

Elastisch und dabei erstaunlich robust, zugfest und bio-kompatibel, thermisch und chemisch stabil und dabei ultraleicht – Materialwissenschaftler geraten ins Schwärmen, wenn sie die Eigenschaften von Spinnenfäden charakterisieren. Warum die »Spinnenseide«, die im Wesentlichen nur aus zwei Proteinen aufgebaut ist, diese erstaunlichen mechanischen Eigenschaften besitzt, erforschen Physiker der Georg-August-Universität Göttingen in einem aktuellen Projekt. Mit Hilfe modernster Analysemethoden, beispielsweise der Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen und der in Göttingen maßgeblich entwickelten Röntgenmikroskopie, untersuchen die Wissenschaftler den feinen Faden bis in seine aller kleinsten Dimensionen.

Am seidenen Faden

Spinnenfäden als Hochleistungsmaterial

Tim Salditt, Anja Glišović

Jeder, der sich schon einmal in einem Spinnennetz verfangen hat, kennt die erstaunliche Festigkeit der dünnen Fäden. Tatsächlich weisen Spinnenfäden oder Spinnenseide, wie dieses biologische Material wissenschaftlich bezeichnet wird, eine erstaunliche Kombination mechanischer Eigenschaften auf. Bei einer Zugfestigkeit vergleichbar mit Stahl ist die Spinnenseide gleichzeitig stark dehnbar (elastisch). Als Zugfestigkeit bezeichnet man dabei die Kraft pro Fläche, bei der ein Material zerreißt. Entsprechend dieser Definition wird die Zugfestigkeit in Pascal (Pa) gemessen. Der Rahmenfaden eines Spinnennetzes mit einer Zugfestigkeit im Bereich von einer Milliarde Pascal (Giga-Pascal) reißt bei einem Durchmesser von einem Millionstel Meter ($1 \mu\text{m}$) unter einer Last von bis zu 80 Milligramm.

Zum Vergleich: Ein Seil von einem Zentimeter Durchmesser würde also theoretisch erst bei einer Gewichtskraft von acht Tonnen zerreißen. Es ist erstaunlich, dass ein leichtes organisches Material wie Spinnenseide solche Werte aufweist. Damit liegt die Spinnenseide gegenüber herkömmlichen Werkstoffen wie etwa Stahl noch nicht im Vorteil. Erst die gleichzeitige starke Dehnbarkeit macht das

Material so außergewöhnlich. Die reversible Dehnbarkeit eines Materials wird durch den Elastizitätsmodul beschrieben. Dieser ist je nach Art der Spinnenseide zehnfach bis hundertfach niedriger als der von Stahl. Spinnenseide kann also viel weiter verstreckt (gedehnt) werden, bevor sie reißt. Typische Werte liegen zwischen 20 und 30 Prozent der ursprünglichen Länge. Es sei hier kurz daran erinnert, dass die Einführung von Nylonstrümpfen ebenfalls durch die Materialkombination hoher Festigkeit und hoher Dehnbarkeit so erfolgreich war. Wenn nun ein Material bei hoher Kraft weit verstreckt werden kann, so ergibt das Produkt aus Kraft mal Weg einen besonders hohen Wert. Gewichtet mit der Dicke des Fadens erhält man eine hohe Energie pro Volumen, welche aufgewendet werden muss, um den Faden zu zerstören. Ein solches Material bezeichnet man als zäh. Zähigkeit erwartet man zum Beispiel auch von den Fangriemen eines Flugzeugträgers, die eine hohe kinetische Energie bei der Landung aufnehmen müssen.

Weitere Vorteile wecken die Phantasie der Forscher, sich die Spinnenseide als Material nutzbar zu machen oder sie als Vorbild in ihren Eigenschaften zu kopieren.

Spinnenseide ist bio-kompatibel, das heißt auch medizinisch einsetzbar. Sie wird bei Raumtemperatur auf kleinstem Raum ohne organische Lösungsmittel »synthetisiert«, ist thermisch und chemisch über weite Bereiche relativ stabil und lässt sich in wässriger Umgebung »verkleben«. Die oben genannten mechanischen Eigenschaften beziehen sich vor allem auf die Rahmenfäden, die als stärkste Fadenart das Rückgrat eines jeden Spinnennetzes bilden.

Eine einzelne Radnetzspinne wie beispielsweise die *Nephila clavipes* oder die Gartenkreuzspinne *Araneus diadematus* kann jedoch bis zu sieben verschiedene Fadensorten zugleich herstellen. Jeder Faden ist dabei für eine spezielle Aufgabe optimiert: Festigkeit der Rahmenfäden, Klebrigkeit und Dehnbarkeit der Fangfäden.

Aus Sicht der Grundlagenforschung wollen wir die Geheimnisse dieses Materials entschlüsseln. Obwohl Spinnenseide im Wesentlichen nur aus zwei Proteinen aufgebaut ist, ist die Struktur bisher trotz intensiver Forschungsanstrengungen nur ansatzweise bekannt. Ebenso bleibt unklar, wie die Struktur die mechanischen Eigenschaften bedingt. Genau diese Kenntnisse wären aber erforderlich, wollte man das Erfolgsrezept der Spinnenseide auch für den Menschen in künstlichen (biomimetischen) Materialien nutzbar machen.

Am Beginn eines Forschungsprojektes unserer Arbeitsgruppe am Institut für Röntgenphysik der Universität Göttingen steht nun die genaue Messung der mechanischen Eigenschaften.



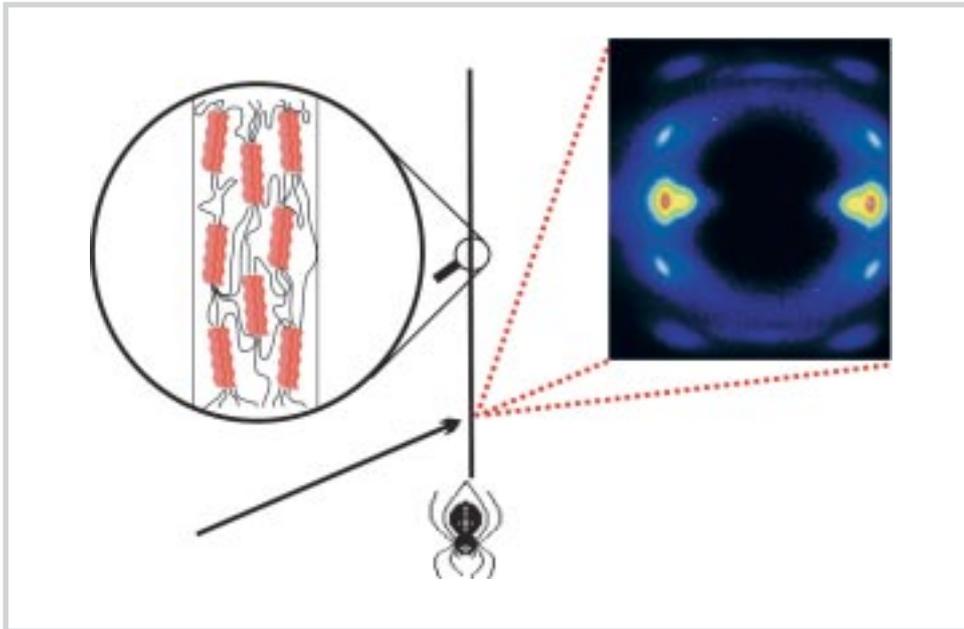
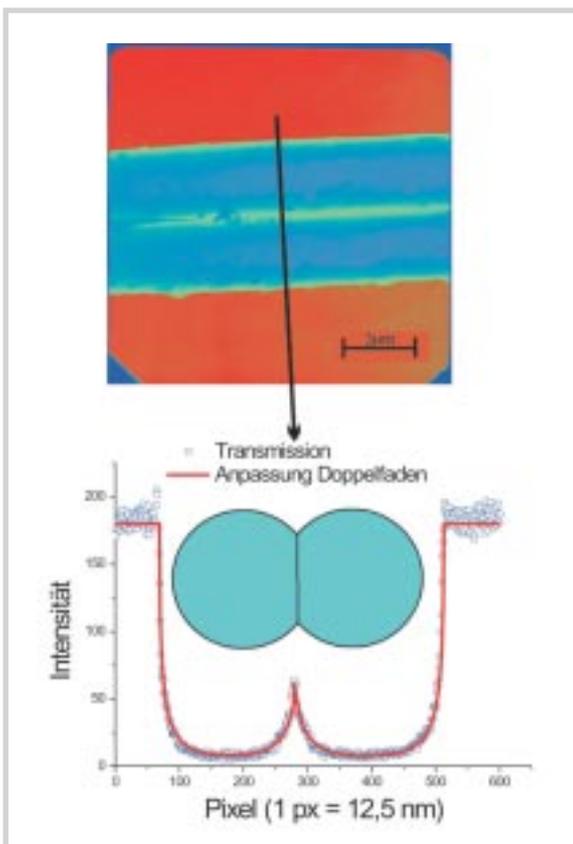


Abbildung 1: Schema des Röntgenexperimentes, bei dem die gestreute Röntgenstrahlung den molekularen Aufbau der Spinnenseide verrät, schematisch links dargestellt. Das zweidimensionale Streubild (rechts) ist im Gegensatz zu den scharfen Bragg-Reflexen eines Proteinkristalls durch die geringe Größe der Kristallite ausgeschmiedt.

Abbildung 2: Aufnahme eines Doppelfadens im Transmissionsröntgenmikroskop. Mit diesem Instrument lassen sich die Fäden in Durchsicht bei einer lateralen Auflösung von bis zu 25 Nanometern abbilden (oben). Absorptionsprofil mit Modellanpassung, die auf eine Verschmelzung der beiden Fäden hinweist (unten).



fenden Röntgenwellen, aus. Aus der Kristallographie sind die scharfen Interferenzmaxima des kristallinen Gitters bekannt, aus denen die Struktur einer Probe sehr genau bestimmt werden kann. Viel schwieriger ist die Strukturbestimmung dann, wenn die Moleküle nicht auf regelmäßigen Gitterplätzen angeordnet sind. Bei der Spinnenseide liegen bestimmte Abschnitte der Proteinquenz als kleine kristalline Bereiche vor, als so genannte antiparallele Faltblatt-Struktur. Diese winzigen Kristalle (Kristallite) füllen etwa 20 bis 30 Prozent des Volumens der Rahmenfäden aus. Sie sind eingebettet in eher ungeordnete Bereiche, die aus anderen Abschnitten der Proteinkette gebildet werden (Abbildung 1).

Wie bei vielen biologischen Materialien, gibt es eine natürliche Variabilität. Deshalb müssen Experimente in der Zug-Dehnungsapparatur an vielen Fäden der gleichen Art durchgeführt werden, um repräsentative Werte zu ermitteln. Dazu halten wir im Labor verschiedene Spinnen, die vor dem Experiment »gemolken«, das heißt zum Spinnen eines Fadens angeregt werden.

Um den Aufbau der Spinnenseide zu bestimmen, also die Anordnung der molekularen Komponenten, insbesondere die so genannte Konformation der Seidenproteine, verwenden wir moderne Methoden der Strukturanalyse mit Röntgenstrahlung. Aufgrund der geringen Wellenlänge sind wir mit Röntgenstrahlung in der Lage, molekulare Strukturen aufzulösen. Dies geschieht jedoch in der Regel nicht in der Form einer direkten Abbildung, sondern (indirekter) durch Streuexperimente, bei denen aus der Winkelverteilung des gestreuten Röntgenlichts auf den inneren Aufbau der Probe geschlossen wird (Abbildung 1). Anschließend werten wir das so genannte Beugungsdiagramm, das Interferenzmuster der auslau-

Diese Anteile bezeichnet man auch als amorphe Matrix. Dabei fällt auf den Röntgendiagrammen sofort auf, dass die Reflexe der Kristallite auf eine bevorzugte Orientierung in Richtung auf die Faserachse schließen lassen. Gleichzeitig sind die Reflexe entsprechend der geringen Größe der Kristallite schwach ausgeprägt und über einen breiten Winkelbereich »ausgeschmiedt«. Die Verteilung der Kristallite in der Matrix, ihre Abmessung und ihre Orientierung sind wichtige Größen für die Erklärung der Materialeigenschaften. Möglicherweise könnten gerade auch die Änderungen dieser Größen unter äußeren Kräften, also die Art und Weise, in der sich das Material bei Belastung verändert, für die erstaunlichen mechanischen Eigenschaften verantwortlich sein.

Weitere geplante Untersuchungen werden uns hoffentlich in die Lage versetzen, zusammen mit unseren Partnern aus der Theoretischen Physik um Prof. Dr. Annette Zippelius ein quantitatives Modell der Spinnenseide auf der Basis der Physik von Polymer-Netzwerken vorzuschlagen. Wir verfolgen gegenwärtig diesen Arbeitsschritt als Teilprojekt des Sonderforschungs-

bereichs 602 »Komplexe Strukturen in kondensierter Materie von atomarer bis mesoskopischer Skala«.

Experimentell soll zunächst im Streuexperiment die Änderung der Struktur während der Ver Streckung eines einzelnen Fadens bis zum Bruch verfolgt werden. Dazu muss ein intensiver Röntgenstrahl auf den Durchmesser eines einzelnen Spinnenfadens fokussiert werden, was an Labor-Röntgen generatoren nicht möglich ist, wohl aber unter Verwendung hochbrillanter Synchrotronstrahlung an Großforschungseinrichtungen. Kollegen an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle in Grenoble (Frankreich) haben bereits gezeigt, dass das Signal eines einzelnen Spinnenfadens ausreicht, um mit den dortigen Mitteln ein Beugungsdiagramm aufzuzeichnen.

Wir haben nun die Experimentiermöglichkeiten in Grenoble genutzt, um erstmals einen einzelnen Spinnenfaden während des Ver Streckens bis zum Bruch zu untersuchen. Gleichzeitig arbeitet unsere Gruppe auch an einer noch kleineren Fokussierung der Röntgenstrahlung, bei der der Strahlfleck auf etwa ein Zwanzigstel des Fadendurchmessers reduziert wird.

Nicht nur mechanische Belastung, auch die Temperatur oder Feuchtigkeit der Umgebung kann die molekulare Struktur der Spinnenseide beeinflussen. Wir haben thermische Untersuchungen durchgeführt, um das Denaturierungsverhalten des Seidenproteins zu untersuchen. Wie jedes Kind weiß, lässt sich ja auch etwas über den Aufbau von Dingen lernen, indem man diese gezielt zerstört. Die Spinnenseide zeigt hierbei eine für Proteine erstaunliche thermische Stabilität. Erst ab 200 Grad Celsius beginnt sie, sich merklich zu zersetzen, nachdem zunächst eine deutliche Vergrößerung der Faltblatt-Kristallite beobachtet wird.

Neben der Röntgenstreuung verwenden wir auch die weniger bekannte Methode der Röntgenmikroskopie, die hier in Göttingen von Prof. Dr. Günter Schmahl und seinen Mitarbeitern maßgeblich entwickelt worden ist. Das Röntgenmikroskop funktioniert dem Prinzip nach wie ein normales Durchsicht-Lichtmikroskop, verwendet aber so genannte Fresnel-sche Zonenplatten, die die Aufgabe der Linsen übernehmen. Das Röntgenmikroskop dient so der Vergrößerung kleinster Strukturen.

In unserem Fall wurde das TXM (Transmission X-Ray Microscope) am Berliner Synchrotronstrahlungslabor BESSY II genutzt, das bei einer gegenüber Licht mehr als hundertfach kleineren Wellenlänge von 2,4 Nanometer (nm) arbeitet. Es ist in der Lage, Strukturen bis zu 25 Milliardstel Meter (nm) aufzulösen. Das aufgenommene Röntgenbild gibt ähnlich wie beim normalen Röntgenbild in der Medizin die lokalen Absorptionsunterschiede zum Beispiel auf Grund von Dichteunterschieden in der Probe wieder (Abbildung 2). Erste Ergebnisse zeigen auf der Skala der Auflösung (25 nm) einen homogenen Aufbau der Spinnenseide. Es ergeben sich weder Hinweise auf eine Kern-Mantel-Struktur noch auf große Kristallite, wie in der Literatur an manchen Stellen behauptet.

Über 150 Millionen Jahre hat die Natur Zeit gehabt, um die Eigenschaften der Spinnenseide unter dem Druck der Evolution zu optimieren. In welchem Zeitraum sich dieses Rätsel jetzt entschlüsseln lässt, bleibt eine offene und spannende Frage – auch wenn wir modernste Geräte und Analysemethoden einsetzen. ◀



Material scientists admire nature for her high performance fibers such as spider silk, a material which is at the same time elastic and robust, tough and biocompatible, chemically stable and of low weight. Biophysicists at the Georg-August-Universität Göttingen are investigating how silk, which is a material composed of only two proteins, can accommodate these properties. For the analysis of the molecular and mesoscopic structure of silk, the researchers are using modern techniques such as x-ray microscopy and single fiber x-ray dif-

Literatur:

F. Vollrath, Scientific American, March, 52-58 (1992)
 J. M. Gosline, The Journal of Experimental Biology 202, 3295-3303 (1999)
 Lazaris, S. Arcidiacono, Y. Huang, Science 295, 472-476 (2002)
 Rieckel et al., Journal of Applied Crystallography 30, 390-392 (1997)
 L. Kaplan ed., Silk Polymers: Materials Science and Biotechnology, ACS Symposium Series 544, American Chemical Society, Washington, DC (1994)



Prof. Dr. Tim Salditt, Jahrgang 1965, studierte Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der Universität Joseph Fourier in Grenoble (Frankreich). 1995 wurde er in München promoviert. Anschließend war er fünf Jahre an der Sektion Physik in München tätig. Ein Forschungsaufenthalt führte ihn 1996 als Stipendiat des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) an die Universität von Kalifornien in Santa Barbara (USA). Im Sommersemester 2000 nahm er die Vertretung einer Professur für Experimentalphysik an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken wahr und habilitierte sich zugleich im Fach Experimentalphysik an der LMU München. Im August 2000 wurde Dr. Salditt zum Professor für Experimentalphysik an der Universität des Saarlandes ernannt. Seit dem Wintersemester 2002/2003 lehrt und forscht der Wissenschaftler als Professor für Experimentalphysik an der Universität Göttingen und ist dort Direktor des Instituts für Röntgenphysik. Seine Arbeitsgebiete umfassen unter anderem die Nanostrukturforschung, biologische Makromoleküle und Membranbiophysik sowie Röntgenoptik.



Anja Glišović, Jahrgang 1978, begann ihr Physikstudium 1998 an der Universität Kiel. Für einen stärkeren biologisch technischen Schwerpunkt wechselte sie im Oktober 2000 an die Universität des Saarlandes in Saarbrücken und schloss dort im April 2004 ihr Studium mit dem Diplom ab. Seit 2004 promoviert sie am Institut für Röntgenphysik der Universität Göttingen über die molekulare Struktur und die mechanischen Eigenschaften von Spinnenfäden, gefördert durch den Sonderforschungsbereich 602 »Komplexe Strukturen in kondensierter Materie von atomarer bis mesoskopischer Skala«. Als Spinnenforscherin ist sie Mitglied der Deutschen Arachnologischen Gesellschaft und der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik.

DAS HAUS MIT CHARME, TRADITION UND DER PERSÖNLICHEN ATMOSPHÄRE

Unser großes Frühstücks-Buffer in den historischen Frühstücks-Salons, stilvoll renovierte Zimmer in einem über 250 Jahre alten Haus, das einst als Professoren-Villa diente, und unser sehr persönlicher Service lassen Gäste sich sofort wie zu Hause fühlen. Alle Zimmer sind mit Dusche/WC/Bad, Direktwahltelefon, Fax-/Modem-Anschluss, Kabel-TV und Radio ausgestattet.

Das Hotel Stadt Hannover liegt in der historischen Altstadt Göttingens, direkt am Beginn der Fußgängerzone, nur 250 Meter vom ICE-Bahnhof entfernt, in ruhiger Lage mit eigenen Privat-Parkplätzen. Allerbeste Verkehrsverbindungen.



WELCOME AT HOME

In 4. Generation im Besitz der Familie Nerke und von ihr geführt.

Hotel Stadt Hannover · Goethe-Allee 21 · D-37073 Göttingen
 Telefon (05 51) 54 79 60 · Telefax (05 51) 4 54 70
 info@hotelstadthannover.de · www.hotelstadthannover.de

Göttinger Physiker entwickeln Wellenleiterkonstruktion für Röntgenstrahlen

(red.) Physiker der Universität Göttingen haben einen energiereichen »harten« Röntgenstrahl so gebündelt und fokussiert, dass sie damit molekulare Strukturen von Proben mit Abmessungen im Nanometerbereich untersuchen können. Die Forscher am Institut für Röntgenphysik entwickelten dazu eine Kanalkonstruktion als »Wellenleiter«, mit dem ein quasi-punktförmiger Röntgenstrahlfleck produziert wird. Damit lässt sich die Röntgenstrukturanalyse mit hoher räumlicher Auflösung durchführen. Dabei gelang es dem Wissenschaftlerteam unter der Leitung von Prof. Dr. Tim Salditt, den derzeit kleinsten energiereichen Röntgenstrahl mit einer Photonenenergie oberhalb von 10 Kiloelektronenvolt zu erzeugen. In Zukunft ist es nun möglich, einzelne Molekülgruppen, Zellbestandteile und Nanokristalle isoliert zu »beleuchten« und aussagekräftige Daten zu gewinnen. In der Fachzeitschrift *Physical Review Letters* vom März 2005 wurde die Neuentwicklung erstmals öffentlich vorgestellt.

Röntgenstrahlen liefern den Großteil der molekularen Strukturinformation in fast allen wissenschaftlichen Disziplinen, beispielsweise in den Werkstoffwissenschaften und der Strukturbiologie. Seit mehr als 30 Jahren erproben Forscher weltweit Möglichkeiten, die Röntgenstrahlung auf einen immer kleineren Brennpunkt zu richten und die Intensität des Strahls zu erhöhen, um damit etwa Strukturen im Nanobereich analysieren zu können. »Mit Hilfe eines Nano-Leiters, einem winzigen lithographisch hergestellten Kanal, ist es uns gelungen, einen intensiven und extrem fokussierten Strahl zu erzeugen«, sagt Prof. Salditt. Der von absorbierendem Silizium umgebene Kanal ist einige Millimeter lang, aber nur 30 Millionstel Millimeter hoch und 70 Millionstel Millimeter breit. »Im Verhältnis von Länge, Breite und Höhe entspricht unsere Struktur etwa einem 1.000 Kilometer langen Autobahntunnel«, erläutert Prof. Salditt. In diesem Kanal breitet sich die Röntgenwelle aus und wird über die gesamte Länge in das erwünschte und exakt berechenbare Profil gebracht. »Am Ende verlässt der Strahl den Nanokanal mit einem Durchmesser von 25 Nanometern in vertikaler und 47 Nanometern in horizontaler Richtung«, erläutert Ansgar Jarre, der derzeit seine Doktorarbeit über das Thema abschließt.

In einem früheren Experiment konnten die Wissenschaftler erstmals das Prinzip des Kanalwellenleiters demonstrieren. Die Physiker haben jetzt im Vergleich dazu eine Intensitätssteigerung um mehr als das Hundertfache und eine weitere Verkleinerung des Röntgenstrahls erreicht. Mit dem in Göttingen erzielten kleinsten harten Röntgenstrahl wollen die Forscher in Zukunft Objekte mit Abmessungen von 1/10.000 bis 1/100.000 Millimeter beleuchten und abbilden. Sie nutzen dabei das Phänomen, dass sich der Strahl nach dem Austritt aus der Kanalstruktur divergent ausbreitet, etwa wie der Strahlkegel einer Taschenlampe. »Durch diesen Effekt kann der präparierte Röntgenstrahl einzelne Objekte, wie zum Beispiel Nanokristalle, Molekülgruppen und Zellorganellen, erfassen und ohne Linsen auf einen Detektor vergrößern. Statt eines direkten Bildes erhalten wir auf diese Weise ein Röntgenhologramm, aus dem sich die Struktur des Objektes ohne Informationsverlust errechnen lässt«, erläutert Prof. Salditt, der zur Zeit mit seinen Mitarbeitern das nächste Experiment an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle in Grenoble (Frankreich) plant.

Der Fortschritt wartet nicht



SteREO
Discovery.V12

Stereomikroskopie
neu durchdacht

Stereomikroskopie der Zukunft.
Tiefenscharfe dreidimensionale
Bilder, deutlich mehr Bildinfor-
mation und hoher Bedien-
komfort – für anspruchvollste
Applikationen in Material-
forschung, Qualitätssicherung,
Biologie und Medizin.
www.zeiss.de/stereo



We make it visible.