

# Moleküle, die Entscheidungen treffen\*\*

Alberto Credi\*

## Stichwörter:

Binäre Logik · Lumineszenz · Molekulare Elektronik · Photochemie · Supramolekulare Chemie

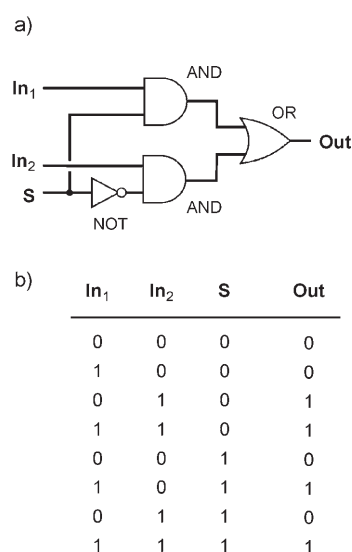
Die in Aussicht stehende Realisierung von Computern mit miniaturisierter Bauweise, niedrigem Energieverbrauch und hoher Rechenleistung jenseits der Kapazitäten siliciumbasierter Prozessoren hat eine intensive Suche nach informationsverarbeitenden Strategien auf der Basis von Einzelmolekülen ausgelöst.<sup>[1]</sup> Den Forschungen auf diesem Gebiet liegt die Erkenntnis zugrunde, dass lebende Organismen mithilfe molekularer oder ionischer Substrate Information weiterleiten, verarbeiten und speichern.<sup>[2]</sup> Obwohl die Komponenten eines molekularen Computers nicht notwendigerweise wie mikroelektronische Schaltkreise operieren müssen,<sup>[3]</sup> wurden zahlreiche Versuche zum Entwurf, zur Synthese und zur Charakterisierung von chemischen Systemen unternommen, die der Funktionsweise eines elektronischen Logikgatters nachempfunden sind.<sup>[4–15]</sup>

Molekulare Schalter wandeln Eingabe- in Ausgabesignale um,<sup>[16]</sup> sodass die Prinzipien der binären Logik (Booleschen Logik)<sup>[17]</sup> unter geeigneten Bedingungen auf die Signalweitergabe durch Moleküle angewendet werden können.<sup>[18]</sup> Die gebräuchlichsten Booleschen Funktionen (PASS, YES, NOT, AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR und INH) können heute mithilfe chemischer Systeme implementiert werden.<sup>[4–15,18]</sup> Ein entscheidendes Problem

bei molekularen Logikgattern ist die Zusammenschaltung der Grundkomponenten zu komplexen Schaltkreisen – im Unterschied zu den verhältnismäßig leicht zu verschaltenden elektronischen Gattern. Anstelle der physikalischen Verknüpfung von Elementargattern besteht auch die Möglichkeit, Einzelmoleküle mit gezielt ausgestatteten Funktionen zu nutzen, und hier insbesondere ihre Fähigkeit, unterschiedliche Konfigurationen einzunehmen.<sup>[4a,19]</sup> Die Tatsache, dass ein relativ einfaches, kommerziell erhältliches Farbstoffmolekül in wässriger Lösung in der Lage ist, sowohl als Volladdierer wie auch als Vollsubtrahierer zu fungieren – was in siliciumbasierten Systemen einen aus fünf Gattern bestehenden Schaltkreis erfordert –, ist Beleg für die generelle Funktionstauglichkeit dieses Prinzips.<sup>[11c]</sup> Jüngste Berichte über die ersten molekularen Versionen eines digitalen Multiplexers<sup>[20]</sup> und eines Tastenschlosses<sup>[21]</sup> markieren wichtige Fortschritte auf dem Gebiet der molekularen Logik.

Ein digitaler Multiplexer ist eine kombinatorische Schaltung (d.h. eine Schaltung, deren Ausgabewert ausschließlich von den momentanen Eingabewerten bestimmt wird; auch als Schaltnetz bezeichnet), die binäre Information aus einem der Eingabekanäle selektiert und zu einem einzelnen Ausgabekanal leitet.<sup>[17]</sup> Ein Multiplexer arbeitet wie ein mechanischer rotierender Schalter, der jeweils einen von mehreren möglichen Eingängen mit einem Ausgang verschaltet. Er besteht aus  $2^n$  Eingängen, einem Ausgang und  $n$  Steuerungskanälen, deren Bitkombinationen festlegen, welcher der Eingabezustände in den Ausgabekanal geleitet wird. Die einfachste Bauweise ist ein 2:1-Multiplexer, der zwei Dateneingänge (**In<sub>1</sub>** und **In<sub>2</sub>**) und eine Steuerungs-

eingabe (**S**) aufweist. Die Schaltung und Wahrheitstafel (eine Tabelle der möglichen Eingabe/Ausgabe-Kombinationen) einer solchen Einheit sind in Abbildung 1 gezeigt.

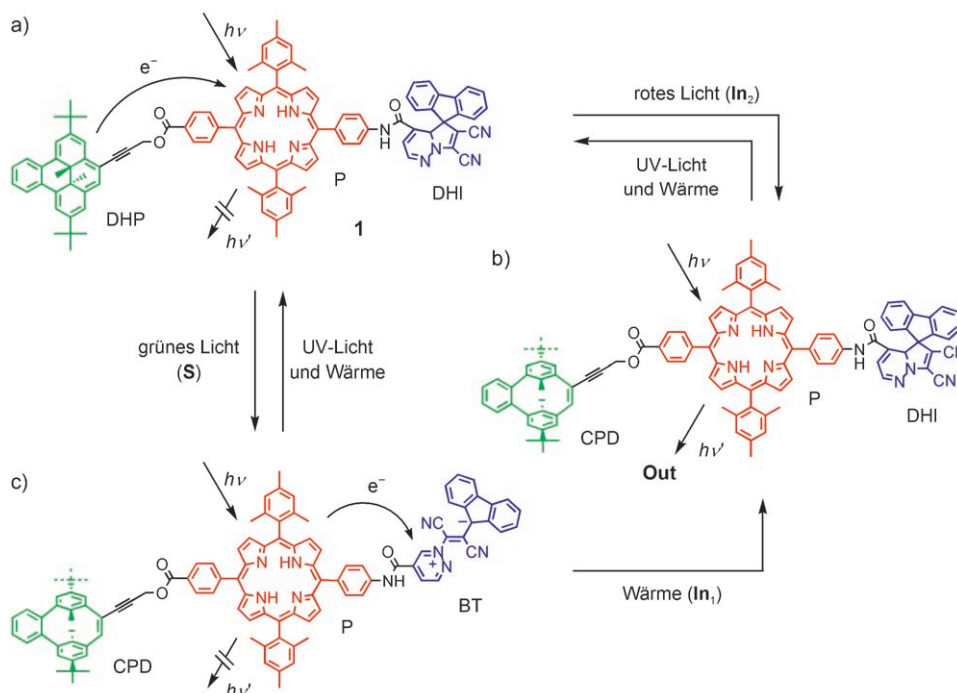


**Abbildung 1.** Digitaler 2:1-Multiplexer: a) Schaltung, b) Wahrheitstafel.

Es wurde demonstriert, dass das Molekül **1** (Abbildung 2a),<sup>[22]</sup> in dem eine Tetraarylporphyringruppe (P) mit einer photochromen Dihydropyrengruppe (DHP) und einer photochromen Dihydroindolizingruppe (DHI) verknüpft ist, in 2-Methyltetrahydrofuran als digitaler 2:1-Multiplexer agiert.<sup>[20]</sup> Zwei Aspekte sind beim Entwurf eines solchen Systems entscheidend: 1) Die beiden photochromen Einheiten müssen reversibel und unabhängig voneinander photoisomerisieren.<sup>[23]</sup> 2) Beide photochromen Einheiten müssen in der Lage sein, den angeregten Singulettzustand des Porphyrins durch charakteristische Elektronentransferprozesse zu löschen. Da jede der beiden photo-

[\*] Prof. A. Credi  
Dipartimento di Chimica „G. Ciamician“  
Università di Bologna  
via Selmi 2, 40126 Bologna (Italien)  
Fax: (+39) 051-209-9456  
E-Mail: alberto.credi@unibo.it

[\*\*] Mein Dank gilt V. Balzani, A. P. de Silva und M. Venturi für hilfreiche Diskussionen sowie der Universität Bologna (Progetto Strategico CompReNDe) für finanzielle Unterstützung.



**Abbildung 2.** Gegenseitige Umwandlung der drei isomeren Formen von Verbindung **1** (15  $\mu\text{M}$  in 2-Methyltetrahydrofuran), die für die Funktion des Moleküls als digitaler 2:1-Multiplexer relevant sind: a) DHP-P-DHI, b) CPD-P-DHI und c) CPD-P-BT.

chromen Einheiten zwei Zustände einnehmen kann, kann **1** in einer von vier isomeren Strukturen vorliegen, von denen drei für die Multiplexerfunktion relevant sind. Die beiden Dateneingänge **In<sub>1</sub>** und **In<sub>2</sub>** werden durch Wärme bzw. rotes Licht realisiert, grünes Licht codiert für die Steuerungseingabe **S**, und die Fluoreszenz des Porphyrins (gemessen bei 720 nm) bildet das Ausgabesignal. Der Anfangszustand wird als das thermisch stabile DHP-P-DHI gesetzt. Bei ausgeschalteten Eingabesignalen und ohne Steuerungseingabe **S** verbleibt das Molekül in der DHP-P-DHI-Form, die wegen des photoinduzierten Elektronentransfers von der DHP-Einheit zur Porphyrin-Einheit nicht fluoresziert. Das Einschalten von **In<sub>1</sub>** (Wärme) bewirkt keinen Effekt, weil sich das System bereits im thermisch stabilen Zustand befindet. Das Einschalten von **In<sub>2</sub>** (rotes Licht) führt dagegen zur Photoisomerisierung der DHP-Einheit unter Bildung der offenen Cyclophandien(CPD)-Form (Bildung von CPD-P-DHI; Abbildung 2b). Der angeregte Zustand der Porphyrin-Einheit wird nun nicht länger gelöscht, und man detektiert eine starke Fluoreszenz: Der **Out**-Zustand (Abbildung 1a) wird auf 1 geschaltet. Einschalten von sowohl

**In<sub>1</sub>** als auch **In<sub>2</sub>** führt ebenfalls zu einem photostationären Zustand, der (hauptsächlich) aus CPD-P-DHI besteht. Für **S** = 0 gibt also der Ausgabezustand den Zustand von **In<sub>2</sub>** wieder, während **In<sub>1</sub>** ignoriert wird (Abbildung 1b).

Beim Einschalten des Steuerbits **S** wird die Lösung von **1** mit grünem Licht der Wellenlänge 530 nm bestrahlt. Hierdurch wird die DHI-Einheit in das Betain(BT)-Isomer umgewandelt, und es entsteht eine photostationäre Verteilung, in der die CPD-P-BT-Form vorherrschend ist (Abbildung 2c). Wenn **In<sub>1</sub>** und **In<sub>2</sub>** beide 0 sind, dann wird die Porphyrin-Emission durch die BT-Einheit gelöscht, und der **Out**-Zustand ist ebenfalls 0. Durch Einschalten von **In<sub>1</sub>** (Wärme) wird das Molekül, unabhängig vom **In<sub>2</sub>**-Zustand, in die CPD-P-DHI-Form umgewandelt (Abbildung 2b), die eine starke Fluoreszenz zeigt (**Out** = 1). Wird dagegen nur **In<sub>2</sub>** eingeschaltet (rotes Licht), bleibt das Molekül in der CPD-P-BT-Form, weil die Photoisomerisierung der BT- zur DHI-Gruppe unter diesen Bedingungen langsam ist: Der **Out**-Zustand bleibt 0. Bei aktivierter Steuerungseingabe (**S** = 1) gibt also der Ausgabezustand den Zustand von **In<sub>1</sub>** wieder und ignoriert **In<sub>2</sub>** (Abbildung 1b). Das Molekül kann durch Be-

strahlung bei 366 nm und anschließendes Erwärmen in den Ausgangszustand zurückgesetzt werden.

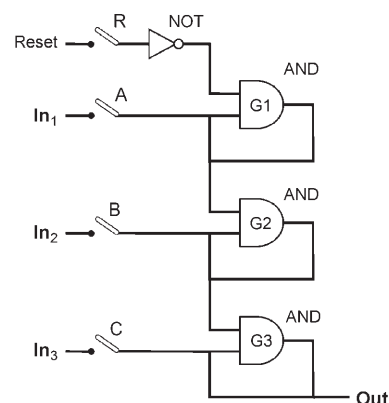
Im Prinzip könnte die Verbindung **1** als Einzelmolekül betrieben werden, da die Schaltung ausschließlich auf intramolekularen Prozessen beruht. Eine mögliche Fluoreszenzschaltung von Einzelmolekülen in einer photochromen Verbindung wurde bereits nachgewiesen,<sup>[24]</sup> und ein optisches Auslesen von einzelnen molekularen Multiplexern sollte daher grundsätzlich realisierbar sein. Allerdings kann für ein einzelnes Molekül von **1** nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden, wie sich ein Anregungsereignis auswirkt, weil die photoinduzierten Prozesse nicht mit 100 % Effizienz verlaufen. Diese Unsicherheit bildet eine klare Einschränkung für die Funktion von **1** als Einzelmolekül-Logikelement. Wenngleich das Ziel der beschriebenen Studie nicht die Entwicklung einer praxistauglichen Funktionseinheit war, haben die Autoren einige der Faktoren diskutiert (z. B. Ermüdungsbeständigkeit und Schaltgeschwindigkeit), von denen man annimmt, dass sie für die reale Anwendung solcher Systeme wichtig sind.<sup>[20]</sup>

Sequenzielle Schaltungen (auch Folgeschaltungen) sind Logiknetzwer-

ke, deren Ausgabe sowohl von momentanen als auch von zeitlich vorgelagerten Eingabewerten bestimmt wird.<sup>[17]</sup> Während kombinatorische Schaltungen wie Addierer, Subtrahierer und Multiplexer momentane Eingabezustände in irgendeiner Weise zu einer Ausgabe kombinieren und somit keine Speicherfunktion haben, erzeugen sequenzielle Schaltungen aus einer zeitlichen Sequenz von Eingabezuständen eine Ausgabe. Tatsächlich sind Speicherschaltungen generell sequenzieller Natur. Beim Entwurf einer Logikschaltung wird Sequenzverhalten durch Einführen von Rückkopplungsschleifen erzielt (d.h., die Ausgabe eines bestimmten Logikgatters wird in einen Eingabekanal desselben oder eines anderen vorgeschalteten Gatters gespeist). Der Rückkopplungsmechanismus unterbricht den unidirektionalen Informationsfluss, wie er für kombinatorische Schaltungen charakteristisch ist. Die Variable Zeit bringt man ein, indem man die unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten der an der Gatterfunktion beteiligten Prozesse nutzt. Chemisch gesehen beruht eine kombinatorische Schaltung

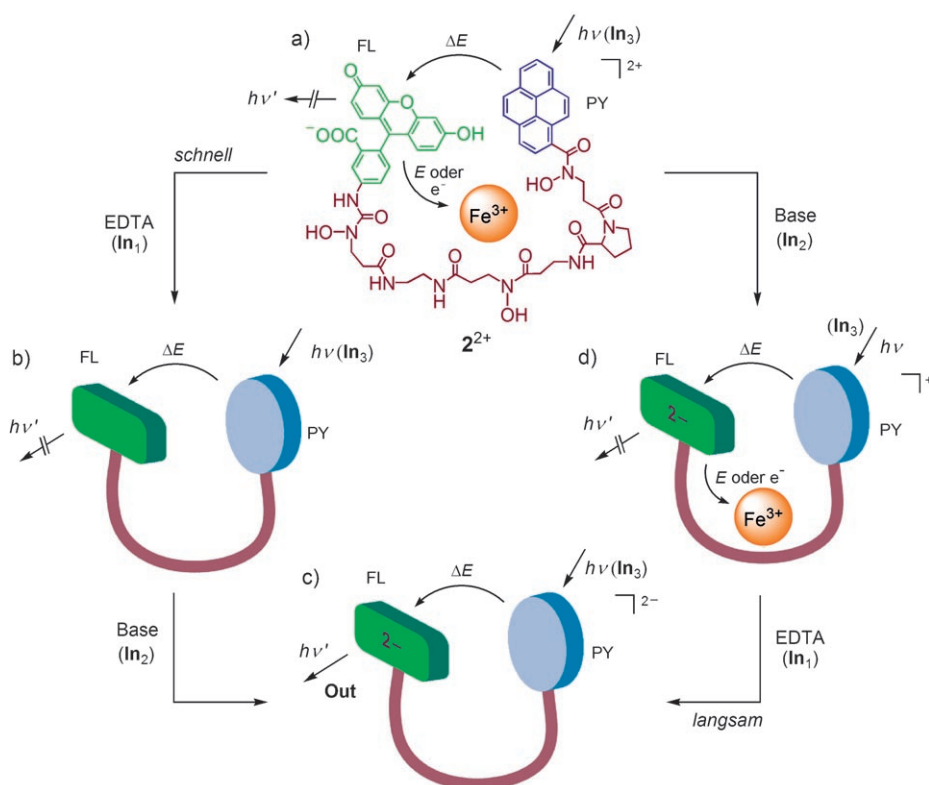
auf Molekülen im Gleichgewichtszustand, während die sequenzielle Schaltung darüber hinaus die Analyse (und eventuell die Optimierung) des kinetischen Verhaltens des Systems erfordert.

Beispiele chemischer Systeme, deren Eigenschaften im Hinblick auf sequenzielle Logikoperationen untersucht wurden, sind selten.<sup>[23]</sup> Ein wichtiger Schritt in diese Richtung ist eine neuere Studie zu einer molekularen Spezies, deren Fluoreszenz auf die „richtige“ Sequenz von drei Eingabesignalen hin eingeschaltet wird.<sup>[21]</sup> Ein solches System erinnert an ein elektronisches Tastenschloss – eine gebräuchliche Sicherheitsvorrichtung zum Verschließen von z.B. Türen oder Tresoren. Eine vereinfachte Darstellung der entsprechenden Schaltung ist in Abbildung 3 gezeigt. Das molekulare Tastenschloss basiert auf dem  $\text{Fe}^{\text{III}}$ -Komplex  $2^{2+}$  (Abbildung 4a), bestehend aus den Fluorophoren Fluorescein (FL) und Pyren (PY), die über einen Linker verknüpft sind, der zugleich als starker und selektiver Ligand (Siderophor) für Eisen-(III)-Ionen fungiert.<sup>[11a]</sup> In Ethanol liegt die FL-Einheit in monoanionischer



**Abbildung 3.** Sequenzielle Logikschaltung einer Funktionseinheit, deren Ausgabe durch drei Eingabesignale definierter Sequenz ( $\text{In}_1$ ,  $\text{In}_2$ ,  $\text{In}_3$ ) geschaltet wird. Die Aktivierung von  $\text{In}_1$  durch Drücken der A-Taste schaltet die Ausgabe des Schaltglieds G1 ein und gibt Schaltglied G2 frei. Durch Drücken der Taste B wird  $\text{In}_2$  aktiviert, G2 gibt ein Signal aus, und G3 wird freigegeben. Aktiviert man schließlich  $\text{In}_3$  durch Drücken der Taste C, so wird auch G3 eingeschaltet, und der Out-Zustand schaltet auf 1. Drücken der R-Taste setzt die Einheit auf den Ausgangszustand zurück.

Form vor, und der Komplex  $2^{2+}$  weist vermutlich eine gefaltete Struktur auf,



**Abbildung 4.** a) Strukturformel des  $\text{Fe}^{\text{III}}$ -Komplexes  $2^{2+}$  und chemische Transformationen bei Zusatz von b) EDTA, c) Base und d) EDTA und Base ( $0.5 \mu\text{M}$   $2^{2+}$  in Ethanol). Diese molekulare Funktionseinheit kann die richtige Sequenz der drei Eingabesignale (EDTA, Base und Bestrahlung bei 344 nm) erkennen.

in der sich die FL- und PY-Einheiten einander annähern können. Die Eingabesignale werden mit einem Chelatbildner für Fe<sup>III</sup> (Ethyldiamintetraessigsäure, EDTA, **In**<sub>1</sub>), einem basischen Reaktanten (Natriumacetat, **In**<sub>2</sub>) und mit UV-Strahlung (**In**<sub>3</sub>) codiert, der Ausgabekanal wird auf die FL-Emission bei 525 nm festgelegt.

Im Ausgangszustand wird die Emission der anionischen FL-Einheit durch das Metallion gelöscht (Abbildung 4a). Bei Zugabe von EDTA wird das Eisen-Ion vom Liganden abgezogen, und die FL-Einheit wird zugleich protoniert und in den nichtemissiven Neutralzustand überführt (Abbildung 4b). Die anschließende Zugabe von Acetat-Ionen führt zur Bildung des FL-Dianions, das stark fluoresziert (Abbildung 4c). Eine Zugabe von Acetat-Ionen zu 2<sup>+</sup> führt ebenfalls zur Bildung des FL-Dianions, dessen Fluoreszenz aber zunächst durch das koordinierte Fe<sup>III</sup>-Ion gelöscht wird (Abbildung 4d). Die anschließende Komplexierung des Fe<sup>III</sup>-Ions mit EDTA ergibt dann die gleiche fluoreszierende Spezies wie zuvor (Abbildung 4c). Die umgekehrte Reihenfolge der Eingabesignale (erst Base, dann EDTA) führt also letztlich zum gleichen Zustand, allerdings ist die Entfernung des Eisen(III)-Ions aus 2<sup>+</sup> durch Umkomplexierung mit EDTA in einer basischen Umgebung gehemmt, sodass für die beiden Reaktionspfade (a→b→c und a→d→c) deutlich verschiedene Reaktionsgeschwindigkeiten beobachtet werden.

Hinzu kommt nun, dass ohne Lichtanregung keine Photolumineszenz detektiert werden kann, woraus sich das dritte Eingabesignal ergibt, nämlich Bestrahlung bei 344 nm. Licht dieser Wellenlänge wird hauptsächlich von der PY-Einheit absorbiert, die dann durch Energietransfer die FL-Lumineszenz sensibilisiert. Die Fluoreszenz bei 525 nm wird nur dann beobachtet, wenn die richtige Sequenz von **In**<sub>1</sub> (EDTA), **In**<sub>2</sub> (Base) und **In**<sub>3</sub> (UV-Anregung) verwendet wurde. Eine andere Kombination führt zu einer nur schwachen oder gänzlich ausbleibenden Fluoreszenz.<sup>[21]</sup>

Die Aussicht auf neuartige Rechnerstrukturen ist die treibende Kraft bei der Erforschung von molekularen Systemen, die Boolesche Logikfunktionen ausführen können. Futuristische Mut-

maßungen über die Konstruktion eines chemischen Computers einmal beiseite gelassen, haben neuere Arbeiten gezeigt, dass molekulare Logikgatter zu praktischen Anwendungen in einer nicht allzu fernen Zukunft führen können. Es wurden molekulare Funktionseinheiten beschrieben, die durch Verarbeitung chemischer Eingabesignale in einer programmierten Schaltung Proteinfaltungen<sup>[25]</sup> oder die Freisetzung chemischer Spezies<sup>[26]</sup> steuern. Solche Einheiten könnten die Vorstufe von In-vivo-Systemen sein, die selbsttätig Diagnosen und Therapien vornehmen. Darüber hinaus wurde eine Methode auf der Basis molekularer Logikgatter zur Markierung und Identifizierung von kleinen Objekten in großen Populationen für die Anwendung in der kombinatorischen Chemie vorgeschlagen.<sup>[27]</sup>

Es ist stets zu beachten, dass Rechnerstrukturen auf der Basis von (supra)molekularen Spezies und „weichen“ Materialien einen völlig anderen Ansatz der Informationsverarbeitung repräsentieren als klassische Halbleiterprozessoren. Vergleiche zwischen diesen beiden Systemen sind daher mit Vorsicht anzustellen. Dennoch sei der Hinweis gestattet, dass es sich bei den im vorigen Absatz erwähnten Beispielen um einfache Rechenoperationen handelt, die von Molekülen ausgeführt werden können, von Silicium aber nicht. Zumindest ist gewiss, dass das Studium „intelligenter“ Moleküle, die die Fähigkeit zur Signalverarbeitung haben, zu neuen Konzepten in der Chemie führen kann und insbesondere die Forschungen zum Bottom-up-Aufbau von Nanofunktionseinheiten befördern wird.

Online veröffentlicht am 20. Juni 2007

- [1] *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2005 Edition and 2006 Update*; verfügbar unter: <http://www.itrs.net>; siehe auch: S. E. Thompson, S. Parthasarathy, *Mater. Today* **2006**, 9, 20.
- [2] a) D. S. Goodsell, *Bionanotechnology: Lessons from Nature*, Wiley, Hoboken, **2004**; b) R. A. L. Jones, *Soft Machines: Nanotechnology and Life*, Oxford University Press, New York, **2004**.
- [3] A. Tullo, *Chem. Eng. News* **2006**, 84, 22.
- [4] a) A. P. de Silva, N. D. McClenaghan, *Chem. Eur. J.* **2004**, 10, 574; b) A. P. de Silva, Y. Leydet, C. Lincheneau,

- N. D. McClenaghan, *J. Phys. Condens. Matter* **2006**, 18, S1847.
- [5] D. Gust, T. A. Moore, A. L. Moore, *Chem. Commun.* **2006**, 1169.
- [6] a) V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, *Molecular Devices and Machines: A Journey into the Nanoworld*, Wiley-VCH, Weinheim, **2003**, Kap. 9; b) V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, *ChemPhysChem* **2003**, 4, 49; c) R. Ballardini, P. Ceroni, A. Credi, M. T. Gandolfi, M. Maestri, M. Semeraro, M. Venturi, V. Balzani, *Adv. Funct. Mater.* **2007**, 17, 740.
- [7] K. Szacilowski, *Chem. Eur. J.* **2004**, 10, 2520.
- [8] a) F. M. Raymo, *Adv. Mater.* **2002**, 14, 401; b) F. M. Raymo, M. Tomasulo, *Chem. Eur. J.* **2006**, 12, 3186.
- [9] F. Remacle, R. Weinkauff, R. D. Levine, *J. Phys. Chem. B* **2006**, 110, 177.
- [10] S. J. Langford, T. Yann, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125, 11198; siehe auch: S. J. Langford, T. Yann, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125, 14951.
- [11] a) D. Margulies, G. Melman, C. E. Felder, R. Arad-Yellin, A. Shanzer, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126, 15400; b) D. Margulies, G. Melman, A. Shanzer, *Nat. Mater.* **2005**, 4, 768; c) D. Margulies, G. Melman, A. Shanzer, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 4865.
- [12] a) R. Baron, O. Lioubashevski, E. Katz, T. Niazov, I. Willner, *Angew. Chem.* **2006**, 118, 1602; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, 45, 1572; b) R. Baron, O. Lioubashevski, E. Katz, T. Niazov, I. Willner, *J. Phys. Chem. A* **2006**, 110, 8548; c) T. Niazov, R. Baron, E. Katz, O. Lioubashevski, I. Willner, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2006**, 103, 17160.
- [13] H. Tian, Q.-C. Wang, *Chem. Soc. Rev.* **2006**, 35, 361.
- [14] a) M. N. Stojanovic, T. E. Mitchell, D. Stefanovic, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 3555; b) H. Lederman, J. Macdonald, D. Stefanovic, M. N. Stojanovic, *Biochemistry* **2006**, 45, 1194.
- [15] G. Seelig, D. Soloveichnik, D. Y. Zhang, E. Winfree, *Science* **2006**, 314, 1585.
- [16] *Molecular Switches* (Hrsg.: B. L. Feringa), Wiley-VCH, Weinheim, **2001**.
- [17] J. R. Gregg, *Ones and Zeros: Understanding Boolean Algebra, Digital Circuits, and the Logic of Sets*, Wiley, New York, **1998**.
- [18] Eine große Zahl chemischer Schalter mit interessanten Eigenschaften für mögliche binäre Schaltungen wurde in der Literatur beschrieben. In vielen Fällen waren sich die Autoren entweder nicht bewusst, dass ihre Systeme ein solches Verhalten zeigen, oder die Arbeiten erschienen, bevor das Thema molekularer Logikgatter populär wurde. Die erste explizite Beschreibung der Analogie zwischen molekularen Schal-

- tern und Logikgattern findet sich bei: A. P. de Silva, H. Q. N. Gunaratne, C. P. McCoy, *Nature* **1993**, 364, 42.
- [19] A. P. de Silva, *Nat. Mater.* **2005**, 4, 15.
- [20] J. Andréasson, S. D. Straight, S. Bandyopadhyay, R. H. Mitchell, T. A. Moore, A. L. Moore, D. Gust, *Angew. Chem.* **2007**, 119, 976; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, 46, 958.
- [21] D. Margulies, C. E. Felder, G. Melman, A. Shanzer, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, 129, 347.
- [22] S. D. Straight, J. Andréasson, G. Kodis, S. Bandyopadhyay, R. H. Mitchell, T. A. Moore, A. L. Moore, D. Gust, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 9403.
- [23] Es ist bekannt, dass photochrome Verbindungen einen Gedächtniseffekt zeigen. Um eine kombinatorische Schaltung zu erhalten, müssen geeignete experimentelle Bedingungen gewählt werden (z.B. hinreichend lange Zeitskalen), um diesen Effekt zu unterdrücken. Das Verhalten von photochromen Einheiten auf kurzen Zeitskalen kann zu einer sequenziellen Schaltung führen; siehe z.B.: F. M. Raymo, R. J. Alvarado, S. Giordani, M. E. Cejas, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125, 2361.
- [24] T. Fukaminato, T. Sasaki, T. Kawai, N. Tamai, M. Irie, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126, 14843.
- [25] S. Muramatsu, K. Kinbara, H. Taguchi, N. Ishii, T. Aida, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 3764.
- [26] R. J. Amir, M. Popkov, R. A. Lerner, C. F. Barbas III, D. Shabat, *Angew. Chem.* **2005**, 117, 4452; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, 44, 4378.
- [27] a) A. Prasanna de Silva, M. R. James, B. O. F. McKinney, D. A. Pears, S. M. Weir, *Nat. Mater.* **2006**, 5, 787; b) R. Webb, *Nature* **2006**, 443, 39.

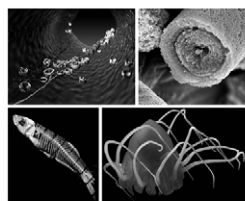
## Wiley-VCH BOOK SHOP

Edited by  
Edmund Bauerlein

WILEY-VCH

### Handbook of Biomaterialization

Biological Aspects and Structure Formation  
Foreword by Jeremy D. Pickett-Heaps



E. Bäuerlein / P. Behrens / M. Eppler  
(eds.)

### Handbook of Biomaterialization

This first comprehensive overview combines all the modern and interdisciplinary aspects of biomaterialization.

approx. 1349 pp, cl,  
Prepublication price € 449.00  
valid until 31 August 2007  
thereafter € 499.00  
ISBN: 978-3-527-31641-0

S. Hecht / I. Huc (eds.)

### Foldamers Structure, Properties, and Applications

This truly comprehensive treatise is at once an introduction, as well as providing in-depth accounts for the specialist. The book is clearly structured, with the first part concentrating on foldamer structure while the second covers properties and applications.

456 pp, cl, € 159.00  
ISBN: 978-3-527-31563-5

Edited by Stefan Hecht and Ivan Huc

WILEY-VCH

### Foldamers

Structure, Properties, and Applications  
Foreword by François Diederich



Prices are subject to change without notice.

You can order online via <http://www.wiley-vch.de>

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA · POB 10 11 61 · D-69451 Weinheim, Germany

Phone: 49 (0) 6201/606-400 · Fax: 49 (0) 6201/606-184 · E-Mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de)



WILEY-VCH

BS\_0704\_C\_BCH\_VCH-2\_BW