft treiben sie einen Generator an, der dann erst die elektrische Energie erzeugt. Dabei geht ein großer Teil der ursprünglich zur Verfügung stehenden Energie verloren.

### Praxistest in Privathaushalten

Zusammen mit dem Heizungshersteller Vaillant hat das IKTS ein kompaktes, sicheres und robustes Brennstoffzellensystem entwickelt, das in Privathaushalten aus Erdgas Strom und Wärme erzeugt. Die Forscher verantworteten insbesondere den Bau der Prototypen, die Auslegung des Gesamtsystems, die Gestaltung der Keramikbauteile sowie die Entwicklung des Reformers und des Nachbrenners. Aktuell werden die Geräte in Privathaushalten im Praxistest »Callux« getestet ([www.callux.net](http://www.callux.net)).

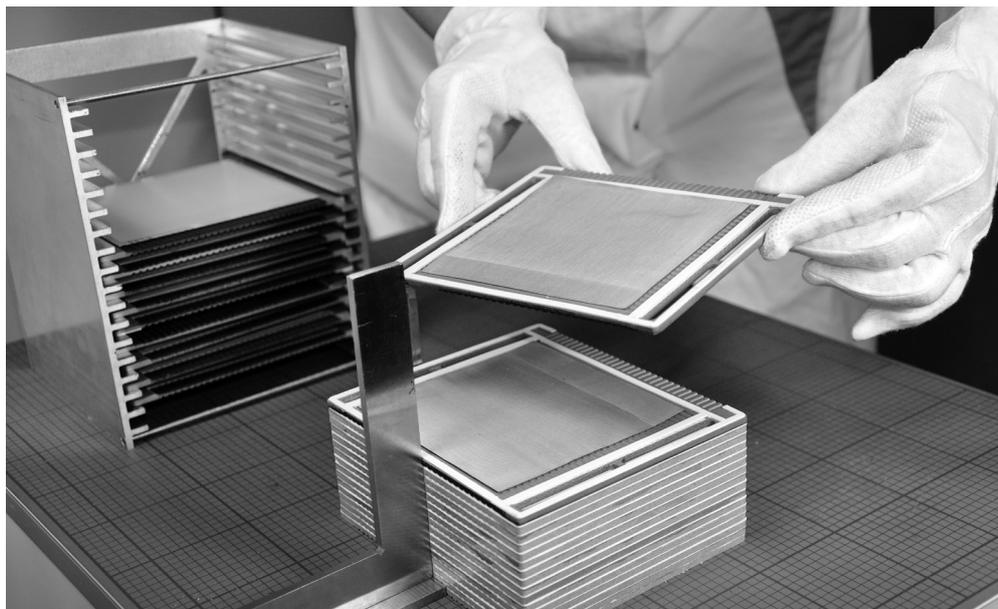
Sie sind ähnlich kompakt wie klassische Gasheizgeräte, die nur Wärme erzeugen. Sie lassen sich bequem an der Wand montieren und einfach warten. Mit einer Leistung von einem Kilowatt decken sie den mittleren Stromverbrauch eines Vier-Personen-Haushalts ab. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI fördert Callux. Derzeit werden im europäischen Demonstrationsprojekt »ene.field« ([www.enefield.eu](http://www.enefield.eu)) etwa 150 weitere Geräte in mehreren Europäischen Ländern installiert. Dazu hat Vaillant Anfang 2014 die Produktion einer Kleinserie gestartet. Parallel zum Praxistest arbeiten die beiden Partner bereits an neuen Modellen. »Jetzt geht es vor allem darum, die Kosten bei der Herstellung weiter zu drücken und die Lebensdauer der Anlage zu erhöhen«, sagt Jahn.

Das Prinzip der Brennstoffzelle ist bereits seit über 175 Jahren bekannt. Bisher blieb der Marktdurchbruch jedoch aus. Wesentlicher Grund war die Erfindung des elektrischen Generators. Er lief der komplexeren Brennstoffzelle den Rang ab. Erst in den 1960er Jahren wurde die Technologie von der NASA bei einigen Apollo-Mondmissionen praktisch umgesetzt. Ende der 1990er Jahre gab es weitere Projekte in der Automobilindustrie, die sich aber bis heute nicht durchsetzen konnten. Die Gründe: Zu komplex, zu teuer, zu unsicher. »In unserem Projekt mit Vaillant haben wir große Fortschritte gemacht, die Technologie nah an die Marktreife zu bringen. Vaillant produziert bereits

eine Kleinserie, die in geförderten Projekten an Kunden verkauft wird«, so Jahn. »Für den Durchbruch am Markt müssen die Kosten weiter deutlich sinken.«

Das Minikraftwerk für den Hausgebrauch basiert auf einer Festoxidbrennstoffzelle (engl. solid fuel cell, SOFC). SOFCs arbeiten gegenüber konkurrierenden Ansätzen, zum Beispiel den Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (engl. proton exchange membrane fuel cell, PEMFC), die in Autos zum Einsatz kommen, mit sehr viel höheren Temperaturen. Während sie bei PEMFCs lediglich bei 80 Grad liegen, erreichen die SOFCs bis zu 850 Grad. »Dadurch können die SOFCs deutlich einfacher und kostengünstiger aufgebaut werden«, sagt Jahn.

Der Elektrolyt einer SOFC leitet nur Sauerstoffionen weiter, keine Elektronen. Andernfalls käme es zu Kurzschlüssen. »Als Material für den Elektrolyt eignet sich Keramik besonders gut. Es verfügt über die gewünschte Leitfähigkeit und hält auch hohe Temperaturen aus«, sagt Jahn. So laufen alle Reaktionen auch ohne den Einsatz von Edelmetallen reibungslos ab, die für das direkte Umwandeln von chemischer in elektrische Energie notwendig sind: Wenn das Brennstoffzellen-Heizgerät an das Erdgasnetz angeschlossen ist, wandelt ein Reformier das Erdgas zunächst in ein wasserstoffreiches Gas um. Dieses reagiert dann im Stack mit dem Sauerstoff der Luft in einer geräuschlosen »kalten Verbrennung«. Dabei entstehen Strom und Wärme.



Fertigung der Zellstapel (engl. Stacks) am Fraunhofer IKTS. (© Fraunhofer IKTS) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)

## Immer gut gelüftet

Unangenehme Gerüche, stickige Luft oder permanenter Durchzug: Wer in der Wohnung oder im Büro regelmäßig schlechter Luft ausgesetzt ist, fühlt sich unwohl. Ausdünstungen von Teppichen, Farben, Lacken und Möbeln können ebenso wie Schimmel oder zu trockene Luft das Raumklima beeinträchtigen. »Es gibt keine Materialien ohne Emissionen und Gerüche«, erklärt Dr. Andrea Burdack-Freitag, Sensorikexpertin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Valley bei Holzkirchen. »Nicht alle Stoffe, die in die Luft emittieren, sind schädlich. Manchmal leiden wir jedoch an tränenden Augen, Halskratzen oder Kopfschmerzen.« Auslöser für solche unerfreulichen Folgen können zu trockene Luft oder flüchtige organische Verbindungen, kurz VOCs (Volatile Organic Compounds) sein, wie beispielsweise Formaldehyd. VOCs stecken in fast jedem Bauteil, zum Beispiel in Form von Lösungsmitteln. »Treten Beschwerden auf oder riecht es irgendwo dauerhaft unangenehm, analysieren wir die Emissionen, die die Luftqualität beeinflussen und suchen nach der Ursache«, erklärt die Forscherin. Dazu setzen sie und ihre Kollegen der Gruppe Chemie und Sensorik eigens für die Luftqualitätsmessung konzipierte Sensoren und Messgeräte ein.

### Neues Indoor Air Test Center im Bau

Wie verteilen sich Belastungen durch VOCs oder CO<sub>2</sub> im Raum? Wie sind die Strömungsverhältnisse und wie gestaltet sich der Luftaustausch? Auf Grundlage ihrer Untersuchungen entwickeln die Wissenschaftler gemeinsam mit Industriepartnern ausgetüftelte Lüftungssysteme. Noch in diesem Jahr wollen die IBP-Forscher das neue Indoor Air Test Center eröffnen. »Dort können wir die Luft künftig gezielt mit biologischen und chemischen Substanzen sowie mit Partikeln unterschiedlicher Größe und Form belasten, Temperaturen bis zu 80 Grad Celsius erzeugen, die Luftfeuchtigkeit auf maximal 95 Prozent erhöhen und zudem die Luftvolumenströme präzise regeln. Mit der Hightech-Ausstattung wollen wir neue Filtertechnologien testen. Wir bauen auch komplette Büro- oder Wohnausstattungen auf und führen dann VOC-Untersuchungen durch. Dazu lassen wir Wände, Boden und Decke der Testräume aus emissionsfreiem Material anfertigen«, erläutert Thomas Kirmayr, Leiter der Gruppe Raumklimasysteme.

Auch an innovativen Luftführungen für Spezialräume – wie Operationssäle – wollen die Wissenschaftler in den neuen Laboren arbeiten. Die neuen Führungen sollen zum Beispiel bei chirurgischen Eingriffen vermeiden, dass mit der aufsteigenden Luft Keime in den Operationsbereich gelangen. Im Test Center haben Fahrzeuge Platz. So können die Experten auch die Luftqualität in Autos prüfen. Diese Tests sind notwendig, da in den Fahrzeugmodellen eine Vielzahl von neuartigen Verbundwerkstoffen stecken.

Auf welche Weise lässt sich nun bestimmen, wie gut oder wie verbraucht die Raumluft ist? »Bisher galt nur eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration als Indikator für schlechte Luftqualität. Diesen Wert messen Sensoren und melden ihn dem Lüftungssystem. Wir gehen

einen Schritt weiter und untersuchen parallel weitere Parameter. Dazu verwenden wir Sensoren, die Kohlendioxid, Stickoxide und Ozon aufzeichnen. Außerdem setzen wir auf Metalloxid-Halbleiter, die bei Speisen, Getränken und bei menschlichen Düften ansprechen«, schildert Burdack-Freitag. Auf Basis der verschiedenen Messwerte kann eine Lüftungssteuerung genauer als bisher reagieren, etwa auf stickige Luft bei Besprechungen.

Welche Lüftung in welchem Gebäude am sinnvollsten eingesetzt werden sollte, ist eine der zentralen Fragen während der Planungsphase eines Neubaus. »Dabei ist zu beachten: Luftwechselrate und Lüftungseffektivität sind zwei unterschiedliche Untersuchungsgrößen. Die Rate beschreibt, welches Luftvolumen pro Stunde in den Raum strömt. Zieht die frische Luft nicht durch das Zimmer, sondern durch das Fenster nebenan gleich wieder ab, findet kein effektiver Austausch statt«, erklärt Thomas Kirmayr und ergänzt: »Man muss bereits in der Bauplanung sicherstellen, dass die Luft wirklich ausgetauscht wird. Hochauflösende virtuelle Modelle helfen dabei, diese Szenarien zunächst am Computer zu testen. So lassen sich später kostenintensive Umbauten vermeiden. Für die Prognose haben wir am IBP das dreidimensionale Zonenmodell VEPZO entwickelt, mit dem sich die Raum- und Lüftungsplanung bewerten und lokal aufgelöst visuell darstellen lässt.«

Die Software kann auch für bestehende Bauten verwendet werden. Auf Basis der Simulationen können Unternehmer dann entscheiden, ob sich die Investition in ein neues oder besseres Lüftungssystem lohnt. Die Forscher am IBP arbeiten auch an flexiblen Systemen, die sich dem Bedarf anpassen und erkennen, wann etwa Teilnehmer einer langen Besprechung frische Luft benötigen. »Eine Idee ist, das Raumklima leicht zu variieren, denn das empfinden wir häufig als angenehmer«, sagt Kirmayr.



**Im HiPIE-Labor (High Performance Indoor Environment) lassen sich die bauphysikalischen Parameter wie Akustik, Raumklima und Beleuchtung gezielt beeinflussen, um ihre Wirkung auf Menschen zu erforschen. (© Fraunhofer IBP) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)**

## Effizient thermisch kühlen und heizen

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 4

Kühlgeräte haben den menschlichen Körper zum Vorbild: Wenn wir schwitzen, verdunstet Wasser auf unserer Haut und kühlt diese. Je niedriger der Luftdruck, desto einfacher geht das. Verfrachtet man diesen Prozess in ein Vakuum, verdunstet Wasser bereits bei wenigen Millibar und Temperaturen von nur 10 Grad. Damit die Geräte kontinuierlich kühlen, muss der Dampf abgeführt werden. Das gelingt zum Beispiel durch einen elektrischen Kompressor, wie in unseren Kühlschränken, der Wasserdampf aus der Gasphase entfernt und anschließend wieder verflüssigt. Eine Alternative ist der thermische Kompressor, ein poröses Material, das Wasserdampf aufnehmen kann. Bei dieser Variante ist die Antriebsenergie nicht elektrisch, sondern thermisch. Derart angetriebene Wärmepumpen oder Kältemaschinen produzieren aus Wärme Kälte und umgekehrt. Bisher konnten sich diese gegenüber ihren mit Strom betriebenen Pendanten jedoch nicht flächendeckend durchsetzen. Ihre Leistungsdichte ist zu gering. Es fehlen Materialien und Komponenten, die in der Lage sind, ausreichend Wasserdampf in kürzerer Zeit abzuführen.

### Materialien müssen Wasserdampf aufnehmen

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg haben diese Lücke jetzt geschlossen. Ihre metallorganischen Gerüstverbindungen (engl.: Metal Organic Frameworks, MOFs) eignen sich besonders gut, um Wasserdampf aufzunehmen. Dabei bildet ein metallischer Kern zusammen mit organischen Verbindern eine dreidimensionale poröse Struktur. »MOFs können wie Legosteine beliebig zusammengesetzt werden und schlagen in Sachen Flexibilität jede bisher bekannte Materialklasse. Die Stoffe sind porös und haben in ihrem Innern Oberflächen, die sich bis zu 4000 Quadratmetern pro Gramm summieren können. Ausreichend Platz, an denen der Wasserdampf adsorbieren – sich anreichern – kann«, erklärt Dr. Stefan Henninger, Leiter der Gruppe Sorptionsmaterialien am ISE.

Zusammen mit seinen Kollegen hat der Forscher eine große Anzahl von MOFs untersucht und diejenigen identifiziert, die besonders stabil gegenüber Wasserdampf sind. Statt bisher 0,4 können diese bis zu 1,4 Gramm Wasser pro Gramm Material aufnehmen. Bisher liegen MOFs zumeist nur als Pulver vor und können daher nur schwer in die relevanten Gerätestrukturen, wie zum Beispiel Wärmetauscher, eingebracht werden. Stand der Technik sind hierbei Schüttungen von Granulaten. Das hat jedoch den Nachteil, dass zwischen Adsorptionsmaterial und Bauteil nur punktuell Kontakt besteht. Der Stoff- bzw. Wärmeübertrag ist limitiert. Besser ist es, die MOFs als Schicht aufzubringen, um eine möglichst große Oberfläche zu erreichen.

Das haben Forscher geschafft. Ihre Schichten können sie direkt aufbringen, ohne dass weitere Hilfsschichten dazwischen nötig sind. Und sie erreichen die für das Kühlen und Heizen relevanten Dicken von 50 bis 150 Mikrometer. Bei ihren Prototypen werden die

MOFs direkt auf Metalle aufkristallisiert. Bei anderen Materialien, wie zum Beispiel Keramik, gelang dies den Wissenschaftlern mit binderbasierten Beschichtungen. Bei beiden Verfahren werden die Komponenten des Geräts einfach in eine Flüssigkeit eingetaucht, die alle entscheidenden Bestandteile des Materials enthält. Die für die Direktkristallisation notwendige Temperatur entsteht dabei nur an der Oberfläche des Bauteils. So wird nur ein minimaler Ausschuss produziert. »Die MOF-Schicht wächst dabei direkt auf dem Bauteil mit einer Rate von bis zu 50 Mikrometer pro Stunde. Das ist deutlich schneller als bisher«, so Henninger. Bisher haben die Forscher Bauteile von bis zu 15x40 Zentimetern mit dem neuen Verfahren beschichtet.

Die Technologie ist nicht auf Kühl- und Heizgeräte beschränkt. »Durch die enorme Flexibilität der MOFs und unseres Herstellungsverfahrens ist eine Vielzahl von Anwendungen denkbar. Wir können die gewünschte Struktur rasch auf nahezu jedes beliebige Bauteil aufbringen. Im Prinzip für jeden Vorgang, bei dem Stoff- oder Wärmeübertragung eine Rolle spielen, könnte unsere Technologie von Vorteil sein«, sagt Henninger. Zum Beispiel in der chemischen Industrie, wo Gase getrennt werden und dabei Wärme entsteht oder benötigt wird. Oder in der Medizintechnik, wo entsprechend beschichtetes OP-Besteck die Keimbelastung reduziert. Auch im Alltag kann die Technologie von Nutzen sein: Indem sie die hässlichen Wasserflecken auf Plastiktellern, -tassen, etc. in unseren Geschirrpülmaschinen beseitigt.

Fraunhofer hat seine Aktivitäten in der MOF-Forschung im internen Projekt »MOF2market« gebündelt: <http://www.mof2market.fraunhofer.de/de/projekt.html>



Bei thermischen Prozessen ist Oberfläche gefragt, um ausreichend Platz für die Anreicherung von Wasser bzw. Wasserdampf zu haben – wie hier bei einem MOF-beschichteten Wärmetauscher.

(© Fraunhofer ISE) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)

## Konzepte für einen sicheren Hafen

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 5

Die meisten Importgüter erreichen uns auf dem Seeweg – und das Verkehrsaufkommen in deutschen Häfen wächst in den kommenden Jahren weiter: Prognosen gehen davon aus, dass das Umschlagsvolumen bis 2030 von derzeit rund 269 Mio Tonnen auf 468 Mio Tonnen ansteigt. Hafenbetreiber stehen vor der Herausforderung, einen sicheren und reibungslosen Schiffsverkehr zu gewährleisten: Wie müssen Hafenbecken oder Fahrrinnen ausgelegt sein, damit auch große Schiffe sicher navigieren können? Was ist bei widrigen Wetter- oder komplizierten Verkehrsbedingungen zu beachten? Wie lassen sich unnötige Wartezeiten vermeiden?

Antworten auf solche Fragen liefern Forscher des Fraunhofer-Centers für maritime Logistik und Dienstleistungen CML, einer Einrichtung des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik IML in Dortmund: Die Hamburger Experten simulieren in Echtzeit konkrete Szenarien und bewerten anhand der Ergebnisse die nautische Sicherheit. Dazu werden die simulierten Schiffe jeweils hydrodynamisch modelliert und bestmöglich an die Werftdaten angepasst. Die Hydrodynamik ist die Lehre von der Bewegung strömender Flüssigkeiten. Mit dieser Dienstleistung bietet das CML strategische Unterstützung bei Hafenumbauten, Erweiterungen oder Neubauten.

### Simulation mit realen Daten

Als erstes nehmen die Forscher die realen Umgebungsbedingungen unter die Lupe – zum Beispiel Hafenpläne, Zufahrten oder Stromdaten, also signifikante Wasserbewegungen vor Ort. Auf Basis dieser Informationen führen die Forscher eine Vorbewertung durch, in der sich schon mögliche »Knackpunkte« identifizieren lassen: »Eine Einfahrt quer zur Hauptstromrichtung ist beispielsweise ungünstig. In dem Fall suchen wir schon im Vorfeld nach Alternativen«, erklärt Hans-Christoph Burmeister, Projektleiter am CML. Für die Simulation wird die Hafenumgebung anschließend gemäß den realen Eckdaten digital visualisiert.

Zudem erstellen die Forscher ein 3D-Modell eines Referenzschiffs sowie ein hydrodynamisches Rechenmodell. »Darunter versteht man verschiedene hydrodynamische Koeffizienten, welche es erlauben, aus der Kraft des Propellers oder des Bugstrahlruders die Schiffsbahn zu bestimmen. Das ist wichtig, um etwa das Kreisfahr- oder Stoppverhalten des jeweiligen Schiffs realistisch abzubilden«, erläutert Burmeister. Abschließend müssen konkrete Szenarien für die Simulation ausgearbeitet werden. Standardsituationen lassen sich dabei genauso nachstellen wie extreme Bedingungen. Aufbau und Ablauf der Simulation kann man sich ähnlich wie bei Flugsimulationen vorstellen.

Herzstück ist der Simulator, in dem ausgebildete Nautiker das Schiff führen. Wie auf einer echten Schiffsbrücke stehen reale Instrumente, ein Radar sowie ein elektronisches

Seekartensystem zur Verfügung. Drei Monitore sorgen für eine 120-Grad-Sicht auf die virtuelle Hafenumgebung. Die Steuerungsbefehle fließen dann in Echtzeit in das Berechnungsmodell mit ein.

Anhand der Ergebnisse lassen sich beispielsweise Aussagen darüber treffen, unter welchen Wind- und Tidebedingungen das Referenzschiff gefahrlos in den Hafen einlaufen kann und welche Zufahrtsroute optimal ist. »In manchen Fällen erreicht man schon durch modifizierte Zufahrtswege eine deutlich längere Reaktionszeit – dann können Schiffe auch bei schlechten Witterungsbedingungen noch anlegen«, so Burmeister. Auch Schleppermanöver können in der Simulation durchgespielt werden, um etwa herauszufinden, wie viele Schlepper mindestens nötig sind, um ein Schiff sicher zur Anlegestelle zu bringen. »Die Ergebnisse beziehen sich jedoch immer nur auf eine spezifische Situation – wenn sich nur ein Parameter ändert, kann das zu einer anderen Bewertung führen«, gibt Burmeister zu bedenken. So manövriert sich etwa ein voll beladenes Schiff anders als eines, das nur zur Hälfte beladen ist. Dies muss im hydrodynamischen Modell berücksichtigt werden. Testläufe von der Stange gibt es nicht. Die Daten werden in Absprache mit dem Kunden – das sind in der Regel Hafenverwaltungen, Terminalbetreiber oder Ingenieurbüros – situationspezifisch angepasst.



Reibungslos wie am Computer; Das Hamburger Fraunhofer CML bietet Dienstleistungen rund um den sicheren Hafen. (© Fraunhofer IML) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)

## Solarmodule in Glas gebettet

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 6

In elektronischen Geräten kommen sie heute teilweise schon zum Einsatz: organische Solarmodule (OPVs), die in eine Folie eingebettet sind. Solche OPVs sind eine vielversprechende Alternative zu siliziumbasierten Solarzellen: So lassen sich die Materialien auch unter Atmosphärendruck verarbeiten. Vor allem aber können die Module mittels Drucktechniken hergestellt werden – das ist schneller und effizienter als die aufwändigen Prozesse, die zur Fertigung von anorganischen Bauteilen nötig sind. Voraussetzung für eine Fertigung im Druckverfahren ist ein flexibles substratartiges Trägermaterial. Bislang kommen Polymerfolien zum Einsatz, die jedoch folgenden entscheidenden Nachteile haben: Die Folien sind bis zu einem gewissen Grad durchlässig für Wasserdampf und Sauerstoff. Beide greifen die empfindlichen Solarmodule an und vermindern deren Lebensdauer beträchtlich. In Abhängigkeit von den Anwendungen haben bisher Substrate mit Barrierschichten die OPV-Module geschützt. Für höhere Prozesstemperaturen und eine längere Lebensdauer muss man andere Trägersubstrate verwenden.

### Extrem stark und bruchfest

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam arbeiten derzeit mit einem neuen Trägermaterial: Sie betten die Solarmodule in hauchdünnes Glas ein. »Glas ist nicht nur ein ideales Verkapselungsmaterial, sondern hält auch Bearbeitungstemperaturen bis zu 400 Grad aus«, erklärt Danny Krautz, Projektleiter in der Abteilung Funktionsmaterialien und Bauelemente am IAP. Bei den Forschungsarbeiten kommt ein Spezialglas der Corning Inc. zum Einsatz. Dank seiner speziellen physikalischen Eigenschaften lassen sich Lagen von nur 100 Mikrometer Dicke realisieren. Das entspricht ungefähr einem Blatt Papier und hat nicht viel mit den Gläsern zu tun, aus denen wir täglich unser Wasser trinken. Das Spezialglas ist nicht nur extrem stark und bruchfest, sondern sogar in festem Zustand noch so flexibel, dass es leicht gewölbt werden kann. Mit diesem Material konnten die Potsdamer Forscher gemeinsam mit dem Kooperationspartner Corning in Sheet-to-Sheet-Prozessen schon erste funktionsfähige OPVs realisieren. Die Verarbeitung funktioniert dabei in Stapeln.

### Fertigung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

Ziel ist es, diese Module auch im Rolle-zu-Rolle-Verfahren zu fertigen: Ähnlich wie beim Zeitungsdruck wird dabei das Trägersubstrat auf einer Rolle aufgewickelt. Gegenüber befindet sich eine leere Rolle. Zwischen beiden Rollen werden in mehreren Prozessen die photoaktiven Schichten und Elektroden aufgedruckt. Mit dieser Fertigungstechnologie lassen sich große Flächen effektiv in Serie herstellen. Einen ersten Test, das flexible Glas auf diese Weise zu bearbeiten, hat das IAP-Team bereits unternommen: »Uns ist es gleich im ersten Anlauf gelungen, mit kleineren Substratgrößen homogene Schichten herzustellen«, so der Wissenschaftler. Damit das Verfahren industriellen Ansprüchen genügt, muss die Prozesstechnologie an vielen Stellen angepasst werden – doch

daran arbeiten die Potsdamer bereits. Mit der Technologie ließen sich langfristig robuste und leistungsstarke OPVs für unterschiedlichste Anwendungen realisieren – von winzigen Solarzellen im Mobiltelefon bis hin zu großflächigen Photovoltaikmodulen.



**Gedruckte Organische Solarzellen auf ultradünnem Glas. (© Fraunhofer IAP) | Bild in Farbe und Druckqualität: [www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)**

## Kollisionen mit Robotern – ohne Verletzungsrisiko

FORSCHUNG KOMPAKT

06 | 2014 || Thema 7

Wer kennt das nicht: Da passt man einmal kurz nicht auf, und schon ist man gegen die Tischkante gestoßen. Zunächst tut es weh, ein wenig später breitet sich ein blauer Fleck aus. Was beim Tisch in die Kategorie »Nicht schlimm, aber ärgerlich« fällt, bekommt eine neue Dimension, wenn es sich bei dem Kollisionspartner um einen Roboter handelt. Denn beim Zusammenprall könnte der Mensch ernsthafte Verletzungen davontragen. Daher arbeiten die technischen Gehilfen derzeit meist noch hinter Schutzzäunen und Absperrgittern. Allerdings gibt es auch Anwendungen, bei denen Mensch und Roboter Hand in Hand arbeiten sollen. Die Kooperation zwischen beiden ist daher einer der Forschungsschwerpunkte in der Robotik weltweit. Doch wo genau liegt die Grenze zwischen einem harmlosen Zusammenstoß und einer Verletzung?

### Kleine Stöße, große Erkenntnisse

Wie viel Kraft ist bei einem Stoß nötig, um an unterschiedlichen Körperstellen einen blauen Fleck zu bekommen? Wann tragen Menschen eine bleibende Verletzung davon? Das konnte bislang niemand genau sagen. Es gibt keine umfangreichen Studien zu diesem Thema. Auch die Kollisionsgeometrie, sprich die Geometrie der aufeinander-treffenden Objekte, hat großen Einfluss auf die Verletzungsschwere bei einem Zusammenstoß. Die Forscher am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg betreten mit einer neuen Studie gänzlich unerforschtes Terrain: Sie untersuchen systematisch, wo die maximal zulässige Belastung liegt, wenn Roboter und Mensch zusammenprallen.

Die Vorgehensweise der Forscher: Sie beschweren ein Pendel mit verschiedenen Gewichten, lenken es aus und lassen es gegen verschiedene Körperstellen der Studienteilnehmer stoßen. Die Druckverteilung beim Aufprall misst eine spezielle Sensorfolie an der Stoßseite des Pendels. Ein Kraftsensor, der sich ebenfalls an der Stoßseite befindet, ermittelt den Verlauf der Kontaktkraft, die maximal wirkende Kraft und die Einwirkdauer. »Somit können wir alle relevanten Messgrößen wie Kraft, Druckverteilung, Aufprallgeschwindigkeit sowie Impuls und Energie ermitteln«, sagt Dr. Norbert Elkmann, Geschäftsfeldleiter am IFF.

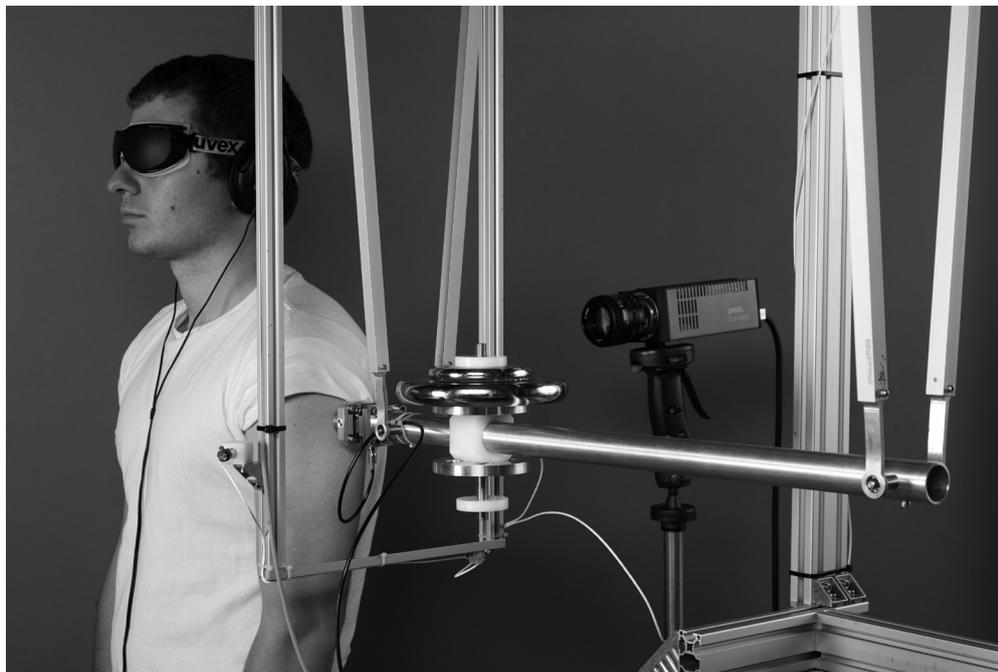
Von medizinischer Seite wird die Studie vom Institut für Rechtsmedizin, der Klinik für Dermatologie, der Klinik für Unfallchirurgie sowie dem Institut für Neuroradiologie des Uniklinikums der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg begleitet. Für die Untersuchung hat die Ethik-Kommission der Otto-von-Guericke-Universität ihr zustimmendes Votum erteilt. Abbruchkriterien der Versuche sind die beginnende Entstehung von Schwellungen oder Hämatomen oder das Erreichen der Schmerzschwelle.

In der Pilotphase haben die Wissenschaftler zunächst die Messtechnik entwickelt und die Methodik verfeinert – gemeinsam mit Medizinern. Mittlerweile produzieren sie in

der Vorphase die ersten Ergebnisse mit mehreren Probanden. Anschließend schätzen die Forscher ab, wie viele Studienteilnehmer nötig sind, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Bei dem weltweit führenden Roboterkongress ICRA in Hongkong werden die Wissenschaftler des IFF im Juni 2014 erste Ergebnisse vorstellen.

Diese können auch von der Kriminalpolizei und der Rechtsmedizin genutzt werden: Kommen Gewaltopfer zu den Beamten oder Ärzten und sind die Unterblutungen schlecht zu sehen, lässt sich meist kaum feststellen, wie intensiv die Gewalteinwirkung war. Opfern wie Ärzten wäre sehr geholfen, wenn die Rechtsmediziner hier auf entsprechende Untersuchungen zurückgreifen könnten.

Auch für den Consumerbereich ist die Studie von Wert: Denn in vielen Haushalten gehören Roboter inzwischen zum Alltag. Sie saugen, wischen die Böden oder mähen den Rasen. In Zukunft dürften die Roboter noch weit mehr Aufgaben im Haushalt übernehmen. Dies ist nur dann möglich, wenn Menschen vor Verletzungen bei Zusammenstößen mit Robotern sicher geschützt sind. Die grundlegenden Daten dafür ermittelt das IFF in der Studie, deren Resultate in international gültige Normen einfließen werden.



Proband bei der Belastungsstudie. (© Fraunhofer IFF) | Bild in Farbe und Druckqualität:  
[www.fraunhofer.de/presse](http://www.fraunhofer.de/presse)

## Mehr Sicherheit für Reisepässe

»Passkontrolle«, schallt es einem entgegen, wenn man braungebrannt aus dem Urlaub am heimischen Flughafen eintrudelt. Der Pass begründet die Identität, aber es sind auch viele Fälschungen im Umlauf. Forscher am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD in Darmstadt entwickeln im EU-Projekt »FIDELITY« Lösungen und Konzepte, um diese Dokumente besser vor Betrügern zu schützen (<http://www.fidelity-project.eu/>). Eine wichtige Rolle spielt bei den Forschungen die Geburtsurkunde. Wer einen neuen Pass beantragt, muss diese vorlegen – zumindest beim ersten Mal. Doch allein in den 50 Staaten der USA gibt es 10 000 verschiedene Arten von Geburtsurkunden. In Europa sieht die Situation nicht viel besser aus. Wie soll ein Beamter erkennen, ob das Dokument echt ist? Hat die Behörde den Reisepass jedoch erst einmal ausgestellt, so ist dieser gültig – auch wenn sich später herausstellen sollte, dass die Geburtsurkunde gefälscht war. Um die Sicherheit der Geburtsurkunden zu erhöhen, integrieren die Forscher beispielsweise einen Barcode, wie man ihn auch von Verpackungen im Supermarkt kennt. Möchte ein Beamter die Echtheit der Urkunde überprüfen, so kann er den Barcode per Computer auslesen und die darauf gespeicherten Informationen mit denen vergleichen, die auf dem Papierdokument stehen. In einem weiteren Schritt optimieren die Wissenschaftler den kompletten Prozess, in dem Pässe beantragt werden.

### Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD

Fraunhoferstr. 5 | 64283 Darmstadt | [www.igd.fraunhofer.de](http://www.igd.fraunhofer.de)

**Kontakt:** Alexander Nouak | Telefon +49 6151 155-147 | [alexander.nouak@igd.fraunhofer.de](mailto:alexander.nouak@igd.fraunhofer.de)

**Presse:** Dr. Konrad Baier | Telefon +49 6151 155-146 | [konrad.baier@igd.fraunhofer.de](mailto:konrad.baier@igd.fraunhofer.de)

## Wasserstoffspeicher für erneuerbare Energien

Wächst der Anteil erneuerbarer Energien, bedeutet dies auch mehr Wetterabhängigkeit: Mal weht der Wind kräftig, mal scheint die Sonne, mal nicht. Doch die Stromnetze in Deutschland sollen Industrie und Haushalte stets stabil und bedarfsgerecht mit Elektrizität versorgen. Die Lösung des Konsortiums »Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany«, kurz »HYPOS«: Überschüssige Energie aus Photovoltaik und Windparks wird zur Elektrolyse genutzt und so gespeichert – aus Wasser wird »grüner« Wasserstoff hergestellt. Dieser lässt sich dann bedarfsgerecht als Alternative zu Erdgas an Tankstellen und für Brennstoffzellen bereitstellen. Mit 45 Millionen Euro fördert das Bundesforschungsministerium »HYPOS« bis 2020. Die Umsetzung soll als Neuheit auch über die Chemische Industrie in Leuna und Böhlen erfolgen. Prof. Dr. Ralf Wehrspohn, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM, Institutsteil Halle, koordiniert das Strategieprojekt und ist stellvertretender Vorsitzender von HYPOS e.V.

Das IWM unterstützt die Großanlagenindustrie in werkstoffwissenschaftlichen Fragen. Um Wasserstoff in Salzkavernen zu speichern und in Pipelines zu verteilen, müssen die

Anlagenbauer die Tank- und Rohrmaterialien für die neue Beanspruchung abhärten. Sie können zum Beispiel durch Gasgemische korrodieren und durch Wasserstoff verspröden. Vorschädigungen, die in Pipelines bei Erdgasbetrieb bedeutungslos sind, verschlimmern sich häufig durch beigemischtem Wasserstoff. An Prüfständen wollen die Forscher die kombinierte mechanisch-korrosive Beanspruchung untersuchen. Zusammen mit dem Fraunhofer-Zentrum für Silizium-Photovoltaik CSP arbeitet das IWM an der Konzeption, Modul- und Komponentenentwicklung von zwei kombinierten Wind-Solar-Parks in Leuna und Böhlen mit, die für die energetische Grundlast der Elektrolyse sorgen sollen.

**Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Institutsteil Halle**

Walter-Hülse-Straße 1 | 06120 Halle | [www.iwm.fraunhofer.de](http://www.iwm.fraunhofer.de)

**Kontakt:** Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn | Telefon +49 345 5589-100 | [ralf.b.wehrspohn@iwmh.fraunhofer.de](mailto:ralf.b.wehrspohn@iwmh.fraunhofer.de)

**Presse:** Clemens Homann | Telefon +49 345 5589-213 | [clemens.homann@iwmh.fraunhofer.de](mailto:clemens.homann@iwmh.fraunhofer.de)

## **Nachhaltig produzieren im urbanen Raum**

Großstadtdschungel oder Landidylle? Bei der Wahl des privaten Wohnorts ist das Geschmackssache. Unternehmen hingegen treffen ihre Standortentscheidung auf Basis einer nüchternen Kosten-Nutzen-Analyse. In den vergangenen Jahren zeichnet sich ein Trend zur Re-Urbanisierung ab. Wissenschaftler des Stuttgarter Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO bieten interessierten Unternehmen Audits an, bei denen individuelle Lösungen für eine erfolgreiche Produktion im städtischen Raum erarbeitet werden. Um eine langfristige Perspektive zu entwickeln, muss die Standortanalyse über eine reine Kostenkalkulation hinausgehen: Vielmehr sollte das Unternehmen sinnvoll in sein Umfeld eingebettet sein und so einen Mehrwert für alle Beteiligten – Unternehmen wie Mitarbeiter, Städte wie Bürger – schaffen.

Welche Chancen eine stadtnahe Produktion bietet, untersuchen die Stuttgarter Forscher im Innovationsverbund »Urban Production«. In Ballungsräumen profitieren Unternehmen vom besseren Zugang zu einem großen Fachkräftepool. Da die Mitarbeiter in der Regel kurze Arbeitswege haben, lässt sich flexibler produzieren. Die räumliche Nähe zu Dienstleistern oder Lieferanten spart Zeit und Geld. Industrieparks bieten einen intensiven Wissensaustausch zwischen den Unternehmen. Der Zwang zu nachhaltigerem Wirtschaften stellt bei einer weltweiten Tendenz zur Verstädterung und schwindenden Ressourcen auch einen Wettbewerbsvorteil dar. Ein urbaner Standort ist jedoch auch mit Herausforderungen verbunden, etwa einer effizienteren und emissionsärmeren Produktion.

**Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO**

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart | [www.iao.fraunhofer.de](http://www.iao.fraunhofer.de)

**Kontakt:** Joachim Lentjes | Telefon +49 711 970-2285 | [joachim.lentjes@iao.fraunhofer.de](mailto:joachim.lentjes@iao.fraunhofer.de)

**Presse:** Juliane Segedi | Telefon +49 711 970-2124 | [juliane.segedi@iao.fraunhofer.de](mailto:juliane.segedi@iao.fraunhofer.de)

---