

Leuchtende Zukunft für effiziente weiße OLEDs

Hohe Lichtausbeute durch innovative Konzepte

► Tagsüber transparente und nachts leuchtende Fensterscheiben, leuchtende Tapeten oder Fliesen, durchsichtige Displays? Organische Leuchtdioden eröffnen viele faszinierende und neue Anwendungsfelder. Erste Produkte wie Fernseher, mp3-Player oder Handy nutzen bereits ein Display aus organischen Leuchtdioden und profitieren von der hohen Energieeffizienz und dem überragenden Kontrast der OLEDs. Allerdings spielen die organischen Leuchtdioden ihre ganze Stärke hinsichtlich ihres geringen Energiebedarfs bei einem anderen Anwendungsfeld aus: der Beleuchtungstechnik.

2006 wurden in der europäischen Union allein im privaten Bereich 96 TWh an elektrischer Energie für Beleuchtung verbraucht [1] – damit ist die Beleuchtungstechnik der drittgrößte Stromverbraucher in privaten Haushalten. Um diesen Verbrauch zu reduzieren, hat die Europäische Kommission 2008 beschlossen, schrittweise die ineffizientesten Leuchtmittel zu verbieten.

Das wohl gebräuchlichste Leuchtmittel ist die Glühbirne, die allerdings auch mit einer Lichtausbeute, dem Maß für die abgestrahlte optische Leistung im Verhältnis zu der eingesetzten elektrischen Leistung, von ungefähr 15 lm/W die ineffizienteste Beleuchtungsquelle ist. Leicht besser schneiden Halogenlampen mit 19 lm/W ab. Viel besser sind die zur Zeit verwendeten Energiesparlampen und Leuchtstoffröhren, die eine Lichtausbeute von ungefähr 60 lm/W (kompakte Energiesparlampe) bis zu 90 lm/W erreichen [2].

Um im Beleuchtungsmarkt möglichst erfolgreich zu sein, müssen OLEDs daher in Zukunft die Effizienz der Leuchtstoffröhre erreichen, d.h. Effizienzen von bis zu 100 lm/W erzielen und angemessene Lebensdauern gewährleisten. Dieses sehr ambitionierte Ziel kann nur durch ein enges Zusammenspiel verschiedener Wissenschaftsdisziplinen wie Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften erreicht werden.

DIE AUTOREN

KARL LEO

Karl Leo promovierte 1988 an der Universität Stuttgart in Physik. Nach Stationen in den Bell Laboratories in Holmdel (USA) und an der RWTH Aachen leitet er seit 1993 das Institut für Angewandte Photophysik der TU Dresden, zusätzlich ist er Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme, Dresden. Sein aktuelles Arbeitsgebiet sind Organische Halbleiter, von den Grundlagen bis hin zu Anwendungen. Er ist u. a. Träger des Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Mitbegründer einiger Firmen, u. a. Novalad AG und Heliatek GmbH.



BJÖRN LÜSSEM

Björn Lüssem studierte Elektrotechnik an der Universität Aachen und der Universität von Bath, England. Er promovierte am Forschungszentrum Jülich im Bereich der molekularen Elektronik. Im Anschluss an seine Promotion arbeitete er von 2006-2008 am Materials Science Laboratory von Sony in Stuttgart. Seit 2008 ist er Leiter der OLED-Forschungsgruppe am Institut für Angewandte Photophysik an der Technischen Universität Dresden.



SEBASTIAN REINEKE

Sebastian Reineke studierte Physik in Heidelberg und Dresden. Für seine hervorragende Diplomarbeit wurde er 2006 mit dem Professor-Schwabe-Preis der Fachrichtung Chemie der TU Dresden ausgezeichnet. Seit 2005 forscht er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Photophysik der TU Dresden zu weißen organischen Leuchtdioden und schließt demnächst seine Promotion ab. Mit seinen Arbeiten ist er maßgeblich an mehreren Patentanmeldungen beteiligt.



ANNETTE POLTE

Annette Polte studierte Chemie an der TU Dresden und der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Sie promovierte 1994 an der TU Dresden im Bereich anorganische Festkörperchemie. Nach Stationen in der Forschung und Wirtschaft ist sie derzeit an der TU Dresden in der Arbeitsgruppe von Prof. Leo im Forschungsmanagement tätig.



Prof. Dr. Karl Leo, Dr. Björn Lüssem, Dr. Anette Polte, Sebastian Reineke
 Institut für Angewandte Photophysik
 Technische Universität Dresden
 01062 Dresden
 Tel.: +49 (0)351 463 375 33
 Fax: +49 (0)351 463 370 65
 E-Mail: leo@iapp.de
 Website: www.iapp.de

Prof. Dr. Karl Leo
 Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme
 Maria-Reiche-Str. 2
 01109 Dresden
 Website: www.ipms.fraunhofer.de

Insbesondere müssen die physikalischen Konzepte zur Erzeugung von weißem Licht in einer OLED optimiert werden [3].

Aufbau und Wirkungsweise der OLED

Eine organische Leuchtdiode besteht aus einer Anzahl von dünnen organischen Schichten, d.h. Schichten bestehend aus kleinen auf Kohlenstoff basierenden Molekülen, die jede für sich nur wenige Nanometer dick ist. Diese Schichten werden derzeit meist auf Glassubstrate aufgebracht. Ein typischer Aufbau einer OLED ist in Abbildung 2 gezeigt. Das Bauelement besteht aus Ladungstransportschichten – den so genannten Elektronen- und Lochtransport-schichten – und den emittierenden Schichten (in Abbildung 2 farbig markiert). Löcher und Elektronen werden an der transparenten Indium-Zinn-Oxid-Anode bzw. an der Silber-Kathode injiziert. Diese Ladungsträger werden mit Hilfe der Ladungstransportschichten zur emittierenden Schicht geleitet, in der sich Löcher und Elektronen treffen und ein sogenanntes Elektronen-Loch-Paar oder – anders ausgedrückt – ein Exziton bilden. Diese Elektronen-Loch-Paare sind angeregte Zustände eines einzelnen Moleküls, die unter Aussendung von Licht in ihren Grundzustand relaxieren können.

In einer OLED werden zwei unterschiedliche Arten von angeregten Zuständen gebildet: Singulett- und Triplett- Zustände. Das Verhältnis der erzeugten Triplett- und Singulettzustände beträgt 3:1 (siehe Abbildung 3). Normalerweise können nur Singulett Licht erzeugen. Diesen Prozess, d.h. die Rekombination eines Singulett unter Abstrahlung von Licht, nennt man Fluoreszenz und die entsprechenden Moleküle fluoreszente Emitter. Für Triplett hingegen ist die strahlende Rekombination quantenmechanisch verboten, so dass drei von vier Exzitonen in einer einfachen OLED verloren gehen.

Einen Ausweg bilden sogenannte phosphoreszente Emitter: durch eine besondere Eigenschaft dieser Moleküle können sowohl Singulett als auch Triplett strahlend rekombinieren. Insgesamt können somit alle Exzitonen in Licht umgewandelt werden und man erreicht mit Hilfe dieser phosphoreszenten Emitter eine nahezu perfekte Umwandlung von elektrischer in optische Energie.

Weißer OLEDs für Beleuchtungszwecke

Um weißes Licht zu erzeugen, muss die OLED Licht erzeugen, das den gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums abdeckt. Normalerweise emittieren organische Emit-

ABB. 1: Organische Leuchtdioden können äußerst effizient Licht in allen sichtbaren Spektralbereichen erzeugen.

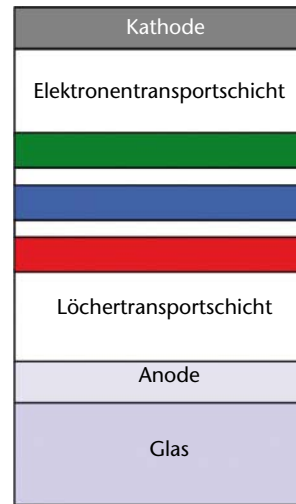
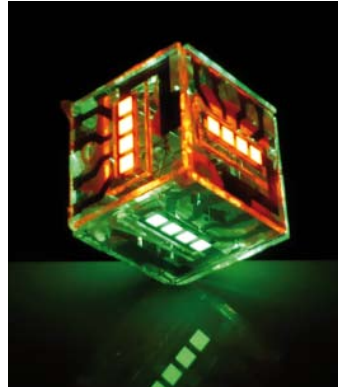


ABB. 2: Aufbau einer weißen organischen Leuchtdiode, die emittierenden Schichten sind farbig dargestellt. Mit Hilfe von Loch- und Elektronentransportschichten werden die Ladungen effizient zu den farbigen Emissionsschichten transportiert, wo Licht aller Grundfarben erzeugt wird.

ter jedoch nur in einem begrenztem Teil des sichtbaren Spektrums – sind also farbig. Weißes Licht kann nur durch die Kombination von verschiedenen Emittoren erzeugt werden. Üblicherweise werden deshalb rote, grüne und blaue Emittoren kombiniert. Die ersten weißen OLEDs basierten auf einer Mischung aus fluoreszenten blauen und phosphoreszenten roten und grünen Emittoren. Da in einer solchen OLED die Energie der Triplett, die auf dem fluoreszenten blauen Emitter gebildet wurden, verloren geht, ergibt sich eine Lichtausbeute von nur 14 lm/W (siehe Abbildung 4, schwarze Linie) [4].

Dresden geht neue Wege

Am Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden wurden zur Erhöhung der Effizienz weißer OLEDs zwei Konzepte entscheidend weiterentwickelt: der voll-phosphoreszente Ansatz und der so genannte Triplett-Harvesting Ansatz.

In einer voll-phosphoreszenten OLED wird die Emission von einem blauen, einem grünen und einem roten phosphoreszenten Emitter gemischt, so dass für das menschliche Auge ein weißer Farbeindruck entsteht [5]. In unserer Anordnung ist die emittierende Schicht in drei abgegrenzte Lagen unterteilt, die jeweils in einer anderen Farbe emittiert (siehe Abbildung 2).

Diese Schichtanordnung ergibt äußerst effiziente OLEDs, was in Abbildung 4 (grüne Linie) verdeutlicht wird. Bei einer Helligkeit von 1000 cd/m², das heißt einer Helligkeit von ungefähr tausend haushaltsüblichen Kerzen auf einer Fläche von einem Quadratmeter, wird eine Lichtausbeute von 37 lm/W erreicht. Allerdings gibt es zwei Aspekte, die einer Verbesserung bedürfen. Der Farbeindruck der OLED ist zu grün und die Lebensdauer der Dioden ist mit 1–2 Stunden noch sehr niedrig. Das Problem ist in dem blauen, phosphoreszenten Emitter begründet. Im Vergleich zu dem roten und grünen Emitter, die beide äußerst stabil

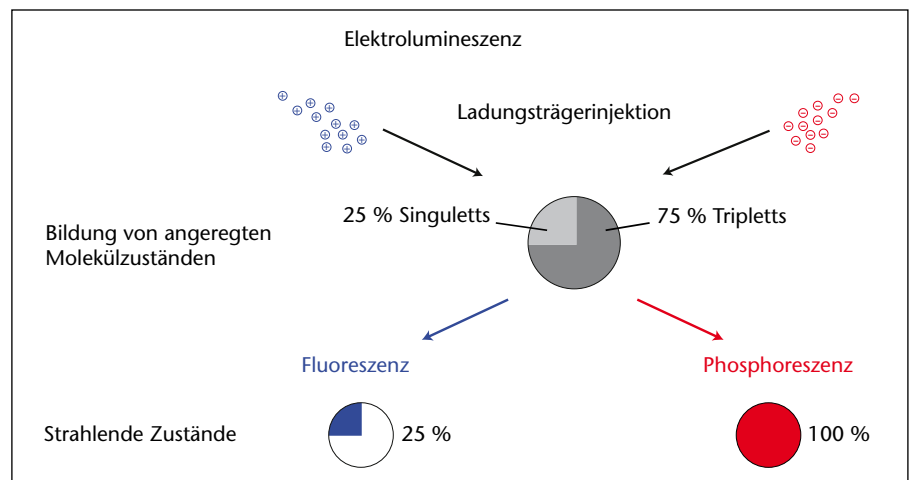


ABB. 3: In einer OLED werden dreimal so viele Triplett wie Singulett gebildet. In fluoreszenten Emittoren können nur die Singulett Licht erzeugen, so dass 75% aller Exzitonen verloren gehen. Im phosphoreszenten Emitter hingegen können die Triplett strahlend rekombinieren, so dass alle Exzitonen Licht erzeugen.

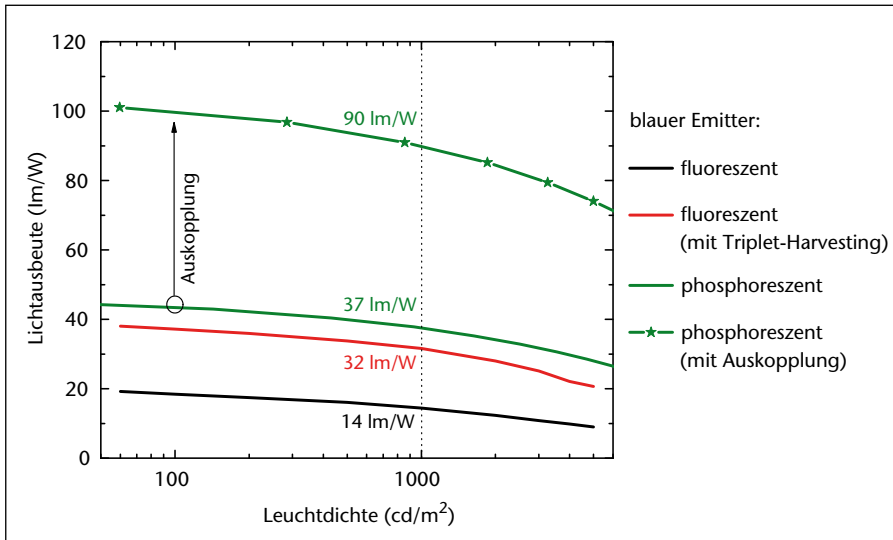


ABB. 4: Lichtausbeuten der verschiedenen Ansätze zur Erzeugung von weißem Licht. Die niedrigste Lichtausbeute besitzt Konzepte, die einen fluoreszenten blauen Emittor nutzen (schwarze Kurve). Mit Hilfe der Triplet-Harvesting Methode kann die Effizienz deutlich gesteigert werden (rot). Höchste Effizienzen liefert der voll-phosphoreszente Ansatz, vor allem wenn er mit Methoden zur Erhöhung der Lichtauskopplung kombiniert wird (grün).

sind und Lebensdauern von ungefähr 100.000 h erreichen, altert der blaue Emittor äußerst schnell. Dieser Mangel könnte mit einem stabilen phosphoreszenten blauen Emittor beseitigt werden, der jedoch zur Zeit nicht verfügbar ist.

Einen Ausweg aus dieser Situation bietet ein alternatives Konzept: weiße OLEDs basierend auf der Triplet-Harvesting Methode [6]. Bei dieser speziellen Art von OLEDs kann der instabile blaue phosphoreszente Emittor durch einen stabilen fluoreszenten Emittor ersetzt werden, ohne dass man Effizienzverluste erleidet. Normalerweise gehen die Triplets, die auf dem fluoreszenten blauen Emittor gebildet werden, verloren. Um dies zu verhindern kann ein blauer Farbstoff mit einem hohen Triplet-Niveau eingesetzt werden. Falls das Triplet-Niveau des blauen Emittors über dem Niveau des roten Emittors liegt, werden die im blauen Emittor er-

zeugten Triplets auf den phosphoreszenten roten Emittor übertragen, wo sie rekombinieren können und Licht aussenden (siehe Abbildung 5). Durch eine gute Wahl der Konzentrationsverhältnisse kann der weiße Farbeindruck erzielt werden.

Insgesamt können so alle Exzitonen genutzt werden und Licht emittieren – eine interne Effizienz von nahezu 100% ist auch auf diesem Wege erreicht. Es ergibt sich eine Lichtausbeute von 32 lm/W (siehe Abbildung 4, rote Linie). Diese Werte zeigen, dass das Triplet-Harvesting Konzept durchaus das Potential hat, an Effizienzen des voll-phosphoreszenten Ansatzes heranzureichen.

Allerdings werden trotz dieser nahezu perfekten Umwandlung von Strom in Licht keine Gesamteffizienzen von 100% erreicht – ungefähr 80% des erzeugten Lichtes bleibt in der OLED gefangen und wird nicht ausgekoppelt. Hier kommt nun ein zweiter

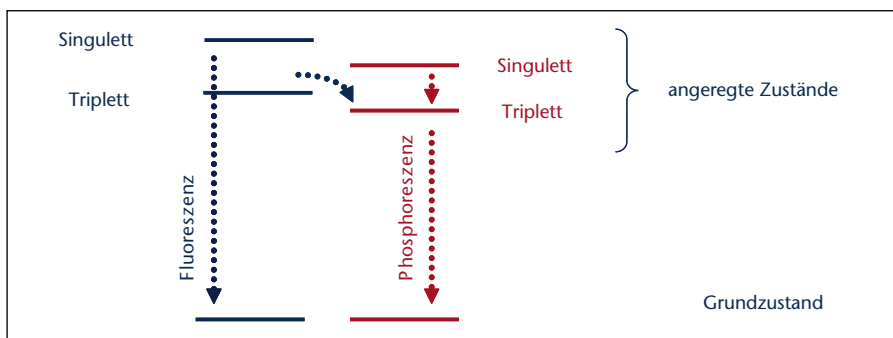


ABB. 5: Das Triplet-Harvesting Konzept. Es sind die Energieniveaus eines blauen fluoreszenten Emittors und eines roten phosphoreszenten Emittors gezeigt. Triplets, die auf dem blauen Emittor gebildet werden, würden normalerweise nicht-strahlend rekombinieren. Da jedoch das Triplet-Niveau des roten Emittors unterhalb des Triplet-Niveaus des blauen Emittors liegt, können die Triplets auf den roten Emittor übertragen werden und dort Licht emittieren.

DAS INSTITUT

Institut für Angewandte Photophysik an der Technischen Universität Dresden

Das Institut für Angewandte Photophysik (IAPP) der TU Dresden ist eines der weltweit führenden Institute bei der Entwicklung organischer elektronischer Bauelemente und hat bereits mehrere Weltrekorde bei organischen Leuchtdioden (OLEDs) und Solarzellen erreicht. Unsere Arbeiten bewegen sich im Spannungsfeld von Grundlagenuntersuchung und angewandter Forschung und haben inzwischen vier Ausgründungen hervorgerufen. Das IAPP befindet sich im Herzen des Clusters „Organic Valley Saxony“, Europas größtem Cluster für F&E und Herstellung im Bereich organischer Halbleiter.

www.iapp.de

Aspekt zum Tragen, der für die Gesamteffizienz einer OLED von Bedeutung ist. Neben der internen Effizienz, die beschreibt, wie gut die gebildeten Exzitonen genutzt werden können, geht die so genannte Auskopplungs-Effizienz als weiterer Faktor in die Gesamteffizienz ein. Das heißt, um mehr Licht abzustrahlen, muss die so genannte Auskopplungs-Effizienz erhöht werden. Auch hier haben Dresdner Forscher einen neuen Ansatz angewandt.

Höhere Effizienz durch bessere Auskopplung der Photonen

Das Problem des Gefangenhaltens von Licht ist in den optischen Eigenschaften der OLED begründet: Aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes der organischen Schichten und des Substratglases treten an den Grenzflächen zwischen organischen Schichten und Glas und zwischen Glas und Luft Totalreflexionen auf. Licht wird hin- und herreflektiert und bleibt effektiv in der OLED gefangen (siehe Abbildung 6).

Bei neueren Experimenten konnten Totalreflexionen an der Grenzfläche zwischen den organischen Schichten und dem Substratglas durch die Verwendung eines Glases, das denselben Brechungsindex wie die organischen Schichten besitzt, verhindert werden. Zum anderen konnte mit Hilfe einer dünnen Struktur aus kleinen Pyramiden, die auf das OLED-Glas gelegt wird, die Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Glas und Luft verringert und somit die Lichtausbeute erhöht werden (siehe Abbildung 6) [5].

Mit dieser Auskopplungsverstärkung ist es theoretisch möglich, die Lichtauskopplung

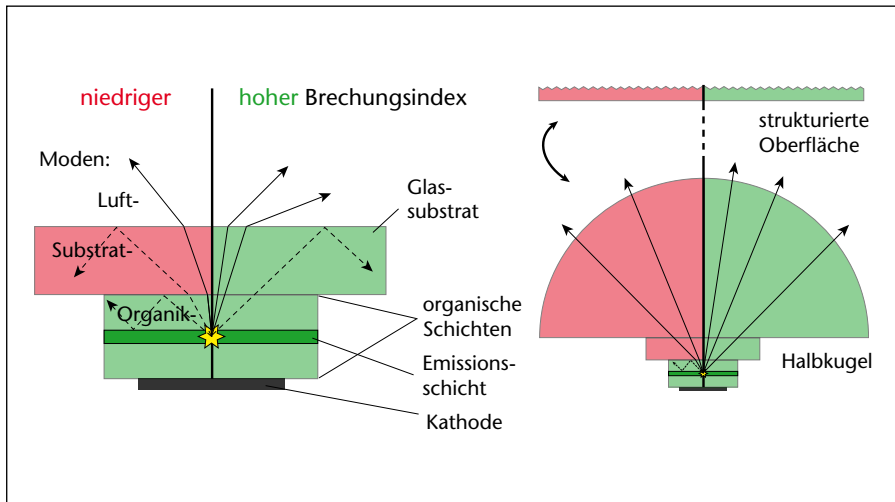


ABB. 6: Auskopplung des Lichtes aus OLEDs: Durch die unterschiedlichen Brechungsindizes wird Licht an der Grenzfläche zwischen Organik und Substrat (rot) und Substrat und Luft reflektiert und bleibt in der OLED gefangen. Mit Hilfe von Substraten aus hochbrechendem Glas (grün), durch eine Halbkugel oder durch eine dünne Struktur aus kleinen Pyramiden kann dieses Licht aus der OLED ausgekoppelt werden.

lung um den Faktor 2,5 auf 50% zu steigern (siehe Abbildung 4). Daher trägt dieser Ansatz entscheidend zu einer deutlichen Effizienzsteigerung von OLEDs bei.

Bei dem voll-phosphoreszenten Ansatz wird kombiniert mit der oben beschriebenen Auskopplungs-Verstärkung insgesamt eine Lichtausbeute von 90 lm/W erreicht (siehe Abbildung 4). Dieser Wert übertrifft die Effizienz von Energiesparlampen und lässt das Potential der OLEDs erahnen.

OLEDs – Leuchtquellen der Zukunft

Anfangs eine Laborkuriosität haben sich weiße OLEDs zu einer mächtigen Technologie entwickelt, die hohe Lichtausbeuten, gute Farbqualität und neue Designoptionen in sich vereint. In der Zukunft wird die OLED Technologie neben Displays in Fernsehern und tragbaren elektronischen Geräten auch in der Beleuchtungstechnik Anwendung finden. Erste weiße OLEDs sind bereits kommerziell erhältlich [7]. Um ihr volles Potential auszuschöpfen, müssen jedoch noch weitere Forschungsanstrengungen unternommen werden, um geeignete stabile phosphoreszente Emittoren oder alternative Konzepte, wie der Ansatz zur Nutzung der Triplets bei fluoreszenten Emittoren, zu finden und zu verbessern.

Referenzen

- [1] P. Bertoldi und B. Atanasiu, Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged european union, EUR 22753 EN, <http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency> (2007)
- [2] Steel, Nature Photonics 1, 25 (2007)
- [3] B. Lüssem, S. Reineke, T. Rosenow *et al.*, „Novel concepts for OLED lighting,“ Proceedings of SPIE Vol. 7617, 761712 (2010)
- [4] G. Schwartz *et al.* Applied Physics Letters 89, 083509 (2006)
- [5] S. Reineke *et al.*, Nature 459 (2009)
- [6] G. Schwartz *et al.*, Applied Physics Letters 92, 053311 (2008)
- [7] Philips (www.lumiblade.com), OSRAM (www.orbeos.com)

[Park XE-Bio]

Advanced Nano-Bio Science

Live cell image in-liquid
Live Mouse Muscle
60 x 60 µm



Rastersondenmikroskope mit SICM, NSOM, Raman

- ⊗ Scanning Ion Conductance Mikroskopie
- ⊗ Messung lebender Zellen
- ⊗ Echter Non-Contact Modus
- ⊗ Phasenkontrast, DIC, Fluoreszenz
- ⊗ Mit optischem Zugang von unten, von oben und von der Seite
- ⊗ Raman-Spektroskopie gleichzeitig mit AFM

Wir liefern auch

Digitale holographische Mikroskope, Interferenz- und Konfokalmikroskope, Systeme zur Analyse der Größenverteilung von Nanopartikeln in Flüssigkeiten



Schaefer Technologie GmbH

D-63225 Langen
Tel.: 06103/30098-0
Fax: 06103/30098-29
info@schaefer-tec.com
www.schaefer-tec.com