

# OLED mit Buckeln leuchtet heller

Verfahren zur verbesserten Lichtauskopplung aus weißen organischen Leuchtdioden entwickelt

• Aus organischen Leuchtdioden oder OLEDs lassen sich brillante Displays und helle, großflächige Lichtquellen für farbiges und weißes Licht herstellen. Eine OLED besteht im Wesentlichen aus einer dünnen Leuchtschicht aus organischem Material, die zwischen einer Metallkathode und einer durchsichtigen Anode aus Indiumzinnoxid (ITO) eingeschlossen ist. Aus der Kathode werden Elektronen und aus der Anode positive Löcher in die Leuchtschicht gepumpt, wo die Ladungsträger Exzitonen bilden, die schließlich unter Lichtemission zerfallen. Für diesen Prozess lässt sich eine Ausbeute von 100 % erreichen. Da das Licht auf seinem Weg aus der OLED jedoch mehrere Materialgrenzflächen überwinden muss, ist die Effizienz für die Lichtauskopplung nur sehr gering und liegt bei etwa 20 %. Jetzt haben japanische Forscher weiße OLEDs mit buckeligen Schichten hergestellt, die zwei- bis dreimal so viel Licht abstrahlen wie glatte OLEDs.

Hideo Takezoe vom Tokyo Institute of Technology und seine Kollegen haben bei der Herstellung der ungewöhnlich hellen OLEDs zwei bekannte Techniken auf neuartige Weise miteinander verbunden. Zum einen hatte man schon die Lichtauskopplung aus den OLEDs dadurch verbessert, dass man den Grenzflächen im Innern der Leuchtdiode sowie ihrer Glasoberfläche Wellenform gab. Dies machte die Grenzflächen zu einem Bragg-Gitter, sodass sie das Licht für passende Wellenlängen in bestimmte Richtungen beugten und so aus der OLED heraus lenkten statt es in ihr Inneres zu reflektieren. Für einfarbige OLEDs ließ sich die Gitterwellenlänge auf die Lichtwellenlänge abstimmen. Doch bei weißen OLEDs mit einem großen Wellenlängenbereich warf die Abhängigkeit der Beugung von der Lichtwellenlänge Probleme auf. Darüber hinaus ist die Anfertigung ausgedehnter Beugungsgitter für großflächige OLEDs kompliziert und kostspielig.

Hier kommt nun die zweite bekannte Technik ins Spiel, mit der japanischen Forscher ihren OLEDs eine besondere Oberflächenstruktur gaben. Sie bedampften eine etwa 100 °C heiße Kunststoffschicht aus Polydimethylsiloxan (PDMS) mit einer 10 nm dicken Aluminiumschicht und ließen sie

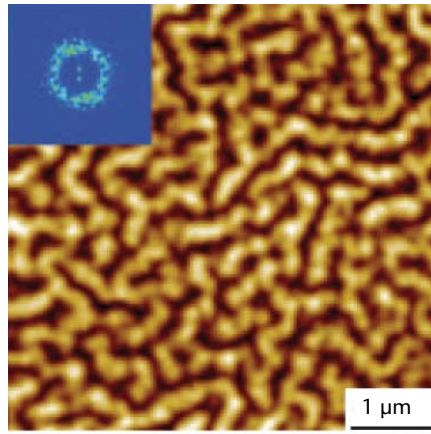


ABB.1: Die buckelige Oberflächenstruktur, die auf die OLED übertragen wurde. Links oben die Fourier-Transformierte. (Quelle: Won Hoe Koo et al., Nature Photonics)

abkühlen, wobei sich beide Schichten zusammenzogen. Da die Kunststoffschicht beim Abkühlen stärker schrumpfte als die Aluminiumschicht, gab es Spannungen an der Grenzfläche beider Schichten, sodass die Schichten buckelig wurden. Um die Oberflächenmodulation noch zu verstärken, benutzten die Forscher die buckelige Oberfläche als Matrice für eine zweite PDMS-Schicht, die wiederum erhitzt, mit Aluminium bedampft und abgekühlt wur-

de. Mit dieser „zweifach buckeligen“ Schicht stellten sie schließlich auf demselben Wege noch eine „dreifach buckelige“ Schicht her.

Es zeigte sich, dass die zwei- und dreifach buckeligen Schichten ein ungeordnetes Wellenmuster mit einer breiten Wellenlängenverteilung um 410 nm hatten, wobei die Wellenamplituden zwischen 40 nm und 70 nm lagen. Die zwei- und dreifach buckeligen PDMS-Schichten wurden anschließend als Matrices für die Herstellung der OLEDs benutzt, deren Grenzflächen die entsprechende Oberflächenstrukturierung erben. In ihren elektrischen und optischen Eigenschaften erwiesen sich die buckeligen OLEDs den glatten Leuchtdioden als deutlich überlegen. Bei vorgegebener Spannung zwischen den OLED-Elektroden hatten die buckeligen Leuchtdioden deutlich höhere Strom- und Leuchtdichten. Die Stromeffizienz (cd/A) und die Leistungseffizienz (lm/W) waren um mehr als das Doppelte erhöht. Dabei erwiesen sich die dreifach buckeligen OLEDs den zweifach buckeligen überlegen.

Die buckeligen Grenz- und Oberflächen erleichterten den OLEDs die Lichtabstrahlung in ähnlicher Weise wie die Bragg-Gitter, allerdings nicht nur für bestimmte Beugungsrichtungen und auch nicht nur für eine Lichtwellenlänge sondern für einen

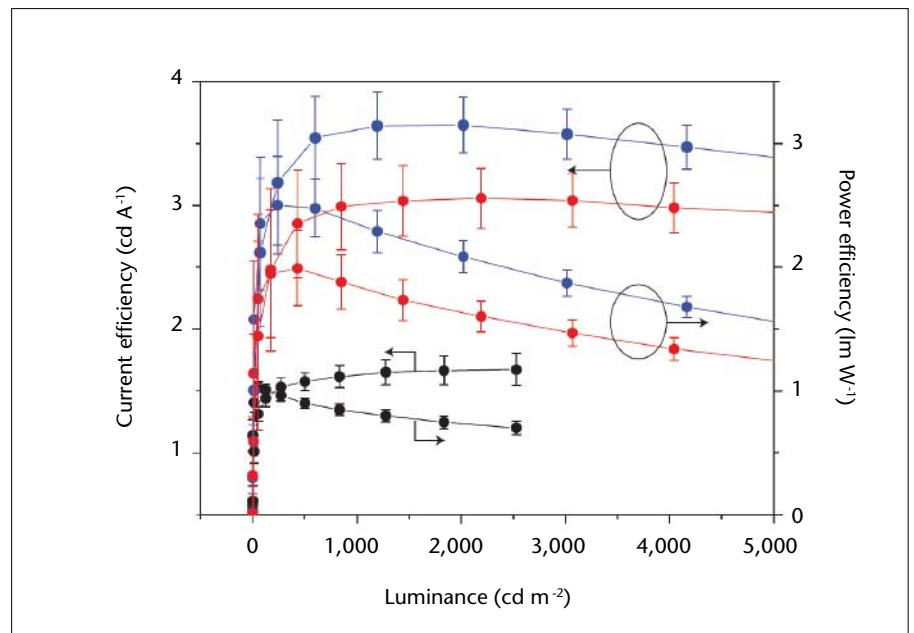


ABB.2: Die zwei- und dreifach buckeligen OLEDs (rot bzw. blau) haben deutlich höhere Strom- und Leistungseffizienz als die glatten OLEDs (schwarz). (Quelle: Won Hoe Koo et al., Nature Photonics)

großen Wellenlängenbereich. Die Richtungsabhängigkeit des von den buckeligen OLEDs abgestrahlten Lichtes war sehr günstig und entsprach der von glatten OLEDs: Die Abstrahlung konzentrierte sich in einem engen Winkel um die Oberflächennormale. Die Forscher weisen darauf hin, dass die buckelige Oberflächenstruktur der Leuchtdioden ihnen zusätzlich Flexibilität verleiht.

**Rainer Scharf**

**Weitere Infos:**

- Originalveröffentlichung:  
Won Hoe Koo et al.: Light extraction from organic light-emitting diodes

enhanced by spontaneously formed buckles, Nature Photonics (online 21.2.2010)

<http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2010.7>

- Gruppe von Hideo Takezoe am Tokyo Institute of Technology:  
<http://www.op.titech.ac.jp/lab/Take-Ishi/index-e.html>
- Alongkarn Chutinan et al.: Theoretical analysis on light-extraction efficiency of organic light-emitting diodes using FDTD and mode-expansion methods. Org. Elect. 6, 3 (2005)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2004.12.001>

- Sebastian Reineke et al.: White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency. Nature 359, 234 (2009) <http://dx.doi.org/10.1038/nature08003>
- J. M. Ziebarth et al.: Extracting light from polymer light-emitting diodes using stamped Bragg gratings. Adv. Funct. Mater. 14, 451 (2004) <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.200305070>
- Markus Klein & Karsten Heuser: Lichthimmel und Lichttapeten. Physik Journal 5/2008, S. 43 <http://www.pro-physik.de/Phy/pdfstart.do?mid=3&articleid=26859&recordid=26897>

# Perfekt fokussiert durch Unordnung

Ungeordnete Schichten bündeln optimierte Lichtwellenfronten weit unterhalb der Beugungsgrenze.

• **Inhomogene und trübe Medien** schränken die Möglichkeiten optischer Geräte normalerweise stark ein. Versucht man z. B. mit einer Linse einen Lichtstrahl in einer trüben Flüssigkeit zu fokussieren, so wird das Licht gestreut und der Strahl weitet sich auf, statt sich zu bündeln. Der zerstreuernden Wirkung eines trüben Mediums kann man jedoch entgegenwirken, indem man die Wellenfronten des einfallenden Lichts in der richtigen Weise moduliert. So war es Forschern von der Universität Twente vor zwei Jahren gelungen, eine ungeordnete und undurchsichtig erscheinende Schicht mit phasenoptimiertem Licht zu durchstrahlen. Jetzt haben sie gezeigt, dass man mit Unordnung das Licht sogar besser fokussieren kann als ohne.

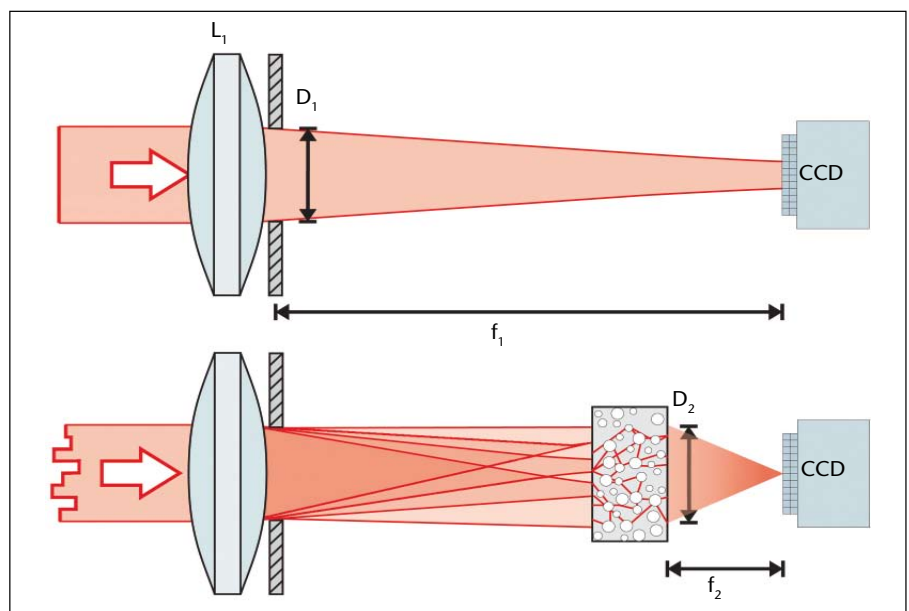
Ivo Vellekoop und seine Kollegen haben zunächst untersucht, wie gut man mit einer Linse von  $f_1=200$  mm Brennweite den orangenen Lichtstrahl eines Helium-Neon-Lasers ( $\lambda=632$  nm) bündeln kann. Dazu haben sie den Strahl hinter der Linse durch eine  $D_1=2,1$  mm weite Blende geführt und ihn dann in der Brennebene der Linse mit einer CCD-Kamera aufgefangen. Es zeigte sich, dass der Fokus einen Durchmesser von  $76 \mu\text{m}$  hatte und damit etwas größer war als  $w=62 \mu\text{m}$ , der durch die Beugungsgrenze gegebene Wert ( $w=1,03 \lambda f_1/D_1$ ). Die Fokussierung war also nicht optimal.

Anschließend brachten die Forscher zwischen Blende und CCD-Kamera eine  $6 \mu\text{m}$

dicke ungeordnete Schicht aus weißer Farbe in den Lichtstrahl. Die Farbschicht streute das hindurchgehende Licht und es entstand ein Specklemuster, das von der Kamera aufgefangen wurde. Von einem Brennfleck war nichts mehr zu sehen. Wie schon in ihrem früheren Experiment haben die Forscher dann den Laserstrahl vor der Linse durch einen Phasenmodulator geschickt. Der Modulator enthielt  $64 \times 64$  Segmente, die einzelnen über einen evolutionären Feedback-Algorithmus gesteuert werden konnten.

Die Forscher wählten ein bestimmtes Pixel der CCD-Kamera aus, auf das das La-

serlicht gebündelt werden sollte. Der evolutionäre Feedback-Algorithmus variierte die Einstellung des Phasenmodulators so lange, bis das Licht tatsächlich fokussiert war und das  $6,45 \mu\text{m} \times 6,45 \mu\text{m}$  große Pixel im Zentrum des Brennflecks lag. Als nun Vellekoop und seine Kollegen die ungeordnete Schicht langsam zur Kamera hin verschoben, nahm die Breite des Brennflecks stetig ab. Schließlich war der Fleck nur noch so groß wie das Pixel, seine Breite war somit zehnmal kleiner als der durch die Beugungsgrenze bestimmte Wert.



**ABB. 1: Linse und ungeordnete Schicht (unten) bündeln das phasenoptimierte Licht besser als die Linse alleine (oben).** (Quelle: I. M. Vellekoop et al., Nature Photonics)

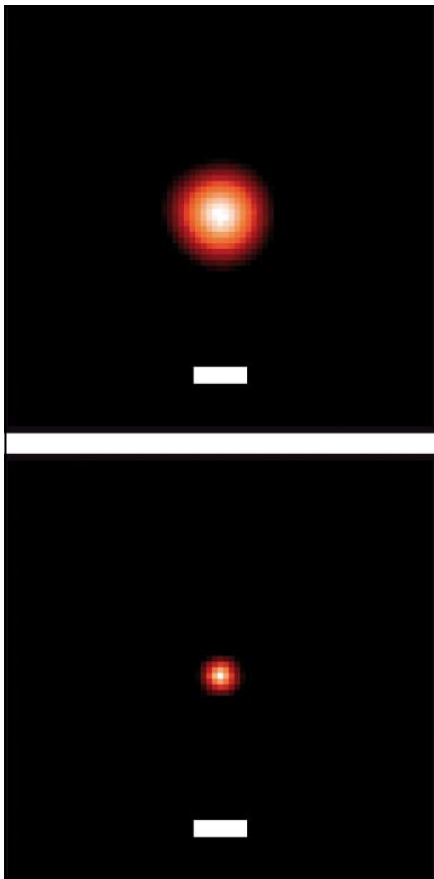


ABB. 2: Unordnung hilft bündeln: Der Fokus der Linse (oben) und der Linse mit ungeordneter Schicht (unten). (Quelle: I. M. Vellekoop et al., Nature Photonics)

Wie die Analyse des Experiments zeigte, war die verringerte Größe des Brennflecks mit einer effektiven Beugungsgrenze im Einklang, der zufolge  $w=1,03 \lambda f_2/D_2$  galt. Dabei war  $f_2$  der Abstand von der ungeordneten Schicht zur Kamera, während  $D_2$  der Durchmesser des Lichtflecks war, den der gebündelte Laserstrahl auf der Schicht erzeugte. Die ungeordnete Schicht wirkte also wie eine Linse mit der Brennweite  $f_2$  und einem Blendendurchmesser  $D_2$ . Die in Abhängigkeit von  $f_2$  gemessenen Fokusbrenndurchmesser zeigten, dass diese „ungeordnete Linse“ das Licht stets exakt im Einklang mit der effektiven Beugungsgrenze fokussierte. Der Fokus hatte immer optimale Schärfe.

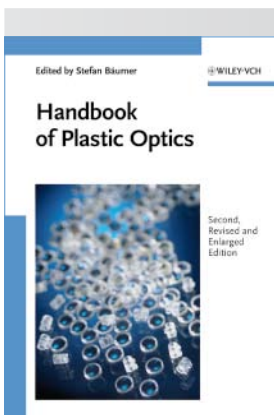
Eine weitere Überraschung gab es, als die Forscher untersuchten, wie die Lichtintensität in einem etwa 30  $\mu\text{m}$  großen Brennfleck verteilt war, den die ungeordnete Schicht auf der in diesem Fall 10 cm entfernten Kamera erzeugt hatte. Die normierte Intensitätsverteilung stimmte nahezu exakt mit der Autokorrelationsfunktion des Specklemusters überein, das man für den ursprünglichen, nicht phasenmodulierten Laserstrahl nach Passieren der ungeordneten Schicht in der Brennebene erhalten hatte. Die Forscher konnten zeigen, dass ihre experimentellen Ergebnisse völlig im Einklang waren mit den Vorhersagen der Theorie der Lichtausbreitung in ungeordneten Medien. Eine verbesserte Fokussierung durch Unordnung hatte man schon früher für Schallwellen sowie Mi-

kro- und Radiowellen beobachtet und z. B. in der mobilen Kommunikation genutzt. Dass sich jetzt auch sichtbares Licht auf diese Weise verbessert bündeln lässt, eröffnet neuartige Anwendungsmöglichkeiten z. B. für die Mikroskopie inhomogener Medien.

Rainer Scharf

**Weitere Infos:**

- Originalveröffentlichung: I. M. Vellekoop, A. Lagendijk and A. P. Mosk: Exploiting disorder for perfect focusing. Nature Photonics (online 14.2.2010) <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2010.3>
- Complex Photonic Systems an der Universität Twente: <http://cops.tnw.utwente.nl/>
- E. G. van Putten, A. Lagendijk and A. P. Mosk: Optimal Concentration of Light in Turbid Materials. (Preprint 2010) <http://arxiv.org/abs/1001.1066>
- S. M. Popoff et al.: Measuring the Transmission Matrix in Optics : An Approach to the Study and Control of Light Propagation in Disordered Media. (Preprint 2010) <http://arxiv.org/abs/0910.5436v1>
- S. H. Simon et al.: Communication in a disordered world. Phys. Today 54 (9), 38 (2001) [http://ptonline.aip.org/journals/doc/PHTOAD-ft/vol\\_54/iss\\_9/38\\_1.shtml](http://ptonline.aip.org/journals/doc/PHTOAD-ft/vol_54/iss_9/38_1.shtml) (frei!)
- R. Scharf: Wundersam erhöhte Lichtdurchlässigkeit. pro-physik 19.9.2008 [www.pro-physik.de/Phys/leadArticle.do](http://www.pro-physik.de/Phys/leadArticle.do)



Edited by STEFAN BÄUMER, Philipps Eindhoven

**Handbook of Plastic Optics**  
2nd revised and enlarged edition

A coherent overview of the current status of injection molded optics, describing in detail all aspects of plastic optics, from design issues to production technology and quality control. This updated second edition is supplemented by a chapter on the equipment and process of injection wells as well as a look at recent applications.

The contributors, each one a leading expert in their discipline, have either a background in or strong ties to the industry, thus combining a large amount of practical experience. With its focus firmly set on practical applications, this is an indispensable reference for all those working in optics research and development.

February 2010, approx 272pp  
with approx 80 figs,  
60 in color, Hbk  
ISBN: 978-3527-40940-2

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, E-Mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de), [www.wiley-vch.de](http://www.wiley-vch.de)



Inhalt und Preisänderungen vorbehalten.

# Ultraschneller Lichtblitz mit LED

Leistungsstarke Lichtquelle mit Belichtungszeiten von 300 Nanosekunden zur Qualitätsprüfung entwickelt

► **Siemens-Forscher haben die schnellste LED-Blitzlampe zur Qualitätsprüfung entwickelt. Mit der leistungsstarken Lichtquelle, die eine extrem kurze Belichtung erlaubt, können schnelle Fertigungsabläufe direkt überwacht werden. Die Kamera kann relativ schnell bewegte Gegenstände mit hoher optischer Auflösung scharf abbilden. Der Hochgeschwindigkeitsblitz wurde für ein Inspektionssystem für gedruckte Elektronik entwickelt. Er verbraucht weniger Energie und heizt den Messraum nicht so stark auf wie die bisher verwendeten Halogenlampen.**

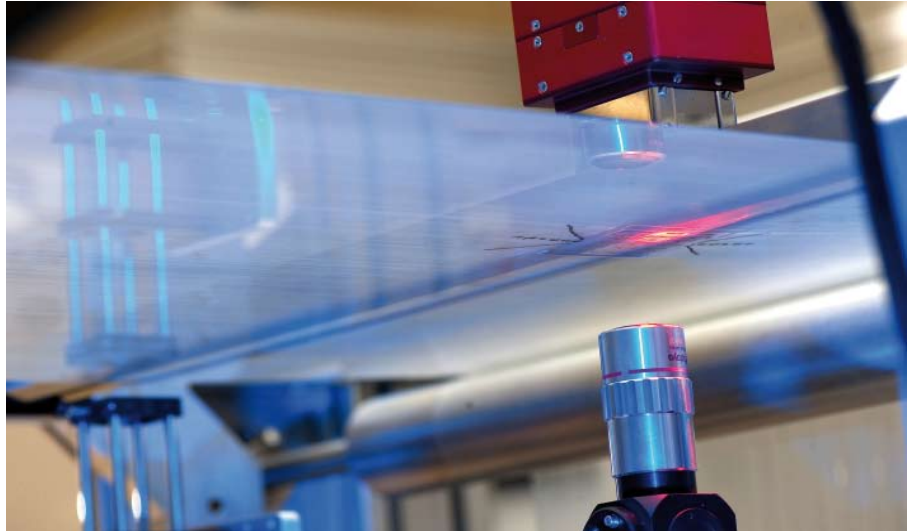


ABB.: Leistungsstarke LED-Blitzlampe zur Qualitätsprüfung. (Quelle: Siemens AG)

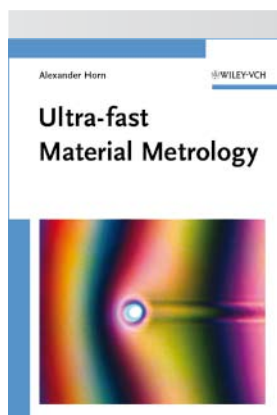
Qualitätskontrollen sind oft optischer Art, das heißt, eine Kamera nimmt ein digitales Bild auf, welches anschließend analysiert wird. Oft läuft aber die Fertigung so schnell, dass herkömmliche Kamerasysteme kein scharfes Bild mehr liefern. Die Tests werden dann ans Ende der Fertigung ausgelagert und pro Produktionseinheit durchgeführt. Wird ein Fehler entdeckt, ist seit dem letzten Test Ausschuss produziert worden. Will man hingegen in der Fertigungslinie testen, werden teilweise Beleuchtungszeiten von weit unter einer Millionstel Sekunde gebraucht. Eine so schnelle Lichtquelle mit genügend hoher Leistung gibt es bisher nicht. Die Alternative ist Dauerlicht und eine Kamera mit extrem kurzen Verschlusszeiten. Die ist jedoch

relativ teuer und hat darüber hinaus den Nachteil, dass die Lichtquelle den Messraum aufheizt.

Die Forscher von Siemens Corporate Technology (CT) verwenden mehrere LEDs für die leistungsstarke und ultraschnelle Lichtquelle. Der Hochgeschwindigkeitsblitz bietet Belichtungszeiten von 300 Nanosekunden. Bei gewöhnlichen Fotoblitzern betragen die kürzesten Beleuchtungszeiten 50 Mikrosekunden und bei industriellen Stroboskopen eine Mikrosekunde. Die LED-Blitzleistung lässt sich bis zu einem Wert von über zwölf Kilowatt sehr fein einstellen.

Der Blitz kombiniert LEDs verschiedener Wellenlängen, damit die Lichtfarbe auf das jeweilige zu testende Produkt abgestimmt werden kann. Der Blitz wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts MaDriX entwickelt. Er bietet die Möglichkeit, Fertigungsabläufe zu optimieren und Prüf- sowie Energiekosten einzusparen.

[www.siemens.com](http://www.siemens.com)



Alexander Horn

## Ultra-fast Material Metrology

This book is the first to describe novel measurement techniques of processes during laser-matter interaction using ultra-fast lasers. Targeted at both engineers and physicists, initial chapters address the working tools, the history of laser ultra-fast metrology, an overview of ultra-fast laser sources, and the fundamentals of laser radiation-matter interaction. Ultra-fast laser radiation is discussed in chapter 4, while further chapters describe the methodology of pump and probe

be in practice, as well as applications for pump and probe metrology in engineering, including spectroscopy and imaging techniques. Chapter 7 describes the perspectives for this new field of research and predicts the metrology of the future, showing new potential applications of laser sources and new detectors in combination with improved pump and probe methods.

September 2009, 222pp with  
91 figs and 6 tabs, Hbk  
ISBN: 978-3527-40887-0

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, E-Mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de), [www.wiley-vch.de](http://www.wiley-vch.de)

 WILEY-VCH

Irrtum und Preisänderungen vorbehalten.