

bild der wissenschaft plus



Knochenarbeit mit Köpfchen

Forschen für die **Medizin** der Zukunft



Die Antwort der Forscher auf aktuelle Herausforderungen

Neue Erkenntnisse und Lösungen aus Technik und Wissenschaft

Vertiefte Themen, Hintergründe und Zusammenhänge

Verschiedene Perspektiven in Text, Bild und Grafik

Intelligente Unterhaltung und Urlaub vom Bildschirm

Zeit zum Denken

Wissenschaft auf den Tisch!



Wissen was kommt

Das häufigste Element des Universums gilt als Hoffnungsträger für eine nachhaltige und klimaneutrale Energieversorgung. Doch um Kohle, Öl und Gas durch Wasserstoff zu ersetzen, braucht es nicht weniger als eine industrielle Revolution. Die Bundesregierung will sie mit Milliarden anschieben.

Die technologischen Herausforderungen sind derzeit noch gewaltig. Lassen sie sich meistern?

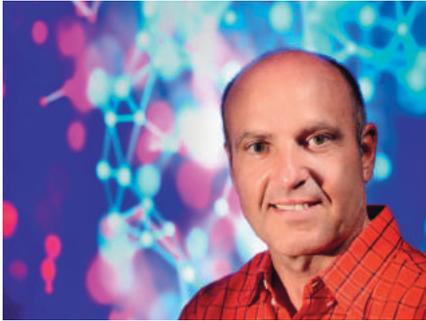
Heft verpasst?

Einzelheftbestellung nutzen

Einfach online bestellen!

bild der wissenschaft
Leserservice
Postfach 810580
70522 Stuttgart
Phone +49 711 7252-201

Zur Online-Bestellung
von Einzelheften und Abos:
www.hier.pro/bdw-magazin



Ralf Butscher,
bild der wissenschaft-Redakteur
für Technologie

Liebe Leserinnen und Leser,

wer nach bedeutsamen neuen Technologien sucht, schaut meist auf die großen Forschungszentren, Max-Planck- und Fraunhofer-Institute, renommierte Universitäten – oder gleich in die USA. Dabei wird auch anderswo Großartiges geleistet – etwa an Hochschulen für angewandte Wissenschaften. Die sind teils enorm stark in der Forschung, was aber oft unter dem Radar der öffentlichen Wahrnehmung bleibt.

Ein Beispiel ist die Hochschule Furtwangen: eine Lehr- und Forschungseinrichtung mit langer Tradition – und sehr erfolgreichen Forschern. Die sind mit ihren Projekten am Puls der Zeit und haben die gesellschaftlichen Erfordernisse der Zukunft im Blick. Eingebettet in ein florierendes Ökosystem aus Unternehmen, die Produkte der Medizintechnik entwickeln, hat sich die Hochschule gerade in diesem Bereich bestens profiliert.

Als Beleg dafür kann ein Bündel aus Partnerschaftsprojekten dienen, die das Bundesforschungsministerium unter dem Titel Connected Health in Medical Mountains, kurz CoHMed, bereits in einer zweiten Runde mit mehreren Millionen Euro fördert. In engem Austausch mit der Industrie stemmen die Hochschulforscher im deutschen Südwesten Forschungsprojekte rund um die Zukunftstrends der Medizintechnik. Die haben es in sich – und das Potenzial, die medizinische Versorgung auf eine neue Basis zu stellen. Es geht etwa um Operationen, Implantate und den Schutz vor Infektionen – und stets um pfiffige Lösungen für knifflige Herausforderungen. Berichte darüber finden Sie in diesem bdw-Sonderheft. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Herzlich, Ihr Ralf Butscher



Die Stuttgarter Fotografin Silicya Roth hat die Forschungsarbeit in den Labs mit einem Blick für das Besondere eingefangen. Fast alle Fotos stammen von ihr.



Dr. Frank Frick ist Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Bornheim bei Bonn. Die Redaktion schätzt ihn seit Langem als vielseitigen Autor.



Der Physiker und Journalist Michael Vogel aus Bietigheim-Bissingen berichtet für bild der wissenschaft regelmäßig über aktuelle Trends aus der Technik.

Inhalt

4 Eine Hochschule auf Hochtouren

Die Hochschule Furtwangen ist ein Motor für die Industrie und prägt das Kulturleben der Region.

8 Ziselieren mit Licht

Mit extrem kurzen Laserblitzen lassen sich die Oberflächen medizintechnischer Bauteile mit zusätzlichen Funktionen versehen.

12 Bioaktiv und knochenhart

Eine besondere Beschichtung lässt robuste Wirbelsäulen-Implantate aus Kunststoff schnell und gut in den Körper einwachsen.

16 „Im Fokus: die Megatrends der Medizintechnik“

Forschen Hand in Hand mit der Industrie: Die beiden Hochschulprofessoren Ulrich Mescheder und Knut Möller im Gespräch.

19 Smarter Schraubendreher

Ein neuartiges Werkzeug soll dafür sorgen, dass Knochenschrauben immer fest genug sitzen.

20 Sensoren mit Gefühl

Die Verbindung von Technologie, Modellierung und Biologie ermöglicht neue Ansätze bei Diagnose und Therapie in der Medizin.

24 Der vernetzte OP-Saal

Aktuelle Daten einer Operation erleichtern die Kooperation von Chirurgen und Anästhesisten.

26 Die Augen der Künstlichen Intelligenz

Wann kann man intelligenter Technik das Auswerten medizinisch wichtiger Bilder anvertrauen?

28 Kampf den Keimen

Krankheitserreger sind auch dort, wo bislang niemand danach gesucht hat: auf Brillen.

32 Gedruckte Implantate

Individuelle Prothesen aus dem 3D-Drucker: Wie sich das Potenzial der Technik voll nutzen lässt.

35 Impressum / Bildnachweise



FORSCHEN FÜR DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT
Die Medizintechnik wird künftig viele neue Perspektiven bieten – etwa für Menschen, die erkrankt sind oder ein künstliches Gelenk benötigen. Mit Partnern aus der Industrie legen Forscher der Hochschule Furtwangen die Basis dafür.

Für eine bessere Lesbarkeit verwenden wir in diesem Heft das generische Maskulinum. Das heißt, Bezeichnungen in der maskulinen Form wie Forscher oder Wissenschaftler stehen sowohl für männliche als auch weibliche Personen.



Eine Hochschule auf Hochtouren

Was einst als großherzogliche Uhrmacherschule begann, ist heute ein Motor für technischen Fortschritt und wirtschaftliche Stärke in der Region zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb. Wie erfolgreich an der Hochschule Furtwangen geforscht wird, zeigt sich vor allem bei innovativer Medizintechnik.

von RALF BUTSCHER

Nächste Station: Schwenningen Bahnhof“, tönt es aus dem Lautsprecher im Zug. Wer hier aussteigt und den Bahnhof Richtung Innenstadt verlässt, steht direkt vor mehreren imposanten Gebäuden, die wirken wie das Ensemble einer großen Fabrik. Tatsächlich befand sich hier einst die Kienzle Uhrenfabrik: ein inzwischen nicht mehr existierendes Traditionsunternehmen aus der Region, das in und um Schwenningen

einst vielen Menschen einen Arbeitsplatz bot. Heute befindet sich auf dem ehemaligen Werksgelände inmitten der Stadt der Campus Schwenningen der Hochschule Furtwangen (HFU), der 1988 gegründet wurde.

Hinter den Mauern mit einer langen industriellen Geschichte verbergen sich nun Büros, Hörsäle, Seminarräume, eine moderne Bibliothek und mit Hightech vom Feinsten ausgestattete Forschungs-

labore. Denn die Hochschule Furtwangen hat sich nicht nur die akademische Ausbildung junger Menschen in einem breiten Spektrum von Studiengängen auf ihre Fahnen geschrieben. Sie gehört – das belegen zahlreiche vergleichende Ranglisten – auch zu den forschungsstärksten Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Deutschland.

Am Standort Schwenningen wird vor allem die Forschung im Bereich der Medi-

Die HFU in Zahlen

Gründung:

1850 (als Uhrmacherschule)

1947 (als Ingenieurschule)

1971 (als Fachhochschule)

Studierende:

über 5600

Mitarbeitende:

etwa 420

davon Professorinnen und Professoren:

180

Zahl der Studiengänge:

54

Standorte:

Campus Furtwangen

Campus Villingen-Schwenningen

Campus Tuttlingen

Studienzentren Freiburg und Rottweil

Infos unter: www.hs-furtwangen.de



Inspirierend: die Hochschule in Furtwangen, Tuttlingen und Villingen-Schwenningen (von links).

zintechnik großgeschrieben. Hier ist auch das Institut für Technische Medizin (ITeM) untergebracht. Dort und an anderen Instituten arbeiten die Forscher und ihre Teams unter anderem an einer besseren molekularen Diagnostik für verschiedene Erkrankungen, an neuartigen, automatisierten Beatmungssystemen und an Methoden, um medizinische Daten mithilfe von künstlicher Intelligenz besser nutzbar zu machen.

Eine Partnerschaft für Innovationen

„Der Fokus unserer Forschung liegt auf den großen Zukunftstrends der Medizin“, sagt Ulrich Mescheder, Hochschul-Prorektor für Forschung, Entwicklung und Technologietransfer sowie Leiter des Technologielabors für Mikro- und Nanosysteme (siehe Interview S. 16, „Im Fokus stehen die Megatrends der Medizintechnik“). Mescheder bezieht sich damit vor allem auf Forschungsprojekte im Rahmen von CoHMed. Die Abkürzung steht für „Connected Health in Medical Mountains“ – und damit für eine Technologie- und Innovationspartnerschaft der Hochschule Furtwangen mit etlichen Industrieunternehmen, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit 2017 fördert. 2021 begann eine zweite, vierjährige Förderphase von CoHMed.

Einige Beispiele für die Ziele und Erfolge der Forschung in CoHMed-Projekten zeigen die Beiträge auf den folgenden Seiten dieses Hefts.

Ausweis der Forschungsstärke

Für die Hochschule Furtwangen ist diese Partnerschaft etwas Besonderes, betont Prorektor Mescheder. Denn sie kann damit Industrieunternehmen ihre Stärken in der Medizintechnik-Forschung demonstrieren – und sich als kompetente Ansprechpartnerin auch für knifflige technologische Fragen präsentieren. „Daher haben wir die wichtigen Zukunftstrends von Anfang an gemeinsam mit der Industrie analysiert und die Unternehmen bei der Auswahl der Forschungsprojekte eingebunden“, betont Ulrich Mescheder.

Traditionell sind viele Unternehmen in der Region zwischen Schwarzwald, Schwäbischer Alb und dem Westufer des Bodensees in der Medizintechnik aktiv. Sie stellen etwa Operationswerkzeuge, bildgebende Systeme oder technische Implantate her. „Je nachdem, wie man rechnet, gibt es allein in und um die Stadt Tuttlingen 300 bis 500 Medizintechnikfirmen unterschiedlicher Größe“, sagt Mescheder. Aus diesem Grund werben die Wirtschaftsverbände dort für sich mit dem Slogan, das „Weltzentrum der Medizintechnik“ zu sein.

Wie eng die Verflechtung der Hochschule mit der regionalen Wirtschaft ist, zeigt das Beispiel Tuttlingen eindrucksvoll: Als der Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften bei den dortigen, teils kräftig wachsenden Unternehmen nach der Jahrtausendwende immer weiter stieg, schlossen sich Politik, die Stadt und der Landkreis Tuttlingen sowie Wirtschaft und Hochschule zusammen und forcierten den Aufbau eines Hochschulstandorts in der Stadt an der oberen Donau.

Der Erfolg des Tuttlinger Modells

Zudem wurde ein privater Förderverein gegründet, um diese Entwicklung zu beschleunigen, auch durch finanzielle Beiträge – eine in Deutschland bislang beispiellose Form der Unterstützung. Sie wurde bekannt als das „Tuttlinger Modell“. Das erfolgreiche Ergebnis: Seit 2009 hat die Hochschule Furtwangen neben Furtwangen und Villingen-Schwenningen auch einen Campus in Tuttlingen, wo inzwischen mehrere Hundert junge Menschen studieren – viele mit Schwerpunkt auf der Medizintechnik.

Die örtlichen Unternehmen profitieren davon enorm, betont Johannes Fallert, Leiter Forschung und Vorausbildung beim Tuttlinger Hersteller von Endoskopiegeräten Karl Storz (siehe Interview Seite 7, „Wir pflegen eine gute und sehr



enge Zusammenarbeit“): zum Beispiel durch die Möglichkeit zu Fortbildungen in neuen Technologien, gemeinsamen Forschungsprojekten sowie der Hochschule als Pool für potenzielle künftige Fachkräfte.

Am Anfang waren die Uhren

Trotz der in den letzten Jahrzehnten stark gewachsenen Bedeutung von Medizin und Medizintechnik ging die Keimzelle der heutigen Hochschule aus einem anderen, für den Schwarzwald charakteristischen Bereich hervor: der Fertigung von Uhren. „1850 gründete der Ingenieur Robert Gerwig in Furtwangen eine Uhrmacherschule“, berichtet HFU-Sprecherin Jutta Neumann: die Großherzoglich Badische Uhrmacherschule Furtwangen – die erste solche Einrichtung in Deutschland. Das Deutsche Uhrenmuseum in Furtwangen zeugt immer noch von dieser Zeit und ist bis heute ein Bestandteil der Hochschule.

Die entstand schließlich 1971 als Fachhochschule aus einer Staatlichen Ingenieurschule, die nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs aus der ehemaligen Uhrmacherschmiede hervorgegangen ist – mit einer starken Ausrichtung auf die Feinwerktechnik.

Dieser Fokus ist am Angebot der Studienbereiche heute immer noch erkennbar – auch wenn im Lauf der Jahre viele neue Studienfächer hinzugekommen sind und sich das Angebot der Hochschule enorm

erweitert hat. Sie bietet heute auch die Möglichkeit, zum Beispiel Business Consulting, Design interaktiver Medien oder Hebammenwissenschaft zu studieren – ein klarer Beleg für das hohe Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Hochschule an neue ökonomische, technische oder gesellschaftliche Entwicklungen.

„Die starke Orientierung unserer Forschung an der Weiterentwicklung der medizinischen Technik basiert zum einen auf dem großen Bedarf der Industrie an Fachleuten auf diesem Gebiet“, erklärt HFU-Sprecherin Jutta Neumann. „Doch er fußt auch stark auf den beteiligten Personen. Da profitieren wir von der enormen Forschungsstärke unserer Professorinnen und Professoren.“

Anschub für die Interdisziplinarität

Einer davon ist Knut Möller, der das ITeM am Standort Villingen-Schwenningen leitet und zusammen mit seinem Team an etlichen Forschungsprojekten im Bereich der Medizintechnik mitwirkt, auch im Rahmen der CoHMed-Partnerschaft. „Eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit ist für die Lösung zahlreicher wissenschaftlicher Fragestellungen entscheidend“, betont Möller. „Und da hat uns CoHMed nicht nur mit Blick auf die Kooperation mit Unternehmen aus der Industrie, sondern auch innerhalb der Hochschule einen großen Schritt weitergebracht.“

Dass die Institutionen der Hochschule Furtwangen auf mehrere Standorte verteilt sind, ist dafür kein Hindernis. Das hat nicht zuletzt die Zeit der Corona-Krise gezeigt, als der Austausch zwischen den Teams oft nur auf virtuellem Weg möglich war. In normalen Zeiten sind auch Institute an anderen Orten rasch und auf kurzen Wegen zu erreichen – sowohl mit dem Auto als auch mit der Bahn, die in den drei Landkreisen Schwarzwald-Baar, Tuttlingen und Rottweil auf einer Ringstrecke unterwegs ist.

Ein Leuchtturm für die Region

Die gute Verkehrsinfrastruktur verstärkt noch die verbindende Wirkung der Hochschule auf die Region. „Wir sind hervorragend vernetzt mit allen wichtigen Akteuren“, sagt Jutta Neumann – mit den Verwaltungen in Städten und Landkreisen, öffentlichen Einrichtungen und Unternehmen. „Ich würde uns als Leuchtturm in der Region bezeichnen“, meint die HFU-Sprecherin: als eine Institution, von der die Menschen auf ganz unterschiedliche Weise profitieren.

So veranstaltet die Hochschule Furtwangen regelmäßig einen Gesundheitskongress, auf dem Wissenschaftler von den neuesten Erkenntnissen und Fortschritten in der Medizin berichten. Sie fördert den digitalen Wandel in der teils recht ländlich geprägten Region durch die Beteiligung an Forschungsprojekten wie dem Digitaldialog 21. Mehreren kon-



Die Hochschulbibliothek ermöglicht entspanntes und erfolgreiches Lernen.

kreten Aspekten des strukturellen Wandels gehen Forscher des Hochschule Furtwangen mit ihren Teams in Projekten nach. Im Visier haben sie dabei zum Beispiel die Technik für einen Ausbau schneller Breitbanddatennetze oder die Möglichkeiten, um Wasserstoffantriebe

als Alternative zu Verbrennungsmotoren und elektrischen Antrieben mit Batterie zu nutzen.

Doch es muss nicht immer Forschung sein. So gibt es auch für Menschen mit eher sportlichen Ambitionen Angebote: etwa den jedes Jahr im Herbst von der

HFU veranstalteten „Black Forest Run“ – einen Halbmarathon, der 10 oder 21 Kilometer weit entlang des Donauquellflüsschens Breg führt.

Dass möglichst viele Menschen auch im fortgeschrittenen Alter noch die nötige Fitness haben, um sich weitgehend ungehindert und schmerzfrei zu bewegen – dazu wollen die Forscherteams an den Instituten der Hochschule Furtwangen auch künftig beitragen. Sie hoffen, dass sie anwendungsnahe Forschungsprojekte dazu auch nach dem Ende der staatlichen Förderung in der CoHMed-Partnerschaft weiterverfolgen können. Dabei setzen sie weiterhin auf einen engen Austausch mit Unternehmen und Kliniken in der Region.

„Das Konkurrenzdenken, das eine Zusammenarbeit mit mehreren Unternehmen früher erschwert hat, ist durch die Erfahrungen in den letzten Jahren ein wenig aufgeweicht worden“, freut sich Forscher Knut Möller. Diese Freude dürften viele Menschen mit ihm teilen, die auf weitere Fortschritte in der Medizintechnik hoffen. ■



„Wir pflegen eine gute und sehr enge Zusammenarbeit“

Dr. Johannes Fallert leitet den Bereich Corporate Research & Technology beim Tuttlinger Medizintechnik-Unternehmen Karl Storz. Im gegenseitigen Austausch mit der Hochschule sieht er einen großen Gewinn für beide Seiten.

In welcher Form kooperiert Karl Storz mit der Hochschule Furtwangen?

Die Zusammenarbeit läuft auf mehreren Ebenen. Zum einen arbeiten wir in gemeinsamen Forschungsprojekten eng zusammen, zum Beispiel im Rahmen von CoHMed. Zum anderen bieten wir Studenten an, bei uns im Unternehmen etwa Praktika oder Abschlussarbeiten zu machen. Umgekehrt nehmen regelmäßig auch Mitarbeiter aus unserem Unternehmen an Fortbildungen der Hochschule Furtwangen teil. Die Verzahnung von Ausbildung und Studium ist etwas Be-

sonderes, das wir zu schätzen wissen – ebenso wie die fachliche Expertise der Hochschule Furtwangen.

Wie nutzen Sie diese Expertise noch?

Das Innovations- und Forschungs-Centrum IFC der Hochschule, das 2018 in Tuttlingen gegründet wurde, bietet regelmäßig Workshops und Veranstaltungen an, an denen unsere Mitarbeiter ebenfalls gerne teilnehmen. Zudem profitieren wir durch Absolventen, die nach ihrem Studium bei uns im Unternehmen eine Stelle finden.

Welche inhaltlichen Ziele verfolgen Sie?

Ein Schwerpunkt unserer Projekte liegt darauf, Medizinprodukte intelligenter zu machen.

Gibt es Hemmnisse in der Kooperation?

Die Antragstellung neuer Projekte im Rahmen von Forschungsprogrammen bedeutet oft eine gewisse Unsicherheit in der Antragstellung. Dadurch ist es manchmal schwierig, die Projekte gezielt in unsere Unternehmensplanung einzubinden. Denn wir wissen vorher nicht, wann und ob wir gemeinsam in einem solchen Programm loslegen können.



Die Forscher erzeugen flexibel Femtosekunden-Laserpulse im grünen oder infraroten Spektralbereich.

Ziselieren mit Licht

In extrem kurzen Laserblitzen sieht Bahman Azarhoushang ein neues Werkzeug für die Medizintechnik. Bauteiloberflächen bekommen durch den Ansatz zusätzliche Funktionen.

von MICHAEL VOGEL

Flüssigkeiten sollten von Operationsbesteck abperlen. Implantate sollen rasch und möglichst fest in einen Knochen einwachsen. Außerdem sollten Implantate keine Entzündungen verursachen. Auf den ersten Blick haben diese drei Sätze nur wenig miteinander zu tun. Doch bei genauerer Betrachtung ergibt

sich ein anderes Bild: In der Medizintechnik geht es immer auch darum, Oberflächen so zu gestalten, dass sie die gewünschte Wirkung eines Produkts oder Geräts begünstigen.

Wenn die Oberfläche einer OP-Schere so glatt ist, dass Blut und Gewebereste kaum haften bleiben können, dann ist das per se

gut. Wenn die Oberfläche eines Hüftimplantats an der Stelle, wo sie mit dem Knochen zusammenwachsen soll, das Zellwachstum begünstigt, dann ist das Bein wieder schneller belastbar. Und wenn sich Prothesen vor der Implantation gut sterilisieren lassen, dann haben Bakterien keine Chance. Wie eine Oberfläche beschaffen

ist, entscheidet also maßgeblich mit über den Erfolg oder Misserfolg einer Operation.

Bahman Azarhoushang, Professor an der Fakultät Mechanical and Medical Engineering der Hochschule Furtwangen, hält den Laser für das optimale Werkzeug, um zahlreiche erstrebenswerte Oberflächeneigenschaften zu verwirklichen. Der Ingenieur leitet das Kompetenzzentrum für Spanende Fertigung. „Mit dem Laser können wir Oberflächenstrukturen sehr flexibel und mit extrem hoher Wiederholgenauigkeit herstellen“, sagt der Forscher. „So lassen sich Oberflächen funktionalisieren.“

In der industriellen Fertigung spielt der Laser schon lange eine wichtige Rolle. Er kann zum Beispiel Bleche schweißen oder schneiden – schnell und präzise, selbst wenn die Bleche eine komplexe geometrische Form haben müssen. Doch wenn Azarhoushang vom Laser redet, dann denkt er an eine bestimmte Gruppe von Lasern, die erst seit ungefähr einem Jahrzehnt als industriell nutzbares Werkzeug zur Verfügung stehen: die Ultrakurzpulslaser. Wie der Name vermuten lässt, fällt der Laserstrahl dabei zwar wiederholt, aber immer nur für eine kurze Zeitspanne auf die Oberfläche des Werkstücks. Besser wäre, von einer extrem kurzen Zeitspanne zu sprechen, denn sie liegt im Bereich zwischen Pikosekunden und einigen Femtosekunden.

Unvorstellbar kurze Augenblicke

Eine Pikosekunde ist der billionste Teil einer Sekunde, eine Femtosekunde der milliardste. Es sind unvorstellbar kurze Augenblicke. „Eine Pikosekunde verhält sich zu einer Sekunde wie ein Tag zum Alter des Universums“, verdeutlicht Azarhoushang die Dimensionen. Eine Femtosekunde entspräche in diesem Vergleich mit dem Weltalter gut einer Minute.

Wirkt ein Laser stets nur für so kurze Sekundenbruchteile auf ein Werkstück ein, hat das entscheidende Vorteile. „Die Oberfläche, und damit das ganze Werkstück, erhitzt sich kaum, weil die Elektronen eines Materials in so kurzer Zeit keine Wärme an das Gitter, also an die mikroskopische Struktur eines Festkörpers, weiterleiten können“, sagt Azarhoushang.



Mit einer 5-Achsen-Anlage (oben) lassen sich Bauteile präzise per Laser bearbeiten (links: Werkstück mit mikrostrukturierter Keramikbeschichtung).

„Das Material, das durch die ultrakurzen Laserpulse abgetragen wird, geht unmittelbar vom festen Zustand in die Gasphase über.“

Eine stärkere Erwärmung durch längere Pulsdauern würde hingegen dazu führen, dass das abgetragene Material zunächst flüssig wird und sich erst dann zum Teil als Gas verflüchtigt, während der Rest sich während des Abkühlens als Tropfen auf dem Werkstück niederschlägt und erstarrt.

Es sind Dinge, die man eigentlich zu vermeiden versucht, aber zum Beispiel beim Schneiden eines Blechs nicht vermeiden kann. Ultrakurzpulslaser richtig angewandt, verursachen keine hitzebedingten Schäden. „Daher können wir mit ihnen extrem genaue Strukturen erzeugen, im Bereich von Mikrometern oder noch weitaus kleiner“, sagt der Forscher.

Solche Strukturen können mehr oder minder große Poren sein, parallel verlaufende oder sich kreuzende Furchen, gleichmäßige Anordnungen von Hügeln oder Löchern. „Wir können komplexe Oberflächen erzeugen, weil wir im Raum sowohl das Werkstück beliebig bewegen können als auch den Laserstrahl“, erklärt Bahman Azarhoushang. „Zudem können wir bei verschiedenen Laserwellenlängen

arbeiten: Absorbiert ein Material zum Beispiel schlecht im infraroten Spektralbereich, wählen wir eine Wellenlänge, bei der die Absorption stärker ausfällt – etwa im Bereich des sichtbaren Lichts.“

Da sich darüber hinaus auch der Durchmesser des Laserstrahls einstellen lässt, stehen Werkzeuge mit unterschiedlicher Breite zur Verfügung – so ergeben sich die erreichbaren Größenordnungen der Strukturen, von einigen Dutzend Mikrometern bis unter einem Mikrometer. „Wir können Metalle, Legierungen, Kunststoffe, Keramiken oder Gläser bearbeiten“, verdeutlicht Azarhoushang die Spanne der Möglichkeiten bei den Materialien. An der Geschwindigkeit scheitert der Ansatz auch nicht: Abtragungsraten von 500 Quadratmillimeter pro Minute sind kein Problem. Der Oberflächenfunktionalisierung scheinen keine Grenzen gesetzt zu sein.

Nun ist es nicht so, dass solche Funktionalisierungen in der Medizintechnik bislang nicht möglich waren. Es geht auch ganz ohne Laser. Schleifen zum Beispiel ist ein Verfahren, mit dem sich eine bestimmte Rauigkeit auf einer Oberfläche erzeugen lässt. Auch Beschichtungen aus zusätzlichen Materialien sind möglich. Titan etwa ist ein Material, das gera-



Die Wissenschaftler forschen mit etlichen Geräten an Medizintechnik-Produkten.

de in der Medizintechnik dafür häufig verwendet wird. Es korrodiert nicht und die Immunabwehr des Körpers stößt es nicht ab – das ideale Oberflächenmaterial, gerade wenn das Trägermaterial keine dieser positiven Eigenschaften aufweist.

Ein drittes Beispiel ist das chemische Ätzen. Dabei lässt man Chemikalien gezielt auf die zu bearbeitende Oberfläche einwirken, um sie entsprechend zu strukturieren. Damit das nur an den gewünschten Stellen geschieht, muss der Rest der Oberfläche „maskiert“ und dadurch geschützt sein.

Ein Minimum an Abfall

„Auch, wenn all diese Verfahren ihre Berechtigung haben, so weist jedes von ihnen spezifische Nachteile im Vergleich zur Laserfunktionalisierung auf“, sagt Azarhoushang. Beim Schleifen setzen besonders die Werkzeuggeometrie sowie die Kräfte und Temperaturen des Prozesses physikalische Grenzen. Zudem gibt es nur relativ wenig Spielraum für die auf der Oberfläche herstellbaren Geometrien. Beschichtungen wiederum können sich im Lauf der Zeit an einzelnen Stellen vom

Trägermaterial ablösen. Dort wird dann unter anderem das Problem der Korrosion wieder akut.

Das chemische Ätzen schließlich ist ein Prozess, der zunächst unter hohem Aufwand an die zu bearbeitende Aufgabe angepasst werden muss. Denn zwischen dem Material der Oberfläche und den Chemikalien kommt es zu Wechselwirkungen. Bei Prototypen oder Kleinserien kann das schnell zu teuer werden. „Zudem entstehen bei allen drei Ansätzen durch Kühlschmierstoffe, Reinigungs- oder Ätzmittel Abfälle, die aufwendig entsorgt werden müssen“, gibt Azarhoushang zu bedenken. „Dagegen bleibt bei der Bearbeitung mit Ultrakurzpulslasern als Abfall nur das vom Werkstück abgetragene Material übrig.“

Der Wissenschaftler und sein Team befassen sich nun seit knapp zwei Jahren intensiv mit der Oberflächenfunktionalisierung in der Medizintechnik. „Es ist ein sehr junges Forschungsgebiet, die Technologie steckt noch in den Kinderschuhen“, betont der Forscher. Wo Ultrakurzpulslaser bereits eine Rolle in der Industrie spielen, ist beim Markieren von Pro-

dukten und Bauteilen. Man kann mit den flinken Lasern Nummern, Barcodes und Hologramme anbringen, ohne dass sich die Eigenschaften des Grundmaterials dadurch verändern. Diese Form des Fälschungsschutzes dürfte künftig auch in der Medizintechnik eine Rolle spielen. Denn derzeit baut die EU eine Datenbank auf, um die Authentizität von Medizinprodukten verifizieren zu können. Damit einher geht eine Kennzeichnungspflicht mit einem Identifizierungs-Code.

Verbesserte Hafteigenschaften

Doch um diese dreht es sich nicht in Azarhoushangs Arbeit. Bei ihm sollen die ultrakurzten Laserpulse vielmehr zu einer unmittelbaren Funktionalität der Oberfläche führen. So hat sein Team zusammen mit einem Industriepartner ein Verfahren erforscht, mit dem sich die Haftung von beschichteten Werkstücken steigern lässt. „Interessant ist das zum Beispiel für die Beschichtung mit Titan, aber auch für die Beschichtung mit Diamant“, sagt der Ingenieur. „Durch eine Strukturierung der Oberfläche des Trägermaterials ist es uns gelungen, dass sol-



Furtwangen erforscht Azarhoushangs Team, wie sich zum Beispiel die Oberflächen von Hüftprothesen gestalten lassen, damit es an der Grenze zwischen Knochen und Implantat zu keinen Entzündungen durch bakterielle Verunreinigungen kommt. „Die Zellen des Knochengewebes und die Bakterien haben ganz unterschiedliche Anforderungen, um sich ausbreiten zu können“, erklärt der Wissenschaftler. „Wenn wir für die Oberfläche des Implantats die passenden Strukturgrößen und Geometrien finden, gelingt den Bakterien kaum noch eine Ansiedlung, den menschlichen Zellen dagegen schon.“ Es wäre ein zusätzlicher Schutz vor Komplikationen bei Hüftoperationen.

Sowohl Hüft- als auch Knie-Implantate könnten von einem weiteren Forschungsprojekt profitieren, das Bahman Azarhoushang derzeit gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft plant. „Künftig könnten Prothesen oder Teile von ihnen aus technischen Keramiken bestehen, nicht mehr wie bislang üblich aus Metallen oder Metalllegierungen“, erklärt er. Technische Keramiken sind Verbindungen aus Metalloxiden und haben gegenüber Metallen prinzipiell den Vorteil, dass sie aufgrund ihrer Mikrostruktur reibungsärmer aufeinander gleiten. Reibung bedeutet Abrieb – und wo es weniger Abrieb gibt, da verrichtet eine Prothese länger ihren Dienst.

Vorteile auch bei der Endoskopie

„Die Laserstrukturierung von keramischen Bauteilen für die Medizintechnik ist noch nicht erforscht“, sagt Azarhoushang. Das soll sich bald ändern. Doch die

Oberflächenfunktionalisierung mit Ultrakurzpulslasern muss in der Medizintechnik keineswegs auf Flächen begrenzt sein, die unmittelbar in irgendeiner Form mit menschlichem Gewebe oder Blut in Berührung kommen. Selbst die endoskopische Bildgebung könnte davon profitieren. Viele Eingriffe erfolgen heute bereits als Schlüsselloch-OP. Dabei sieht der Chirurg ein Videobild der Operationsstelle. Damit das klappt, muss durch das Endoskop Licht ins Körperinnere fallen – und die Bildinformation zurück durchs Endoskop auf ein Display gelangen, auf dem sich der Chirurg während des Eingriffs orientiert. Außerdem muss das Operationsbesteck durch das Endoskop geführt werden. Viel Platz gibt es in dieser engen Röhre also nicht. Und je weniger Platz die Einzelkomponenten beanspruchen, desto dünner ließe sich ein solches Endoskop bauen.

„Prinzipiell kann man die Beleuchtung und die Bildsignale durch dieselbe Faseroptik führen“, stellt Azarhoushang fest. „Allerdings erzeugt die Beleuchtung Lichtreflexe, was die Qualität des Videobildes mindert.“ Schuld daran sind die Querschnittsflächen, durch die das Licht der Beleuchtung in die Faser gelangt oder wieder aus ihr austritt. „Mit Ultrakurzpulslasern lassen sich diese Flächen so strukturieren, dass sie unabhängig vom Blickwinkel tiefschwarz wirken“, erläutert der Ingenieur. Die Reflexe wären dann stark unterdrückt. Über die Machbarkeit dieses Ansatzes diskutiert er gerade mit Unternehmen.

Hohe Flexibilität

„Über all diese technischen Möglichkeiten sollte man nicht vergessen, dass die Materialbearbeitung mithilfe von Ultrakurzpulslasern sehr flexibel ist“, betont Bahman Azarhoushang. „Ändert sich der Werkstoff, so müssen wir lediglich die Prozessparameter anpassen, es ist keine neue Maschine erforderlich.“

Das macht das Verfahren auch ökonomisch sehr interessant. „Die Möglichkeiten der Ultrakurzpulslaserbearbeitung sind nur durch die Fantasie und den Willen begrenzt“, ist der Wissenschaftler aus Furtwangen überzeugt. An beidem wird es ihm und seinem Team sicher nicht mangeln. ■

che Beschichtungen besser haften bleiben. Gleichzeitig besitzt das Bauteil weiterhin superhydrophobe Eigenschaften.“ Flüssigkeiten perlen also einfach von seiner Oberfläche ab, ähnlich wie bei den Blättern der Lotuspflanze. Für gewöhnlich verhindert dagegen gerade die Superhydrophobie, dass auf so einer Oberfläche auch erwünschte Partikel einer Beschichtung gut haften.

Gemeinsam mit Kollegen am Institute of Precision Medicine der Hochschule

Ein Ziel des Einsatzes eines Femtosekundenlasers ist es, super-hydrophobe (wasserabweisende), Oberflächeneigenschaften zu erzeugen.



Bioaktiv und knochenhart



So sieht ein Wirbelsäulen-implantat aus dem Kunststoff PEEK aus, bevor es mit Titandioxid beschichtet wird.

Wie bringt man widerstandsfähige Wirbelsäulen-Implantate aus Kunststoff dazu, schnell und gut in den Körper einzuwachsen? Die Antwort fanden Forscher in einer besonderen Beschichtung.

von FRANK FRICK

Wer als Journalist einen Forscher besucht, um sich über dessen Arbeit zu erkundigen, wird heutzutage meist in einen gewöhnlichen Besprechungsraum geführt. Dort zeigt der Wissenschaftler Präsentationsfolien mit vielen Diagrammen und Zahlen, zu denen er wortreiche und oft abstrakte Erklärungen liefert. Nicht so bei Volker Bucher, seines Zeichens Professor für das Lehrgebiet Oberflächentechnologien in der Medizintechnik an der Fakultät Mechanical and Medical Engineering der Hochschule Furtwangen. Denn er führt

erst einmal durch seine Arbeitsumgebung, um die ihn sicher viele akademische Wissenschaftler beneiden – und zu der er vieles beigetragen hat.

Labore in historischer Pulverfabrik

Bucher hat mit seinen Mitarbeitern 2016 Räumlichkeiten in einer faszinierenden und architektonisch bemerkenswerten ehemaligen Industrieanlage im Neckartal bei Rottweil bezogen, weil sich am Campus Villingen-Schwenningen der Hochschule Furtwangen keine geeigneten Laborräume finden ließen. Das abgeschie-

dene Industriegelände im engen Flusstal beherbergte bereits während des Dreißigjährigen Krieges im 17. Jahrhundert mehrere Pulvermühlen, aus denen 1863 die Rottweiler Pulverfabrik mit zeitweise mehr als 2000 Beschäftigten hervorging. Nach dem Ersten Weltkrieg diente das Gelände auch zur Textilproduktion, die 1994 eingestellt wurde. Heute umfasst die historische Industrieanlage 110 Gebäude, von denen 40 als Kulturdenkmäler klassifiziert sind.

„Als Rottweiler Bürger wurde ich darauf aufmerksam gemacht, dass die ehe-

maligen Werkstätten der Pulverfabrik angemietet werden können“, erinnert sich Volker Bucher. „Es stellte sich heraus, dass die ausgedehnten Räumlichkeiten sich sehr gut für Labor- und Praktikumsräume eignen.“

Doch das einmalige Areal ist nur eine der zwei Komponenten, die das „Studienzentrum Rottweil“ ausmachen. Eine große Vielfalt von Beschichtungsanlagen, Prüfständen, Mess- und Analysegeräten bilden die andere Komponente. Für einen Hochschullehrstuhl ist dieser reichhaltige Gerätepark keineswegs selbstverständlich – und Bucher hat ihn auf einem ungewöhnlichen Weg aufgebaut: „Viele der Geräte habe ich über mein wissenschaftliches Netzwerk für wenig Geld, als Spende oder als Dauerleihgabe bekommen, weil sie defekt oder abgeschrieben waren“, sagt der Experte für Oberflächentechnologien. „Dann haben meine Mitarbeiter und studentischen Hilfskräfte die Geräte bei uns aufgebaut, instandgesetzt und, wenn nötig, an unsere speziellen Anforderungen angepasst.“

Atomare Schichten abscheiden

Unter den Geräten im Rottweiler Studienzentrum nimmt eine Anlage eine besonders wichtige Rolle ein. Denn die Wissenschaftler um Bucher setzen eine spezielle Form der sogenannten Atomlagenabscheidung ein, um Modelle von medizinischen Implantaten – beispielsweise zur Wiederherstellung von Sehvermögen oder als Bandscheiben-Platzhalter – zu beschichten. Anschließend erkunden sie, ob die so entstandene Oberfläche bestimmte Eigenschaften des Implantats verbessern kann.

Die Beschichtungen sollen etwa Netzhaut-Chips mitsamt ihrer Elektronik vor den Einflüssen der Körperflüssigkeiten schützen, damit die auch Jahre nach der Implantation noch funktionieren. „Um es mit den Worten eines Kollegen auszudrücken: Diese Anforderung entspricht der, dass man einen Flachbildschirm ins Meerwasser wirft, und der soll dann jahrelang laufen“, schmunzelt Bucher. Im Fall von Bandscheiben-Platzhaltern aus dem Hochleistungskunststoff PEEK (kurz für Polyetheretherketon) soll die Beschichtung bewirken, dass das Implantat möglichst gut einwächst.



In dieser Laboranlage zur plasmaunterstützten Atomlagenabscheidung erhalten die Implantate eine hauchdünne Haut aus Titandioxid.

Bandscheiben-Platzhalter, auch Wirbelsäulen-Cages genannt, kommen bei Operationen insbesondere der Halswirbelsäule aufgrund von Bandscheibenverschleiß zum Einsatz. Ärzte nehmen solche Eingriffe vor, wenn Patienten auch nach monatelanger Medikamenteneinnahme und physiotherapeutischer Behandlung unter sehr starken Rückenschmerzen und Bewegungseinschränkungen leiden oder wenn sogar Lähmungserscheinungen an Schultern, Armen und Händen auftreten.

Sie entfernen dann die betroffene Bandscheibe und bringen das Implantat in den dadurch entstandenen Zwischenwirbelraum ein. Das Implantat stabilisiert das Rückensegment. Es verhindert, dass die Wirbelkörper zusammensinken und dadurch schmerzhaft auf die Nerven in diesem Bereich drücken.

Cages aus dem Leichtmetall Titan, das häufig für Implantate verwendet wird, haben den Nachteil, dass sie deutlich härter und weniger elastisch sind als die natürlichen, knöchernen Wirbelkörper. Das kann dazu führen, dass die alltäglichen Kräfte, denen die Wirbelsäule ausgesetzt ist, vor allem auf den Bandscheiben-Platzhalter wirken, während die umgebenden Wirbelkörper unterbelastet sind.

Die mögliche Folge: Die Wirbelkörper bilden sich zurück, sodass sich das Implantat lockert.

Durchlässig für Röntgenlicht

Der Kunststoff PEEK hat dagegen ungefähr die gleiche Elastizität wie Knochen. Gegenüber Titan hat er einen weiteren Pluspunkt: Er ist für Röntgenstrahlung weitgehend durchlässig. Dadurch können Ärzte das Einwachsen des Implantats und damit den langfristigen Erfolg der Operation mittels Röntgenaufnahmen leicht überprüfen. Doch diesen Vorteilen steht ein wesentlicher Nachteil gegenüber: Während Titan fördert, dass sich Proteine anlagern und Zellen anhaften, ist der unempfindliche Kunststoff biologisch weitgehend inaktiv. Die Folge davon ist: Implantate aus diesem Material wachsen nicht optimal ein.

Kunststoff mit Titanoberfläche

Der Ausweg erscheint naheliegend und wird beispielsweise vom Konstanzer Unternehmen Orthobion beschrrieben: Es überzieht PEEK-Cages mit einer dünnen Oberfläche aus Titan, die sich später im Körper zu Titandioxid umwandelt, um so beim Implantat knochenähnliche Elastizität mit Bioaktivität zu kombinieren.



Volker Bucher (stehend) und Doktorand Felix Blending prüfen am Rasterelektronenmikroskop die Zusammensetzung der Beschichtung.

Das Unternehmen nutzt dazu ein Verfahren, das in einer Hinsicht nicht ideal ist: Mit ihm ist es nur unter großem Aufwand möglich, das Titan gleichmäßig über die gesamte Oberfläche des recht kompliziert geformten Implantats zu verteilen. „Es tritt ein ähnliches Problem auf wie bei dem Versuch, einen dreidimensionalen, rauen Gegenstand einheitlich zu lackieren, wobei der Lackauftrag aus einer unbeweglichen Sprühdüse erfolgen soll“, sagt Volker Bucher. Denn dann werden Bereiche der Oberfläche, die der Sprühdüse nicht zugewandt sind oder von Unebenheiten sozusagen verschattet werden, dünner oder gar nicht lackiert.

An dieser Stelle kommt nun die Idee des Oberflächenspezialisten aus Rottweil ins Spiel, für die Beschichtung von Implantaten aus dem Kunststoff PEEK die Atomlagenabscheidung (ALD) einzusetzen. Dieses aus mehreren Schritten bestehende Verfahren kam ab den 1990er-Jahren in der Computerchipindustrie zur Herstellung von Materialien für Transistoren und Speicherbausteine zum Einsatz. Spä-

ter wurde eine Variante davon entwickelt – die sogenannte ALD mit Plasmaunterstützung (PEALD) –, um auch Materialien beschichten zu können, die durch Erhitzen auf mehrere Hundert Grad Celsius zerstört werden.

„Zur Beschichtung von Objekten aus PEEK mit Titandioxid erwärmen wir Tetrakispropyltitanat (TTIP) auf rund 60 Grad Celsius und leiten den entstehen-

Schritt für Schritt wird das Material in atomar dünnen Schichten aufgetragen

den Dampf in die Vakuumkammer unserer Anlage ein“, erläutert Buchers Mitarbeiter Felix Blending, der gerade seine Doktorarbeit abschließt. Dort lagern sich TTIP-Moleküle an der 100 Grad Celsius heißen PEEK-Oberfläche an. Anschließend leiten die Wissenschaftler das reaktionsträge Edelgas Argon durch die Kam-

mer und spülen damit überschüssiges TTIP heraus. Auf dem PEEK verbleibt somit nur eine einzige Moleküllage TTIP.

Reaktiver Sauerstoff im Plasma

„Im nächsten Schritt lassen wir Sauerstoff einströmen und erzeugen mithilfe der Energie hochfrequenter elektrischer Wechselfelder ein sogenanntes Plasma, in dem äußerst reaktive Sauerstoff-Spezies vorliegen“, erklärt Felix Blending. Diese Sauerstoff-Komponenten reagieren dann mit den TTIP-Molekülen auf der Kunststoffoberfläche zu Titandioxid. Darauf folgt ein weiterer Spülschritt, um überflüssige Reaktionsprodukte aus der Anlage zu entfernen.

Anschließend kann der ganze Prozess so oft wie gewünscht wiederholt werden. Die Wissenschaftler sind somit in der Lage, die Dicke der entstehenden Titandioxid-Schicht bis auf Nanometer genau zu steuern.

„Unter anderem mithilfe von Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop haben wir nachgewiesen, dass sich

Sicherheit im Griff



mit der plasmaunterstützten Atomlagenabscheidung dreidimensionale PEEK-Objekte fehlerfrei und überall einheitlich mit einer 50 Nanometer dicken Titandioxid-Schicht überziehen lassen“, berichtet Bucher. Messungen des Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeitstropfen und der Oberfläche belegen zudem, dass die Oberfläche aufgrund der Beschichtung nicht mehr wasserabweisend ist, sondern sich gut benetzen lässt – eine wichtige Voraussetzung, um vom Körper akzeptiert zu werden.

Die Bioverträglichkeit ist belegt

Dass die beschichteten Implantat-Oberflächen auch tatsächlich biokompatibel und bioaktiv sind, hat die damit beauftragte Firma BioMed Center Innovation mithilfe von Mäuse-Tumorstammzellen nachgewiesen. Auf den mit Titandioxid beschichteten Oberflächen wuchsen innerhalb von zwei Tagen ähnlich viele Zellen wie auf biphasischem Hydroxylapatit – einem Material, das als Knochenersatz beispielsweise in der Gesichtschirurgie verwendet wird. „Auch Versuche über 28 Tage verliefen sehr erfolgreich“, freut sich Felix Blendinger: „Die Stammzellen auf der Oberfläche entwickelten sich zu Knochenzellen und mineralisierten sogar zum Teil zu einem knöchernen Material.“

Was die praktische Anwendung der wissenschaftlichen Ergebnisse aus Rottweil angeht, ist die Freude allerdings nicht ungetrübt: „Während unseres Forschungsprojekts trat in Deutschland eine neue Verordnung in Kraft, die die Zulassung von Medizinprodukten regelt. Wer unser Beschichtungsverfahren für Implantate einsetzen will, muss klinische Studien durchführen – und die sind sehr kostspielig“, klagt Volker Bucher. Das Unternehmen Orthobion, das mit den Forschern kooperiert hat, wird daher die Produktion seiner Wirbelsäulen-Cages nicht umstellen.

Erfolg auf Umwegen

Wissenschaftlich gesehen war das Forschungsprojekt jedenfalls ein Erfolg, der eine Veröffentlichung in einer hochrangigen Fachzeitschrift einbrachte. Darüber hinaus könnten die Forscher mit Blick auf die Geschichte ihrer Arbeitsräume darauf verweisen, dass Erfolg in der Praxis manchmal Umwege nimmt. Denn über Max von Duttonhofer, den Gründer der Rottweiler Pulverfabrik, schreibt die Stadt Rottweil in einer Broschüre: „Seine Erfindung eines rauchlosen Schießpulvers 1884 kam zwar nie über das Versuchsstadium hinaus, sicherte aber dennoch den Aufstieg zum Konzern.“ ■

Infektionsschutz nach Krabbenart

Implantate werden immer zuverlässiger, ihre Herstellung dank 3D-Druck einfacher und an die individuellen Bedürfnisse des Patienten anpassbar. Allerdings: Nach Einsetzen eines Implantats kann es – trotz Behandlung mit Antibiotika – zu bakteriellen Entzündungen kommen. Mitunter bildet sich dadurch ein Biofilm auf der Oberfläche des Implantats, der sein Einwachsen behindert. Beschichtungen, die das verhindern können, werden dagegen häufig vom Körper abgestoßen.

Max Borgolte und Hans-Peter Deigner vom Institute of Precision Medicine der Hochschule Furtwangen fanden eine Lösung für dieses Problem: in Chitosan, einer natürlichen Substanz, die etwa in Krabbenschalen und Insektenpanzern vorkommt. Ihr Vorteil: „Chitosan ist für den menschlichen Körper gut verträglich und wirkt zudem antibakte-

riell“, sagt Borgolte. Beschichtungen daraus könnten daher Infektionen und körperliche Abwehrreaktion verhindern. Doch der Naturstoff hat auch Nachteile. „Er reagiert sehr empfindlich auf Wärme und ist schlecht löslich“, sagt Hans-Peter Deigner. „Das schränkt seine medizinische Anwendbarkeit stark ein.“

Daher zerlegen die Forscher das Chitosan und nutzen nur deren Grundbaustein, das N-Acetylglucosamin. „Diese Verbindung bringen wir in eine Matrix aus einem anderen Material, das sich mechanisch und chemisch besser verarbeiten lässt“, erklärt Deigner. Zudem fügen die Forscher photoaktive Substanzen hinzu, um die Schutzschicht stabil auf der Implantat-Oberfläche zu fixieren. „So ist es uns gelungen, eine widerstandsfähige und Bakterien effektiv abweisende Beschichtung zu entwickeln“, freut sich Max Borgolte.

Patientensicherheit ist für uns oberstes Gebot und die Erfüllung der Verordnung für sichere Medizinprodukte (MDR) eine Selbstverständlichkeit.

Sie sollen im OP nur mit sicheren, beständigen Instrumenten in Berührung kommen.



↓ Katalog
Download

Sprechen Sie mit uns:

Weber Instrumente
GmbH & Co. KG

T. +49 (0) 7465 92090-0
info@kammerer-med.de

KAMMERER-MED.DE



„Im Fokus stehen die Megatrends der Medizintechnik“



Prof. Dr. Ulrich Mescheder

ist Prorektor für Forschung und Transfer der Hochschule Furtwangen. Zudem leitet er das Institut für Mikrosystemtechnik sowie das Technologie-labor für Mikro- und Nanosysteme. Er ist überdies im Vorstand der Innovations- und Forschungspartner-schaft CoHMed.



Prof. Dr. Knut Möller

koordiniert als Leiter des Instituts für Angewandte Forschung die zentrale Forschung an der HFU. Er leitet das Institut für Technische Medizin und ist Sprecher von CoHMed. Zudem leitet der Mediziner und Informatiker seit 2021 die German Section of Engineering in Biology and Medicine des weltweiten Elektro- und Informations-technikverbands IEEE.

Im engen Austausch mit der Industrie treiben Forschungsteams der Hochschule Furtwangen die Entwicklung der Medizintechnik voran – eine Partnerschaft, von der beide Seiten enorm profitieren, wie die Professoren Ulrich Mescheder und Knut Möller erklären.

Das Gespräch führte RALF BUTSCHER

Herr Prof. Mescheder, Herr Prof. Möller, was verbirgt sich hinter dem Kürzel „CoHMed“?

Ulrich Mescheder: CoHMed – Connected Health in Medical Mountains – ist ein vom Bundesforschungsministerium BMBF gefördertes Projekt im Rahmen des Programms „FH-Impuls“: eine Innovations- und Forschungspartner-schaft zwischen der Hochschule Furtwangen und Industrieunternehmen. Inhaltlich geht es um Medizintechnik.

Knut Möller: Hintergrund ist das Ziel des BMBF, Hochschulen wie die Hochschule Furtwangen zu stärken, indem vorhandene Stärken ausgebaut werden. Dazu mussten wir uns thematisch positionieren. Das haben wir im Bereich der Medizintechnik getan, wo wir seit vielen Jahren anwendungsnahe Forschung betreiben. Die Kooperation mit der Industrie soll dazu führen, dass wir dort als kompetenter Partner wahrgenommen werden.

Was sind die Schwerpunkte dieser Partnerschaft?

Mescheder: Der Fokus liegt auf den großen Zukunftstrends der Medizintechnik, die wir gemeinsam mit der Industrie analysiert haben.

Möller: Dazu haben wir mehrere Big Player aus der Industrie eingebunden. Wichtige Fragen waren: Was erwartet man in der Industrie von der Entwicklung der Medizintechnik? Und: Wobei brauchen die Firmen Unterstützung? Das haben wir gespiegelt an unseren Kompetenzen – und festgestellt, dass wir damit alle sogenannten Megatrends gut adressieren können.

Welche Megatrends bestimmen denn aktuell die Entwicklung der Medizintechnik?

Möller: Die Digitalisierung ist ein wesentlicher Aspekt. Hinzu kommen Automatisierung und Miniaturisierung. So wird immer schonender und weniger invasiv operiert. Zudem sollen Implantate intelligent werden, indem man ihnen zusätzliche Fähigkeiten verleiht. Ein weiteres Ziel ist, Implantate biologisch kompatibel zu machen – also Abstoßungsreaktionen des Körpers zu vermeiden – und

ihr Einwachsen zu fördern. Dabei spielen Beschichtungen eine wichtige Rolle. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung neuer Materialien mit besseren Eigenschaften.

Wie können Sie die Industrie da unterstützen?

Möller: Betrachten wir etwa die Gegend um Tuttlingen. Dort werden traditionell mechanische Geräte und auch Implantate hergestellt. Die Entwicklung hin zu mehr Elektronik und Digitalisierung können einige Firmen allein nicht bewältigen, da sie stark mechanisch ausgerichtet sind. Der Grund ist, dass viele Unternehmen ursprünglich aus dem Nähbereich kommen und früher etwa Maschinen für die Textilindustrie hergestellt haben. Was hingegen fehlt, sind zum Beispiel Kompetenzen in Biologisierung.

Mescheder: Viele dieser Firmen sind auch sehr stark im Bereich Stahlverarbeitung, etwa für die Anforderungen der Operationstechnik. Doch die entsprechenden Werkzeuge lassen sich heute in vielen Ländern und teils deutlich kostengünstiger fertigen. Wettbewerbsfähig können Unternehmen mit der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb komplexerer Systeme bleiben. Bei diesem Umstieg können wir Unterstützung leisten. Das gilt übrigens auch für die Individualisierung der Medizin.

Was bedeutet das?

Möller: Individualisierung heißt, dass individuelle Anforderungen des Patienten berücksichtigt werden – zum Teil auch automatisiert in den Geräten. Ein Beispiel dafür ist die Beatmungstherapie. Dort geht es darum, dass jederzeit automatisch erkannt wird: Was ist der aktuelle Bedarf des Patienten? Daran soll sich das Gerät dann selbstständig anpassen. Dabei soll die Technik die strategischen Ziele verfolgen, die der Arzt vorgibt.

Haben Sie ein Beispiel parat für ein gemeinsames Projekt von Hochschule und Industrie?

Mescheder: Es gibt eine Firma, die ein Element für den Knochenaufbau im Kiefer herstellt. Dazu schneidet man



den Knochen auf und zieht ihn Stück für Stück auseinander. Danach entsteht zunächst weiches Gewebe, das allmählich aushärtet. Das dafür nötige Element ist ein Implantat, das ungefähr ein halbes Jahr im Körper bleibt.

Möller: Damit unterstützt man im Prinzip die Wundheilung. Dazu muss man stets genau an die Geschwindigkeit der Wundheilung angepasst den Abstand der beiden Knochenteile wahren. Das ist eine typische Anwendung für Individualisierung: Das Auseinanderziehen des Knochens ließe sich automatisieren und dadurch optimieren. Bislang wird das noch per Hand gemacht.

Mescheder: Eine Firma hat uns gefragt: Kann man etwas machen, das vollständig implantiert ist und eigenständig arbeitet? Diese Aufgabe haben wir angenommen und gelöst. Dabei konnten wir Vorerfahrungen in verschiedenen anderen Themenfeldern nutzen: zum Beispiel bei der Energieversorgung, der elektronischen Steuerung sowie der Stabilität der verwendeten Materialien und ihrer Verträglichkeit mit dem Körpergewebe.

Man braucht für so ein Projekt also auch die Kooperationen innerhalb der Hochschule?

Möller: Ja, es gibt da eine klare Interdisziplinarität mit etlichen beteiligten Teams. Diese Fülle an Kompetenzen haben die meisten Unternehmen nicht. Doch daraus folgt auch ein klarer Mehrwert solcher Projekte für uns als Hochschule: Wir haben intern eine Form von Kooperation aufgebaut, die es so vorher nicht gab. Und: Die Industrie nimmt uns dadurch als kompetenten Ansprechpartner deutlicher wahr. Das ist auch ein erklärtes Ziel der CoHMed-Partnerschaft: eine Stärkung der Zusammenarbeit, sowohl intern als auch extern.

Mescheder: Auch die Firmen haben einen Mehrwert, der über die konkrete Fragestellung hinausreicht. Durch den ständigen Austausch lernen sie neue Methoden kennen. Und sie sehen, wie die Forschung läuft – und wo es Probleme gibt. Im Grunde ist es für ein Unternehmen auch wichtig zu wissen, was nicht funktioniert.

Reicht die Zusammenarbeit mit Unternehmen auch über ein bestimmtes Projekt hinaus?

Mescheder: Natürlich. Das ist ja gerade der Sinn der Förderung durch das BMBF. Das Projekt soll einen Impuls geben – und danach soll es auf anderer Ebene weitergehen. Eine Basis dafür ist das Vertrauen, das sich durch die Kooperation auf beiden Seiten entwickelt. Und manchmal entstehen auch ganz verrückte Ideen.

Da bin ich nun gespannt auf ein Beispiel ...

Möller: Es gab vor ein paar Jahren mal ein Projekt zur Blindennavigation. Wir haben einen Rollator mit einem System ausgestattet, das angelehnt ist an die Einparkhilfe bei Autos. Das System gibt ein Signal an die Hände, das verrät, wie weit etwa ein Hindernis entfernt ist und in welcher Richtung es sich befindet. Und es zeigt dem Blinden, wie er das Hindernis umgehen kann. Dazu haben wir unter anderem mithilfe von Mikrosystemtechnik Karten entwickelt, die sich mit den Fingern ertasten lassen.

Mescheder: Ein anderes Beispiel ist eine Idee, zu der wir gerade mit einem Unternehmen Vorgespräche führen. Ziel ist es, dass auch blinde Menschen ein Youtube-Video „anschauen“ wollen. Denn da wird heutzutage viel erklärt. Die Frage ist: Wie lässt sich das technisch realisieren? Im Visier haben wir dafür dynamische Displays, auf denen figürliche Bilder dargestellt werden: durch Erhöhungen oder Vertiefungen der Oberfläche. Blinde Menschen haben enorme Fähigkeiten, solche Feinheiten zu erfassen.

Von welchen Errungenschaften, die vielleicht aus CoHMed erwachsen, könnte jemand profitieren, der in ein paar Jahren erkrankt?

Möller: Wir forschen etwa an der Herstellung von Implantaten per 3D-Druck. Damit lässt sich zum Beispiel ein künstliches Kniegelenk oder eine künstliche Hüfte exakt passend für jeden Patienten machen. So wird auch deren Haltbarkeit erhöht, weil der Abrieb an der Materialoberfläche geringer ist. Bei Implantaten von der Stan-

»Ein breites Spektrum an Kompetenzen, wie wir es besitzen, können viele Firmen selbst gar nicht vorhalten«

•

»Die Partnerschaft mit der Industrie verschafft auch uns einen Mehrwert«

»Wir machen Operationen sicherer, indem wir die Datenlage für die Mediziner verbessern«

•

»Künftig wollen wir den Transfer von Wissen, das für ganze Branchen wichtig ist, ausbauen«

ge ist meist nach etwa 15 Jahren Schluss. Dann wird ein neues Ersatzgelenk benötigt, es muss wieder operiert werden. Andererseits machen wir Operationen sicherer, indem wir die Datenlage für Chirurgen und Anästhesisten verbessern. In einem Operationssaal gibt es mittlerweile so viele verschiedene Informationskanäle, dass die Mediziner gar nicht mehr alle erfassen können. Das kann künftig eine intelligente Technik übernehmen, die etwa eigenständig Monitorbilder auswertet. Ein anderes Beispiel ist die Heilung chronischer Wunden. Die sind vor allem bei vielen älteren Menschen oder solchen mit Diabetes ein Problem. Wir untersuchen, wie sich der Heilungsprozess unterstützen lässt, indem man die Wunden gezielt mit Licht bestimmter Wellenlängen bestrahlt.

Arbeiten Sie direkt mit Patienten zusammen?

Möller: Wir zeichnen im Krankenhaus Daten bei Operationen auf, wenn die Patienten dem zugestimmt haben. Wir haben auch viele klinische Partner, die in kontrollierten Studien unsere Systeme testen. Das liefert für uns enorm wichtige Hinweise darauf, wie sich die Technik noch verbessern lässt.

CoHMed ging ja jetzt in die zweite Phase. Was bedeutet das – und wie geht es danach weiter?

Mescheder: Nach den ersten vier Jahren gab es eine Evaluation. Da wurden Kennwerte erfasst und es wurden Interviews mit allen Beteiligten geführt. Es hat sich gezeigt: Wir haben die Zielsetzung der Ausschreibung des

BMBF erfüllt. So folgte eine zweite, ebenfalls vierjährige Förderphase. Das bietet uns einen Rahmen, um langfristige und intensive Kooperationen aufzubauen.

Möller: Und es gibt uns die Möglichkeit, eine gewisse Nachhaltigkeit bei den Firmen zu erreichen. Die gewöhnen sich quasi daran, dass sie regelmäßig mit Fragen an die Hochschule herantreten – und ihre Fragen auch gelöst bekommen.

Mescheder: Dazu kommt die Hoffnung, dass das Land Baden-Württemberg sieht, dass hier ein erfolgreiches Netzwerk aufgebaut wurde – und nach dem Ende von CoHMed die Förderung von Forschungsprojekten vom Bund übernimmt. Künftig wollen wir dazu auch den Wissenstransfer in die Industrie ausbauen.

Wie könnte das aussehen?

Möller: Statt Zukunftsfragen nur im Austausch mit einzelnen Unternehmen zu behandeln, wollen wir Antworten auf Fragen aufbereiten, die für ganze Branchen interessant sind. Oder wir finden uns mit mehreren Firmen zusammen, um gemeinsam nach Lösungen zu suchen – und damit Standards zu setzen. Denn in einem Verbund ist man stärker, als wenn man als Einzelkämpfer agiert.

Mescheder: In solchen Runden könnte es auch um zivilgesellschaftliche Aspekte gehen – beispielsweise um die Frage: Ist eine neue Technologie sicher? Wenn ich etwa in Narkose liege, muss ich Vertrauen haben in das, was mit mir geschieht. Wir sehen es als wichtige Aufgabe für die Hochschule, an der Vertrauensbildung mitzuwirken. ■



Smarter Schraubendreher

In der Orthopädie spielen Knochenschrauben eine wichtige Rolle. Ein mechatronisches Werkzeug könnte dabei helfen, dass diese Schrauben immer fest genug sitzen.

von MICHAEL VOGEL

Künstliche Hüft- und Kniegelenke sind inzwischen Routineeingriffe. Laut dem Statistischen Bundesamt bekamen 2019 rund 243 000 Menschen ein Hüft- und 194 000 ein Knie-Implantat eingesetzt. Diese Endoprothesen werden in den Knochen verschraubt und wachsen dann ein. Schrauben spielen auch bei anderen orthopädischen Eingriffen eine wichtige Rolle, etwa bei Mehrfachbrüchen. Dabei hängt es letztlich von Erfahrung und Feingefühl der Chirurgen ab, wie fest sie die Schrauben ziehen.

„Grundsätzlich ist es ratsam, eine Schraube so weit wie möglich anzuziehen, um zu vermeiden, dass sie sich im Lauf der Zeit wieder lockert“, sagt Jack Wilkie, Doktorand am Institut für Technische Medizin der Hochschule Furtwangen. Denn dann wäre ein erneuter Eingriff nötig.

Doch das ist gar nicht so einfach, denn kein Knochen ist wie der andere. Das fängt damit an, dass es zwei unterschiedliche Arten von Knochengewebe gibt: schwammartiges und

kompakteres. Das kompaktere Knochengewebe ist – wenig überraschend – deutlich fester. Darin lässt sich eine Schraube also auch stärker anziehen. „Noch gravierender sind jedoch die individuellen Unterschiede zwischen den Menschen“, sagt Wilkie. „Vererbung, Kindheit, Ernährung, Sport und nicht zuletzt Erkrankungen wie Osteoporose beeinflussen die Knochenfestigkeit maßgeblich.“

Unterstützung während der OP

Der Neuseeländer forscht nun an einem Verfahren, mit dem ein intelligenter Schraubendreher Chirurgen unmittelbar unterstützen soll. „Anhand von Drehmoment und Rotationsgeschwindigkeit der Schraube soll dieses Werkzeug bei der Operation anzeigen, ob eine Schraube bereits optimal angezogen ist“, erläutert der Mechatroniker. Allerdings: In den Experimenten, die er dazu durchführt, ist derzeit nichts von Knochen zu sehen. Vielmehr dreht Wilkie Schrauben in PU-Schaumstoff. „Das Material dient in der Medizintechnik oft als Ersatz, ehe man an Knochen testet“, erklärt der Forscher.

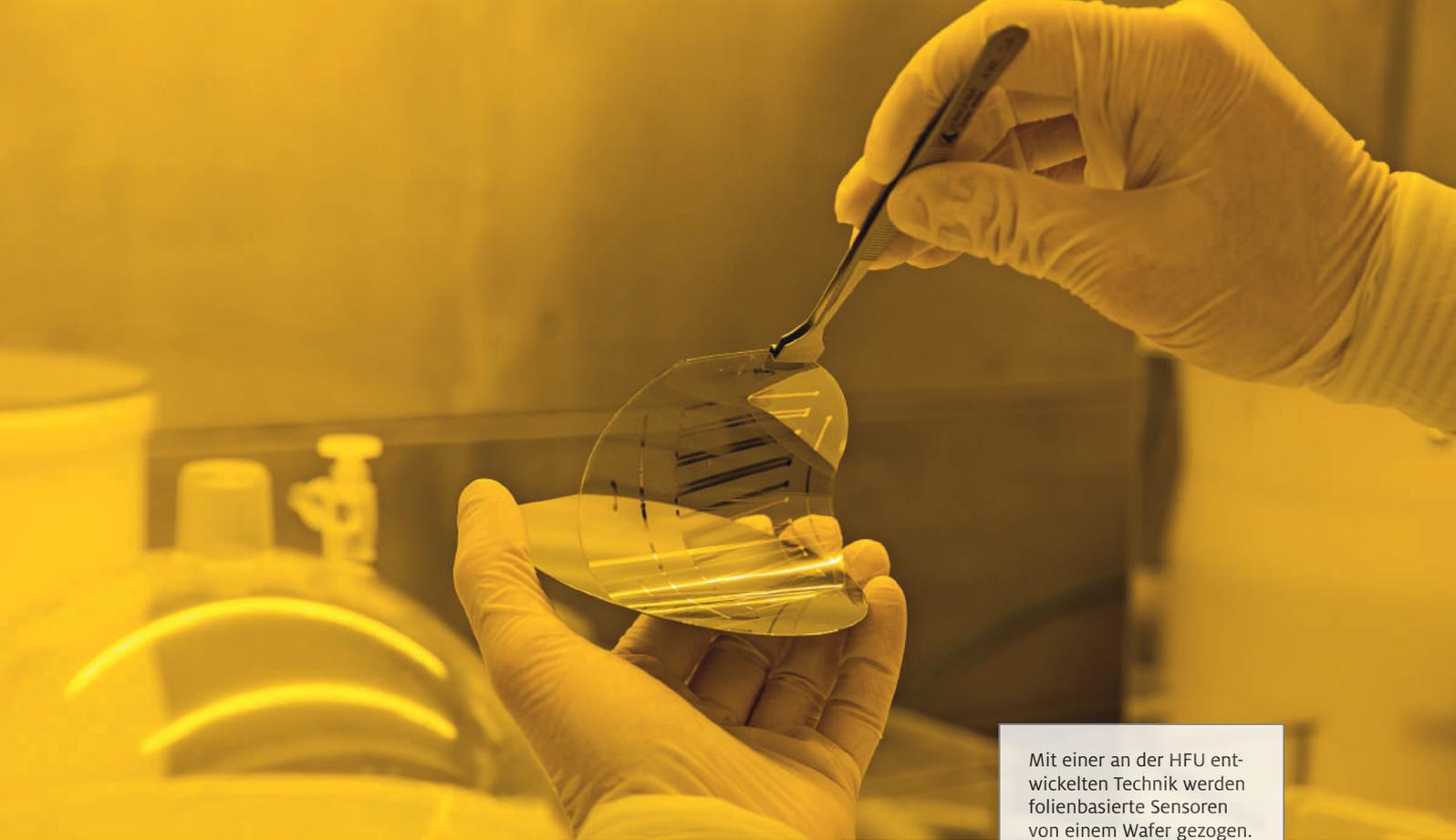
Mit einem mathematischen Modell des Schraubvorgangs versucht der Wissenschaftler zunächst die Materialfestigkeit anhand der gemessenen Drehmomente und Rotationsgeschwindigkeiten abzuleiten. Dann treibt Jack Wilkie es ins Extrem: Er dreht Schrauben so weit ein, bis sie ausreißen, also das Material versagt. „Für technische Materialien wie PU liefern Datenblätter dazu Anhaltspunkte“, sagt der Jungforscher.

Anhand dieser Extremwerte und der gemessenen Zusammenhänge zwischen Drehmoment und Rotationsgeschwindigkeit einerseits und der Materialfestigkeit andererseits lässt sich ableiten, welches sinnvolle Drehmoment bei PU maximal erreichbar ist. „Im nächsten Schritt übertrage ich diese Experimente auf Tierknochen, um auch für sie maximale Drehmomente zu ermitteln“, erklärt Wilkie.

Ein intelligenter Schraubendreher könnte später einmal dem Chirurgen zum Beispiel optisch über eine LED anzeigen, dass das maximale Drehmoment bald erreicht ist. „Es würde also auch weiterhin ein Mensch die letzte Entscheidung treffen“, betont der Wissenschaftler – „und keine Maschine.“ ■



Dieser Testaufbau dient zum Erfassen der individuellen Eigenschaften des Knochengewebes während Knochenschrauben befestigt werden.



Mit einer an der HFU entwickelten Technik werden folienbasierte Sensoren von einem Wafer gezogen.

Sensoren mit Gefühl

Die Verbindung von Technologie, Modellierung und Biologie ermöglicht neue Ansätze bei Diagnose und Therapie in der Medizin. Ein Beispiel dafür ist die Gefäßrekonstruktion, an der ein interdisziplinäres Team der Hochschule Furtwangen forscht.

von MICHAEL VOGEL

Minimalinvasive Eingriffe sind inzwischen Standard. Da sie das Gewebe weniger schädigen, belasten diese „Schlüsselloch-Operationen“ Patientinnen und Patienten auch weniger. Zudem verläuft die Heilung meist rascher als nach einer herkömmlichen Operation. Soweit möglich nutzt das OP-Team dabei Hohlorgane. So lassen sich etwa Eingriffe am Herz über einen Katheter vornehmen, der über die Leiste durch die Arterie bis zum Zielort vorgeschoben wird. Andere Beispiele für minimalinvasive Eingriffe sind Eingriffe an der Pros-

tata oder an der Harnröhre, bei der die Harnwege als Zugang dienen.

Während solcher Operationen nutzt das OP-Team zwar Ultraschallbilder, um sich im Körper zu orientieren, doch es ist erstaunlich, wie sehr die Chirurgen dabei dennoch auf das eigene Erfahrungswissen angewiesen sind: Sie sehen nur die Bilder, doch Informationen über die mechanischen Eigenschaften eines Organs haben sie nicht. So weiß der Chirurg zum Beispiel nicht, ob das Organ an einer bestimmten Stelle genauso stark dehnbar wäre wie an einer anderen.

Ein interdisziplinäres Team dreier Arbeitsgruppen der Hochschule Furtwangen erforscht, wie sich das ändern lässt – und wie sich gleichzeitig individuelle Besonderheiten der Patienten besser berücksichtigen lassen. Das Forschungsprojekt ist auf zweieinhalb Jahre angelegt und läuft noch bis Ende 2022. Mit im Spiel sind ein Sensor, ein Computermodell und die Harnröhren von Schweinen. „Wir entwickeln zunächst ein Verfahren, mit dem sich die mechanische Beschaffenheit der menschlichen Harnröhre ermitteln lässt“, sagt Ulrich Mescheder, Leiter des Insti-



Die Prototypen der Sensoren werden im Technologiela-
bor für Mikro- und Nanosysteme
hergestellt.

tuts für Mikrosystemtechnik sowie des Technologiela-
bors für Mikro- und Nano-
systeme.

Die Harnröhre hat im Zusammenhang mit dem Projekt gleich zwei Vorzüge: Sie ist durch eine natürliche Körperöffnung zugänglich und weist einen recht großen Durchmesser auf. Dadurch liegen die technischen Anforderungen etwas niedriger als bei anderen Gefäßen, bei denen die Messung der Beschaffenheit ebenfalls interessant ist.

Dehnen bis aufs Dreifache

Mescheders Team kümmert sich in dem Projekt um den Sensor. „Die Funktion ist dabei ähnlich wie bei einem Ballonkatheter: Ist der flexible Sensor mithilfe eines Katheters in die Harnröhre eingeführt, bläht sich die flexible Silikonhülle des Sensors auf“, erklärt der Physiker das Funktionsprinzip. Bei der Harnröhre sind so Dehnungen um 80 bis 200 Prozent möglich. Die Arbeitsgruppe bedient sich handelsüblicher Ballonkatheter und rüstet sie um. „Der Sensor liegt auf der Innenseite des Ballons, damit kein Kontakt zu Körperflüssigkeiten auftreten kann.“

Der flexible Sensor besteht aus einer extrem dünnen, strukturierten Metall-

schicht auf der Ballonhaut. In dieser Schicht erzeugen die Beteiligten bereits bei der Herstellung gezielt Risse. Bei einer Messung liegt an der Schicht dann eine elektrische Spannung an. „Dehnt sich der Ballon, vergrößern sich die Risse und dadurch verändert sich der elektrische Widerstand des Sensors“, erklärt Mescheder. „An den Stellen der Harnröhre, an denen das Gewebe weniger elastisch ist, wo der Ballon die Gefäßwand nicht so gut dehnen kann, bekommen wir also ein anderes Signal als an elastischeren Stellen.“

Anspruchsvolle neue Techniken

Das vermeintlich einfache Sensorprinzip täuscht leicht darüber hinweg, wie anspruchsvoll die Beschichtungs- und Oberflächentechniken sind, die man dafür beherrschen muss – Quanteneffekte inklusive. Flankierend zu dem Projekt läuft deshalb auch eine Promotion, da auch wissenschaftlich Neuland betreten wird. Zudem muss der Ballon für die zuverlässige Funktionsweise des Sensors möglichst optimal an der Gefäßwand anliegen. „Inzwischen haben wir funktionierende Sensoren“, freut sich Mescheder.



Für Silizium-Wafer opti-
mierte Verfahren müssen
für eine Folientechnik
weiterentwickelt werden.



Margareta Müller und ihre Mitarbeiterin Sabine Hensler prüfen am Mikroskop mit Inkubationskammer den Fortschritt der Heilung.

„Derzeit überprüfen wir, ob sie wie erwartet funktionieren.“ Das geschieht an flexiblen Röhren, in denen der per Sensor er-tüchtigte Ballonkatheter steckt. Übrigens ist das Prinzip des Sensors so gehalten, dass er sich auch an die Anforderungen anderer Gefäße anpassen ließe.

Doch der Sensor ist nur ein Teil der Miete. Denn wie die Messwerte zu interpretieren sind, die der Sensor in einer Harnröhre gewonnen hat, ist keine triviale Frage. Hier kommt das Team von Knut Möller ins Spiel, Professor und Leiter des Instituts für Technische Medizin. „Wir haben ein Computermodell der Harnröhre erstellt“, berichtet er. In diesem Modell versucht das Team die Harnröhre möglichst realistisch dreidimensional zu beschreiben, also auch deren Elastizität.

Als Basis dafür dienen Materialdaten, die in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlicht sind. „Eine Harnröhre ist keineswegs starr, sondern ähnelt im leeren Zustand eher einem Schlauch, der innen Falten wirft“, erklärt der Informatiker und Mediziner Möller. „Aufgrund von Verletzungen oder Entzündungen kann eine Harnröhre an manchen Stellen ver-

narben und dadurch verengt sein. Das wirkt sich unmittelbar auf die Elastizität des Gewebes aus.“

Mehr noch: Die mechanischen Eigenschaften können sich über kurze Distanzen deutlich verändern. Jede Harnröhre ist also anders. Dieser Individualität möchten Ärzte künftig gerne besser Rechnung tragen. Sie hoffen dadurch nicht nur auf bessere Behandlungsergebnisse, sondern auch auf geringere Folgekosten für das Gesundheitswesen.

Modellierung in 3D

Knut Möllers Team versucht, die mechanischen Eigenschaften der Harnröhre im 3D-Modell nachzubilden. Dazu hat es ein existierendes Computermodell der Arterie genommen und angepasst. „In unserem Modell können wir simulieren, wie Kräfte das Gewebe verändern, die ein Sensor darauf ausübt“, sagt Möller. Dazu muss man wissen: „Biologisches Gewebe reagiert hochgradig nichtlinear – zunächst dehnt es sich leicht, aber dann immer weniger, bis es irgendwann reißt.“ Dieses Verhalten macht das Modell und die Simulationen deutlich komplexer. Den

Sensor wird es ebenfalls als Modell für den Computer geben. Daran arbeiten die Forscher um Ulrich Mescheder gerade.

Zunächst untersucht Möllers Team in der Simulation, wie die virtuelle Harnröhre bei gegebenen Geometrien und mechanischen Eigenschaften auf die Dehnung eines virtuellen Ballons reagiert. „Als nächstes wollen wir dann Messwerte des realen Sensors in unsere Simulation einspeisen, die dieser an realen Harnröhren ermittelt hat“, kündigt Möller an. „So klären wir ab, wie genau wir die mechanischen und geometrischen Eigenschaften treffen, die wir dem virtuellen Gewebe anfangs gegeben hatten.“ Das beantwortet, so die Hoffnung der Forscher, auch die Frage, ob sie ihr Harnröhrenmodell weiter verbessern müssen.

Lackmustest an Schlachtabfällen

Der eigentliche Lackmustest für Modell und Sensor sind also die Messungen an realen Harnröhren. Sie stammen von Schweinen, aus Schlachtabfällen. „Die Harnröhren dieser Tiere ähneln den menschlichen stark“, erklärt Margareta Müller, Professorin an der Fakultät Me-

chanical and Medical Engineering der Hochschule Furtwangen. „Entscheidend für die Messungen mit dem Sensor war die Frage, wie sich die Harnröhren so präparieren lassen, dass das Gewebe vital bleibt“, sagt sie. Dazu hat Müllers Team ein geeignetes Protokoll entwickelt. „Wir können die Zellen des Gewebes inzwischen für zwei Wochen stabil halten“, berichtet die Biologin. Unter anderem war hierfür die Zugabe von Antibiotika zur Kulturschale nötig, selbst die Länge der Harnröhrenstücke hat einen Einfluss auf die Versorgung mit Nährstoffen und damit auf deren Haltbarkeit.

Von Margareta Müllers Seite steht den Sensorexperimenten am vitalen Gewebe nun nichts mehr im Wege. „Bis es soweit ist, untersuchen wir geeignete Reparaturtechniken“, sagt sie. Denn das interdisziplinäre Team hat letztlich die Gefäßrekonstruktion als Ziel vor Augen, also die Wiederherstellung einer möglichst intakten Gefäßwand. „Um das über eine natürliche Körperöffnung zu machen, muss man die Harnröhre von innen kleben können, wenn ein operativer Eingriff erfolgt“, erläutert die Forscherin.

Heute kleben Chirurgen zwar auch schon, allerdings nur von außen – oder sie nähen, ebenfalls von außen. Margareta Müllers Team geht das Thema nun grundlegend an. „Wir schneiden die Harnröhren längs oder quer ein und verschlie-



Um das Gewebe zu analysieren, werden in einem Kryostat Gefrierdünn-schnitte davon hergestellt.

ßen diese Schnitte wieder mit einem biologischen Klebstoff“, erklärt sie. „Dann untersuchen wir an dünnen Gewebeschnitten, wie gut die Verletzung ausheilt und ob die Stelle dauerhaft stabil ist.“

Auch Arterien im Visier

Für solche Arten von Eingriffen müsste der Sensor zusätzlich zum Aktor werden, also eine völlig neu konzipierte Form von Minigreifer und Minidüse mitführen, um die durchtrennte Stelle zu fixieren und zu kleben. Neue Modelle und Simulationen wären dafür ebenfalls nötig. Aber das

Team aus Müller, Mescheder und Möller haben genau diese Vision vor Augen. „Der Ansatz soll auch nicht auf Harnröhren beschränkt bleiben“, sagt Möller. „Wir wollen ihn auf andere Arten von Gefäßen ausdehnen, etwa auf Arterien.“ Gefäßseigenschaften sollen so ganz allgemein messbar werden, um mit diesem Wissen neue Diagnose- und Therapieverfahren zu entwickeln. Es wäre der nächste Schritt, um Veränderungen in Gefäßen von innen zu heilen – egal ob sie die durch Krankheiten, Alterung oder infolge von Unfällen auftreten. ■

B. BRAUN
SHARING EXPERTISE

INNOVATION WEITERDENKEN

Innovation in der Medizin macht so vieles möglich, was wir nie zu denken gewagt hätten.

Seit über 150 Jahren geht AESCULAP® den Fortschritt in der Medizin nicht nur mit, sondern treibt diesen aktiv voran – in der Chirurgie, Orthopädie und interventioneller Gefäßmedizin.

Seit 1976 gehört AESCULAP® zur B. Braun-Gruppe und ist damit Teil eines familiengeführten Konzerns mit über 64.000 Mitarbeitern in 64 Ländern. In enger Partnerschaft mit den Kunden entwickelt B. Braun Produktsysteme und Serviceleistungen, die weiter gehen und weiter führen – und schützt und verbessert so die Gesundheit von Menschen auf der ganzen Welt.





Im OP-Saal werden Daten gebündelt und analysiert. Das Ziel: Monitoring, Dokumentation und Operationsmanagement zu verbessern.

Der vernetzte OP-Saal

Geräte und Instrumente im Operationssaal liefern viele Daten, die ein Team des Instituts für Technische Medizin nutzen will, um die Zusammenarbeit zwischen Chirurgen und Anästhesisten zu erleichtern.

von FRANK FRICK

Der Name ORI Neo könnte die Bezeichnung für eine Kamera oder ein neues Automodell sein. Doch tatsächlich verbirgt sich dahinter ein hochmoderner Operationssaal, wie ihn etwa das Universitätsklinikum Heidelberg besitzt. Überall Monitore und Steuergeräte – fest installiert an den Wänden oder flexibel heranziehbar über Decken-

haltungen und Trägerarme. Nichts steht auf dem Fußboden, nirgends ist ein Kabel zu sehen, denn alle Geräte sind unsichtbar miteinander vernetzt.

Der Saal erinnert an die Kommandozentralen von Raumschiffen in den Science-Fiction-Filmen aus den vergangenen Jahrzehnten. Jeder kann sich ihn selbst von innen rundherum anschauen – im

Internet. Denn das Tuttlinger Medizintechnik-Unternehmen Karl Storz, das ihn eingerichtet hat, zeigt ihn dort zu Werbezwecken natürlich gerne.

Viele minimalinvasive Eingriffe

Einer der Gründe für die vielen Monitore ist, dass Ärzte heute etliche Operationen minimalinvasiv durchführen: Um mög-

lichst wenig Gewebe zu verletzen, dringen sie über kleine Schnitte oder natürliche Öffnungen mit ihren Instrumenten und einem Endoskop an die zu operierende Stelle im Körper vor. Das Endoskop liefert dabei die Bilder aus dem Körperinneren, die dann den Operateuren über Monitore gezeigt und zudem zur Dokumentation des Eingriffs gespeichert werden.

Steine zertrümmern, Gewebe schneiden

Mit weiteren Geräten im Saal saugt das OP-Team während der Operation Blut ab, spült Gelenke oder bläst etwa Kohlendioxid in die Bauchhöhle ein, um diese endoskopisch besser betrachten zu können. Eine Laser-Einheit dient dazu, Gallen-, Harn- oder Nierensteine zu zertrümmern. Um Gewebe zu durchtrennen oder Geschwulste zu entfernen, nutzen Chirurgen häufig nicht mehr das Skalpell, sondern einen Elektrokauter: Dieser schneidet mit Hilfe von hochfrequentem Wechselstrom nicht nur das Gewebe, sondern verschließt zugleich die Blutgefäße. Dabei werden Rauchgase freigesetzt. Spezielle Absauggeräte verschaffen dem Chirurgen freie Sicht und schützen das OP-Team vor dem dauernden Einatmen der Rauchgase.

„All diese Geräte und Instrumente liefern eine Menge Daten, die allerdings nur die chirurgische Seite der Operation widerspiegeln“, sagt Knut Möller, Leiter des Instituts für Technische Medizin (ITeM) und zugleich Leiter des Instituts für Angewandte Forschung der Hochschule Furtwangen. Für die andere Seite ist ein Anästhesist verantwortlich – manchmal auch ein ganzes Anästhesie-Team. Er leitet nicht nur die Narkose ein, sondern überwacht auch die Lebensfunktionen des Patienten, zum Beispiel den Herzschlag, den Blutdruck, die Sauerstoffsättigung im Blut und die Atmung – permanent gemessen mit entsprechenden Geräten. Die Messwerte werden meist unmittelbar grafisch aufbereitet auf Displays angezeigt.

„Fast immer verwenden Anästhesisten ein anderes informationstechnisches System als die Chirurgen, mit separaten Anzeigen und Bildschirmen sowie herstellerabhängigen Datenprotokollen“, erläutert Möller. „Es gibt zwischen Chirurgen und Anästhesisten eine scharfe Trennung der Arbeitsbereiche, die sich nicht nur in Form des grünen Vorhangs zeigt, der normalerweise während der Operation zwischen dem Anästhesist und dem liegenden Patienten angebracht wird.“

Alle Daten vereinen

Im Projekt DaCapo, an dem das Unternehmen Karl Storz als Industriepartner beteiligt ist, arbeitet Möller mit Doktoranden daran, die chirurgische und die anästhetische Seite zu vernetzen und wirklich alle Daten aus dem Operationssaal zusammenzuführen. Die Forscher haben im Schwarzwald-Baar Klinikum in Villingen-Schwenningen eine entsprechende Datensammelstation aufgebaut und getestet. „Wir konnten bereits zeigen, dass es möglich ist, alle Daten verlustfrei zu erfassen, ohne dass die Arbeitsabläufe im Operationssaal durcheinandergeraten“, sagt Doktorand Nour Aldeen Jalal aus Möllers Team. Die Covid-19-Pandemie hat allerdings die Forscher gebremst: Sie konnten nicht wie gewünscht Daten sammeln und auswerten.

Ein Ziel der Forscher ist es, den Mediziner und dem OP-Team eine einheitliche Gesamtsicht auf den Patienten zu liefern. So sollen die Chirurgen stets darüber informiert sein, ob es bei den Körper-

funktionen starke und möglicherweise lebensbedrohliche Veränderungen gibt. Mit anderen Worten: Sie sollen jederzeit erkennen können, wie es dem Patienten während des Eingriffs geht.

Der Anästhesist wiederum soll in die Lage versetzt werden, seine Messwerte mit den Handlungen des Chirurgen in Verbindung zu bringen. Wenn der Chirurg zum Beispiel Gas in den Bauchraum des Patienten einbläst, so ist es nicht ungewöhnlich, dass sich dessen Atmung durch den erhöhten Druck auf die Lunge verändert. Selbstverständlich müssen die Daten so aufbereitet und auf den Monitoren dargestellt werden, dass die Ärzte nicht von der Informationsflut überfordert werden.

Sanftere Eingriffe

Wenn Chirurgen und Anästhesisten während der Operation einen besseren Informationsstand haben, wird das Eingriffe mit geringeren Auswirkungen auf den Organismus ermöglichen, hofft Mediziner und Informatiker Knut Möller. Die ITeM-Forscher wollen die gesammelten Daten darüber hinaus nach statistischen Zusammenhängen zwischen den ärztlichen Eingriffen und dem Zustand des Patienten durchforsten. Möglicherweise finden sich auf diese Art Ansatzpunkte für besonders sanfte chirurgische Therapiemethoden.

Doch es geht den Forschern nicht nur darum, mittels zusammengeführter Daten die Ärzte besser als bisher zu unterstützen und Wege zu finden, um die Belastung der Patienten während der Opera-



Erweitertes Monitoring auf Basis der Fusion aller chirurgischen und anästhesiologischen Daten: So sollen sich Operationsabläufe besser bewerten und individuell an den Patienten anpassen lassen.



tion möglichst klein zu halten. Sie wollen die Daten auch nutzen, um die Wirtschaftlichkeit von Operationssälen zu verbessern, deren Betrieb sehr teuer ist.

Operationen besser managen

Als zentrale Einrichtungen der Krankenhäuser müssen die Säle möglichst gut ausgelastet werden. Doch die OP-Manager können bislang nur schwer vorhersagen, wie lange ein Saal durch eine Operation belegt sein wird – und somit weder den besten Zeitpunkt für die Vorbereitung des nächsten Patienten angeben noch das Personal auf der Station und für den Operationssaal optimal einplanen. Denn es kann bei Eingriffen zu Ereignissen kommen, die den ursprünglichen Zeitplan durcheinanderbringen – etwa starke

Blutungen, Herzrhythmusstörungen oder die Entdeckung, dass mehr Gewebe krankhaft verändert ist als zuerst angenommen.

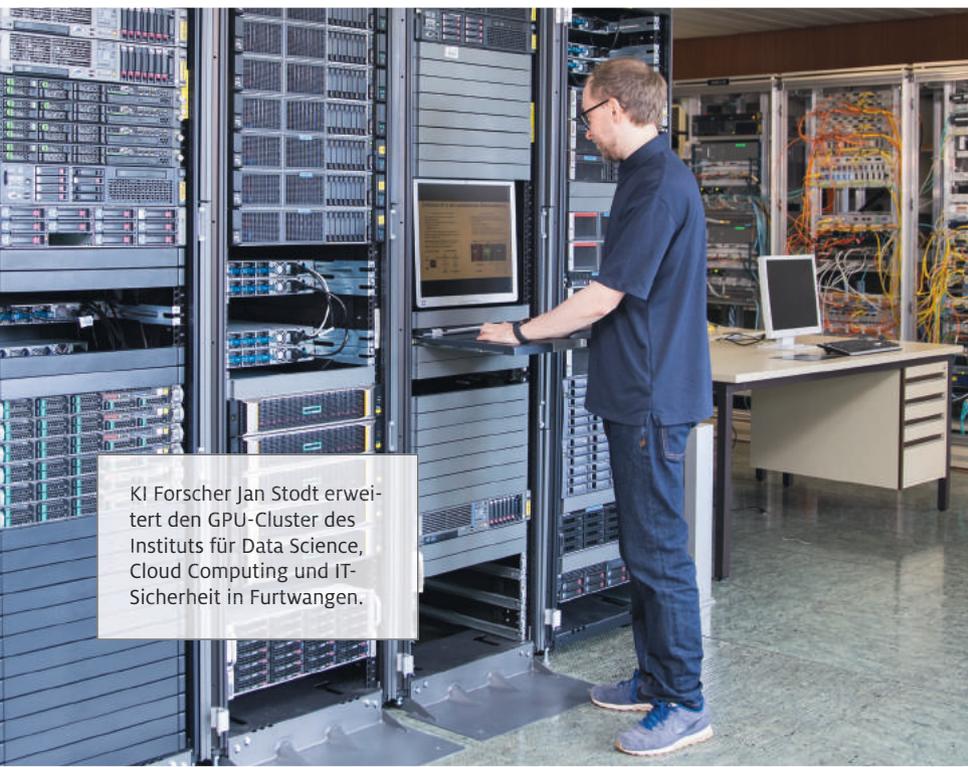
Um die Zeitplanung nachfolgender Operationen anzupassen, müssen die Chirurgen die entsprechenden Informationen bislang üblicherweise mündlich über das Personal im OP an den OP-Manager und die Schwestern auf den Stationen weitergeben. Ziel der ITeM-Forscher ist dagegen eine ständig aktualisierte automatische Vorhersage, wie lange die Operation noch dauern wird.

„Dafür muss das System auf Grundlage der Bilder und Daten aus dem OP-Saal selbstständig erkennen, in welcher Phase sich eine Operation gerade befindet“, sagt Doktorand Tamer Abdulkaki Alshirbaji vom ITeM. „Diese automatische Erken-

nung erfolgt mittels maschinellen Lernens und künstlichen neuronalen Netzen, die nach dem Vorbild des menschlichen Gehirns arbeiten.“ (siehe auch: „Die Augen der künstlichen Intelligenz“, S. 27). Die automatische Phasenerkennung kann darüber hinaus helfen, bei Rechtsstreitigkeiten automatisch die wesentlichen Bildsequenzen aus der enormen Menge an Daten herauszusuchen, die zum Zwecke der OP-Dokumentation aufgehoben werden.

Das Erscheinungsbild von OR1 Neo wird sich durch die Arbeit der ITeM-Forscher wohl nicht ändern. Aber sie trägt möglicherweise dazu bei, dass futuristisch wirkende OP-Säle wirtschaftlicher genutzt werden, und dass darin Chirurgen und Anästhesisten zum Wohle des Patienten besser zusammenwirken. ■

Die Augen der Künstlichen Intelligenz



KI Forscher Jan Stodt erweitert den GPU-Cluster des Instituts für Data Science, Cloud Computing und IT-Sicherheit in Furtwangen.

Unter welchen Umständen kann man einer künstlichen Intelligenz die Auswertung medizinisch bedeutsamer Bilder anvertrauen? Diese Frage beschäftigt zwei Informatiker aus Furtwangen.

von FRANK FRICK

Computersysteme, die als Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet werden, können lernen und sich durch Lernen verbessern. Außerdem lösen sie Probleme selbstständig. Das ist großartig, wenn dadurch Verkehrsstaus vermieden, Strom im Netz effizienter verteilt und der Datentransfer aus einem IT-System in ein anderes beschleunigt wird. Doch spätes-



Christoph Reich (links) und sein Doktorand Jan Stodt diskutieren über einen Algorithmus zum Klassifizieren von Endoskopie-Bildern.

tens, wenn die KI über unsere Gesundheit oder gar über Leben und Tod bestimmt, drängt sich die Frage auf: Kann man ihrer Entscheidung vertrauen?

Wertet ein künstliches neuronales Netz als eine Form der KI etwa Bilder fehlerhaft aus und erkennt ein Stoppschild oder eine rote Ampel nicht, kann das fatale Folgen haben für die Passagiere in einem selbstfahrenden Bus. „Tatsächlich zeigen einige Fehlleistungen von KI bei der Bilderkennung, dass man solchen Systemen nicht blind vertrauen sollte“, sagt Christoph Reich vom Institut für Data Science, Cloud Computing und IT-Sicherheit (IDACUS).

Maschinen ticken anders

So beschrieben schon 2013 Forscher aus Kanada und den USA, dass man mit kaum wahrnehmbaren Pixel-Manipulationen neuronale Netze für die Bilderkennung in die Irre führen kann. „Neuronale Netze erkennen in Bildern manchmal Eigenschaften, die der Mensch kaum oder nicht wahrnimmt, und nutzen sie für die Klassifikation“, sagt Reich. Um beim Beispiel der Ampel zu bleiben: Möglicherweise trainiert der Mensch die KI auf das rote und das grüne Signal, aber diese lernt die Situation an einem ganz anderen Merkmal zu unterscheiden, etwa winzigen Unterschieden im Umgebungslicht.

Bei Christoph Reich und Doktorand Jan Stodt geht es nicht um Ampeln, sondern um chirurgische Instrumente. Sie trainieren neuronale Netze darauf, diese Instrumente automatisch in Bildern zu erkennen, die Ärzte während einer minimalinvasiven Operation per Endoskop aufnehmen. Daraus soll das KI-System dann während des Eingriffs ableiten, in welcher Phase sich die Operation befindet und wie lange sie noch dauern wird

(siehe den vorhergehenden Beitrag: „Der vernetzte OP-Saal“). Dabei arbeiten die beiden Forscher eng mit Kollegen im Team um Knut Möller am Institut für Technische Medizin zusammen.

Was die KI wirklich erkennt

„Wir erforschen, auf welche Weise sich am besten herausfinden lässt, ob die KI die Bilder tatsächlich aufgrund des Instrumentes unterscheidet, oder ob sie beim Training beispielsweise auf die Blutung dahinter schaut“, sagt Jan Stodt. Die Informatiker aus Furtwangen haben bereits Methoden entwickelt, mit denen sich überprüfen lässt, welche Informationen die jeweilige Schicht – Fachsprache: Layer – eines neuronalen Netzes bearbeitet.

Die künstlichen Neuronen sind in solchen Schichten angeordnet, wobei jedes Neuron einer Schicht mit den Neuronen der nächsten Schicht verbunden ist. Wenn Wissenschaftler einem neuronalen Netz durch viele Beispiele beibringen, wann es richtig oder falsch liegt, ändert das die Stärke der Verbindungen zwischen den Neuronen der Schichten in dem Netz, den „Hidden-Layers“ (verborgene Schichten). Die von den IDACUS-Forschern ermittelten Methoden erlauben es also, die Lernprozesse der KI nachvollziehbarer und transparenter zu machen, die normalerweise für den Menschen verborgen sind.

„Zumindest werden es die Methoden für Informatiker, Data Scientists und Zulassungsbehörden leichter machen, die Qualität des Trainings zu beurteilen“, sagt Reich. „Für Mediziner werden die Entscheidungsprozesse der KI so zwar nicht unbedingt leichter durchschaubar, aber die KI wird für sie indirekt vertrauenswürdiger, weil unabhängige Qualitätskontrollen möglich sind.“ ■



KS CoHMED 1-0-09/2021/SA-D

Seit über 75 Jahren
Partner der Medizin

Endoskopie und vernetzte
Systemlösungen
von KARL STORZ



KARL STORZ SE & Co. KG,
Dr.-Karl-Storz-Straße 34,
78532 Tuttlingen/Germany,
www.karlstorz.com



Was tummelt sich auf dem Brillenglas? Der behutsame Abstrich einer Probe hat den Forschern viel über die unsichtbare Mikroflora verraten.

Kampf den Keimen

Mikrobiologe Markus Egert hat Krankheitserreger da gefunden, wo noch niemand vorher genau hingeschaut hatte: auf Brillen.

von FRANK FRICK

Oft führt die Frage, wie Forscher auf ihre Forschungsthemen gekommen sind, nicht zu überraschenden Antworten: Beispielsweise sind sie während ihrer Doktorarbeit auf ungeklärte Probleme gestoßen oder sie haben ihre Forschung auf der Suche nach Finanzquellen auf die öffentlichen Förderprogramme zugeschnitten. Doch manchmal bringt die Frage auch eine bemerkenswerte Geschichte ans Tageslicht. Etwa bei Markus Egert, Professor für Mikrobiologie am Campus Villingen-Schwenningen der Hochschule Furtwangen. Wichtige Ele-

mente der Geschichte sind persönliches Engagement und Zufälle.

Egert ist überzeugt: Wenn Studierende sich langweilen, wird sich Wissen in ihren Köpfen nur schwer verankern. Deshalb achtet er auch auf den Unterhaltungswert, wenn er Experimente für Praktika der Studiengänge „Angewandte Biologie“ und „Molekulare und technische Medizin“ konzipiert. „2013 kam ich darauf, dass die Studierenden die zu erlernenden mikrobiologischen Methoden anwenden könnten, um die Keimbesiedlung auf einem Gegenstand zu untersuchen, der aus

ihrem Alltag und überhaupt aus dem modernen Leben nicht mehr wegzudenken ist: dem Smartphone.“

Display-Reinigung im Visier

Es lag nahe, die Studierenden nicht nur die Zahl und die Art der Mikroben auf ihren Handy-Touchscreens bestimmen zu lassen, sondern auch, inwieweit sich eine Reinigung des Bildschirms auswirkt: Wie verändert sich die Keimbesiedlung, wenn mit einem trockenen Mikrofasertuch über das Smartphone gewischt wird? Und verringern feuchte Brillen-Reinigungs-



Auf Brillen ließen sich viele Bakterienarten identifizieren. Zudem fanden die Forscher heraus, wie sich die Brille effektiv reinigen lässt.

tücher die Zahl der vorhandenen Bakterien besonders effektiv?

So gab Egert seinen Studierenden den Auftrag, feuchte Brillenreinigungstücher zu besorgen. Die kauften daraufhin beim Optiker Tücher des Unternehmens Zeiss. „Warum sie nicht zum Discounter gingen oder Exemplare eines anderen Herstellers erstanden, weiß ich nicht: Vielleicht wollten sie sicherstellen, dass es sich um Tücher hoher Qualität handelt. Ich bin ihnen dafür jedenfalls bis heute dankbar“, sagt Egert.

Er und seine Studierenden fanden auf den Smartphone-Displays im Schnitt pro Quadratzentimeter 1,37 Keime – ein sehr niedriger Wert. Und das Abwischen mit dem Brillenreinigungstuch verringerte diesen Wert nochmals auf etwa ein Hundertstel: ein beruhigendes, wenn auch wenig aufsehenerregendes Ergebnis. Wegen der guten Datenqualität reichte Egert es trotzdem bei einer Fachzeitschrift ein.

Begeisterung beim Hersteller

Die Gutachter wollten vor Veröffentlichung wissen, welche Reinigungsmittel die Tücher enthalten. Um das beantworten zu können, rief Egert bei der Hotline

der Herstellerfirma an. „Drei Tage später bekam ich den Rückruf eines Wissenschaftlers von Zeiss Vision Care, der wissen wollte, wofür ich die Angaben brauche“, erinnert sich Egert. Der Wissenschaftler und seine Kollegen bei Zeiss waren ganz begeistert, als sie hörten, dass Egert mit Brillenputztüchern Forschung betreibt. „Aufgrund dieses Kontaktes kam es dann zur weltweit ersten molekularbiologischen Studie über die Brillenflora“, sagt Egert.

Inzwischen existiert die exzellente wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen Egert und dem Unternehmen Zeiss – unter anderem im Rahmen

von CoHMed – seit acht Jahren. Das Thema Bakterien auf Brillen lieferte dabei Stoff für zwei Doktorarbeiten. Dass es bis dahin kaum erforscht war, ist verwunderlich: Zum einen, weil allein in Deutschland 45 Millionen Menschen ständig oder zeitweise eine Brille tragen. Zum anderen, weil es durchaus denkbar ist, dass Brillen Träger von Infektionserregern sind. Da ist besonders ihre Rolle für entzündliche Augenerkrankungen in den Blick zu nehmen. Aber auch bei immungeschwächten Patienten im Krankenhaus oder im Altenheim könnten Brillen als Infektionsquelle bedeutsam sein.

Brillen wie seidene Krawatten?

Egert vergleicht Brillen in diesem Zusammenhang manchmal mit der Chefarzt-Krawatte aus Seide: „Der Chefarzt geht mit dieser Krawatte von Patient zu Patient, fasst sie zwischendurch mal an, gibt Frau Müller und Herrn Schmidt die Hand, rückt die Krawatte wieder zurecht.“ Weil die Krawatte aus Seide ist, lässt sie sich nicht desinfizierend reinigen. Tatsächlich gibt es Studien, die eine starke Keimbeseidlung solcher Krawatten nachweisen. „Analog habe ich mir am Anfang unserer Untersuchungen die Chefarzt-Brille als eine Art mögliche Keimschleuder vorgestellt“, schmunzelt Egert.

In einer 2018 veröffentlichten Studie haben Wissenschaftler um Markus Egert die bakterielle Besiedlung von elf Brillen aus dem Umfeld der Hochschule



Die Keime sichtbar machen: Auf einer sogenannten Agarplatte zeigen sich Kolonien von Mikroorganismen.



Um mikrobielle Gemeinschaften auf einer Brille zu analysieren, nutzt das Team einen Hochdurchsatz-DNA-Sequenzierer.

mit zehn Brillen von Bewohnern aus einem lokalen Altenheim verglichen. Sie strichen dafür mit Tupfern die Brillen jeweils auf den Gläsern, dem Ohrbügel und dem Nasenpolster ab. Die Keime, die sie so auf die Tupfer übertragen hatten, wuschen die Forscher von diesen mittels einer sterilen Flüssigkeit herunter. Anschließend tropften sie die nun keimhaltige Flüssigkeit in kleine Schälchen mit Nährboden. Schließlich zählten sie die Bakterienkolonien aus, die auf dem Nährboden wuchsen.

Mehr Keime als auf der Toilette

Das Resultat: Die Brillen waren im Durchschnitt und gemittelt über die je drei abgestrichenen Stellen mit 10000 Keimen pro Quadratzentimeter belastet. Das ist ein Vielfaches der Keimkonzentration auf dem Display eines Smartphones oder auf einem Toilettensitz. Dabei zeigten Nasenpolster die höchsten Bakteriendichten, Gläser die geringsten. Die Zahl der Bakterien auf den Brillen von Altenheimbewohnern war dabei höher als auf den studentischen Brillen, doch könnte der Unterschied statistisch gesehen zufällig sein.

Egert und sein Team testeten bei ihrer Studie auch die Wirkung von feuchten Zeiss-Brillenreinigungstüchern auf gezielt

verkeimte Brillengläser. Unabhängig davon, ob die Tücher auf Alkohol basierten oder alkoholfrei waren, reduzierten sie die Keime um 99 bis 100 Prozent. Trockene Mikrofasertücher entfernten dagegen nur 85 bis 90 Prozent der Bakterien.

Allerdings: Um die Gefahr für die Gesundheit beurteilen zu können, die von Keimen auf Brillen ausgeht, ist neben ihrer Zahl auch entscheidend, welcher Art sie angehören. Dazu muss man wissen, dass die Kultivierung von Bakterienkolonien auf Nährböden immer nur einen kleinen Bruchteil der Organismen zum Vorschein bringt, die einen Lebensraum besiedeln. Denn viele Mikroorganismen vermehren sich und wachsen nur unter den speziellen dortigen Bedingungen.

Verräterisches Erbgut

„Daher haben wir eine zweite Studie durchgeführt mit 30 Brillen, die von Studierenden und Dozenten getragen worden waren. Dabei nutzten wir molekularbiologische Methoden, um die Mikroorganismen anhand ihres Erbguts, also ihrer DNA, zu identifizieren“, berichtet Markus Egert. Auf diese Weise entdeckte er mit seinem Team 5232 verschiedene Arten und 665 Gattungen von Bakterien. Mit der Kultivierungsmethode hatten die For-

schnerinnen und Forscher dagegen lediglich zehn Gattungen gefunden.

Die meisten der molekularbiologisch identifizierten Arten von Mikroben gehörten dabei zu den Haut- und Schleimhautbakterien, darunter Cutibakterien, Corynebakterien oder Staphylokokken. Sie gelangen über Gesichtshaut, Hände, Mund oder Nase auf die Brille. Auf den Gläsern ließ sich eine größere Artenvielfalt nachweisen als auf den Nasenpolstern – darunter typische Umweltkeime, die über die Luft dorthin gelangt waren.

Keine akute Gesundheitsgefahr

Aber was sagen die Ergebnisse über die möglichen Gesundheitsgefahren aus, die von Brillen ausgehen können? „Solange man gesund ist und keine akute Augenentzündung hat, muss man keine Angst vor den Mikroben auf der Brille haben“, meint Egert. Zwar seien 11 der 13 häufigsten Bakterienarten prinzipiell in der Lage, bei empfindlichen Menschen Infektionen auszulösen. Doch sei die Zahl der Keime nicht besorgniserregend. Zudem stammten die Bakterien meist vom Träger selbst, da Brillen nur selten an andere Menschen weitergegeben werden. Egert empfiehlt dennoch, die Gläser und die Fassungen regelmäßig zu reinigen, bevorzugt mit feuchten Brillentüchern. „Wer seine Brille sauber hält, betreibt Gesundheitsvorsorge“, ist der Mikrobiologe überzeugt.

Auch wenn das Team um Markus Egert nun schon viel über die Keimbeseidlung von Brillen herausgefunden hat, so ist das Forschungsthema noch längst nicht vollständig erschlossen. Als nächstes werden sich die Forscher Viren, Pilzen und allergieauslösenden Partikeln – etwa Pflanzenpollen – auf Brillen zuwenden. „Über die virale Belastung von Brillen ist bisher überhaupt nichts bekannt“, betont Egert. Er vermutet, dass sich auf Brillen infizierter Menschen krankmachende Viren – darunter Coronaviren – aufspüren lassen. Allerdings sind Viren schwieriger zu finden als Bakterien: Es existiert keine Methode, mit der sich alle Arten von Viren gleichzeitig nachweisen lassen. Außerdem ist die Konzentration an Viren-DNA oder Viren-RNA, die auf Brillen zu erwarten ist, äußerst gering.

In eine andere Richtung haben die Mikrobiologen um Egert ihr Thema be-



Scharfer Blick auf Bakterien und Viren: Biologe Markus Egerl leitet das Forschungsprojekt zur mikrobiellen Besiedlung von Brillen.

reits erweitert: Sie untersuchten die Keimbildung der Okulare von zehn Mikroskopen aus einem Hochschullabor – und zwar direkt nach einem Praktikumskurs. Dafür kultivierten sie Bakterien von allen linken Okularen und Augenmuscheln, während sie die rechte Hälfte der Mikroskope molekularbiologisch erkundeten.

Das Forscherteam fand bis zu 1700 Bakterien pro Quadratzentimeter und 262 Gattungen. Von den Okularen isolierten sie vier Bakterienstämme, die bei empfindlichen Menschen unter anderem Lidentzündungen oder andere Augenkrank-

heiten hervorrufen können. So fällt den Akteuren ein Forschungsthema auf Umwegen wieder vor die Füße: „Die Ergebnisse mahnen uns, unsere Mikroskop-Okulare regelmäßig zum Beispiel mit Isopropanol zu reinigen – vor allem, weil in den Praktika verschiedene Personen dasselbe Mikroskop benutzen“, sagt Egerl. Doch da in den meisten medizinischen und in vielen naturwissenschaftlichen Laboren weltweit Lichtmikroskope genutzt werden, reicht die Bedeutung der Forschungsergebnisse weit über Villingen-Schwenningen und Furtwangen hinaus. ■

Wie Wunden besser heilen

„Chronische Wunden sind ein ernstes Problem“, sagt Margareta Müller. „Vor allem bei älteren Menschen mit schlechter Durchblutung und Diabetes-Patienten schließen sich offene Stellen kaum.“ Die Leiterin des Labors für Molekulare Zellbiologie am Institut für Technische Medizin (ITeM) der Hochschule Furtwangen sucht deshalb mit ihrem Team nach Möglichkeiten, die Wundheilung zu unterstützen. Doch dazu müssen die Forscher erst einmal verstehen, was beim Heilen einer Wunde im Körper geschieht. „Dazu haben wir ein dreidimensionales Gewebemodell entwickelt“, berichtet Müller – quasi ein künstliches Stück menschlicher Haut, das wie eine echte Haut aus mehreren Schichten besteht und mit Nährstoffen versorgt wird. Um eine Wunde zu erzeugen, stanzten die Forscher ein Loch in das künstliche Gewebe. Danach

konnten sie verfolgen, welche Prozesse ablaufen – und wie sie sich beeinflussen lassen.

So hat das Team um Margareta Müller gemeinsam mit Kollegen um ITeM-Leiter Knut Möller und dem Lenzkircher Medizintechnik-Unternehmen Atmos die Wunde mit Licht verschiedener Farbe bestrahlt. „Das hatte je nach Wellenlänge unterschiedliche Effekte“, berichtet Müller. So beschleunigte rotes Licht zunächst Wundheilung, doch bald gelangten Entzündungszellen ins Wundbett und zerstörten das bereits regenerierte Gewebe teils wieder. Unter blauem Licht setzte die Heilung etwas langsamer ein, verlief aber ungestört und deutlich schneller als ohne Bestrahlung. „Ideal wäre eine Kombination von rotem und blauem Licht“, resümiert Müller: Erst gibt das Rotlicht der Wundheilung einen Kick, dann hält sie das Blaulicht weiter in Gang.



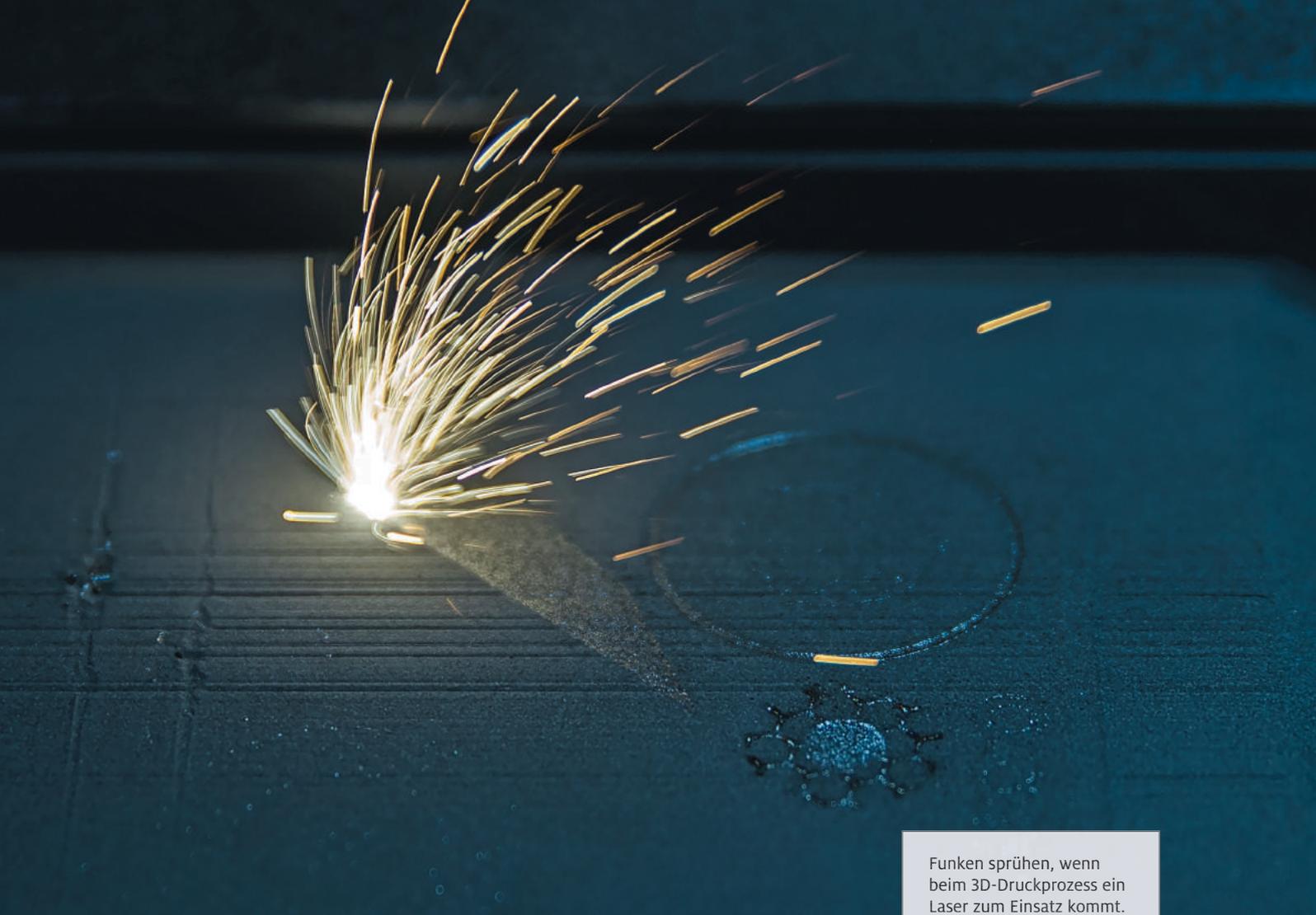
Seeing beyond



Challenge the limits of imagination

175 years

www.zeiss.de/175



Funken sprühen, wenn beim 3D-Druckprozess ein Laser zum Einsatz kommt.

Gedruckte Implantate

3D-Druck ermöglicht es, individuell angepasste Implantate herzustellen. Forscher des Instituts für Werkstoffe und Anwendungstechnik Tuttlingen helfen, das Potenzial der Technologie auszuschöpfen.

von FRANK FRICK

Im Jahr 2020, am Anfang der Covid-19-Pandemie, griffen laut Medienberichten Schüler oder Arbeitgeber häufiger zu handelsüblichen 3D-Druckern, um Visiere oder Hygiene-Trennwände herzustellen, die im Handel kaum zu bekommen waren. Das kam in dieser außergewöhnlichen Situation der eher allgemein gedachten Vision von Journalisten

des britischen Wochenmagazins „The Economist“ aus dem Jahr 2012 sehr nahe: Demnach kehrt die industrielle Fertigung dank des 3D-Drucks aus den Billiglohnländern zurück an die Orte, die nahe am Kunden sind.

Wunschenken blieb dagegen bislang, dass aufgrund der 3D-Drucktechnologie alle stupiden Fabrik Tätigkeiten entfallen

können. Doch hat sich die „additive Fertigung“, wie Fachleute den 3D-Druck auch nennen, in mehr und mehr Branchen einen festen Platz erobert. Eine davon ist die Medizintechnik: Das Spektrum dort reicht von Zahnkronen und Hörgeräten über chirurgische Instrumente bis hin zu kundenindividuellen Prothesen und Implantaten.

Denn der 3D-Druck hat vor allem zwei prinzipielle Vorteile: Zum einen gibt es fast keine Einschränkungen bei der Formgebung von Objekten. Die Hersteller können daher beispielsweise Implantate mit komplexer Geometrie verwirklichen, zum anderen gab es viele Implantate, Endoprothesen und Prothesen bislang nur in wenigen Größen. Die Ärzte verwendeten dann für ihre Patienten eben das Exemplar, das am ehesten passt. Denn eine Prothese mit herkömmlichen handwerklichen Methoden auf die Anatomie eines Patienten hin maßzuschneidern, ist sehr teuer. Beim 3D-Druck spielt es dagegen – sofern die individuellen Patientendaten vorliegen – mit Blick auf die Kosten keine Rolle, ob es sich bei einem Objekt um ein Einzelstück oder um das x-te Exemplar einer Baureihe handelt.

Enge Verzahnung mit der Industrie

Selbstverständlich ist der 3D-Druck daher auch im „Weltzentrum der Medizintechnik“ angekommen – einer Bezeichnung, mit der die Region Tuttlingen beworben wird. Und mittendrin befindet sich das IWAT, das Institut für Werkstoffe und Anwendungstechnik Tuttlingen der Hochschule Furtwangen. „Es gibt zahlreiche Forschungseinrichtungen, die sich mit der Weiterentwicklung der additiven Fertigung beschäftigen. Doch wohl kaum ein anderes Institut ist so eng wie wir mit der Medizintechnik-Industrie verknüpft“, ist Hadi Mozaffari Jovein, Professor an der Fakultät Industrial Technologies an der Hochschule Furtwangen und Leiter des IWAT, überzeugt. Die besonderen Kennzeichen dieser Zusammenarbeit seien kurze Wege, ein regelmäßiger wissenschaftlicher Austausch und Vertrauen.

Was aber können Materialforscher dazu beitragen, den 3D-Druck von Prothesen und Implantaten zu verbessern? Um diese Frage zu beantworten, muss man wissen, wie die additive Fertigung von metalli-



Der Fachbereich Werkstofftechnik und Materialwissenschaften besitzt ein bestens ausgestattetes Werkstofftechnik-Labor, geleitet von Professor Mozaffari Jovein (rechts).

schen Objekten funktioniert. Am häufigsten kommt ein 3D-Druck-Verfahren mit der Bezeichnung „Selective Laser Melting“ (SLM) zum Einsatz: Die Anwender tragen zunächst feines Metallpulver auf eine Platte auf. Dann schmilzt ein Laser dieses Pulver entsprechend den Computerdaten auf. Das Metall erstarrt und bildet eine feste Schicht. Anschließend senkt sich die Platte um einen programmierten Wert, die nächste Lage Pulver wird eingetragen und der Laser bestrahlt nach den Computervorgaben erneut das Pulver. Aus den vielen Wiederholungen erwächst dann das künstliche Hüftgelenk oder ein chirurgisches Instrument.

Allerdings: „Das, was da aus dem Drucker kommt, entspricht nicht hundertprozentig dem entsprechenden herkömmlich gefertigten Bauteil –

selbst dann nicht, wenn das gleiche Material verwendet wurde und es die gleiche Form hat“, sagt Hadi Mozaffari Jovein. Das ist eine Tatsache, die durchaus verblüffend ist.

Mikroskopisch feine Unterschiede

Augenscheinlich werden die Unterschiede beispielsweise unter dem Elektronenmikroskop oder bei Untersuchungen mit dem Pulverdiffraktometer – einem Gerät, bei dem Röntgenstrahlung an der Materialprobe gebeugt wird: Auf der Skala von Mikrometern oder gar Nanometern sind die Materialien aus dem 3D-Drucker fast immer anders aufgebaut als konventionelle Werkstoffe. Dafür gibt es mehrere Gründe. So heizt der Laser das Pulver in



Die Illustration zeigt die Analyse des Belastungsverhaltens 3D-gedruckter Gitterstrukturen.



Unter dem Lichtmikroskop wird eine additiv gefertigte Mikrostruktur untersucht.

einem kleinen Bereich sehr rasch auf – und anschließend kühlt das Material dort wieder sehr schnell ab. Das geschmolzene Metall erstarrt daher oft in Strukturen, die es beim konventionellen Herstellungsprozess nicht einnehmen würde: Die Atome haben keine Zeit, sich so anzuordnen, wie es vom Energiegehalt her am günstigsten wäre. Hinzu kommt, dass speziell die Oberflächen von gedruckten Bauteilen ohne jede Nachbearbeitung prozessbedingt eine im Vergleich zu einem geschmiedeten oder gedrehten Werkstück sehr raue, fast poröse Struktur aufweisen.

„Das Produktionsverfahren beeinflusst die Mikrostruktur und die wiederum beeinflusst die Eigenschaften eines Materials“, erläutert Mozaffari Jovein. Diese Zusammenhänge im Detail aufzudecken, steht im Fokus der Forschungsarbeiten seines Teams. Denn die Forscher wollen sicherstellen, dass die Eigenschaften von

additiv gefertigten Implantaten, Prothesen und chirurgischen Instrumenten auf keinen Fall hinter denen der herkömmlich gefertigten – und zugelassenen – Pendants zurückbleiben. Vor allem aber geht es ih-

Ein medizinisches Implantat soll ein ganzes Leben lang einwandfrei funktionieren

nen darum, die Eigenschaften gedruckter Implantate weiter zu verbessern.

Was ein Patient von einem medizinischen Implantat erwartet, lässt sich in einem einzigen Satz zusammenfassen: Es soll möglichst ein ganzes Leben lang seine Funktion einwandfrei erfüllen. Die Voraussetzung dafür erläutert Mozaffari

Jovein so: „Der Werkstoff für ein lasttragendes Implantat muss leicht, mechanisch belastbar und sehr beständig gegenüber den korrosiv wirkenden Körperflüssigkeiten sein. Er darf keine gesundheitsschädlichen Stoffe abgeben und muss gut einwachsen, also biokompatibel sein.“

Robuster als Titan

Diese Anforderungen erfüllen Legierungen – Metall-Mischungen – gut, die hauptsächlich auf Basis von Titan, Kobalt oder ähnlichen Metallen hergestellt sind. Eine in der Medizintechnik verbreitete Legierung mit dem Kürzel Ti-6Al-4V enthält außer Titan noch Aluminium und Vanadium. Sie widersteht einwirkenden Kräften besser als reines Titan, wird vom Körper aber ähnlich gut angenommen.

Die Wissenschaftler des IWAT haben nun untersucht, wie sich Proben aus 3D-gedrucktem Ti-6Al-4V im Lauf der Zeit verändern – aufgrund von chemischen Reaktionen mit der Umgebung. Dieses Korrosionsverhalten verglichen sie mit herkömmlich produzierten Proben aus der gleichen Legierung. Dabei hatten sie insbesondere die Bildung von Löchern an der Oberfläche im Blick, den Lochfraß.

Die Nachbearbeitung entscheidet

Die Forscher stellten dabei fest, dass in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren – herkömmlich oder durch 3D-Druck – und dem jeweiligen Material die Korrosionsbeständigkeit vergleichbar oder besser ist. Noch entscheidender ist, ob die Bauteile am Ende des Produktionsprozesses nachbearbeitet werden: Wenn die Oberfläche geschliffen und poliert wird, sind die Proben widerstandsfähiger gegenüber Einflüssen der Umgebung.

Außerdem konnten die IWAT-Wissenschaftler zeigen, dass beim Lochfraß von 3D-gedruckten Titanlegierungen je nach Oberflächenbearbeitung vor allem Aluminium freigesetzt wird und kaum Vanadium, das als bedeutend gesundheitsgefährdender gilt. „Selbstverständlich wäre es noch besser, wenn die Legierungen auch nach vielen Jahren keine Stoffe an den Körper abgeben würden oder allenfalls harmlose“, sagt Mozaffari Jovein. Daher sucht er zusammen mit seinem Team für 3D-gedruckte Implantate auch nach Legierungen, die erst gar keine bedenkli-

chen Metalle enthalten – und trotzdem den vielfältigen Anforderungen genügen.

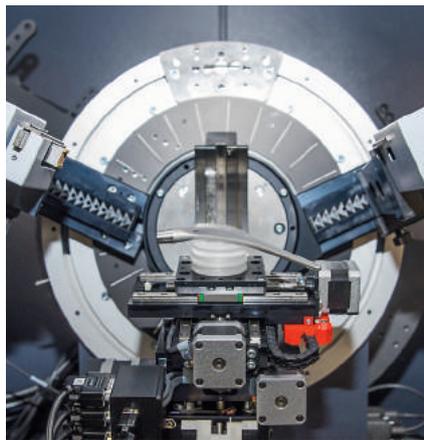
Verbesserungen bei Implantaten sind für viele Menschen wichtig. So verzeichnete das Endoprothesen-Register Deutschland 2019 rund 380000 Erstimplantationen von künstlichen Hüft- oder Kniegelenken. Doch im selben Jahr meldeten die Kliniken auch fast 18000 Folgeeingriffe

am Hüftgelenk, bei denen eine Endoprothese ersetzt werden musste. Ähnlich sah es bei Knie-Endoprothesen aus: Rund 14500 Folgeeingriffe sind für 2019 dokumentiert. Es ist ein schöner Gedanke für die Forscher im Weltzentrum für Medizintechnik, dass sie mit ihrer Arbeit dazu beitragen können, die Zahl der notwendigen Wechseleingriffe zu senken. ■

Neue Maßstäbe an die Qualität

Die additive Fertigung bringt neben Vorteilen auch neue Herausforderungen. „Denn sie führt trotz gleicher Werkstoffe zu anderen Eigenschaften“, sagt Hadi Mozaffari Jovein. So beeinflusst der 3D-Druck die Qualität von Implantaten wie künstlichen Kniegelenken. „Doch dafür gibt es derzeit keine vorgeschriebenen Prüfprozesse“, betont der Werkstoff-Professor der Hochschule Furtwangen. „Um spätere Schwierigkeiten zu vermeiden, müssen wir definieren, wie Produkte für den medizinischen Einsatz freigegeben werden und welche Anforderungen sie erfüllen müssen.“

Zusammen mit der Firma Clean Controlling hat sich Mozaffari Jovein dieser Aufgabe gestellt und eine Checkliste für eine verlässliche Produkt- und Materialprüfung beim 3D-Druck erarbeitet. Dazu hat er mit seinem Team zunächst analysiert, welche Besonderheiten die additive Fertigung mit sich bringt und welche Effekte das im Körper haben kann. „Die Produkte haben eine andere Oberflächenstruktur“, nennt der Forscher ein Beispiel. „Darauf haften winzige Partikel, die sich später lösen und etwa in die Blutbahn gelangen.“ Die Folge könnten Entzündungen sein. Andere Substanzen könnten Allergien auslösen. „Einige Hersteller spülen oder schleifen ihre Produkte daher nach der Herstellung – andere tun



das nicht“, berichtet Mozaffari Jovein. „Zudem erfolgt die Nachbearbeitung auf unterschiedliche Weise.“ Vorgaben dafür fehlen.

Neben neuen Prüfverfahren setzt Hadi Mozaffari Jovein auf neue Werkstoffe, die potenzielle Probleme von vornherein ausschließen. Einige aussichtsreiche Kandidaten dafür hat er bereits aufgespürt. „Die Werkstoffwissenschaften sind und bleiben auch künftig unabdingbar“, meint der Forscher: „und das nicht nur in der Medizintechnik.“

Impressum

FORSCHEN FÜR DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT
Eine Sonderpublikation von
bild der wissenschaft
in Kooperation mit der Hochschule Furtwangen

ERSCHEINUNGSTERMIN:
November 2021
(Beilage in bild der wissenschaft 12/2021)

HERAUSGEBERIN:
Katja Kohlhammer

VERLAG:
Konradin Medien GmbH
Ernst-Mey-Straße 8
70771 Leinfelden-Echterdingen

CHEFREDAKTION:
Andrea Stegemann

PROJEKTLÉITUNG:
Ralf Butscher

GRAFISCHE GESTALTUNG:
Ricardo Rio Ribeiro Martins

AUTOREN:
Dr. Frank Frick, Michael Vogel

FOTOGRAFIE:
Silicya Roth

BILDREDAKTION:
Sandra Kühnle

REDAKTION HOCHSCHULE FURTWANGEN:
Caroline Armbruster, Prof. Dr. Markus Egert

VERTRIEB:
Kosta Poullos

DRUCK:
Konradin Druck,
Kohlhammerstraße 1–15
70771 Leinfelden-Echterdingen

Weitere Exemplare von
FORSCHEN FÜR DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT
können Sie anfordern bei:
Leserservice *bild der wissenschaft*
Telefon: +49 711 7252–201
Fax: +49 711 7252–399
E-Mail: bdw@zenit-presse.de

Bildnachweise

S. 7: Johannes Fallert/Karl Storz
S. 8/9: Ricardo Rio Ribeiro Martins

Cover und alle anderen Fotos:
Silicya Roth für bdw

Grafik Rückseite:
Ricardo Rio Ribeiro Martins

Hightech und ärztliches Wissen gehen Hand in Hand.



Fachkompetenz



Innovation



Labordiagnostik

www.labor-blessing.de



**Institut für
Laboratoriumsmedizin**
PROF. BLESSING & KOLLEGEN

Über das CoHMed-Projekt

Die Hochschule Furtwangen ist eine von nur zehn Hochschulen in Deutschland, die eine Förderung im Rahmen des Förderprogramms „Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung erhalten hat.

Mit dem Projekt CoHMed wurde die Medizintechnik-Forschung innerhalb von vier Jahren mit rund sechs Millionen Euro gefördert. In einer zweiten Förderphase stehen ab 2021 weitere vier Jahre lang nochmals fünf Millionen Euro Fördermittel zur Verfügung. Hinzu kommen Eigenmittel der Industriepartner in Höhe von fast vier Millionen Euro. Ziel ist es, die regionalen Unternehmen bei der Entwicklung zukunftsfähiger Produkte zu unterstützen und den Forschungs- und Wissenschaftsstandort zu stärken.

CoHMed in Zahlen

4 PLUS 4 JAHRE

Projektlaufzeit ab 2017

6 PLUS 5 MILLIONEN

Euro (gerundet) Fördersumme

4 NETZWERKPARTNER

TechnologyMountains e.V.

MedicalMountains GmbH

IHK Schwarzwald-Baar-Heuberg

Hochschulcampus Tuttlingen Förderverein e.V.

15 BETEILIGTE

Professorinnen und Professoren

30 FORSCHUNGSPARTNER

aus der Industrie, 18 davon KMU

Beteiligte HFU-Forschungsinstitute



KONTAKT

Postanschrift:
Hochschule Furtwangen
Projekt CoHMed
Kronenstraße 16
78532 Tuttlingen

ANSPRECHPARTNER

Prof. Dr. Knut Möller
Partnerschaftssprecher
Olga Liske
Partnerschaftsmanagement

TELEFON

07461 1502-6780

E-MAIL

cohmed@hs-furtwangen.de

WEB

www.cohmed.de