

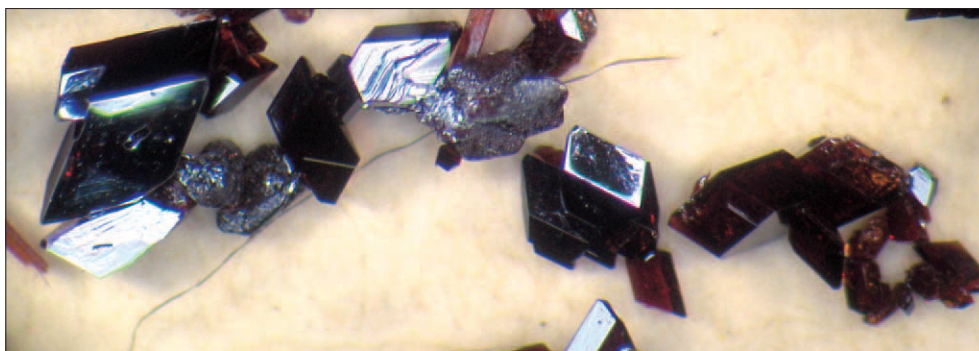
Die Chemie erfährt gegenwärtig einen interessanten Übergang von der traditionellen Betrachtung der Einzelmoleküle hin zu großen komplexen Funktionseinheiten. Besonders das wachsende Verständnis biologischer Prozesse als auch die steigenden Forderungen nach neuen Werkstoffen mit einem spezifischen Eigenschaftsprofil führten zur gezielten Konstruktion definierter Baueinheiten auf der Nanometerskala. Dabei werden in intelligenter Weise reversible Bindungsprozesse auf Basis schwacher nichtkovalenter Wechselwirkungen, wie koordinative und Wasserstoffbrückenbindungen, Van-der-Waals-Kräfte sowie π - π - und elektrostatische Wechselwirkungen, genutzt. Aufbauend auf den natürlichen Prinzipien der molekularen Erkennung und Selbstorganisation ist die supramolekulare Chemie heute eine der Säulen in der Entwicklung der Nanotechnologie. Im Beitrag wird ein Überblick über wesentliche Aspekte der supramolekularen Chemie, ihre Anknüpfung an biologische Prinzipien und ausgewählte Nutzungsmöglichkeiten gegeben.

At present chemistry is undergoing an interesting change from the traditional preparation and investigation of single molecules to the construction and use of more complex functionalized architectures. Especially the better understanding of biological processes and the demand to create new materials with specific properties lead to a development of novel nanostructured assemblies that are held together by reversible weak interactions, that include coordination and hydrogen bonds, van der Waals forces as well as π - π and electrostatic interactions.

Based on the smart use of Nature's principles of molecular recognition and self-assembly, the supramolecular chemistry is now one of the pillars within the framework of nanotechnology. This contribution gives an overview on the basic concepts of supramolecular chemistry, the latter's connections with biological systems and foreseeable applications.

Karsten Gloe, Kerstin Gloe, Holger Heßke und Leonard F. Lindoy

Supramolekulare Chemie: Vom Einzelmolekül zur komplexen Funktionseinheit



*Es wird! die Masse regt sich klarer!
Die Überzeugung wahrer, wahrer:
Was man an der Natur Geheimnisvolles pries,
Das wagen wir verständig zu probieren,
Und was sie sonst organisieren ließ,
Das lassen wir kristallisieren.*
(J. W. von Goethe, Faust, 2. Akt, Laboratorium)

1 Einleitung

Im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte begegneten die Menschen den ständig wechselnden Herausforderungen ihrer Zeit mit immer neuen, kreativen Ideen und deren praktischer Umsetzung. So entstanden und entstehen ständig neue Beispiele technischer, wissenschaftlicher oder künstlerischer Leistungen, in denen sich Möglichkeiten und Grenzen, aber auch Visionen der jeweiligen Epochen widerspiegeln. Historische Zeugnisse dafür finden sich vor allem in makroskopischen Dimensionen und sind somit für das Auge gut wahrnehmbar. Nicht zuletzt bestaunen wir heute viele gleichermaßen wagemutige wie schöne Architekturen, beispielsweise die ägyptischen Pyra-

miden, die mittelalterlichen Kirchen mit ihren reichen Kunstgegenständen oder den Eiffelturm in Paris. Analysiert man detailliert die dabei genutzten Techniken oder eingesetzten Materialien mit den heute verfügbaren physikalischen und chemischen Methoden, so zeigen sich große Ähnlichkeiten zu den Strukturen und Prozessen auf mikroskopischer und molekularer Ebene. Ein interessantes Beispiel stellt in diesem Zusammenhang der Damaszener Stahl des Mittelalters dar, dessen legendäre Eigenschaften nach kürzlich publizierten Untersuchungen auf einen signifikanten Gehalt an Kohlenstoffnanostrukturen zurückzuführen sind [1], welche eigentlich als spektakuläre Entdeckung der letzten Jahre gelten [2].

Trotz fehlender wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden konnten in der Vergangenheit bemerkenswerte Ergebnisse durch fleißiges Experimentieren und exaktes Beobachten erzielt und nutzbringend angewendet werden. Die im Laufe der Zeit erzielten Erkenntnisse auf vielen Gebieten sind dabei nicht unwesentlich durch Ergebnisse chemischer Studien beeinflusst worden. Auch gegenwärtig beobachtet man in der Chemie breitgefächerte Aktivitäten, mit denen der weitere wissenschaftlich-technische Fortschritt beschleunigt werden soll. Dabei stehen Design, Synthese und Charakterisierung neuer Stoffe und Materialien sowie Verfahren, die effizienter und umweltfreundlicher arbeiten, im Mittelpunkt. Neue Werkstoffe für die Elektronik und Energiegewinnung, selektive Katalysatoren für ressourcen- bzw. energieschonende Verfahren oder wirksame Pharmaka und Diagnostika für die Medizin unterstreichen das deutlich [3]. Außerdem tragen chemische und biochemische Untersuchungen in starkem Maße zum Verständnis der komplexen Lebensvorgänge bei und fördern deren technische Nutzung.

Seit dem Beginn der wissenschaftlich fundierten Chemie Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts hat sich die chemische Betrachtungsweise zunehmend von der makroskopischen auf die molekulare Ebene verlagert, weil man erkannt hatte, dass die chemischen Eigenschaften der Stoffe entscheidend von den vorliegenden Bindungsverhältnissen und der Struktur abhängen. In Molekülen basiert die Verknüpfung der Atome auf ausgesprochen starken Wechselwirkungen, den durch gemeinsame Elektronenpaare bedingten kovalenten Bindungen. Diese bilden die Basis der klassischen molekularen Chemie organischer und anorganischer Prägung. Vergleichbar starke Wechselwirkungen findet man aber auch in den geordneten Gitterstrukturen der Metalle und ihrer Salze, hierbei allerdings infolge von elektrostatischen Anziehungskräften zwischen unterschiedlich geladenen Teilchen. Neben diesen drei starken Bindungsarten sind auch schon lange eine Reihe weiterer, sogenannter schwacher oder nichtkovalenter Bindungen bekannt, die aber erst in neuerer Zeit mit der Entwicklung der supramolekularen Chemie die notwendige Aufmerksamkeit gefunden haben. Dazu zählen Coulomb-Wechselwirkungen zwischen Ionen und Dipolen, Wasserstoffbrückenbindungen, Van-der-Waals-, hydrophobe sowie π -Wechselwirkungen. Für supramolekulare Strukturen sind außerdem die für Übergangsmetallkomplexverbindungen charakteristischen koordinativen Bindungen von Bedeutung, deren Bindungsenergien sich zwischen den schwachen und starken Bindungen einordnen.

Bild 1 gibt eine allgemeine Übersicht der typischen Bindungsenergien für die diskutierten Wechselwirkungen

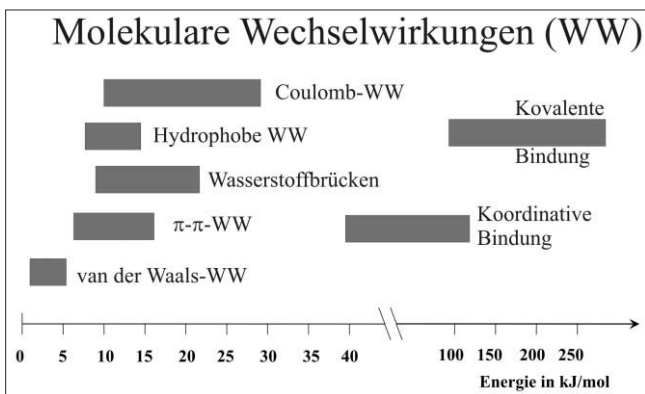


Bild 1. Molekulare Wechselwirkungen und ihre Energiebeträge [4]

[4]. Aus diesen Daten wird klar, dass eine mit kovalenten Bindungen vergleichbare Stabilität nur durch eine größere Anzahl von schwachen Wechselwirkungen erreicht werden kann. Allerdings besitzen diese mit ihrem reversiblen Charakter einen bemerkenswerten Vorzug, weil dadurch dynamische Vorgänge möglich werden. Von den angeführten schwachen Wechselwirkungen sind die zwischen gebundenen Wasserstoffatomen und elektronegativen Partnern entstehenden Wasserstoffbrücken von besonderem Interesse. So entstehen die charakteristischen Eigenschaften des Wassers, wie der hohe Schmelz- und Siedepunkt, die große Oberflächenspannung und Viskosität sowie das ausgeprägte Löslichkeitsverhalten für viele Stoffe, durch Ausbildung einer großen Anzahl von Wasserstoffbrücken sowohl im flüssigen als auch im festen Zustand. Schließlich erhalten wesentliche Komponenten und Prozesse im biologischen Geschehen ihre spezifische Struktur, Funktion und Dynamik durch diese Form der Wechselwirkungen in einem insgesamt aufeinander abgestimmten System nichtkovalenter Bindungen.

Die detaillierte Untersuchung und kreative Nutzung der gesamten Palette der in Bild 1 zusammengestellten schwachen Wechselwirkungen begann vor 40 Jahren mit der Entwicklung der supramolekularen Chemie. Damit wurde eine wesentliche Voraussetzung für den gezielten Aufbau nanoskopischer Systeme aus molekularen Bausteinen mit definierter Architektur und Funktion gelegt [5]. Dieser supramolekulare Weg wird in der Nanotechnik als Weg „von unten nach oben“ oder „Bottom-up-Strategie“ bezeichnet und ist eine Alternative zum traditionellen Vorgehen bei der Miniaturisierung von „oben nach unten“, der „Top-down-Strategie“ [6].

In diesem Beitrag sollen die Ziele der supramolekularen Chemie und die zu ihrer Erreichung genutzten Prinzipien näher charakterisiert sowie insbesondere ihr Entwicklungspotenzial im Hinblick auf die Nanotechnologie an ausgewählten Beispielen diskutiert werden.

2 Prinzipien der supramolekularen Chemie

In der Natur sind eine Vielzahl von Aufbauprozessen und Reaktionsabläufen auf einer sehr komplexen Ebene mit hoher Effektivität organisiert. Das beinhaltet einmal die kovalente Bindungsknüpfung unter Bildung charakteristischer Funktionsmoleküle. Ein typisches Beispiel dafür ist das Coenzym Vitamin B₁₂, das entscheidend an der Produktion der roten Blutkörperchen sowie an verschiedenen Nervenzellen- und Stoffwechselfunktionen im Organismus beteiligt ist und von Mikroorganismen produziert wird. Für die vielstufige Totalsynthese dieser komplizierten niedermolekularen Verbindung aus 63 Kohlenstoff-, 88 Wasserstoff-, je 14 Stickstoff- und Sauerstoffatomen, einem Phosphoratom und einem Cobalt(III)-Ion benötigten zwei renommierte chemische Arbeitskreise mehr als zehn Jahre intensiver Forschungsarbeit [7].

Eine verwandte Struktur stellt der Eisenporphyrin-komplex der Hämereinheit des Hämoglobins dar, das in Bild 2 in einem Ausschnitt dargestellt ist. In diesem Fall ist das Funktionsmolekül, das für Bindung und Transport von Sauerstoff bei Wirbeltieren verantwortlich zeichnet, zusätzlich in eine charakteristische Proteinumgebung eingebettet, die wesentliche Bedeutung für die Funktionsweise besitzt. Durch Verknüpfung über Wasserstoffbrücken entsteht aus vier einzelnen Hämproteineinheiten eine komplexe Quarstruktur mit einem Durchmesser von 5 bis 6 nm [8].

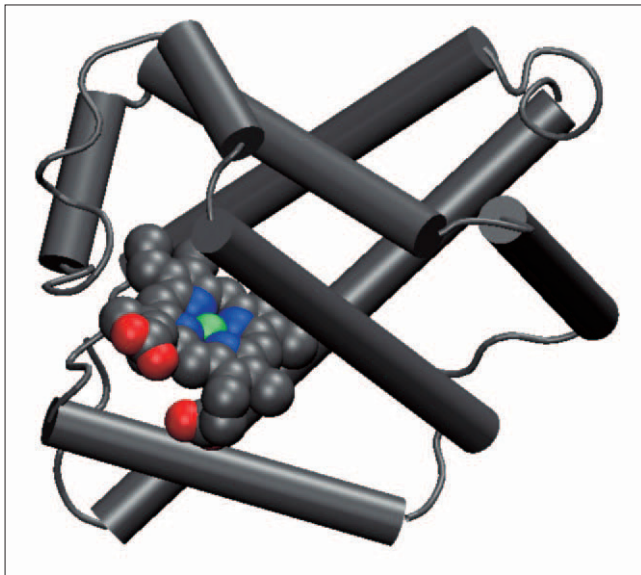


Bild 2. Struktur einer Hämoglobinuntereinheit mit der sauerstoffbindenden Hämfunktion [8]

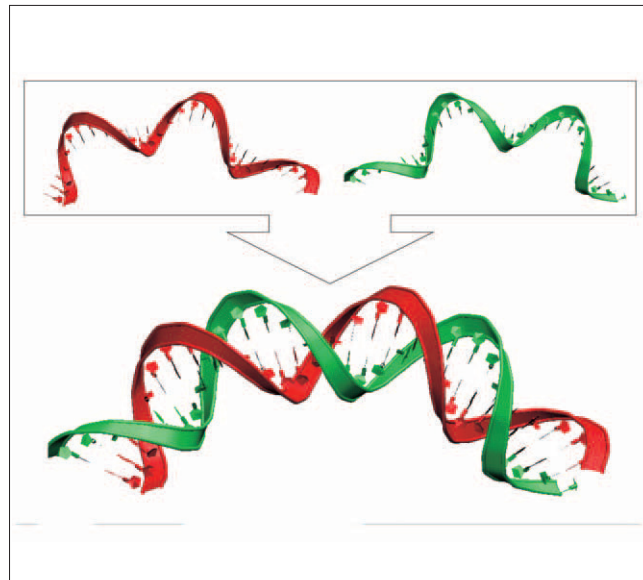


Bild 3. Aufbau der DNA-Doppelhelix durch Selbstorganisation über definierte Wasserstoffbrückenbindungen [8]

Auch die Doppelhelixstruktur der polymeren Nucleinsäuren DNA, die als Träger der Erbinformationen in biologischen Systemen fungieren, entstehen in ähnlicher Weise unter molekularer Erkennung von zwei komplementären Einzelsträngen und deren Selbstorganisation über definierte Wasserstoffbrücken zwischen komplementären Basenpaaren. Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung dieses Selbstorganisationsvorganges mit dem resultierenden charakteristischen Wasserstoffbrückenmuster.

In allen drei Beispielen erfolgt eine sehr effektive Bildung der Strukturen im Biosystem, während es sich als schwierig erweist, diese Prozesse im Labor in vergleichba-

rer Weise nachzuvollziehen. Die besondere Spezifik der natürlichen Vorgänge wird maßgeblich durch eine optimale Nutzung von molekularen Erkennungs- und Selbstorganisationsprozessen bestimmt, wobei schwache Wechselwirkungen eine ganz entscheidende Rolle spielen. Dieser prinzipielle Ansatz wurde in der supramolekularen Chemie aufgegriffen, inzwischen in vielen Beispielen getestet und in der Laborpraxis weiterentwickelt. Dabei wird dieses neue Teilgebiet als Chemie „über das Molekül hinaus“ definiert, das durch die gezielte Nutzung unterschiedlicher aufeinander abgestimmter schwacher Wechselwirkungen zwischen kleinen Molekülen den maßgeschneiderten Aufbau großer Aggregate mit neuen spezifischen Eigenschaften erlaubt. Infolge dieses Strukturierungsprozesses können in den gebildeten „Supramolekülen“ Funktionen mit variablem Informationsgehalt implementiert und gesteuert werden. Als typische Beispiele sollen hier Wirt-Gast- oder Rezeptor-Substratkomplexe genannt werden. Die Entwicklung begann mit den Pionierarbeiten von CHARLES J. PEDERSEN, JEAN-MARIE LEHN und DONALD J. CRAM Ende der 60-er Jahre des letzten Jahrhunderts und wurde mit dem Nobelpreis für Chemie 1987 gewürdigt [9 bis 11].

Bild 4 illustriert die Definition der supramolekularen im Vergleich zur traditionellen molekularen Chemie anhand der von PEDERSEN erstmals synthetisierten Kronenether [12]. Das als Beispiel gewählte Wirtmolekül 18-Krone-6 basiert auf einer kovalenten Verknüpfung von Kohlenstoff-, Wasserstoff- sowie Sauerstoffatomen und erlaubt aufgrund seiner Hohlraumgröße und -struktur die selektive Erkennung und Bindung eines Kaliumions unter Ausbildung von schwachen Ion-Dipol-Wechselwirkungen mit den Ethersauerstoffdonorfunktionen. Damit verfügt diese Modellverbindung über Eigenschaften der strukturanalogen Ionophore Valinomycin oder Nonactin, die im biologischen Geschehen Kaliumionen binden und durch Zellmembranen transportieren. Eine optimale Komplementarität zwischen Wirt und Gast ist in diesen Fällen nur mit Kaliumionen (K^+) gegeben. In den letzten 40 Jahren sind eine Vielzahl von derartigen Funktionseinheiten oder Rezeptoren unterschiedlicher Struktur, Topologie und Selektivität synthetisiert und

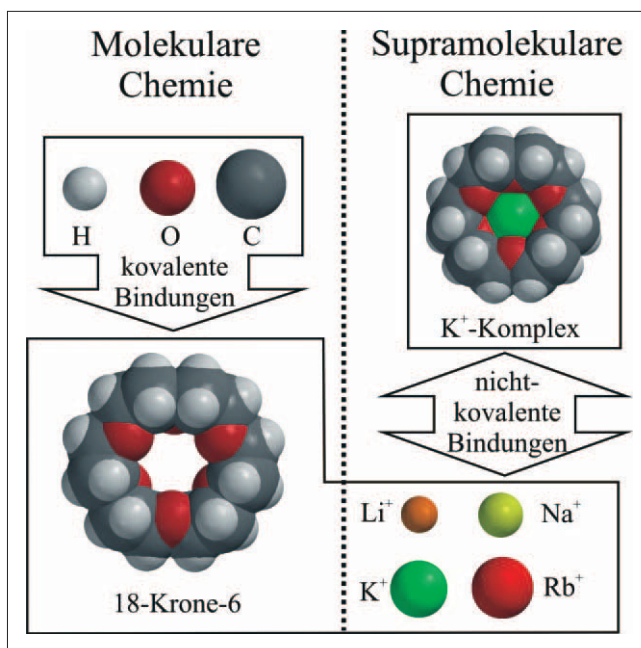


Bild 4. Gegenüberstellung von kovalent geprägter molekularer und auf schwachen Wechselwirkungen beruhender supramolekularer Chemie

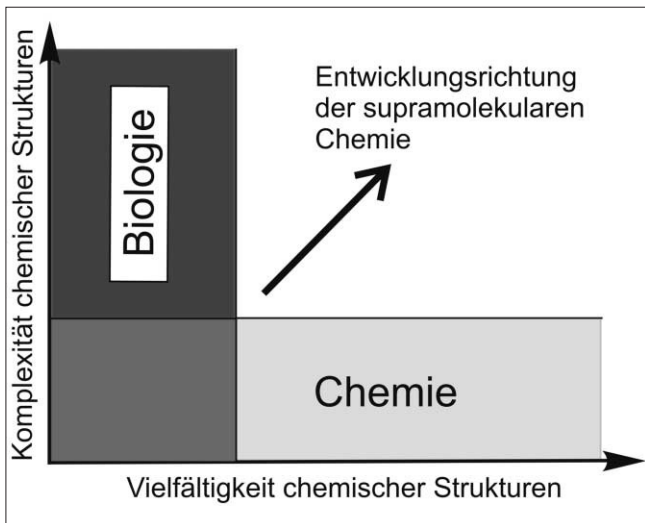


Bild 5. Komplexität und Vielfalt chemischer Strukturen in Biologie und Chemie (nach [5])

charakterisiert worden. Als Basisstrukturen sollen hier Podanden, Cryptanden, Sphäranden, Calixarene oder Cyclo-dextrine genannt werden, die mit spezifischen Erkennungsfunktionen nicht nur für Kationen sondern auch für Anionen und Neutramoleküle versehen und im Hinblick auf gewünschte Anwendungen vielfältig modifiziert wurden [13]. Im Vergleich mit der Natur, die nur eine begrenzte Anzahl an chemischen Elementen und Stoffen nutzt, lassen sich insgesamt viele Gemeinsamkeiten und Analogien feststellen. Die prinzipiellen Möglichkeiten für künstliche Systeme sind sogar umfangreicher, weil das gesamte Periodensystem zur Verfügung steht. Allerdings wird der im Laufe der Evolution in der Natur entstandene hohe komplexe Charakter der Systeme bei Weitem noch nicht erreicht, wie es in Bild 5 schematisch dargestellt ist [5].

Betrachtet man die Entwicklung der supramolekularen Chemie in den letzten Jahren, dann stellt man eine signifikante Zunahme von Größe und Komplexität der synthetisierten Systeme fest. Es gelingt immer besser, die Selbstorganisation komplementärer molekularer Komponenten zur strukturellen Organisation und zum Aufbau größerer

Funktionseinheiten zu nutzen. Auf diese Weise kann die aufwendige und komplizierte Synthese von großen Molekülen allein über einen kovalenten Bindungsaufbau wesentlich vereinfacht und effizienter gestaltet werden. Zusätzlich sind diese Reaktionen reversibel und lassen sich durch äußere Stimuli schaltbar gestalten. Wie bei einem Puzzle werden zueinander komplementäre Basiselemente mit wechselseitig abgestimmten Funktionen nach einem festen Bauplan zu einer Einheit zusammengeführt.

Bild 6 zeigt schematisch, wie durch Komplexbildung aus Metallionen und organischen Ligandmolekülen unter Einbeziehung von Gegenionen und Lösungsmittelmolekülen ganz unterschiedliche supramolekulare Anordnungen mit cyclischer, gitterartiger, helikaler oder linearer Struktur resultieren, wobei deren hohe Stabilität in diesen Fällen durch ausgeprägte koordinative Bindungen an den Verknüpfungsstellen bedingt ist [14]. Weitere schwache Wechselwirkungen unterschiedlicher Art zwischen den jeweiligen Anordnungen führen zu ausgedehnten Netzwerken und Raumstrukturen mit spezifischen katalytischen, photochemischen, elektronischen oder magnetischen Eigenschaften [15, 16]. Ein weiterer interessanter Ansatz beschäftigt sich mit dem Aufbau von porösen Netzwerken, die zur reversible Bindung von Gastmolekülen, beispielsweise zur Einlagerung von Wasserstoff, befähigt sind [17].

Derartige Selbstorganisationsprozesse können, wie in der Natur bevorzugt, auch über die schwächeren Wasserstoffbrücken- sowie Coulomb-Wechselwirkungen realisiert werden. Auch in diesen Fällen sind reversible Einlagerungen von kleinen Gastmolekülen wie Wasser oder Toluol möglich [18].

3 Supramolekulare Architekturen auf der Nanometerskala

Die im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Prinzipien der molekularen Erkennung und der Selbstorganisation bilden sowohl in der Natur als auch im Falle von künstlichen Systemen die Voraussetzung zum gezielten Aufbau von Funktionseinheiten auf der Nanometerskala. Der Größenbereich der Startkomponenten in Form von Atomen und Molekülen liegt dabei überwiegend im Subnanometerbereich, während die daraus resultierenden Supramo-

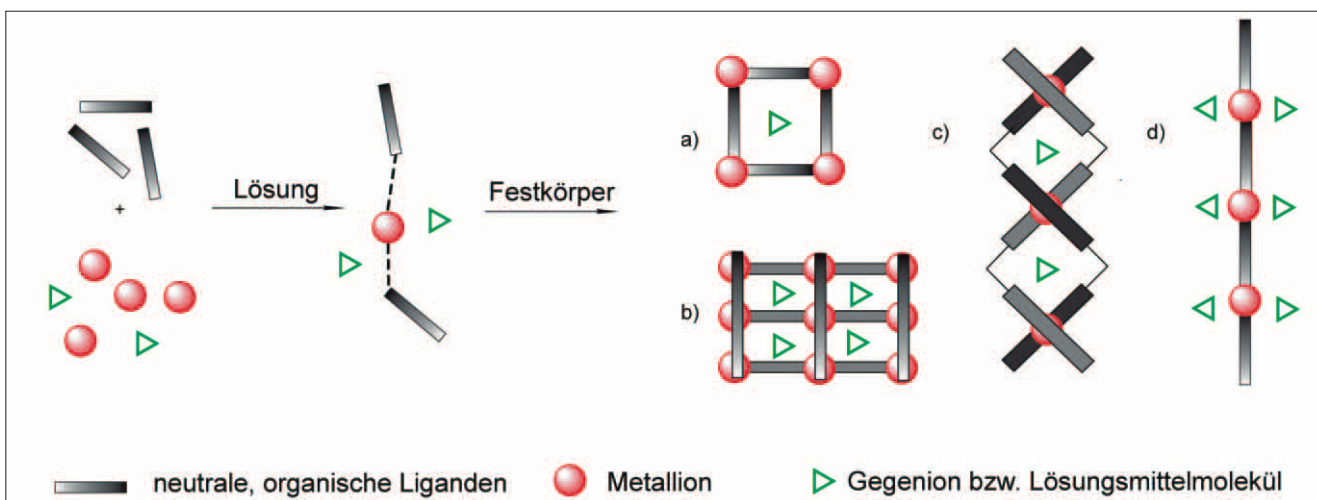


Bild 6. Möglichkeiten der Strukturbildung durch molekulare Erkennung und Selbstorganisationsprozesse von Metallionen mit funktionalisierten Ligandmolekülen (nach [15])

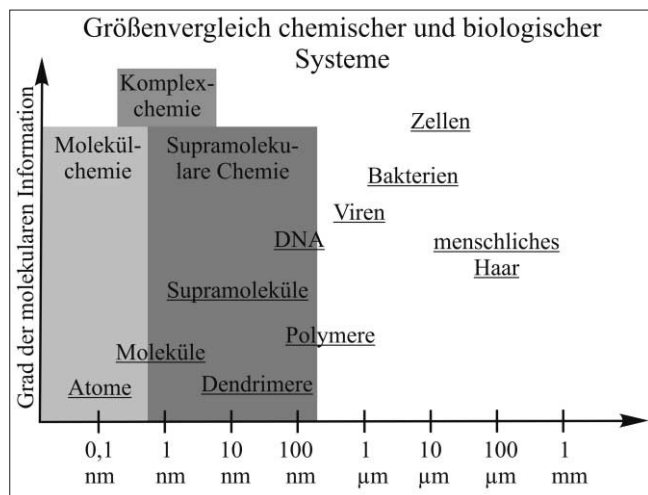


Bild 7. Größenvergleich zwischen ausgewählten chemischen und biologischen Systemen

leküle dann den technologisch wichtigen Bereich zwischen 1 und 100 nm auf der Größenskala erreichen. Im Hinblick auf ihre Größenordnung können sie dadurch mit natürlichen Komponenten wie Proteinen, Nucleinsäuren (DNA) oder Enzymen verglichen werden (Bild 7).

Einige Ergebnisse von metallionen- und anionengesteuerten supramolekularen Strukturbildungsprozessen, die in jüngster Zeit in den Labors der Autoren entstanden sind, sollen die getroffenen allgemeinen Aussagen und die Vielfalt der Möglichkeiten illustrieren.

Das erste Beispiel in Bild 8 zeigt eine Architektur, bei der aus jeweils drei Kupfer(II)-Ionen Cu^{2+} und drei Ligandmolekülen **L** Chelatkomplexmoleküle $[\text{Cu}_3\text{L}_3]$ mit trigonalplanarer Geometrie gebildet werden, die dann in axialer Richtung symmetrisch über Diamine **A** zwischen jeweils zwei Kupferzentren zu charakteristischen Säulenstrukturen der Zusammensetzung $[\text{Cu}_3\text{L}_3\text{A}_3]_n$ verknüpft werden. Die Stabilität basiert dabei weitgehend auf koordinativen Bindungen des Kupfers, während die Struktur durch die räumliche Orientierung der Bindungsfunktionen im Ligandmolekül sowie die bevorzugte Geometrie des Metallions gesteuert wird. Innerhalb des gebildeten trigonal-prismatischen Hohlraums reichern sich bei der Kristallisation Lösungsmittelmoleküle an [19]. Dieses Ergebnis eröffnet reale Möglichkeiten, diesen nanoskopischen Hohlraum als „Molekülcontainer“ oder „chemisches Reaktionsgefäß“ zu nutzen. Mit anderen Systemen konnten derartige Varianten schon realisiert werden [20]. Die spezifischen Erkennungseigenschaften der Ligandmoleküle für Kupferkationen sind weiterhin auch für Anwendungen in der Sensorik oder bei Stofftrennprozessen von Interesse und lassen sich über den pH-Wert reversibel steuern.

Das zweite Beispiel in Bild 9 zeigt eine Hohlraumstruktur der Zusammensetzung $[\text{LI}]_n$ mit vergleichbarer Porosität, deren strukturprägende Verknüpfung allerdings durch Coulomb-Wechselwirkungen und ein Wasserstoffbrückennetzwerk zwischen Iodidionen **I** und tetrapodalen Ammoniumkationen L^+ erreicht wird. Im Unterschied zum ersten Beispiel sind diese Wechselwirkungen, bedingt durch ihre geringeren Bindungsenergien, signifikant schwächer. Trotzdem ist auch diese supramolekulare Verbindung zur Aufnahme von Lösungsmittelmolekülen befähigt. Die in diesem Fall bestehenden spezifischen Bindungseigen-

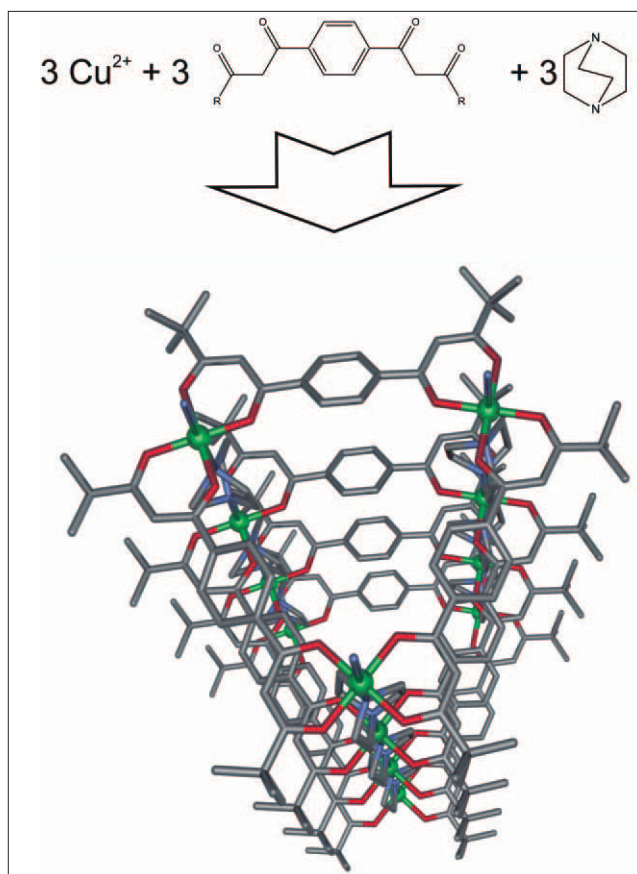


Bild 8. Aufbau einer charakteristischen Hohlraumstruktur durch molekulare Erkennung und Selbstorganisation von Kupferionen, β -Diketon- und Aminmolekülen unter Nutzung koordinativer Bindungen [20]

schaften gegenüber anionischen Spezies können außerdem zu deren Nachweis oder Trennung genutzt werden [21].

Die Vielfalt möglicher Architekturen und damit auch denkbarer Anwendungsoptionen ist aufgrund der riesigen Auswahl an unterschiedlichen Basisstrukturen, relevanten Verknüpfungselementen und Art und Anzahl der Wechselwirkungsmechanismen nahezu unbegrenzt. Da der Reaktionsverlauf zusätzlich auch durch die äußeren Bedingungen, wie Temperatur, Konzentration der Komponenten, Gegenion, Lösungsmittel, pH-Wert usw., beeinflusst werden kann, sind weitere Steuerungsmöglichkeiten im Rahmen einer Strukturoptimierung gegeben.

Dass derartige Molekülensembles auch hohen ästhetischen Ansprüchen genügen, soll durch Bild 10 verdeutlicht werden. Hier sind die Kristallstrukturen von zwei Silberkomplexen, $[\text{Ag}_3\text{L}_2(\text{NO}_3)_2]\text{NO}_3$ [22] bzw. $\{[\text{AgL}]\text{ClO}_4\}_n$ [23], gegenübergestellt, die von zwei unterschiedlichen dreiarmligen Ligandsystemen gebildet werden. Während im ersten Fall eine molekulare Kapsel entstanden ist, wurde im zweiten Beispiel eine symmetrische Propellerstruktur erhalten. In beiden Fällen sind wiederum koordinative Bindungen des Metallzentrums dominierend, die durch weitere schwache Wechselwirkungen in der Kristallstruktur ergänzt werden.

4 Zusammenfassung

Die supramolekulare Chemie steht für ein sich rasant entwickelndes interdisziplinäres Forschungsgebiet an der

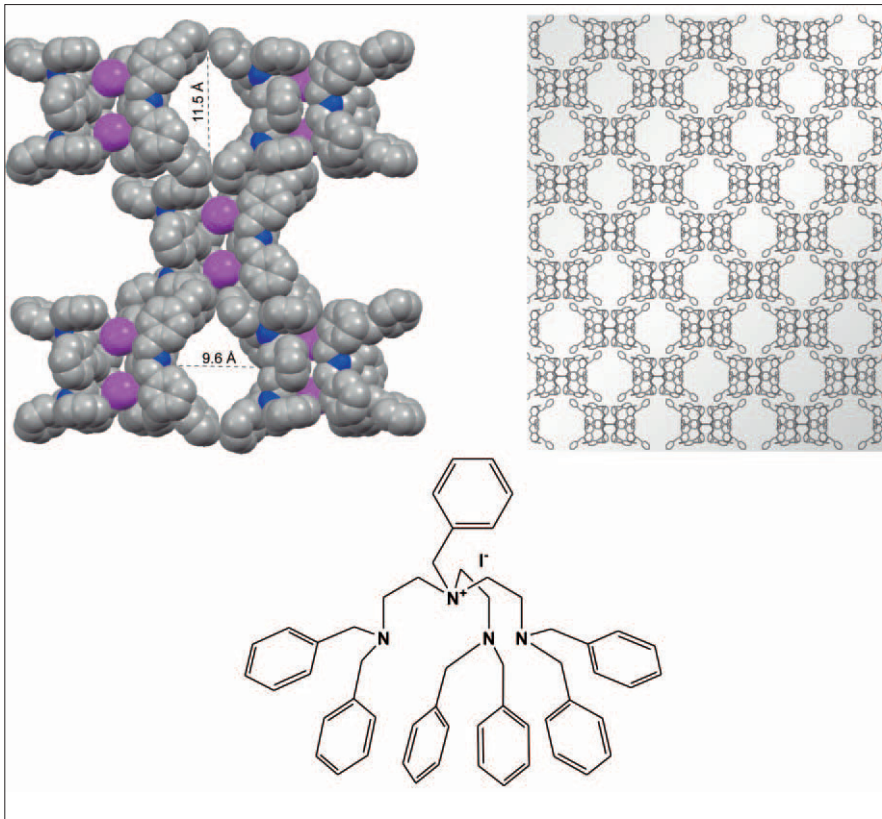


Bild 9. Selbstorganisierte Hohlraumstruktur zwischen quaternären Ammoniumionen und Iodidionen auf Basis von Coulomb-Wechselwirkungen und multiplen Wasserstoffbrückenbindungen [22]

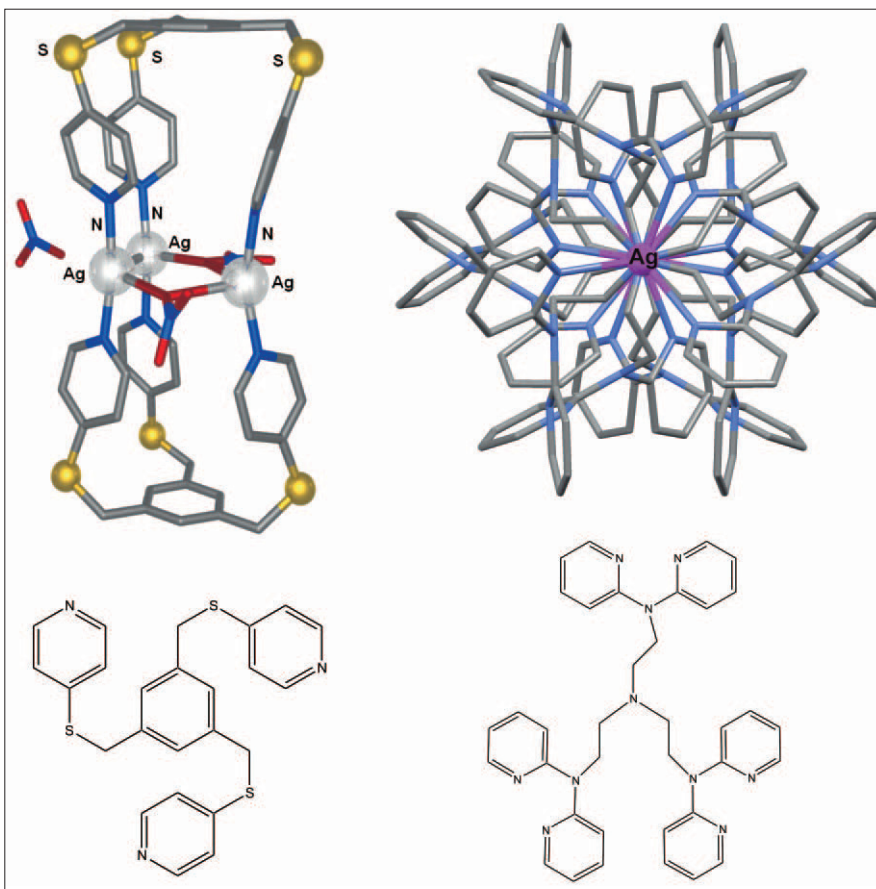


Bild 10. Definierte Komplexarchitekturen zwischen Silberionen und zwei dreiarmligen Ligandsystemen [23, 24]

Schnittstelle von Chemie, Biologie, Physik und Materialwissenschaften. Ihre Bedeutung ist in den 40 Jahren seit den spektakulären Anfängen Ende der 60-er Jahre des vorigen Jahrhunderts stetig gewachsen. Das Besondere an typischen supramolekularen Verbindungen besteht nun darin, dass sie in Hohlräumen oder Nischen definierter Abmessung und Funktion Ionen oder Moleküle nach Art und Größe selektieren, reversibel binden, speichern sowie transportieren können. Dabei kommt vor allem das in der Biologie ubiquitäre Prinzip der molekularen Erkennung zum Tragen, das in Kombination mit der molekularen Selbstorganisation als zweitem Grundprinzip biologischer Systeme zum effektiven Aufbau von komplexen supramolekularen Architekturen aus einfachen Basiskomponenten genutzt werden kann. Die auf diese Weise zugänglichen definierten Struktureinheiten mit steuerbaren Funktionen schlagen eine direkte Brücke vom Vorbild Natur zur Zukunftstechnik Nanotechnologie und eröffnen vielfältige Anwendungsoptionen [24, 25]. Typische Beispiele biologischer Funktionsträger, die Vorbilder für derartige supramolekulare Systeme darstellen, sind Hämoglobin als Sauerstoffträger höherer Lebewesen, Enzyme als vielfältige biologische Katalysatoren oder spezifische Ionophore als Transporter und Signalgeber. Das Potenzial der makrocyclischen bzw. supramolekularen Chemie geht inzwischen, was ihre Vielfalt betrifft, weit über die natürlichen Beispiele hinaus; begrenzt ist allerdings im Moment noch die Komplexität entsprechender künstlicher Systeme. Dabei wächst die Zahl neuer innovativer Entwicklungen ständig. Beispielhaft sollen hier selektive Funktionseinheiten zur Stofftrennung und Stoffgewinnung in Industrie und Umweltschutz oder als Sensoren in der Analytik, intelligente Werkstoffe für Elektronik und Katalyse oder neue Wirkstoffe in der medizinischen Therapie oder Diagnostik genannt werden. Zunehmend konzentrieren sich die wissenschaftlichen Ansätze unter Einsatz der „Bottom-up-Strategie“ auf die Konstruktion von funktionalisierten Bausätzen im Nanometerbereich für molekulare Motoren, Maschinen bzw. Computer. So stellt die supramolekulare Chemie einerseits eine wesentliche Basis für neue Technologien des 21. Jahrhunderts dar, trägt aber andererseits auch mit vielfältigen Impulsen zur Aufklärung und Interpretation biologischer Phänomene bei. Dieses Wechselspiel zwischen

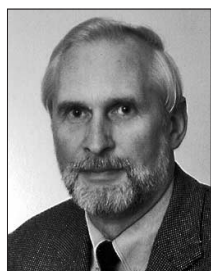
dem Erkennen von natürlichen Funktionsweisen, deren Adaption und praktischen Nutzungsmöglichkeiten gepaart mit einem vielfältigen ästhetischen Formenspiel auf der molekularen Ebene verleiht diesem Gebiet nicht zuletzt seinen eigenen Reiz.

Literatur

- [1] Reibold, M.; Paufler, P.; Levin, A. A.; Kochmann, W.; Pätzke, N.; Meyer, D. C.: In: *Nature* **444** (2006), S. 286
- [2] Iijima, S.: In: *Nature* **354** (1991), S. 56
- [3] Ball, Ph.: In: *Nature* **444** (2006), S. 500
- [4] Swiegers, G. F.; Malefetsse, T. J.: In: *J. Inclusion Phenom.* **40** (2001), S. 253
- [5] Lehn, J.-M.: *Supramolecular Chemistry: Concepts and Perspectives*. Weinheim: VCH, 1995
- [6] Balzani, V.: In: *small* **1** (2005), S. 278
- [7] Eschenmoser, A.: In: *Angew. Chem.* **100** (1988), S. 5
- [8] Franck, B.; Nonn, A.: In: *Angew. Chem.* **107** (1995), S. 1941
- [9] Diederich, F.: In: *Angew. Chem.* **119** (2007), S. 68
- [10] Vögtle, F.: *Supramolekulare Chemie*. Stuttgart: Teubner, 1992
- [11] Steed, J. W.; Atwood, J. L.: *Supramolecular Chemistry*. Chichester: Wiley, 2000
- [12] Pedersen, C. J.: In: *J. Am. Chem. Soc.* **89** (1967), S. 2495 und 7017
- [13] Gloe, K. (Hrsg.): *Macrocyclic Chemistry – Current Trends and Future Perspectives*. Dordrecht: Springer, 2005
- [14] Robin, Y.; Fromm, K. M.: In: *Coord. Chem. Rev.* **250** (2006), S. 2127
- [15] Holliday, B. J.; Mirkin, C. A.: In: *Angew. Chem.* **113** (2001), S. 2076
- [16] Lindoy, L. F.; Atkinson, I. M.: *Self-assembly in Supramolecular Chemistry*. Cambridge: RSC, 2000
- [17] Rowsell, J. L. C.; Yaghi, O. M.: In: *Micropor. Mesopr. Mat.* **73** (2004), S. 3
- [18] Wuest, J. D.: In: *Chem. Commun.* **47** (2005), S. 5830
- [19] Clegg, J. K.; Gloe, K.; Hayter, M. J.; Kataeva, O.; Lindoy, L. F.; Moubaraki, B.; McMurtrie, J. C.; Murray, K. S.; Schilter, D.: In: *Dalton Trans.* **33** (2006), S. 3114 und 3977
- [20] Cronin, L.: In: *Angew. Chem.* **118** (2006), S. 2
- [21] Wichmann, K.; Antonioli, B.; Söhnel, T.; Wenzel, M.; Gloe, K.; Gloe, K.; Price, J. R.; Lindoy, L. F.; Blake, A. J.; Schröder, M.: In: *Coord. Chem. Rev.* **250** (2006), S. 2987
- [22] Bray, D. J.; Liao, L.; Antonioli, B.; Gloe, K.; Lindoy, L. F.; McMurtrie, J. C.; Wie, G.; Zhang, X. Y.: In: *Dalton Trans.* **12** (2005), S. 2082
- [23] Antonioli, B.: Dissertation. TU Dresden, 2007
- [24] Schalley, C. A.; Lützen, A.; Albrecht, M.: In: *Chem. Eur. J.* **10** (2004), S. 1072
- [25] Lehn, J.-M.: In: *Rep. Prog. Phys.* **67** (2004), S. 249

Manuskripteingang: 15.1.2007

Angenommen am: 30.1.2007



Gloe, Karsten

Prof. Dr. rer. nat. habil.

Studium Chemie von 1965 bis 1972 an der TU Dresden ♦ 1972 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ 1988 Habilitation zum Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 1992 Professor für Spezielle Anorganische Chemie/Koordinationschemie an der Fachrichtung Chemie und Lebensmittelchemie, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden



Heßke, Holger

Dipl.-Chem.

Studium Chemie von 1998 bis 2003 an der TU Dresden ♦ 2003 Studienabschluss als Diplomchemiker ♦ seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachrichtung Chemie und Lebensmittelchemie, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden



Lindoy, Leonard F.

Prof. Dr.

Studium Chemie von 1960 bis 1966 an der University of New South Wales/Australien ♦ 1968 Promotion zum Ph. D. ♦ 1985 D. Sc. ♦ 2005 D. Sc. h. c. an der University of Wollongong/Australien ♦ von 1987 bis 1995 Professor für Anorganische Chemie an der James Cook University Townsville/Australien ♦ seit 1996 Professor für Anorganische Chemie an der University of Sydney/Australien und Direktor des Centre for Heavy Metals Research an der University of Sydney ♦ 2006 Mercator-Gastprofessor an der Fachrichtung Chemie und Lebensmittelchemie, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden



Gloe, Kerstin

Dr. rer. nat.

Studium Chemie von 1975 bis 1980 an der Universität Leipzig ♦ 1984 Promotion zum Dr. rer. nat. ♦ seit 1994 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fachrichtung Chemie und Lebensmittelchemie, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der TU Dresden