

Abb. 2. Die transiente Ab- und Loslösung von Kettensegmenten eng superspiralierter DNA-Moleküle, die an Muskovit adsorbiert sind wie in (a), wird durch sich öffnende und vergrößernde Schleifen wie in (b) und (c) durch topologische Einschränkungen „eingefangen“ und sichtbar gemacht. Die Balken entsprechen 100 nm.

Experimentelles

20 µL einer HEPES-Pufferlösung, die 1 µg mL⁻¹ superspiralisiertes pBR322-DNA-Plasmid und 10 mM MgCl₂ enthielt, wurde auf eine Scheibe aus frisch gespaltenem, rubinrotem Muskovit (Glimmer) gegeben. Die überschüssige Lösung wurde mit Filterpapier abgelöscht, die Probe kurz mit einigen Tropfen Wasser gespült, in einem schwachen Stickstoffstrom getrocknet und 90 s in einer kleinen Kammer mit drei 15W-Hg/Xe-Lampen bestrahlt. Danach wurde sie mit der Oberseite nach oben unterschiedlich lang in ein Gefäß mit etwa 50 mL entionisiertem, doppelt destilliertem Wasser, das im Argonstrom von Luft befreit worden war, getaut. Die Proben wurden abgetupft, wiederum getrocknet und schließlich in einer trockenen Stickstoffatmosphäre mit einem Tapping-Mode-Rasterkraftmikroskop (Nanoscope III, Digital Instruments, Santa Barbara, CA) abgebildet. Die ursprüngliche DNA-Probe war, wie eine Elektrophorese-Untersuchung auf Agarose ergab, zu mindestens 95% superspiralisiert. Lineare Moleküle und solche mit einfachen Strangbrüchen wurden durch Behandlung der nativen *E. coli*-pBR322-DNA-Proben mit Exonuclease III [15] entfernt, um die Ablagerung bereits entspannter DNA-Moleküle auf dem Muskovit zu vermeiden.

Eingegangen am 7. August 1995 [Z 8291]

Stichworte: DNA · Rasterkraftmikroskopie · Topologie

- [1] C. Bustamante, D. Keller, G. Yang, *Curr. Opin. Struct. Biol.* **1993**, *3*, 363–372.
- [2] C. Bustamante, D. A. Erie, D. Keller, *Curr. Opin. Struct. Biol.* **1994**, *4*, 750–760.
- [3] B. Samori, G. Siligardi, C. Quagliariello, A. L. Weisenhorn, J. Vesenka, C. Bustamante, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1993**, *90*, 3598–3601.
- [4] B. Samori, C. Nigro, V. Armentano, S. Cimieri, G. Zuccheri, C. Quagliariello, *Angew. Chem.* **1993**, *105*, 1482–1483; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1993**, *32*, 1461–1463.
- [5] D. Keller, F. S. Franke, *Surf. Sci.* **1993**, *294*, 409–419.

ralisierungs-Torsionsspannung in der Nähe der zuvor durch UV-Bestrahlung induzierten Strangbrüche zu entspannen (Abb. 1b). Die Zahl der Strangbrüche beeinflusst daher die Empfindlichkeit dieses experimentellen Ansatzes^[1,3]. Wenn die Häufigkeit der Strangbrüche über die Kette verteilt groß ist, wird die Superspiralisierung jedes sich vom Substrat ablösenden Kettensegments entspannt. Sogar äußerst geringe und transiente^[14] Bewegungen einzelner adsorbierter Moleküle, die nur sehr schwer mit anderen physikalischen Methoden, selbst mit direkter SFM-Abbildung in Lösung, zu entdecken wären, können mit dieser Methode „eingefangen“ und nachgewiesen werden – ohne das Risiko, sie mit der Abtastspitze zu induzieren.

Chemische Topologie stellt permanente interne Marker für jede Art von molekularem Vorgang zur Verfügung, der mit Bindungsbrüchen und -neuknüpfungen einhergeht, unabhängig davon, wie kurzlebig die molekularen Strukturen sind und wie schnell und transient der Prozeß ist^[10]. SFM-Abbildung in Kombination mit topologischen Einschränkungen kann es ermöglichen, diese Prozesse „einzufangen“ und zu untersuchen, ohne in ihre Dynamik einzugreifen (Abb. 2).

- [6] S. H. Leuba, G. Yang, C. Robert, B. Samori, K. van Holde, J. Zlatanova, C. Bustamante, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1994**, *91*, 11621–11625.
- [7] M. Guthold, M. Bezanilla, D. A. Erie, B. Jenkins, H. Hansma, C. Bustamante, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1994**, *91*, 12927–12931.
- [8] M. Bezanilla, B. Drake, E. Nudler, M. Kashlev, P. K. Hansma, H. Hansma, *Biophys. J.* **1994**, *67*, 2454–2459.
- [9] M. Bezanilla, S. Manne, D. E. Laney, Y. L. Lyubchenko, H. G. Hansma, *Langmuir* **1995**, *11*, 655–659.
- [10] A. D. Bates, A. Maxwell, *DNA Topology*, Oxford University Press, New York, 1993.
- [11] M. Matzeu, *Physica Medica* **1991**, *VII*, 3–9; R. D. Ley, R. B. Webb, *Photochem. Photobiol.* **1974**, *20*, 395–398.
- [12] K. Sawadaishi, K. Miura, E. Ohtsuka, T. Ueda, K. Ishizaki, N. Shinriki, *Nucleic Acids Res.* **1985**, *13*, 7183–7194.
- [13] Es ist sehr wahrscheinlich, daß eine bessere Kontrolle über das Ausmaß der Einzelstrangbrüche in Zukunft durch die Anwendung von Spaltungsmethoden erreicht werden kann, die bereits zum Nachweis von DNA-Strukturen in Lösung verwendet werden sind (D. M. J. Lilley, *Methods Enzymol.* **1992**, *212*, 133–139). Ozon spaltet pBR322-Plasmide an spezifischen Stellen [12].
- [14] Diese Segmente werden vorübergehend von der Oberfläche abgelöst, da die Zahl der Moleküle im Blickfeld, nachdem sie bereits alle eine offene Gestalt angenommen haben, über Stunden hinweg nahezu konstant bleibt. Bei einer geringeren Anfangskonzentration von Mg²⁺ nimmt die Zahl der an Muskovit adsorbierten Moleküle ab, und ihre vollständige Ablösung wird nach kürzeren Eintauchzeiten erreicht.
- [15] S. G. Rogern, B. Weiss, *Methods Enzymol.* **1980**, *65*, 201–211.

„Programmierte“ Selbstorganisation von Kupfer(II)-L- und -D-Aarginin-Komplexen mit aromatischen Dicarboxylaten unter Bildung von chiralen Doppelhelices**

Nayumi Ohata, Hideki Masuda und Osamu Yamauchi*

Großes Interesse findet in den letzten Jahren die Selbstorganisation von Molekülen, die zu einzigartigen Eigenschaften und Funktionen führen kann^[1–4]. Selbstorganisation resultiert aus einer Kombination von nichtkovalenten Wechselwirkungen und wird oft durch die Koordination von Metall-Ionen gefördert. Die stereospezifische Bildung von Molekülaggregaten kann man durch Einführung von chiralen Bauelementen erreichen. Typische Beispiele sind die rechtsgängigen Spiralen der α -Helices von Proteinen^[5] und die rechtsgängige DNA-Doppelhelix^[6]. Wir berichten hier über die Bildung von kristallinem $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2](\text{L})$ ($\text{L} = m\text{-Phthalat}$ (pa), Pyridin-2,6-dicarboxylat (2,6-dipic)) und $[\text{Cu}(\text{D-Arg})_2](\text{L})$ ($\text{L} = \text{Pyridin-3,5-dicarboxylat}$ (3,5-dipic)) aus Kupfer(II), L- bzw. D-Aarginin (Arg) und einem aromatischen Dicarboxylat L. Dabei führt ein einzigartiges Netz aus Wasserstoffbrückenbindungen abhängig davon, welches Arginin-Enantiomer eingesetzt wurde, zur Bildung einer rechts- bzw. einer linksgängigen Doppelhelix.

Metall-Ionen mit tetraedrischer Koordinationsgeometrie wie Cu¹, Ag¹ und Ni^{II}^[7–12] können Komplexe mit Doppel- oder Tripelhelixstruktur bilden. Eine solche Komplexbildung spielt auch bei der sequenzspezifischen Bindung von DNA durch „Zink-Finger“-Proteine eine Rolle, wie Kristallstrukturanaly-

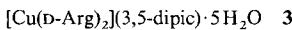
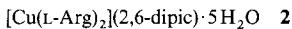
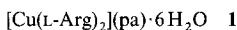
[*] Prof. Dr. O. Yamauchi, N. Ohata
Department of Chemistry, Faculty of Science, Nagoya University
Chikusa-ku, Nagoya 464-01 (Japan)
Telefax: Int. + 52/789-2953
E-mail: b42215a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

Dr. H. Masuda
Department of Applied Chemistry, Nagoya Institute of Technology, Nagoya (Japan)

[**] Wir danken dem japanischen Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur für einen Grant-in-Aid for Scientific Research on Priority Areas (Bioanorganische Chemie).

sen ergaben^[13–15]. Bei Proteinen ist der Guanidiniumrest von Arginin sehr wichtig für die Bindung von Carboxylat^[16, 17] und Phosphatgruppen^[18], bei der zwei Typen (A und B) von Wasserstoffbrückenbindungskombinationen^[19] auftreten können. Das Guanidinium-Carboxylat-Paar eignet sich ideal zur Brückenbildung, und mit zweifachen Wasserstoffbrückenbindungen^[19] können sich so in „programmierbarer“ Weise durch Selbstorganisation der Komponenten Cu^{II}, Arg und Dicarboxylat L Komplexe bilden.

Für eine Kristallstrukturanalyse geeignete Einkristalle von 1–3



wurden in 30–40% Ausbeute durch Mischen einer wässrigen Lösung von $\text{CuCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (0.171 g, 1.0 mmol) und L- bzw. D-Arg (0.348 g, 2.0 mmol) mit einer alkalischen (2 Äquiv. NaOH), wässrigen Lösung von L (L = pa, 2,6- bzw. 3,5-dipic) und nachfolgendes langsames Eindiffundieren von gasförmigem Ethanol erhalten. Die Komplexe kristallisieren in der gleichen Raumgruppe, und die entsprechenden kristallographischen Parameter ähneln einander sehr, obwohl sich die drei Dicarboxylate L deutlich unterscheiden^[20]. Die kristallographischen Parameter des D-Analogons von 1 gleichen denen von 1^[21]. Pro Elementarzelle enthalten 1–3 jeweils vier $[\text{Cu}(\text{Arg})_2]^{2+}$ - und vier L^{2-} -Ionen sowie 24 oder 20 Wassermoleküle, die sämtlich über H-Brücken miteinander verknüpft sind. Abbildung 1a zeigt kristallographisch unabhängige Moleküle in der Elementarzelle von 1. Das Cu^{II}-Ion ist dabei so von zwei Argininmolekülen quadratisch-planar koordiniert, daß die Amin-Stickstoffatome und die Carboxylat-Sauerstoffatome jeweils cis-ständig zueinander sind. Die Arg-Seitenketten weisen von der Koordinationssphäre des Cu^{II}-Ions weg und bilden Wasserstoffbrückenbindungen vom Typ A mit der Carboxylatgruppe eines zwischen den Komplex-Ionen befindlichen L^{2-} -Ions. Diese verbinden so die Arg-Seitenketten entlang der kristallographischen a-Achse zu einem endlosen, helixförmigen Strang aus $\text{L}^{2-}[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2]^{2+}$ -Einheiten. Zwei solche Stränge sind über Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den koordinierenden Aminogruppen des einen Strangs und den L^{2-} -Carboxylatgruppen des anderen Strangs zu einer Doppelhelix verknüpft. Im Kristall ist eine so gebildete Doppelhelix mit einer benachbarten über Wasserstoffbrückenbindungen vom Typ B zwischen den Guanidiniumgruppen der einen Doppelhelix und den Carboxylat-Sauerstoffatomen von jeweils zwei Carboxylatgruppen der anderen verknüpft, die ein Cu^{II}-Ion koordinieren (Abb. 1b). Dies trägt wahrscheinlich maßgeblich zur cis-Konfiguration am Cu^{II}-Ion bei, denn Cu^{II}-Arg-Komplexe können gewöhnlich sowohl in der cis- als auch in der trans-Konfiguration vorliegen^[22, 23]. Die Stapelung der aromatischen Ringe der L^{2-} -Ionen mit einem mittleren Abstand zwischen den Ringebenen von 3.49 Å führt zu einer weiteren Stabilisierung der Assoziation zwischen den Doppelhelices. Die Strukturen von 2 und 3 im Kristall ähneln der von 1 sehr stark und lassen erkennen, daß die Stickstoffatome von 2,6-dipic und 3,5-dipic weder das Cu^{II}-Ion koordinieren, noch Wasserstoffbrückenbindungen bilden, d. h. die genannten Dianionen L fungieren in gleicher Weise als Brückenliganden. Bei keiner der drei Verbindungen sind an den Wasserstoffbrückenbindungen innerhalb der Stränge sowie an denen zwischen den Strängen Wassermoleküle beteiligt, sieht man von einem Wassermolekül ab, das sich in der axialen Position der Koordinationssphäre des Cu^{II}-Ions mit einem Cu-O-Abstand von 2.522(6) (1), 2.387(8) (2) bzw. 2.385(5) Å (3) befindet.

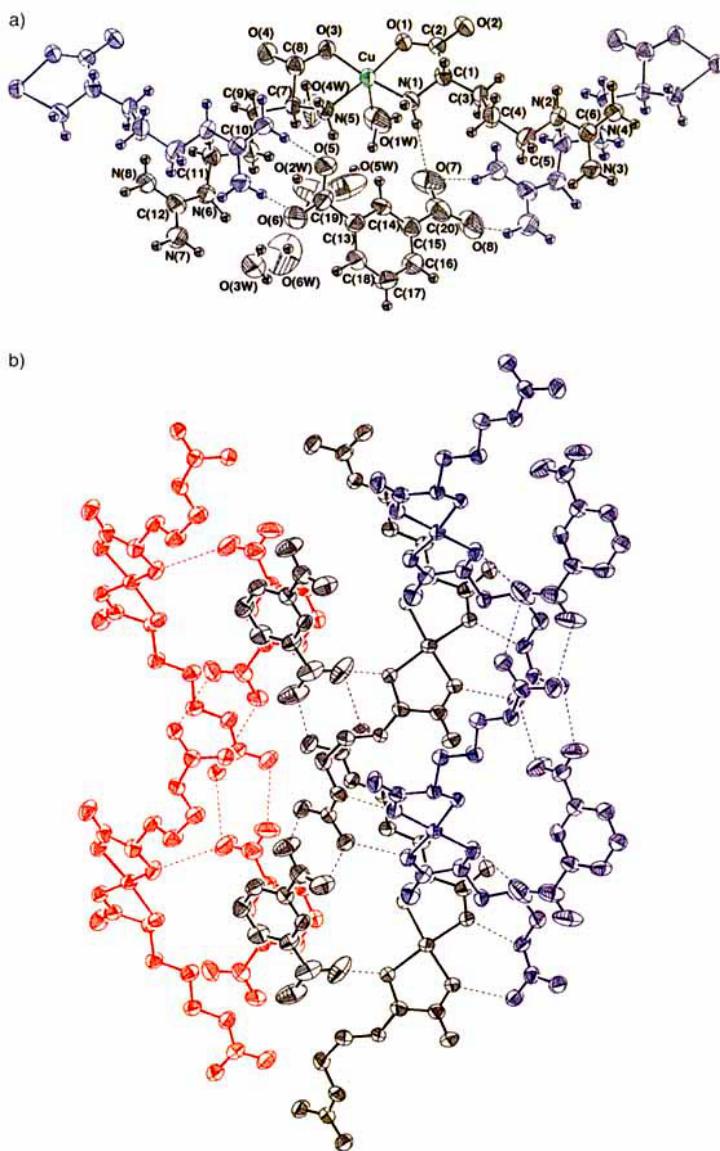


Abb. 1. a) Struktur kristallographisch unabhängiger Moleküle in der Elementarzelle von $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2](\text{pa}) \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ 1; b) Struktur von 1 im Kristall mit Wasserstoffbrückenbindungen zwischen einer Doppelhelix (schwarz) und zwei benachbarten Doppelhelices (rot und blau).

Interessanterweise bilden die Komplexe mit L-Arg, 1 und 2, eine rechtsgängige und der mit D-Arg, 3, eine linksgängige Helix (Abb. 2). Dies deutet darauf hin, daß der Drehsinn der Doppelhelices im festen Zustand durch die Konfiguration des α -Kohlenstoffatoms der Aminosäure bestimmt, d. h. durch die $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2]^{2+}$ - bzw. $[\text{Cu}(\text{D-Arg})_2]^{2+}$ -Einheiten kodiert wird. Im Unterschied hierzu bildet der cis-konfigurierte Komplex $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2](\text{NO}_3)_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ keine Doppelhelix, sondern ein endloses, dreidimensionales Netz aus Wasserstoffbrückenbindungen, an denen die Guanidiniumgruppen, die Nitrat-Ionen und die Wassermoleküle beteiligt sind^[23]. Vor kurzem wurde berichtet, daß sich aus chiralen Diaminen und Diolen infolge schwacher Wasserstoffbrückenbindungen Tripelhelices bilden, deren Drehsinn von den Konfigurationen der beiden asymmetrischen Kohlenstoffatome des Diamins abhängt^[24].

Der entscheidende Unterschied zwischen den Strukturen von 1–3 einerseits und von $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2](\text{NO}_3)_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ andererseits besteht in den anionischen Brückenliganden L^{2-} bzw. NO_3^- .

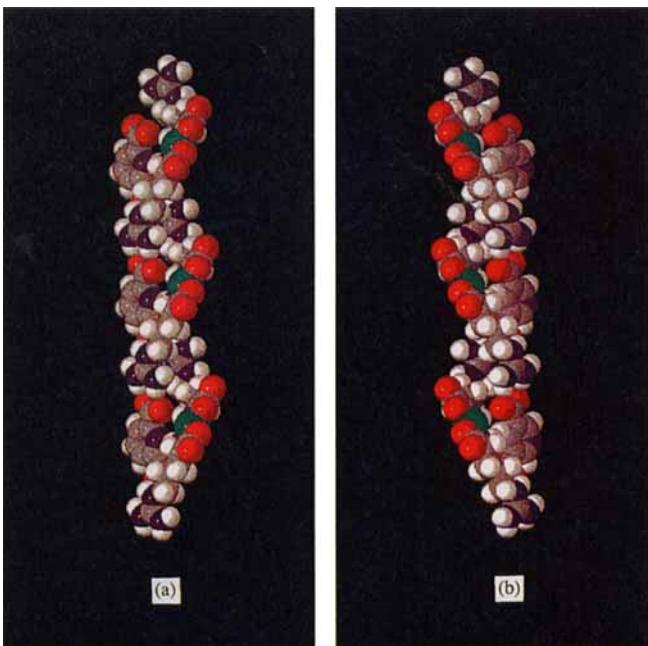


Abb. 2. Kalottenmodelle von $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2](2,6\text{-dipic}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2 (a) und $[\text{Cu}(\text{D-Arg})_2](3,5\text{-dipic}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 3 (b). Die rechts- bzw. linksgängige Doppelhelix wird durch Wasserstoffbrückenbindungen innerhalb des Stranges und zwischen den Strängen stabilisiert. C: grau, H: weiß, O: rot, N: blau, Cu: grün.

Das Nitrat-Ion ist relativ klein und im Kristall unabhängig von anderen NO_3^- -Ionen angeordnet. Dagegen hat L^{2-} einen größeren Raumbedarf und kann zwei räumlich isolierte Sätze von Wasserstoffbrückenbindungen bilden. Insofern kann die stereospezifische Helixbildung als durch die L^{2-} -Einheiten „programmiert“ angesehen werden, die die Arg-Reste über Guanidinium-Carboxylat-Wechselwirkungen verbrücken und die in den $[\text{Cu}(\text{L-Arg})_2]^{2+}$ bzw. $[\text{Cu}(\text{D-Arg})_2]^{2+}$ -Einheiten kodierte Chiralitäts-Information weitervermitteln.

Diese Ergebnisse heben die Bedeutung der intrinsischen Faktoren für die molekulare Selbstorganisation über Wasserstoffbrückenbindungen sowie für den Chiralitätssinn der entstehenden Helices hervor und können zum Verständnis von organisierten Systemen in der Biologie beitragen.

Eingegangen am 6. Oktober 1995 [Z 8449]

Stichworte: Doppelhelices · Elektrostatische Wechselwirkungen · Kupferverbindungen · Selbstorganisation

- [1] J.-M. Lehn, *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1347–1362; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, *29*, 1304–1319.
- [2] F. Vögtle, *Supramolecular Chemistry*, Wiley, Chichester, 1991.
- [3] D. B. Amabilino, J. F. Stoddart, *Pure Appl. Chem.* **1993**, *65*, 2351–2359.
- [4] G. M. Whitesides, E. E. Simanek, J. P. Mathias, C. T. Seto, D. N. Chin, M. Mammen, D. M. Gordon, *Acc. Chem. Res.* **1995**, *28*, 37–44.
- [5] C. Branden, J. Tooze, *Introduction to Protein Structure*, Garland, New York, 1991.
- [6] W. Saenger, *Principles of Nucleic Acid Structure*, Springer, Heidelberg, 1984.
- [7] J.-M. Lehn, A. Rigault, J. Siegel, J. Harrowfield, B. Chevrier, D. Moras, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1987**, *84*, 2565–2569.
- [8] E. C. Constable, *Tetrahedron* **1992**, *48*, 10013–10059.
- [9] C. Piguet, G. Bernardinelli, B. Bocquet, A. Quattrapanni, A. F. Williams, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, *114*, 7440–7451.
- [10] R. Krämer, J.-M. Lehn, A. De Cian, J. Fischer, *Angew. Chem.* **1993**, *105*, 764–767; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1993**, *32*, 703–706, zit. Lit.
- [11] R. F. Carina, G. Bernardinelli, A. F. Williams, *Angew. Chem.* **1993**, *105*, 1483–1485; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1993**, *32*, 1463–1465.
- [12] E. C. Constable, A. J. Edwards, P. R. Raithby, J. V. Walker, *Angew. Chem.* **1993**, *105*, 1486–1487; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1993**, *32*, 1465–1467.
- [13] N. P. Pavletich, C. O. Pabo, *Science* **1991**, *252*, 809–817.

- [14] N. P. Pavletich, C. O. Pabo, *Science* **1993**, *261*, 1701–1707.
- [15] L. Fairall, J. W. R. Schwabe, L. Chapman, J. T. Finch, D. Rhodes, *Nature* **1993**, *366*, 483–487.
- [16] F. A. Quiocio, W. N. Lipscomb, *Adv. Protein Chem.* **1971**, *25*, 1–78.
- [17] T. L. Poulos, B. C. Finzel, A. J. Howard, *Biochemistry* **1986**, *25*, 5314–5322.
- [18] G. Waksman, D. Kominos, S. C. Robertson, N. Pant, D. Baltimore, R. B. Birge, D. Cowburn, H. Hanafusa, B. J. Mayer, M. Overduin, M. D. Resh, C. B. Rios, L. Silverman, J. Kuriyan, *Nature* **1992**, *358*, 646–653.
- [19] D. M. Salunke, M. Vijayan, *Int. J. Pept. Protein Res.* **1981**, *18*, 348–351.
- [20] Die Kristallstrukturanalysen wurden mit einem Rigaku-ACF-5R-Vierkreisdiffraktometer mit rotierender Anode aufgenommen; $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -Strahlung ($\lambda = 1.54178 \text{\AA}$), Messung bei 295 K , ψ -Scan, $2\theta_{\max} = 120^\circ$, Lorentz- und Polarisationskorrektur, empirische Absorptionskorrektur, Strukturlösung mit Direkten Methoden (Programm: teXsan), anisotrope Verfeinerung aller Nichtwasserstoffatome durch Volle-Matrix-Kleinste-Fehlerquadrate-Methoden ($I > 3\sigma(I)$), Gewichtungschema $w^{-1} = \sigma^2(F_o)$, Lokalisierung aller H-Atome mit Ausnahme einiger Wasser-H-Atome durch Differenz-Fourier-Analyse (ohne Verfeinerung). – 1: $\text{C}_{20}\text{H}_{44}\text{N}_8\text{O}_{14}\text{Cu}$, $M_r = 684.16$, orthorhombisch, Raumgruppe $P2_12_12_1$, $a = 13.293(4)$, $b = 30.100(7)$, $c = 7.57(1) \text{\AA}$, $V = 3027(3) \text{\AA}^3$, $Z = 4$, $\rho_{\text{ber.}} = 1.501 \text{ g cm}^{-3}$, $\mu = 17.41 \text{ cm}^{-1}$, $F(000) = 1444.0$, $R = 0.043$, $R_w = 0.031$ für 1953 beobachtete Reflexe. – 2: $\text{C}_{19}\text{H}_{41}\text{N}_9\text{O}_{13}\text{Cu}$, $M_r = 667.13$, orthorhombisch, Raumgruppe $P2_12_12_1$, $a = 13.158(3)$, $b = 29.608(2)$, $c = 7.457(3) \text{\AA}$, $V = 2905(1) \text{\AA}^3$, $Z = 4$, $\rho_{\text{ber.}} = 1.525 \text{ g cm}^{-3}$, $\mu = 17.53 \text{ cm}^{-1}$, $F(000) = 1404.0$, $R = 0.047$, $R_w = 0.042$ für 1694 beobachtete Reflexe. – 3: $\text{C}_{19}\text{H}_{41}\text{N}_9\text{O}_{13}\text{Cu}$, $M_r = 667.13$, orthorhombisch, Raumgruppe $P2_12_12_1$, $a = 13.158(4)$, $b = 29.596(5)$, $c = 7.464(3) \text{\AA}$, $V = 2906(3) \text{\AA}^3$, $Z = 4$, $\rho_{\text{ber.}} = 1.524 \text{ g cm}^{-3}$, $\mu = 17.52 \text{ cm}^{-1}$, $F(000) = 1404.0$, $R = 0.044$, $R_w = 0.039$ für 2274 beobachtete Reflexe. – Weitere Einzelheiten zu den Kristallstrukturergebnissen können beim Direktor des Cambridge Crystallographic Data Centre, 12 Union Road, GB-Cambridge CB2 1EZ, unter Angabe des vollständigen Literaturzitats angefordert werden.
- [21] Gitterparameter für $[\text{Cu}(\text{D-Arg})_2](\text{pa})$: orthorhombisch, Raumgruppe $P2_12_12_1$, $a = 13.331(7)$, $b = 30.10(2)$, $c = 7.545(5) \text{\AA}$, $V = 3028(3) \text{\AA}^3$.
- [22] M. T. L. S. Duarte, M. A. A. F. de C. T. Carrondo, M. L. S. S. Goncalves, M. B. Hursthorne, N. P. C. Walker, H. M. Dawes, *Inorg. Chim. Acta* **1986**, *124*, 41–47.
- [23] H. Masuda, A. Odani, T. Yamazaki, T. Yajima, O. Yamauchi, *Inorg. Chem.* **1993**, *32*, 1111–1118.
- [24] S. Hanessian, A. Gomtsyan, M. Simard, S. Roelens, *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*, 4495–4496.

Synthese von kovalent an Oxidoberflächen gebundenen, polaren Selbstorganisationssystemen aus molekularen Pyramiden und deren NLO-Eigenschaften**

Xiaoguang Yang, Duncan McBranch, Basil Swanson und DeQuan Li*

Die Konstruktion künstlicher supramolekularer Architekturen auf Oberflächen ist von großer aktueller Bedeutung und ein wichtiger Aspekt der Chemie von Selbstorganisationsprozessen^[1], denn Selbstorganisation ermöglicht das rationale Design und den Zugang zu hoch geordneten Strukturen im mesoskopischen Bereich mit gewünschten chemischen Funktionalitäten und physikalischen Eigenschaften. Die Herstellung von polaren molekularen Überstrukturen ist eine besondere Herausforderung und deshalb wichtig, weil polare Molekülverbin-

[*] Dr. D. Li, Dr. X. Yang, Dr. D. McBranch, Dr. B. Swanson
Chemical Sciences and Technology Division
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, NM 87545 (USA)
Telefax: Int. + 505/665-2992

[**] Diese Arbeit wurde vom Department of Energy, vom Center for Materials Science des Los Alamos National Laboratory und vom Laboratory Directed Research and Development Programm gefördert. X. Y. wurde durch ein Los Alamos Directors Postdoctoral Fellowship unterstützt. Wir danken Mr. Johny E. Anderson für die Durchführung der matrixunterstützten Laserdesorptions-ionisations-Massenspektrometrie.