

Wolfgang Kowalsky

„Am Anfang war s Käse!“ In der Geschichte des Kunststoffs wird ein neues Kapitel aufgeschlagen – vom Käsekonzentrat zum Mikrochip [1]. Mit diesem Rückblick auf das Jahr 1530, in dem B. Schobinger eine Rezeptur zur Gewinnung einer Ersatzsubstanz für Rinderhorn als Einstieg in die Chemie der Kunststoffe vorstellte, lud der Projektträger Informationstechnik des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im August 2002 zu einer Presseveranstaltung unter dem Motto „Polytronik: Intelligenz in Plastik – Polymer-elektronik für das 21. Jahrhundert“ ein.

Während Kunststoffe kaum mehr aus einem Bereich unseres Alltags wegzudenken sind, spielten sie in der Elektronik und Photonik bisher nur eine begleitende Rolle. Abgesehen von sehr wenigen Ausnahmen (z. B. Flüssigkristall) wurde von diesem Allroundwerkstoff selten mehr als die Eigenschaft der elektrischen Isolation genutzt. Aus diesem Schattendasein treten derzeit organische Materialien nach beachtlichen Erfolgen in langjähriger Grundlagenforschung als neuartige elektronische und photonische Funktionswerkstoffe heraus: Komplexe, maßschneiderbare organische Verbindungen erobern Anwendungsfelder als elektrische Leiter, Halbleiter und Lichtemitter, die bisher ausschließlich anorganischen Materialien vorbehalten waren. Vorrangiges Ziel dieser Polytronik (*Polymerelektronik*) ist es nicht, mit der klassischen Silizium- und III-V-Halbleitertechnologie in Konkurrenz zu treten, sondern neue Anwendungsfelder zu erschließen, die diesen prinzipiell nicht zugänglich sind, wie z. B. flexible Displays, elektronische Etiketten und Fahrausweise. Abb. 1 zeigt erste Produkte dieses zukunftssträchtigen Forschungsgebiets, die im Folgenden näher diskutiert werden. Für zukünftige Fertigungsstandorte dominiert zwar Asien (Korea, China, Taiwan, Japan), doch werden auch europäische Firmen dank umfangreicher Grundlagenforschung als Hersteller von Produktionseinrichtungen, organischen Quellenmaterialien und Substraten erheblich an der Wertschöpfungskette beteiligt sein.



Abb. 1
Anwendungsbeispiele der Polytronik: a) Digitalkamera mit organischem Elektrolumineszenz-Display (Kodak), b) integrierte Schaltung aus organischen FETs auf einem flexiblen Kunststoffsubstrat (Siemens) und c) Lichtemission (Fernfeld) eines optisch angeregten organischer DFB-Laser (OLAS-Verbund des BMBF)

Drei ausgewählte Beispiele sollen das Potential dieses neuen Arbeitsgebiets belegen. Die organische Elektrolumineszenz, die organische Elektronik und die organischen Laser. Weitere Schwerpunkte liegen in den Bereichen Sensorik, Mikrosystemtechnik und integrierte Optik. Die Bedeutung der noch jungen Polytronik dürfte bereits in naher Zukunft erheblich anwachsen. Die *organische Elektrolumineszenz* wird seit mehr als fünfzehn Jahren intensiv erforscht. Sie ermöglicht flache selbstleuchtende Displays, deren hohe Effizienz insbesondere für mobile Anwendungen bei begrenzter Akkukapazität (z. B. Mobiltelefone, Organizer und Laptops) sehr vorteilhaft ist. Während diese OLED-Displays (organic light emitting diodes) die Schwelle zur Markteinführung bereits überschritten haben, erfordert die *organische Elektronik* noch weitere Grundlagenforschung. Diese Technologie tritt nicht in Konkurrenz zu anorganischen Halbleitern, sondern erschließt durch eine kostengünstigere Rolle-zu-Rolle Fertigung, bei der elektronische Schaltungen nicht auf Einzelsubstraten, sondern fortlaufend auf einem Plastikfilm präpariert werden, neue Produktfelder, wie z.B. elektronische Etiketten zum Ersatz des Barcodes. *Organische La-*

ser, deren Erforschung sich ebenfalls noch in einer frühen Phase befindet, belegen die außerordentliche Stabilität organischer Materialien. Sie ermöglichen Laser im gesamten sichtbaren Spektralbereich.

Organische Elektrolumineszenz

Anzeigeelemente als Bindeglied zwischen Maschine und Mensch gewinnen einen immer größeren Stellenwert. Die Anforderungen an derartige Displays sind vielseitig. Die Anwendungsgebiete für den Einsatz von einfachen Anzeigeelementen bis hin zu großflächigen Vollfarbdisplays nehmen in unserer multimedialen Gesellschaft stetig zu [2]. Folglich zeigt der Flachdisplay-Markt für Flüssigkristall-Displays (LCD) und andere Flachdisplays (FPD), s. Abb. 2, ein Wachstum von jährlich etwa 15% bei einem weltweiten Gesamtvolumen von etwa 45 Milliarden US \$. Das Marktvolumen der voluminösen Kathodenstrahlröhren (CRT) ist dagegen rückläufig. In diesem hart umkämpften Markt hat kaum eine neue Technologie eine stürmischere Entwicklung erfahren als die organische Elektrolumineszenz und ihre Anwendung in flachen

selbstleuchtenden Displays. OLEDs werden in zwei zunächst konkurrierenden, inzwischen aber häufig kombinierten Technologien hergestellt: Die „Small Molecule-OLEDs“ (SM-OLED), also OLEDs aus kleinen Molekülen, werden vorrangig durch Vakuumsublimation von niedermolekularen Verbindungen hergestellt, während „Polymer-OLEDs“ (P-OLED) durch naß-chemische Beschichtungen (Aufschleudern, Drucken, Tauchen oder Sprühen) entstehen.

In ihrer Funktion unterscheiden sich die Polymer- und SM-Dioden nicht. Beide beruhen auf der Elektrolumineszenz organischer Materialien. Über eine Anode und eine Kathode werden Löcher bzw. Elektronen in die organischen Schichten injiziert. Diese bilden in der Emissionszone angeregte Zustände aus, sogenannte Exzitonen, die teilweise ihre Energie in Form von Licht „strahlend“ abgeben [3]. Um das Licht abstrahlen zu können, wird bei konventionellen OLEDs die Anode auf dem Glassubstrat aus leitfähigem transparentem Indium-Zinn-Oxid (ITO) abgeschieden, das auch bei LC-Displays als Kontaktmaterial eingesetzt wird. Effiziente Bauelemente sind allerdings nur Mehrschichtsysteme (Abb. 3), da die organischen Materialien unterschiedliche Eigenschaften für den Elektronen- und Löchertransport aufweisen. So ist es möglich, den Ort der Rekombination der Elektronen mit den Löchern im Bauelement durch eine geeignete Schichtenfolge festzulegen. Der in Abb. 3 dargestellte Standardaufbau einer grün emittierenden OLED enthält die organischen Halbleiter BCP als Elektronentransport- und Löcherblockierschicht, den Metall-Chelat-Komplex Alq_3 dotiert mit etwa 1% Chinacridon als Emissionsschicht und das Starburst-Derivat 1-TNATA sowie das aromatische Amin α -NPD für den Löchertransport. Die Einsatzspannung liegt bei der Photonenenergie von 2,2 V. Die für ein Mobiltelefon erforderliche Leuchtdichte von 100 cd/m^2 wird bereits bei 3 V erreicht, und bei 4,7 V beträgt die Helligkeit sogar 10.000 cd/m^2 . Dieses Beispiel belegt die Leistungsfähigkeit von OLEDs, so daß sie eine interessante Basis für eine emissive Displaytechnologie bilden.

Ein großflächiges, defektfreies und in der Schichtdicke präzise kontrolliertes Aufbringen der organischen Schichten ist die größte Herausforderung für die OLED-Displayfertigung. In der Grundlagenforschung werden bevorzugt Cluster-Vakuumanlagen (OMBD, organic molecular beam deposition) eingesetzt. Um einen zentralen Substratmanipulator herum sind die einzelnen Prozeßkammern für das Aufdampfen der organischen Schichtenfolge und der Deckmetallisierung angeordnet. Ein derartiges System bietet zwar eine hohe Flexibilität für die Forschung, limitiert aber aufgrund des seriellen individuellen Substrataufbringens den Probandurchsatz derart, daß hiermit keine kostengünstige Produktion realisiert werden kann.

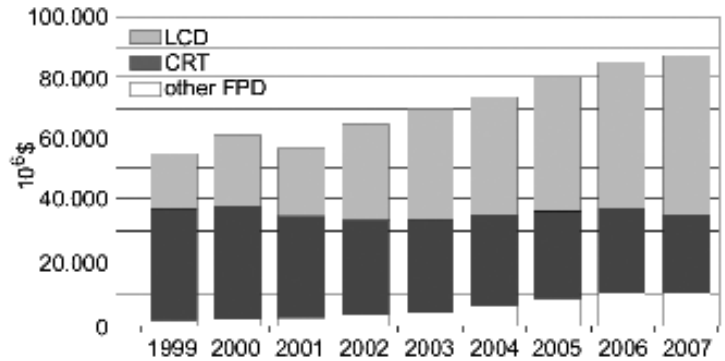
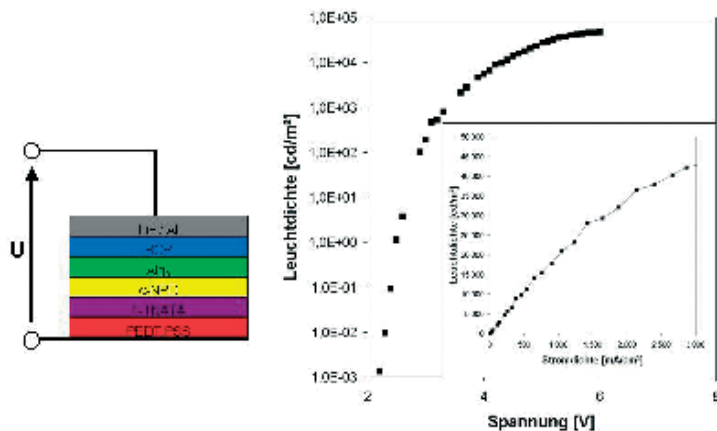


Abb. 2
Weltweiter Displaymarkt [1]

In Zusammenarbeit mit der Firma Applied Films wurde daher ein in-line-OMBD-Prozeß entwickelt: Die in Abb. 4 dargestellte weltweit erste in-line-Anlage erlaubt die Beschichtung von Substraten bis $180 \times 240 \text{ mm}^2$ während des kontinuierlichen Transports durch das langgestreckte Vakuumsystem: Orthogonal zur Transportrichtung sind lineare Verdampferquellen in geringem Abstand unter dem Substrat angeordnet, die eine homogene Schichtabscheidung bei hoher Materialausbeute ermöglichen. Zur Steigerung der OLED-Lichteffizienz und zur Erzeugung unterschiedlicher Farben werden die Emissionsschichten dotiert. Über die Dotierung kann die Emission der OLEDs von der in Abb. 2 gezeigten grünen Emissionswellenlänge in den blauen oder roten Bereich verschoben werden, so daß auch die Herstellung eines mehrfarbigen oder vollfarbigen Displays möglich ist [4]. In Kooperation mit der Firma Aixtron wird am Institut derzeit ein neuartiges Abscheideverfahren, die OVPD-Technik (engl. *organic vapour phase deposition*), erprobt. Im Gegensatz zur OMBD-Anlage, bei der das organische Material im Hochvakuum sublimiert wird und sich dann auf dem Glassubstrat abscheidet, wird bei der OVPD das organische Quellenmaterial in einen Gasstrom sublimiert. Präzise Schichtdicken- und Dotierungskontrolle bei hoher Materialausbeute zeichnen dieses Verfahren aus.

Abb. 3
Aufbau und Leistungskennlinie einer grün emittierenden OLED



Die Herstellung eines Passiv-Matrix-Displays mit Lichtemission durch das Glassubstrat stellt spezifische Anforderungen an die Substratstrukturierung, da bei organischen Halbleitern keine gängigen Strukturierungsverfahren der Mikroelektronik eingesetzt werden können. So ist z.B.



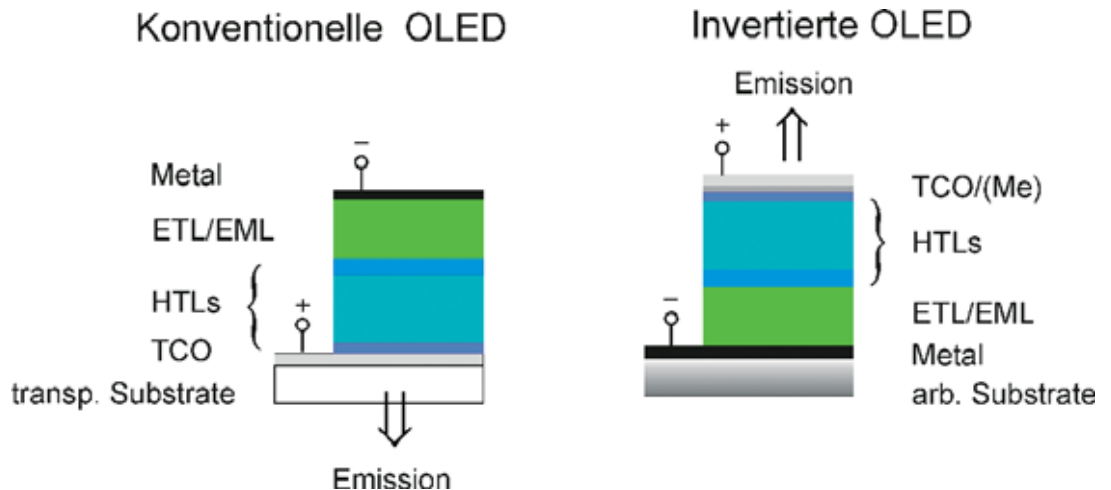
Abb. 4
Produktionsnahe in-line-Depositionsanlage



Abb. 5
5000 Pixel PM-Display

eine photolithographische Strukturierung der organischen Dünnschichten nicht möglich, da Feuchte und die verwendeten Lösungsmittel die Schichten angreifen oder sogar völlig zerstören. Ein etabliertes Verfahren für monochrome oder mehrfarbige Displays ist die Verwendung von Kathodenseparatoren. Nach der naß-chemischen Strukturierung der ITO-Zeilen werden Polymerrippen lithographisch präpariert. Bei der anschließenden Vakuumabscheidung der organischen Filme und der Deckmetallisierung werden diese an den Kathodenseparatoren unterbrochen, so daß die Spalten des Displays elektrisch getrennt sind. Abb. 5 zeigt am Beispiel eines 5.000 Pixel Passiv-Matrix-Displays für ein Mobiltelefon die gute Homogenität bei hohem Füllfaktor.

Abb. 6
Invertierte OLED für Aktiv-Matrix-Displays



Der serielle Ansteuermodus der einzelnen Zeilen eines Passiv-Matrix-Displays mit einer Bildwiederholfrequenz von typisch 100 Hz begrenzt aufgrund der Leitungsverluste die Displaygröße auf etwa 128 Zeilen (MUX 128). Für eine hohe Auflösung bei großen TV-Bildschirmdiagonalen ist daher der bei Flüssigkristall-Displays etablierte Aktiv-Matrix-Aufbau unverzichtbar: Auf dem Glassubstrat werden die Treibertransistoren aus polykristallinem Silizium unmittelbar am Ort jedes einzelnen Pixels präpariert. Auf diese Weise kann in Aktiv-Matrix-Displays jede OLED individuell angesteuert werden, so daß die Notwendigkeit hoher Impulshelligkeiten entfällt. Ein wichtiges Gütekriterium ist der Füllfaktor (Abb. 5), also der Ausnutzungsgrad der Bildschirmfläche für leuchtende Elemente. Es ist daher sinnvoll, die Treiberschaltungen „platzsparend“ unter den organischen Leuchtdioden anzuordnen. Invertierte organische Leuchtdioden erlauben eine Lichtemission durch den obenliegenden Deckkontakt und stellen somit einen vielversprechenden Ansatz zur Realisierung von Aktiv-Matrix-Displays dar. Wie Abb. 6 zeigt, basieren sie auf einer Umkehrung der Kontaktreihenfolge sowie der funktionalen organischen Dünnschichten. Die technologische Herausforderung liegt im Aufbringen eines transparenten, leitfähigen Metalloxids mit guten Injektionseigenschaften. Durch die Verwendung eines hydrophoben Schutzfilms ist es gelungen, die Materialklasse der hochleitfähigen Polymere zu erschließen. Die in Wasser dispergierten Verbindungen werden durch Aufschleudern abgeschieden und zeichnen sich durch ideale ohmsche Kontakteigenschaften mit der Indium-Zinn-Oxid-Anode aus.

Organische Elektronik

Organische Materialien für den Ladungstransport verfügen im undotierten Zustand über nahezu keine freien Ladungsträger und sind damit gu-

ble und leistungsfähige OLED-Displays herzustellen.

Organische Laser

Mit zunehmendem Erfolg organischer Leuchtdioden (OLEDs) sind die organischen Emissionsmaterialien auch für Laser interessant geworden. Forschungsarbeiten zu optisch angereg-

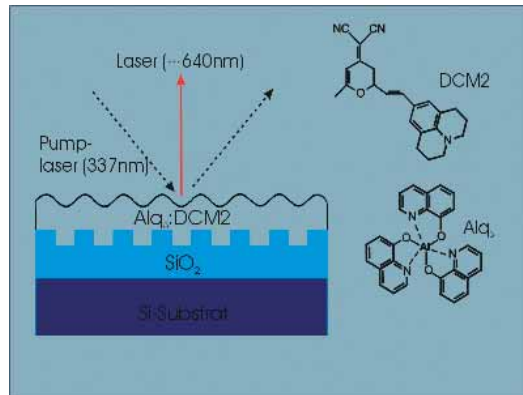


Abb. 9
Aufbau des Lasers
und Struktur der organischen Materialien

ter ASE (Amplified Spontaneous Emission) lieferten den Nachweis für das Vorhandensein der für Laser notwendigen Besetzungsinversion. Weiterführende Untersuchungen des optischen Gewinns, sowie die erfolgreiche Realisierung verschiedener Laserbauelemente, ergaben ein großes Potential der organischen Emissionsmaterialien. Die Forschungsbemühungen zielen hierbei auf günstig herstellbare, weit in der Wellenlänge abstimmbare Laserdioden für den gesamten sichtbaren Spektralbereich.

Dieser Reihe von Vorteilen solcher Bauelemente steht jedoch eine Anzahl praktischer Probleme entgegen, die es zu lösen gilt. Im Gegensatz zu OLEDs, die mit geringen Betriebsströmen (mA/cm) arbeiten, ist für den Laserbetrieb eine Hochstromanregung (kA/cm) erforderlich. Daher werden extreme Anforderungen an solche Bauelemente hinsichtlich Stromzuführung und Wärmeableitung gestellt.

Die in jüngster Zeit erzielten Fortschritte auf dem Gebiet optisch angeregter organischer Laser

bestätigen die vielversprechenden Eigenschaften wie Emissionswellenlänge und spektrale Abstimbarkeit. Hierbei kommen als aktive Lasermaterialien prinzipiell alle organischen Materialien in Frage, welche bei geeigneter Anregung optischen Gewinn erbringen. Der Aufbau der Laserbauelemente (Abb. 9) orientiert sich dabei am DFB-Laser (DFB: distributed feedback) und besteht im wesentlichen aus einem vorstrukturierten Substrat und der organischen Emissionsschicht. Somit entsteht ein Filmwellenleiter, der über die Substratoberfläche die für Laseremission erforderliche Rückkopplung sicherstellt. Als Substratmaterialien werden hauptsächlich oxidierte Siliziumwafer verwendet. Die Strukturierung der Substratoberfläche zur Erzeugung des DFB-Gitters erfolgt in der Physikalischen Bundesanstalt mittels Elektronenstrahlithographie und Ätzverfahren, die eine rechteckförmige Modulation der Oxidschicht erzeugen. Diese Modulation des Substrates gibt die Emissionswellenlänge des Lasers vor. Am hiesigen Institut werden dann in einer Cluster-OMBD-Anlage die organischen Emissionsschichten aufgedampft. Die Spektren dieser Laser zeigen Halbwertsbreiten von etwa 0,1nm und lassen sich durch Wahl der Gitterperiodizität abstimmen (Abb. 10). Für Alq₃:DCM₂ wurden eine Abstimbarkeit von 37,6 nm im roten Spektralbereich erzielt [6].

Die erfolgreichen Untersuchungen an optisch gepumpten organischen Laserbauelementen sind nur ein erster Schritt zum elektrischen Betrieb. Hierfür sind noch einige Hürden zu überwinden. Soll das Aufbaukonzept der OLED auch für organische Laser Verwendung finden, so müssen die Ausmaße des Wellenleiters auf etwa eine Materialwellenlänge ausgedehnt werden. Hierbei stellt vor allem die geringe Leitfähigkeit organischer Materialien ein Problem dar. Des weiteren müssen die verschiedenen Auslöschungseffekte, welche bei Hochstromanregung auftreten, untersucht und minimiert werden. Diese Schwierigkeiten sind der Grund dafür, daß bis heute noch keine elektrisch angeregte Besetzungsinversion in amorphen organischen Dünnschichten nachgewiesen werden konnte.

Derartig komplexe experimentelle Forschungsarbeiten erfordern ein hochmotiviertes interdisziplinäres Forschungsteam und eine aufwendige technologische und meßtechnische Ausstattung. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verdienen daher unbedingt eine namentliche Nennung in diesem Beitrag (unter Verzicht auf akademische Grade): E. Becker, T. Dobbertin, G. Dobрева, M. Dümeland, G. Ginev, S. Hartmann, A. Janssen, H.-H. Johannes, A. Kammoun, H. Krautwald, M. Kröger, U. Lawrentz, R. Parashkov, T. Rabe, T. Riedl, C. Schildknecht, D. Schneider. Die umfangreiche Förderung des BMBF (Förderkeennzeichen 01 BK 918, 13N 8216, 01 BI 162, 13 N

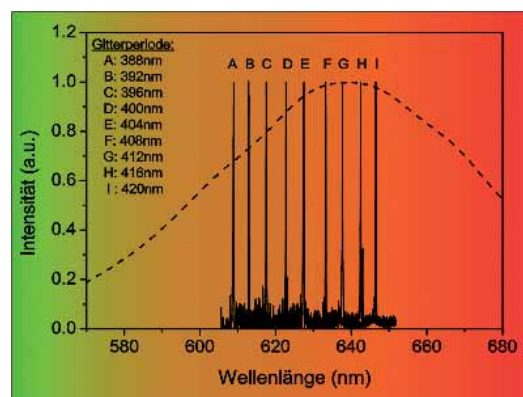


Abb. 10
Laserspektren für
verschiedene Gitter-
periodizitäten

8166) der DFG, der VW-Stiftung und der EU haben diese Forschungsarbeiten überhaupt erst ermöglicht. Die durch nur drei Beispiele belegte Entwicklung von polymeren Bauelementen mit elektrischen, optischen, mikromechanischen und sensorischen Funktionalitäten hat in den letzten Jahren erstaunliche Fortschritte gemacht. Sie wird in naher Zukunft preiswerte, flexible mikroelektronische Systeme ermöglichen, die wesentliche Bereiche unseres täglichen Umfelds nachhaltig verändern werden. Zu visionären Anwendungen gehören der elektronische Barcode, die flexible elektronische Display-Zeitung aber auch mikrooptische Systeme für die medizinische Diagnostik (lab on chip).

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky
Technische Universität Braunschweig
Institut für Hochfrequenztechnik
Labor für Elektrooptik
Schleinitzstraße 22
38106 Braunschweig

Literatur

- [1] C. Lüdemann, Einladung zur Presseveranstaltung Polytronik, Fraunhofer Verbund Mikroelektronik, Berlin, 8.2002.
- [2] D. E. Mentley: State of Flat-Panel Display Technology and Future Trends. Proceedings of the IEEE 90 (2002) 4,453-459.
- [3] D. Metzdorf: Organische Passiv-Matrix-Displays. ISBN3-89873-764-0 Cuvillier Verlag Göttingen 2002.
- [4] BMBF- Förderung 01 BK 918.
- [5] Applied Physics Letters Vol 49(18) pp. 1210-1212, 1986.
- [6] D. Schneider et al.: Wavelength-tunable organic solid-state distributed-feedback laser. Applied Physics B 77, 399-402 (2003).



GEGENWÖRTE

hrsg. von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften **ZEITSCHRIFT
FÜR DEN DISPUT
ÜBER WISSEN**

Das neue Heft ist da:

Die Reduktion frisst ihre Kinder

Zum Umgang mit komplexen Themen

Um zu erkennen, reduzieren wir. Ausgehend von Diskussionen um „das Leben“ in der Gentechnik, fragen die Autoren, wie in der Wissenschaft - theoretisch und praktisch - mit komplexen Themen umgegangen wird. Dieter Simon, Ulrich Schollwöck, Martin Korte, Karl Sperling und Heinz Duddek schreiben über Komplexität und die Funktion des Modells, über Strategien im Umgang mit zu vielem Wissen, die Schönheit der Formel und die Diskrepanz zwischen Tag- und Nachtgeschichten der Wissenschaft. Mit Berichten über das Institut für Komplexitätsforschung in Santa Fe, über das wechselhafte Glück innovativer biotechnischer Unternehmen, Redner und Redenschreiber und die Überforderung der Bibliothekare.



GEGENWÖRTE erscheinen 2x jährlich.

GEGENWÖRTE erhalten Sie im Buchhandel oder im Direktversand über den Verlag, das Abonnement kostet € 16 pro Jahr, Einzelhefte € 9 plus Porto.

Lemmens Verlags- & Mediengesellschaft mbH
Matthias-Grünwald-Straße 1-3
D-53175 Bonn
Tel. +49(0)2 28/4 21 37-0
Fax +49(0)2 28/4 21 37-29
E-Mail: info@lemmens.de

Inhaltsverzeichnisse finden Sie unter www.lemmens.de