



Die supramolekulare Chemie beschäftigt sich mit intermolekularen Wechselwirkungen. Diese sogenannten nichtkovalenten Interaktionen sind einzeln gesehen sehr schwach, können jedoch gezielt miteinander kombiniert werden, um eine Anwendung zu ermöglichen. Das Verständnis über die Nutzung dieser Wechselwirkungen bildet die Basis für das hochaktuelle und interdisziplinäre Forschungsfeld der supramolekularen Chemie.

Wo schwache Kräfte sinnvoll walten

Von der Bedeutung und gezielten Anwendung nichtkovalenter
Wechselwirkungen zwischen Molekülen

Von Michael Giese, Jens Voskuhl & Jochen Niemeyer

*Im Andenken an
Prof. Carsten Schmuck
(1968–2019)*

Moleküle und Supramoleküle

Im Zentrum der Chemie stehen die Bausteine der Materie: Atome und Moleküle. Moleküle können aus nur wenigen Atomen bestehen (das kleinste Molekül Diwasserstoff H_2 besteht aus nur zwei Atomen), aber auch Tausende von miteinander verbundenen Atomen enthalten (wie z.B. in vielen Proteinen).

Dabei ist Chemie im wahrsten Sinne des Wortes kreativ: Neue Moleküle, wie zum Beispiel ein neuer pharmazeutischer Wirkstoff, können auf dem Papier oder heutzutage mit Hilfe von Computern design und anschließend im Labor synthetisiert werden. Es ist also möglich, vollkommen unbekannte Moleküle zu kreieren, die keinerlei Vorbild in der Natur haben. Dies eröffnet Anwendungsmöglichkeiten in der Medizin beispielsweise im Kampf gegen Krankheitserreger wie Bakterien und Viren, in der Materialchemie zum Beispiel bei der Herstellung von leistungsfähigen Batterie-

rien, im Bereich der IT-Technologie beispielsweise bei der Herstellung hochauflösender Displays sowie in vielen weiteren Bereichen.

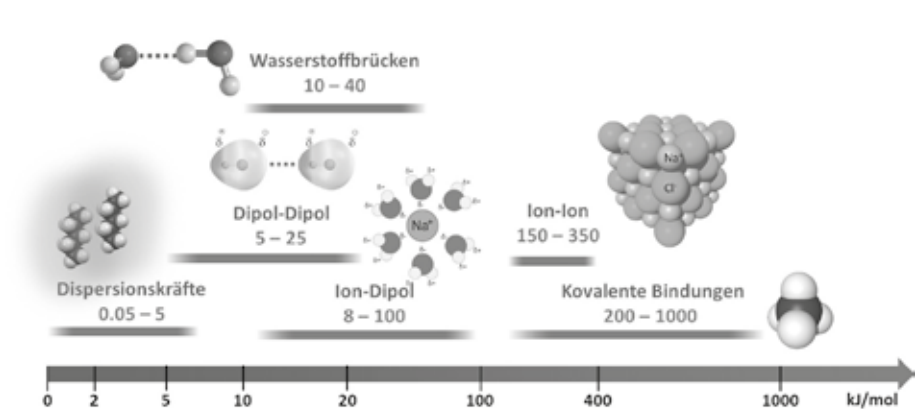
Dabei besteht die Herausforderung der synthetischen Chemie darin, einzelne Atome gezielt zu einem gewünschten Molekül zusammenzusetzen. Dabei werden Atome über chemische Bindungen, sogenannte kovalente Bindungen, miteinander verknüpft. Kovalente Bindungen sind stark (ca. 200–900 kJ/mol) und meistens nicht reversibel, das heißt kovalent verknüpfte Atome sind dauerhaft miteinander verbunden. Es entstehen also stabile

und langlebige Moleküle, was in vielen Anwendungen von großem Vorteil ist.

Wenn allerdings sehr große Moleküle hergestellt werden sollen, ergibt sich ein Problem: Der synthetische Aufwand steigt linear mit der Größe des Moleküls. Man stelle sich vor, ein Molekül aus 100 Atomen soll Atom für Atom aufgebaut werden, und jeder Syntheseschritt funktioniert mit einer Effizienz oder Ausbeute, wie die Chemiker*innen sagen, von 90 Prozent: Um ein Kilogramm dieses Materials herzustellen, müsste man 34 Tonnen an Ausgangsmaterialien verwenden, um auf die gewünschte Ausbeute zu kommen, da in jedem Schritt zehn Prozent verloren gehen.

Wie lässt sich dieses Problem also umgehen? Ein moderner Ansatz besteht in der Verwendung von sogenannten nichtkovalenten Wechselwirkungen. Dieser Begriff bezeichnet schwächere (ca. 5–150 kJ/mol) und meist reversible Wechselwirkungen zwischen Molekülen. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen nichtkovalenten Wechselwirkungen, wie zum Beispiel ionischen Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen, Ion-Dipol bzw. Dipol-Dipol Wechselwirkungen oder Dispersionskräfte (Abb. 1). Genau wie kovalente Bindungen können auch diese Effekte dazu genutzt werden, größere Systeme gezielt aufzubauen. Da nichtkovalente Effekte schwächer sind, werden sie oftmals gezielt kombiniert: Nutzt man beispielsweise vier Wasserstoffbrückenbindungen mit einer Stärke von jeweils 60 kJ/mol, so erhält man eine Bindungsenergie von insgesamt 240 kJ/mol, was bereits der Bindungsenergie einer (schwachen) kovalenten Bindung entspricht.

Das Verständnis über diese Effekte und deren gezielter Einsatz hat ein vollkommen neues Teilgebiet der chemischen Wissenschaften etabliert, die sogenannte supramolekulare Chemie. So lassen sich nichtkovalente Wechselwirkungen inzwi-



(1) Übersicht verschiedener nichtkovalenter Wechselwirkungen sowie relative Bindungsenergien (in kJ/mol).

Quelle: eigene Darstellung

schen gut in molekulare Bausteine „programmieren“. Die resultierenden supramolekularen Bausteine lagern sich dann auf vorhersagbare und definierte Art und Weise zu einem größeren System zusammen: Aus mehreren Molekülen entsteht ein Supramolekül. Kommen wir zurück zu unserem System aus 100 Atomen: Anstelle einer durchgehenden kovalenten Verknüpfung wollen wir ein analoges System nun aufbauen, indem wir nichtkovalente Wechselwirkungen nutzen: Wir stellen fünf Bausteine aus je 20 Atomen her, die sich anschließend zum einem Supramolekül aus 100 Atomen zusammenlagern. Zur Herstellung von einem Kilogramm dieses Supramoleküls benötigen wir nun lediglich 8,3 Kilogramm an Ausgangsmaterialien und nicht mehr 34 Tonnen!

Die Herstellung und Anwendung von Supramolekülen bietet neben der effizienteren Synthese noch eine Reihe weiterer Vorteile und Chancen: Die individuellen nichtkovalenten Wechselwirkungen sind schwach und daher meist reversibel. Sind die Bausteine nun richtig „programmiert“, so bildet sich nach einiger Zeit selbstständig und ohne äußeres Zutun dasjenige Supramolekül, das am besten durch die supramolekularen Wechselwirkungen stabilisiert wird. In diesem Prozess der sogenannten Selbstassemblierung können Supramoleküle von enormer Größe

entstehen, die aber dennoch über eine definierte Struktur verfügen. Wird ein Supramolekül nun ungewollt zerstört, beispielsweise durch mechanische Kräfte, so kann es sich erneut assemblieren, es entsteht also ein selbstheilendes Material. Anders gedacht, kann ein Supramolekül auch gezielt in seine molekularen Bestandteile zerlegt werden, zum Beispiel durch die Erhöhung der Temperatur, was ein einfaches Recycling des gesamten Materials ermöglicht. Darüber hinaus ist es ebenfalls möglich, ein Supramolekül gezielt in seiner Struktur zu beeinflussen, ohne es dabei vollständig zu zerstören: Wenn ein äußerer Stimulus die feine Balance der verschiedenen supramolekularen Wechselwirkungen in einem Supramolekül stört, so kann es seine Struktur dynamisch anpassen. Solche sogenannten responsiven Materialien haben zahlreiche mögliche Anwendungen, wie zum Beispiel für die gezielte Freisetzung von Wirkstoffen im Körper.

Die Supramolekulare Chemie stellt einen Forschungsschwerpunkt an der Fakultät für Chemie der Universität Duisburg-Essen dar. Zahlreiche Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit der Synthese, Charakterisierung und Anwendung von supramolekularen Systemen. Darüber hinaus wird die supramolekulare Wechselwirkung von synthetischen Molekülen mit Proteinen im Son-

derforschungsbereich 1093 „Supramolekulare Chemie an Proteinen“ erforscht.

Auch in der Forschung unserer Nachwuchsgruppen untersuchen wir unterschiedliche Facetten von supramolekularen Systemen: Angefangen von supramolekularen Flüssigkristallen (AK Giese), über biosupramolekulare Systeme (AK Voskuhl) bis hin zu verzahnten Strukturen (AK Niemeyer).

Von schwachen Wechselwirkungen zu smarten Materialien

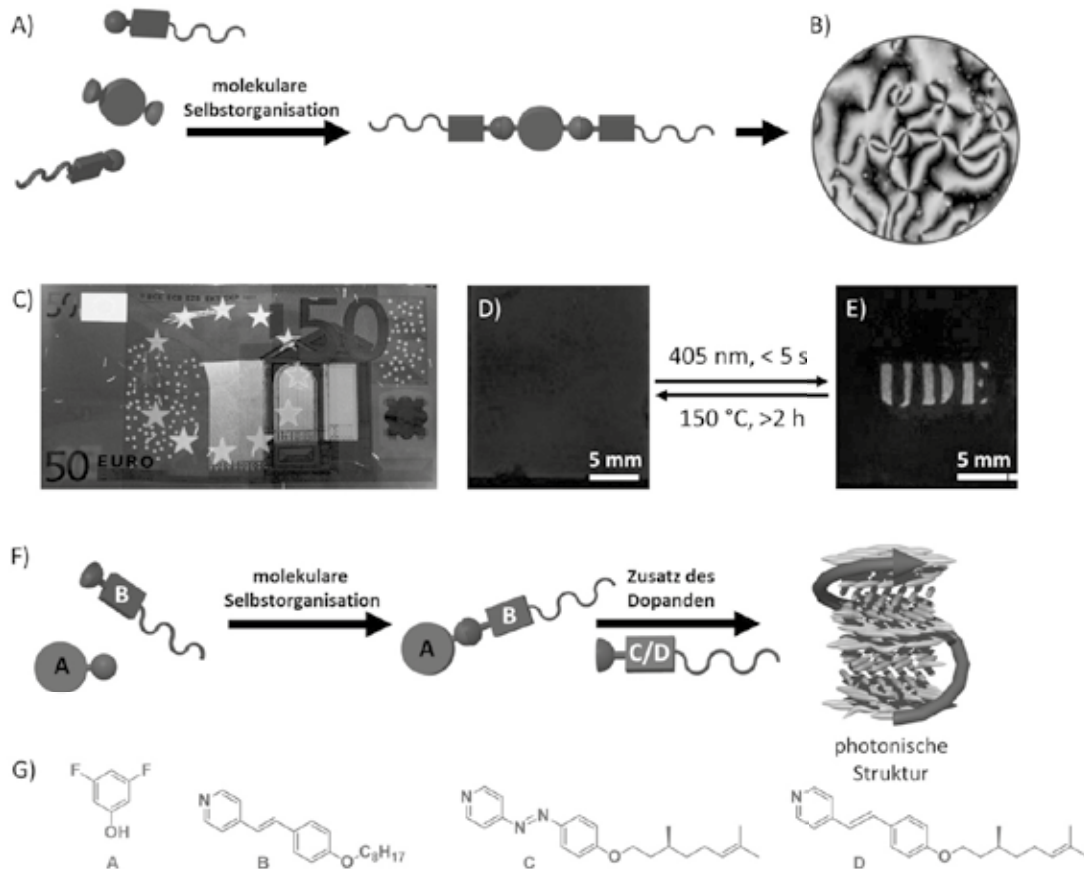
Wie bereits erwähnt können komplexe Strukturen und Materialien mit Hilfe von supramolekularen Wechselwirkungen zwischen einfachen molekularen Bausteinen aufgebaut werden. Der besondere Reiz in Hinblick auf die Entwicklung von Materialien besteht in der Dynamik der nichtkovalenten Bindungen – das heißt, sie können einfach gebrochen und wiederaufgebaut werden. Bei kovalenten Bindungen fehlt diese Dynamik in der Regel. Zum Brechen einer kovalenten Bindung muss viel Energie investiert werden und ist eine Bindung einmal gespalten, ist dieser Prozess nicht umkehrbar. Der Unterschied zwischen nichtkovalenten Wechselwirkungen und kovalenten Bindungen lässt sich anhand eines alltäglichen Beispiels verdeutlichen. Der Aggregatzustand des Wassers (und eines jeden anderen Stoffes) wird durch nichtkovalente Wechselwirkungen zwischen den Molekülen bestimmt. Möchte man diese aufbrechen, so sind im Falle des Wassers 100°C (unter Standardbedingungen) erforderlich und das Wasser geht vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über. Kühlt man den Wasserdampf wieder ab, so kondensiert dieser und wird wieder flüssig. Dieser Prozess ist also reversibel und basiert auf schwachen Wechselwirkungen zwischen den Wassermolekülen. Möchte man hingegen die kovalenten Bindungen innerhalb eines Wassermoleküls aufspalten, so sind dazu Temperaturen

von einigen Tausend Grad Celsius erforderlich und dieser Prozess lässt sich nicht durch einfaches Abkühlen umkehren.

In Hinblick auf die Materialforschung ist es erstrebenswert, Systeme zu entwickeln, die sich durch hohe mechanische Belastbarkeit auszeichnen und gleichzeitig auf Veränderungen in der Umwelt reversibel reagieren können oder selbstreparierend/selbstheilend sind (sogenannte smarte Materialien). Wer würde sich nicht ein Auto oder Fahrrad mit einem Lack wünschen, in dem die Kratzer vom Vortrag von selbst wieder verschwinden? Die Dynamik supramolekularer Wechselwirkungen stellt einen vielversprechenden Ansatz auf dem Weg zu solchen smarten, selbstheilenden Materialien dar. In der Arbeitsgruppe Giese arbeiten wir an einem supramolekularen Konzept für neue Materialien wie Flüssigkristalle, Gele oder Polymere. Dabei wird ein modulares Design verfolgt, das es uns erlaubt, Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu erzeugen (Abb. 2A).¹ Vergleichbar ist dies mit dem Prinzip der farbenfrohen Klemmbausteine aus Dänemark. Durch die Kombination einer Reihe an Grundbausteinen kann man seiner Kreativität freien Lauf lassen und Häuser, Fahrzeuge und komplexe Strukturen realisieren. Da die einzelnen Bausteine nur geklemmt werden, lassen sie sich wiederverwenden und für neue Projekte verwenden. In ähnlicher Weise kombinieren wir in unserer Forschung molekulare Bausteine, die über nichtkovalente Wechselwirkungen „zusammengeklemmt“ werden. Eine weitere Gemeinsamkeit zwischen unserem Forschungsgebiet und dem Spielzeug ist, dass neben der Kombination der Eigenschaften der Einzelkomponente (z.B. Farbe und Form der Klemmbausteine) zusätzliche Eigenschaften und Funktionen aus dem Prozess des Zusammenbaus resultieren. So hat ein Haufen an Klemmbausteinen zunächst einmal keine Funktion. Wird daraus allerdings ein

Haus oder Fahrzeug generiert, dient es als Unterkunft oder der Mobilität. In analoger Weise lassen sich neue Eigenschaften durch den Zusammenbau der molekularen Bausteine, der bereits erwähnten molekularen Selbstassemblierung, erzeugen. In unserer Forschung werden zum Beispiel durch die molekulare Selbstassemblierung Strukturen erhalten, die flüssigkristallin sind, das heißt also den Ordnungszustand eines Kristalls mit der Mobilität einer Flüssigkeit kombinieren (Abb. 2B). Flüssigkristalle besitzen ein breites Anwendungspotenzial insbesondere in Bezug auf neue Informationstechnologien und werden uns täglich bei der Betrachtung von LC-Displays (LC aus dem Englischen für Liquid Crystal, zu Deutsch Flüssigkristall) vor Augen geführt. Ein entscheidender Unterschied zwischen unserer Forschung und dem Spiel mit Klemmbausteinen ist, dass in unserem supramolekularen System die Natur die Baumeisterin ist und durch molekulare Selbstorganisation der „programmierten“ Bausteine die Materialien aufgebaut werden. Unsere Herausforderung besteht nun darin, die Komponenten so zu designen, dass sie vielseitig und flexibel verwendet werden können und gleichzeitig gezielt zu den gewünschten Strukturen führen.

In den letzten Jahren haben wir einen molekularen Baukasten zusammengestellt, der es uns ermöglicht, eine Vielzahl von supramolekularen Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen. Aufgrund der Dynamik der Verknüpfung der Bausteine über nichtkovalente Wechselwirkungen können diese Modellsysteme reversibel auf Veränderungen in der Umwelt (beispielsweise Temperaturänderungen oder Bestrahlung mit ultraviolettem Licht) reagieren und stellen somit einen essentiellen Schritt in Richtung smarterer Materialien dar. Ein weiterer Vorteil des gewählten supramolekularen Ansatzes besteht darin, dass die molekularen Bausteine mit geringem Aufwand wieder vonein-



(2) A) Modulares Konzept zur Erzeugung supramolekularer Flüssigkristalle mit maßgeschneiderten Eigenschaften und B) typische Textur eines Flüssigkristalls unter einem Polarisationsmikroskop. C) Foto eines 50-Euro-Scheins unter ultraviolettem Licht (Quelle: Von repro by H. Grobe – Eigenes Werk, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12464952>). Die Europäische Flagge sowie die Sterne fluoreszieren unter ultraviolettem Licht. D) Schalbarkeit der Materialfilme vor und nach Bestrahlung (E) betrachtet unter ultraviolettem Licht. F) Konzept zur Erzeugung photonischer Strukturen sowie molekulare Struktur der eingesetzten Bausteine (G).
Quelle: eigene Darstellung

ander getrennt werden und für die Herstellung neuer Materialien wiederverwendet werden können – ganz so wie bei den geschätzten Klemmbausteinen. Es handelt sich somit um ein nachhaltiges Konzept zur Materialentwicklung.

Basierend auf dem molekularen Baukasten haben wir vor Kurzem Materialien entwickelt, die durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ihre Eigenschaften ändern. Genauer gesagt, können wir mit Hilfe der Bestrahlung die Fluoreszenz der Materialien einschalten. Fluoreszenz ist ein photophysikalisches Phänomen, was uns von unseren Geldscheinen bei Betrachtung unter ultraviolettem Licht bekannt ist

(Abb. 2C). Betrachtet man beispielsweise einen 50-Euro-Schein unter ultraviolettem Licht, so leuchtet die Europaflagge und die Sterne des europäischen Symbols auf – das heißt, diese Bereiche fluoreszieren. Im Falle unserer Materialien können wir die Fluoreszenz steuern. Dazu haben wir dünne Materialfilme hergestellt, die zunächst keine Fluoreszenz zeigen (Abb. 2D). Durch die Verwendung einer Schablone haben wir nun gezielt bestimmte Regionen der Filme bestrahlt und damit die Fluoreszenz aktiviert. Durch betrachten der Filme unter ultraviolettem Licht wird die eingeprägte Information sichtbar – hier das Kürzel der Universität

Duisburg-Essen, UDE (Abb. 2E).² Durch längeres Erhitzen der Filme lässt sich diese Information wieder löschen und die Filme kehren in den nicht-fluoreszierenden Zustand zurück. Erneute Bestrahlung aktiviert die Fluoreszenz wieder.

Ein anderes Beispiel aus unserer Forschung ist die Erzeugung von struktureller Farbe. Dabei handelt es sich um ein in der Natur weitverbreitetes physikalisches Phänomen, das auf die gezielte Lichtbrechung an nanostrukturierten Oberflächen zurückgeführt werden kann.³ Die schillernden Farben von Vogelfedern und Insektenflügeln genauso wie die schimmernde Perlmutteroberfläche sind Beispiele für strukturelle

Farbe. Dabei wird selektiv Licht gebrochen, dessen Wellenlänge den Dimensionen der Oberflächenstruktur entspricht. Man spricht hier auch von einer photonischen Struktur (aus dem griechischen *photos* = Licht). Mit Hilfe unseres molekularen Baukastens können wir unseren Flüssigkristallen Bausteine zusetzen, die photonische Strukturen erzeugen und somit strukturelle Farbe zeigen (Abb. 2F). Dabei sind die Einzelkomponenten unseres Systems in der Regel farblos, und erst die molekulare Selbstorganisation führt zur Erzeugung der photonischen Struktur und somit zur Farbigkeit der Materialien. Da in unserem Fall die photonische Struktur auf nichtkovalenten Wechselwirkungen basiert, lässt sich die Struktur durch Störung dieser Wechselwirkungen verändern, was zu einer Farbänderung führt. Das Spannende hierbei ist, dass wir aufgrund der Modularität unseres Designkonzepts die Möglichkeit haben, die photonischen Materialien so anzupassen, dass sie auf unterschiedliche Veränderungen in der Umwelt reagieren. Verwenden wir beispielsweise das Wasserstoffbrücken-gebundene System bestehend aus A, B und C (Abb. 2G), so zeigt dieses eine ausgeprägte Thermochromie, das heißt, die Farbe verändert sich mit Änderung der Temperatur. Wird nun aber Komponente C durch D ausgetauscht, so geht die Thermochromie weitestgehend verloren und wir haben die Möglichkeit, die Anwesenheit von chemischen Stoffen anzuzeigen (man spricht von einem Chemosensor). So führt beispielsweise die Anwesenheit von Ioddampf zu einer Farbveränderung von blau hin zu grün.

Diese beiden Beispiele zeigen bereits das breite Anwendungspotential von supramolekularen Materialien und unterstreichen die Vorteile eines modularen Ansatzes. Genau wie in unserem Beispiel der farbenfrohen Klemmbausteine eröffnet ein modulares Designkonzept für supramolekulare Materialien ein nahezu unbegrenztes Spielfeld an

Möglichkeiten und lässt der Kreativität Raum für Neues.

Schwache Wechselwirkungen ermöglichen Leben

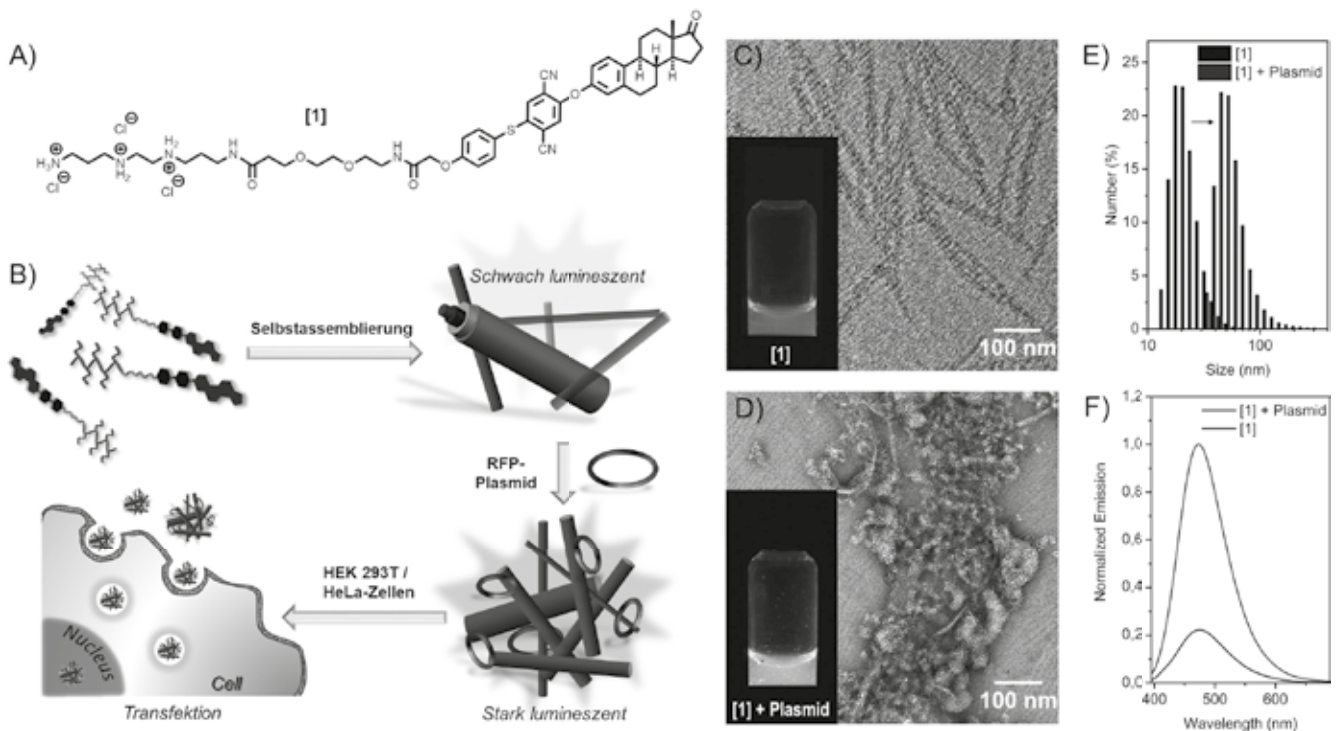
Wie bereits in der Einleitung beschrieben, ermöglichen schwache, nichtkovalente Interaktionen den Aufbau von komplexen hochfunktionellen Strukturen. Dieser elegante Ansatz ist natürlich kein nur durch die Menschheit entwickelte Idee, denn die Natur hat sich dieses Designkonzept seit Anbeginn des Lebens zu Nutze gemacht.

Wie und wo die Chemie der nichtkovalenten Interaktionen nun eine wichtige Rolle in der Natur spielt, beziehungsweise wie unsere Arbeitsgruppe den Bogen zwischen synthetischer Chemie und der Biologie schlägt, wird im nächsten Abschnitt beleuchtet. Schauen wir uns einmal eine der kleinsten Unterheiten des Lebens genauer an. Ein lebender Organismus besteht aus einer unzählbaren Anzahl einzelner Zellen, die nur wenige Mikrometer groß sind, aber ein hochkomplexes Konstrukt darstellen und eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen. Hier spielt beispielsweise der Schutz der DNA, die Replikation derselben sowie auch die Synthese von Enzymen und Proteinen eine wichtige Rolle für jeden Organismus. Natürlich braucht die Zelle auch noch Energie, diese wird durch chemische Stoffe in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle, gewonnen. Interessant in diesem Kontext ist, dass der Großteil der Prozesse innerhalb der Zelle auf nichtkovalenten Interaktionen beruht.

Schauen wir uns mal die Zellmembran an, die die Zelle mit all ihren Komponenten umschließt und beschützt. Die Membran besteht, neben weiteren komplexen Verbindungen zu einem großen Teil aus Phospholipiden. Dies sind Bausteine, die sich durch einen wasserunlöslichen Schwanz (apolar) und einer wasserlöslichen Kopfgruppe (polar) auszeichnen. In wässrigen Medien,

wie wir sie auch in unserem Körper finden, ordnen sich die Phospholipid-Bausteine dann so an, dass sich die apolaren Reste zusammenlagern und die polaren Kopfgruppen jeweils nach außen zeigen. Auf diese Art und Weise bildet sich eine Doppelschichtmembran, die wässrige Bestandteile einschließen kann, also die Bestandteile der Zelle.⁵ Einen ähnlichen Effekt machen sich beispielsweise Seifen zu Nutze, um wasserunlösliche Bestandteile, wie das Fett in der Bratpfanne an den apolaren Resten zu binden und durch die polare Kopfgruppe in die wässrige Phase, das Spülwasser, zu bringen. Die Triebkraft dieser Assemblierung sind schwache intermolekulare Kräfte wie beispielweise hydrophobe Wechselwirkungen.

Die Basis für die Entstehung von Leben ist die Vervielfältigung (Replikation) von DNA, die ebenfalls auf multiplen nichtkovalenten Interaktionen beruht. DNA besteht aus insgesamt vier sogenannten Nukleobasen – Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin –, die sich selektiv paaren können. Die Struktur der DNA – die berühmte Doppelhelix – wurde von Watson und Crick mit Hilfe von Rosalind Franklin aufgeklärt und zeigte die spezifische Basenpaarung von Adenin mit Thymin, sowie Cytosin mit Guanin. Durch diese Spezifität besitzt unser Körper die Fähigkeit, identische Kopien unserer DNA herzustellen und nahezu jede Zelle im Körper mit einer Kopie auszustatten.⁶ Diese Basenpaarung beruht ebenfalls auf nichtkovalenten Interaktionen, basierend auf Wasserstoffbrücken, die erstaunlich stabil sind, da insbesondere der Einfluss von Multivalenz – also der mehrfachen Bindung – innerhalb eines Stranges genutzt wird. Die DNA wird zunächst in RNA übersetzt, die dann im Ribosom zur Bildung von Proteinen und Enzymen führt.⁷ Proteine und Enzyme bestehen aus Aminosäuresequenzen, die sich je nach Reihenfolge und Länge häufig selbstständig falten und erst so, beispielsweise durch die Bildung



(3) A) Molekulare Struktur des Transfektionsvektors mit aggregations-induzierter Emission, B) Schematische Präsentation der Assemblierung von Monomeren bestehend aus [1], Bindung des RFP-Plasmids und Aufnahme der Lipoplexe und anschließender Transfektion. C) Transmissionselektronenmikroskopie der Verbindung [1] (Die Photographie zeigt die schwache Emission der Assemblate unter UV-Licht), D) Transmissionselektronenmikroskopie der Verbindung [1] in der Gegenwart des RFP-Plasmids (Die Photographie zeigt die gesteigerte Emission der Assemblate unter UV-Licht) E) Dynamische Lichtstreuung zeigt die Zunahme der Größe der Assemblate durch die Bildung von Lipoplexen. F) Emissionsspektren der Verbindung [1] in Abwesenheit und in der Gegenwart des RFP-Plasmids.

Quelle: S. Riebe et al., RSC Adv., 2020, 10, 19643, DOI: 10.1039/D0RA03608K – Published by The Royal Society of Chemistry.

von aktiven Reaktionszentren, ihre Funktion erhalten. Auch diese Faltung beruht wiederum auf nicht kovalenten Interaktionen wie Wasserstoffbrücken, elektrostatischen Wechselwirkungen, hydrophoben Kontakten sowie der Bildung dynamischer Bindungen wie Disulfide.⁸ Zusammenfassend kann man sagen, dass multiple nicht kovalente Interaktionen sowie deren minutiöses Zusammenspiel erst das Leben ermöglichen.

Die Frage, die sich nun stellt: Können Wissenschaftler*innen durch entsprechendes Design künstlicher Systeme, die sich selbstassemblieren können oder spezifische Orte innerhalb eines Organismus adressieren, Einfluss nehmen auf biologische Funktionen? Diese Frage lässt sich ganz klar mit einem „Ja“ beantworten. Durch das zunehmende Verständnis der komplexen Sachverhalte

innerhalb eines Organismus wie auch deren Zusammenspiel, wird die Möglichkeit der Einflussnahme von Wissenschaftler*innen auf biologische Prozesse möglich.

Eines der komplexesten Probleme in der Medizin ist wohl die Behandlung von Erkrankungen, die durch Schäden oder Varianzen im Erbgut, also der DNA, hervorgerufen werden. Diese Krankheiten betreffen zumeist den ganzen Organismus und lassen sich oft nur schwer behandeln. Dazu gehören Krankheiten wie Mukoviszidose oder Sichelzellenanämie. Bei diesen Krankheiten können häufig nur die Symptome gelindert werden, nicht aber die Ursache der Krankheit behoben werden. Grund hierfür ist, dass die fehlerhafte Erbinformation in jeder einzelnen Zelle vorhanden ist und dies lediglich durch eine Gentherapie adressiert

werden kann.⁹ Ein Problem bei der Gentherapie ist der Transport von Erbinformation, beispielsweise einzelner Sequenzen, zur Reparatur schadhafter DNA in den Zellkern. DNA kann nicht ohne Hilfe in eine Zelle eindringen. Grund hierfür ist eine elektrostatische Abstoßung zwischen der zumeist negativ geladenen Zellmembran und der negativ geladenen DNA, ähnlich wie bei zwei sich abstoßenden Magneten. Das hat die Natur so eingerichtet, damit die Zelle vor dem Eindringen von Fremd-DNA, zum Beispiel von Bakterien oder Viren geschützt ist, denn diese könnte den Zellen oder dem ganzen lebenden Organismus schaden. Wie können wir aber nun DNA-Sequenzen aktiv in eine Zelle einbringen, ohne dass die Zelle Schaden nimmt und die neuen DNA-Sequenzen in bestehende DNA eingebaut werden?

Die Entwicklung von Transportern für DNA stellt einen Arbeitszweig der Arbeitsgruppe Voskuhl dar. Hier werden sogenannte amphiphile Verbindungen genutzt. Dies sind Verbindungen, die sowohl unpolare als auch polare Gruppen besitzen, ähnlich wie zuvor für die Phospholipide in der Zellmembran beschrieben (Abb. 3A). Um den Transport, beziehungsweise den Weg dieser Verbindungen in der Zelle nachverfolgen zu können, tragen diese sogenannten Transfektionsvektoren fluoreszente Marker. Diese Marker zeigen dann eine Fluoreszenz, sobald sie sich zusammenlagern und DNA-Sequenzen binden. Dieses Phänomen bezeichnen Wissenschaftler*innen als aggregations-induzierte Emission, die auf der Einschränkung der molekularen Beweglichkeit basiert (Abb. 3B). Dieses Phänomen funktioniert exakt gegensätzlich zu Luminophoren die zumeist durch Aggregation beziehungsweise Assemblierung ihre Emissionseigenschaften verlieren.¹⁰

Die von der AG Voskuhl designten Komponenten sind in der Lage, in wässrigen Medien sogenannte stäbchenartige Mizellen auszubilden (Abb. 3C). Diese leuchten

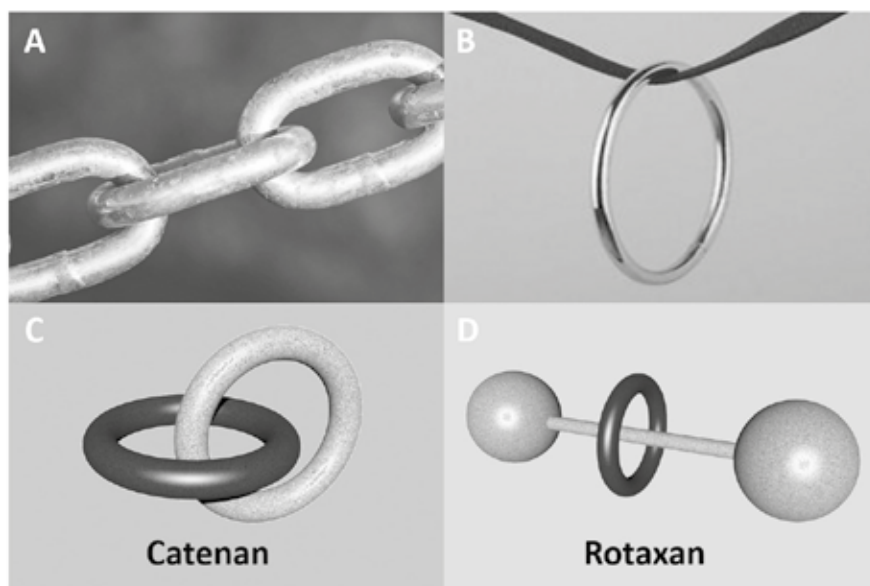
schwach durch die Einschränkung der Beweglichkeit der emissiven Untereinheit.¹¹ Die kationische Kopfgruppe ermöglicht die Bindung von negativ geladenen DNA-Sequenzen durch elektrostatische Wechselwirkungen, was zu einer Emissionszunahme führt (Abb. 3D und F). Diese Konstrukte aus kationischen amphiphilen Strukturen und DNA bezeichnet man als Lipoplexe, die durch eine Zunahme der Größe detektiert werden können (Abb. 3E). Durch eine teilweise Ladungsneutralisierung können diese Lipoplexe mittels Endozytose in eine Zelle aufgenommen werden. Um den weiteren Transport in den Zellkern zu beobachten, und, noch wichtiger, die Einbindung der Fremd-DNA in die bestehende DNA zu beobachten, wurde ein sogenanntes Plasmid (eine ringförmige DNA-Sequenz) verwendet, das in der Lage ist, nach erfolgreicher Einbindung in die bestehende DNA (Hybridisierung) ein rot-fluoreszierendes Protein (RFP) zu exprimieren. Somit hat dieses Konstrukt zwei Möglichkeiten, nachverfolgt zu werden: 1. und Verfolgung der Lipoplexe innerhalb der Zelle durch aggregations-induzierte Emission

und 2. Bildung des rot fluoreszierenden Proteins durch erfolgte DNA Hybridisierung (Basenpaarung), Transkription (Umschreiben von DNA in RNA) und abschließender Translation (Übersetzen von RNA in das rot fluoreszierende Protein).

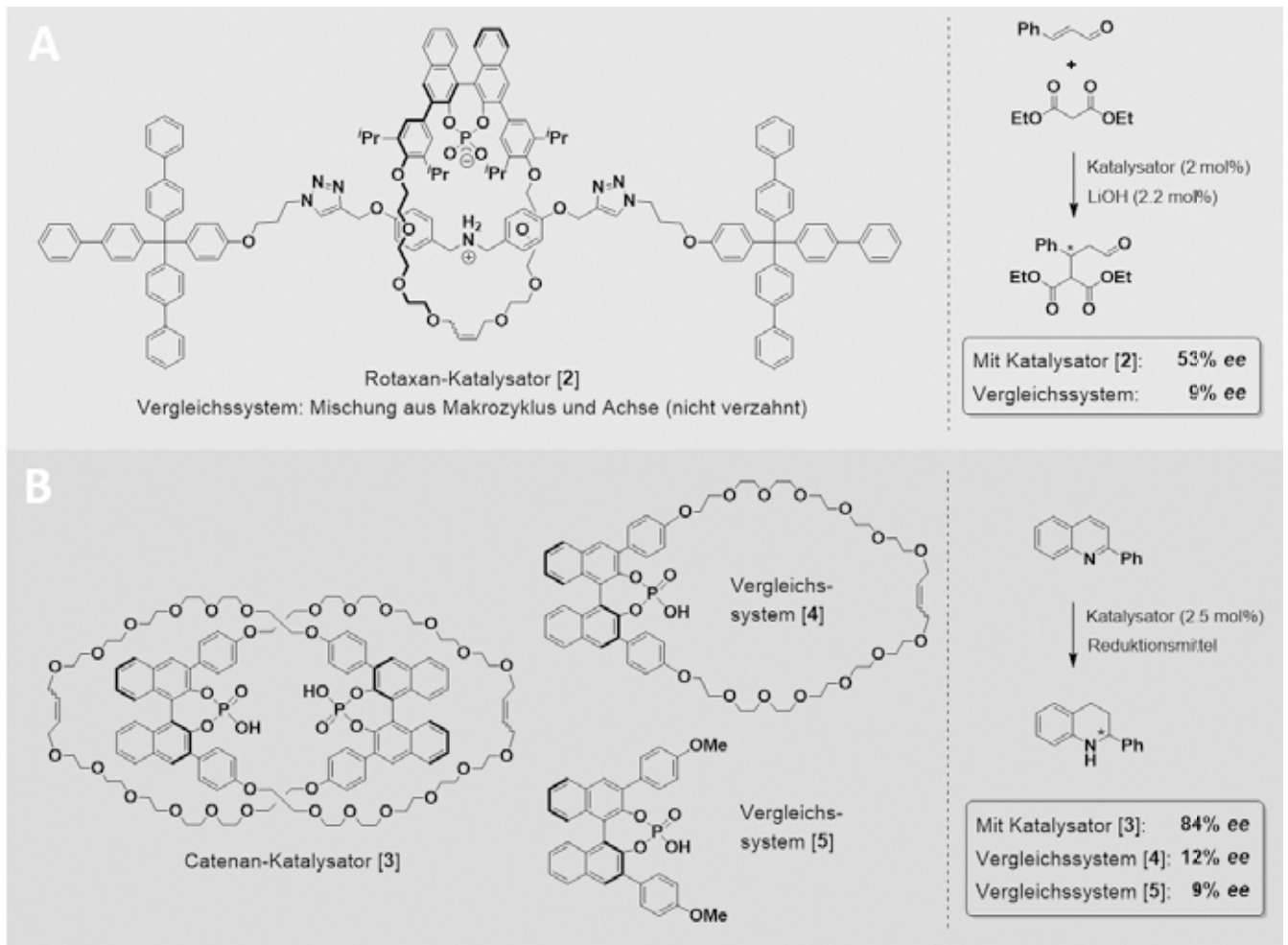
Die erfolgreiche Transfektion konnte im Experiment beobachtet werden. So war es möglich, die entsprechenden Lipoplexe durch die aggregations-induzierte Emission zu verfolgen und zusätzlich die Bildung des rot-fluoreszierenden Proteins nachzuweisen. Damit ist es der Arbeitsgruppe Voskuhl gelungen, durch eine geschickte Assemblierung, mittels multipler nicht-kovalenter Interaktionen, erfolgreich Erbinformation in eine Zelle einzuschleusen und gleichzeitig die Transfektion durch eine aggregations-induzierte Emission zu verfolgen. Dieses interessante Konzept wird sicherlich weiterhin untersucht werden und ermöglicht komplexe Sachverhalte, wie den Transport, die Aufnahme sowie die Hybridisierung und Transkription von Plasmid-DNA nachzuverfolgen und besser zu verstehen.

Verzahnte Moleküle – Von Ringen und Ketten

Neben den bereits beschriebenen supramolekularen Wechselwirkungen gibt es eine weitere Form der nichtkovalenten Bindung zwischen Molekülen: die sogenannte mechanische Bindung. Als mechanische Bindung bezeichnet man eine Bindung zwischen Molekülen, die sich durch eine Verzahnung (oder Verflechtung) im dreidimensionalen Raum ergibt. Auf makroskopischer Ebene kennen wir alle Beispiele für eine solche dreidimensionale Anordnung (Abb. 4A/B): In einer Kette sind die Kettenglieder ineinander verzahnt und damit untrennbar verbunden, obwohl die Kette aus einzelnen Komponenten besteht. Das gleiche gilt für einen Ring auf einem langen Faden: Der Ring kann den Faden



(4) Makroskopische und molekulare Objekte, die durch Verzahnung miteinander verbunden sind A) Kettenglieder, B) Ein Ring auf einem Faden, C) ein Catenan, D) ein Rotaxan. Quelle: eigene Darstellung



(5) Verzahnte Katalysatoren aus der Arbeitsgruppe Niemeyer. A) Der heterobifunktionelle Rotaxan-Katalysator [2] und dessen Einsatz in der stereoselektiven Michael-Addition, B) das homobifunktionelle Catenan [3] und dessen Einsatz in der stereoselektiven Transferhydrierung.

Quelle: eigene Darstellung

nicht verlassen, solange er nicht das Ende des Fadens erreicht (oder diese Enden z.B. durch Anknöten an einen weiteren Gegenstand blockiert sind).

Das gleiche Prinzip lässt sich auf molekularer Ebene anwenden (Abb. 4C/D): Erreicht man die Verzahnung von zwei cyclischen Molekülen (sogenannten Makrozyklen) analog den Gliedern einer Kette, so sind diese beide Moleküle untrennbar miteinander verbunden, obwohl zwischen ihnen keine kovalente Bindung besteht. Ein solches Molekül wird als Catenan bezeichnet. Auch unser Ring/Faden-Beispiel lässt sich auf molekularer Ebene umsetzen: Fädelt man einen Makrozyklus auf ein

lineares Molekül (die Chemiker*innen sprechen von einer Achse) und versieht die Enden der Achse mit großen Resten (man spricht von Stoppnern), so kann der Makrozyklus die Achse nicht mehr verlassen. Man erhält ein sogenanntes Rotaxan.

Eine Besonderheit ist die Stabilität von mechanisch verzahnten Systemen. Wie im echten Leben gilt hier: Die Kette ist so stark wie ihr schwächstes Glied, das heißt die schwächste Bindung im Gesamtsystem bestimmt die Stabilität der verzahnten Verbindungen. Sowohl die Makrozyklen als auch die Achse sind über starke kovalente Bindungen aufgebaut, so dass sich die mechanische Bindung in einem verzahnten

Molekül nicht ohne Weiteres brechen lässt. Dies stellt einen wichtigen Unterschied zu schwachen nicht-kovalenten Wechselwirkungen (wie z.B. Wasserstoffbrückenbindungen) dar, die sich sehr leicht, zum Beispiel durch eine Temperaturerhöhung, aufbrechen lassen. Trotz ihrer stabilen Verknüpfung besitzen mechanisch verzahnte Systeme eine hohe Flexibilität, was sie von kovalent verbundenen Molekülen unterscheidet: Die Makrozyklen in einem Catenan können frei rotieren und sind auch lateral gegeneinander verschieben (wenn die Ringe groß genug sind). Genauso kann der Makrozyklus in einem Rotaxan rotieren und auch eine laterale Bewegung entlang der Achse ausführen.

Insgesamt ergibt sich also eine äußerst spannende Kombination von Eigenschaften: Zwei molekulare Komponenten sind dauerhaft und stabil miteinander verknüpft und befinden sich in unmittelbarer räumlicher Nähe. Dennoch besteht eine große Flexibilität in der exakten räumlichen Anordnung der einzelnen Komponenten. Diese Eigenschaften machen Catenane und Rotaxane zu besonders spannenden Kandidaten für verschiedene Anwendungen, und es wurden auf Basis dieser Moleküle zum Beispiel molekulare Schalter und Motoren hergestellt. Die Arbeiten zur Synthese von verzahnten Molekülen und zu deren Anwendungen als molekulare Motoren wurden im Jahr 2016 mit dem Nobelpreis für Chemie an Jean-Pierre Sauvage, Fraser Stoddart und Ben Feringa gewürdigt.

In unserer Forschung nutzen wir Rotaxane und Catenane, um daraus neuartige Katalysatoren herzustellen. Als Katalysator bezeichnet man eine Spezies, die eine chemische Reaktion beschleunigt und dabei selbst nicht verbraucht wird (so beschleunigt z.B. der Katalysator im Auto die Umsetzung von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid, ohne dass er ständig erneuert werden muss). Die Erforschung neuer Katalysatoren ist von höchstem Interesse, da Katalysatoren die Effizienz einer chemischen Reaktion sowohl in Bezug auf ihre Geschwindigkeit als auch in Bezug auf ihre Selektivität entscheidend erhöhen können. Einfach gesagt: Ein Katalysator ermöglicht die Herstellung von neuen Molekülen unter milderer Bedingungen (z.B. bei niedrigerer Temperatur) und vermeidet die Bildung von ungewollten Nebenprodukten (und damit Abfall). Damit sind Katalysatoren ein wichtiges Werkzeug zur Herstellung neuer Moleküle, beispielsweise in der Pharmaforschung.

Bei der Herstellung der Katalysatoren in unsere Gruppe nutzen wir ein besonderes Konzept, die sogenannte Kooperativität. Dies besagt, dass ein Gesamtsystem mehr leisten

kann als die Summe seiner Komponenten. Und genau hier kommen die verzahnten Catenane und Rotaxane wieder ins Spiel: In ihnen sind jeweils zwei molekulare Komponenten nichtkovalent verknüpft. Versieht man nun jede dieser Komponenten mit einer funktionellen Gruppe, die wichtig für die Katalyse ist, so können diese beiden Gruppen kooperativ agieren. Die mechanische Bindung sorgt dafür, dass die beiden katalytisch aktiven Gruppen jederzeit in räumlicher Nähe sind, ohne jedoch die exakte Position der Gruppen festzulegen. Und genau dieses Konzept ist neu: Statt einer starren Anordnung von zwei funktionellen Gruppen erhält man eine flexible (oder adaptive) Anordnung. Der Katalysator kann also selbst entscheiden, welche Anordnung der funktionellen Gruppen für die Katalyse am besten geeignet ist. Man kann dieses Konzept zum Beispiel mit einer verstellbaren Rohrzange vergleichen: Anstatt den Abstand der Zangenhälften fest vorzugeben lassen wir die Zange selbst entscheiden, welcher Abstand der Beste ist. Unser verzahntes Supramolekül ist also ein selbst-einstellendes, adaptives Werkzeug!

Was bewirkt nun also die Verzahnung in der Katalyse? Ist dieses Konzept wirklich geeignet, um kooperative Systeme mit adaptiven Eigenschaften herzustellen? Dazu haben wir bislang zwei Systeme untersucht: Zunächst den Rotaxan-Katalysator [2], der über eine Phosphorsäuregruppe am Makrozyklus sowie über ein sekundäres Amin auf der Achse verfügt (Abb. 5A).¹² Es handelt sich also um zwei unterschiedliche funktionelle Gruppen (man spricht auch von einem heterobifunktionellen System), die beide für die katalytische Reaktion von Bedeutung sind. Bei der Reaktion, die durch dieses System katalysiert wird, handelt es sich um eine Additionsreaktion, es reagieren also zwei Moleküle zu einem neuen, komplexeren Molekül. Dabei lässt sich die Effizienz des Katalysators

anhand von zwei Kenngrößen beurteilen: Einerseits die Geschwindigkeit der Reaktion (gemessen am sogenannten Umsatz) und andererseits die Selektivität (in diesem Fall der sogenannte Enantiomerenüberschuss (*ee*)), mit der ein bestimmtes Produkt in der Katalysereaktion entsteht. Führt man nun die Reaktion einerseits mit unserem verzahnten Rotaxan-Katalysator und andererseits mit einem Vergleichssystem durch (das Vergleichssystem besteht in diesem Fall aus den gleichen Komponenten, also dem Makrozyklus und der Achse, die aber nicht miteinander verzahnt sind), so ergibt sich ein erstaunliches Bild: Der verzahnte Katalysator führt nicht nur zu einer stärkeren Beschleunigung der Reaktion (mit dem Rotaxan können 88 % Umsatz erhalten werden, mit dem Vergleichssystem nur 76 %), sondern vor allem zu einer deutlich verbesserten Stereoselektivität. Diese beträgt für das Rotaxan 53 % Enantiomerenüberschuss (*ee*), für das Vergleichssystem jedoch lediglich neun Prozent *ee*.

Das zweite erfolgreiche System, das wir auf Basis unseres Konzeptes entwickelt haben, ist das Catenan [3] (Abb. 5B).¹³ Hier enthält jeder Makrozyklus eine Phosphorsäuregruppe, es handelt sich also um einen homobifunktionellen Katalysator. Dieses System katalysiert eine Transferhydrierung (also die Übertragung von Wasserstoff), wobei ebenfalls der Enantiomerenüberschuss (*ee*) eine Maß für die Effizienz des Katalysators ist. In diesem Fall wurden zwei Vergleichssysteme gewählt: Die makrozyklische, aber nicht verzahnte Phosphorsäure [4] (also quasi ein isoliertes Kettenglied des Rotaxans) und die azyklische Phosphorsäure [5] (also quasi ein Teil eines Kettengliedes). Auf diese Weise kann genau untersucht werden, welchen Einfluss der Makrozyklus selbst und welchen Einfluss die Verzahnung von zwei Makrozyklen auf die Katalysereaktion hat. Auch hier zeigt sich ein erstaunliches Bild: Die Stereoselektivität für das Catenan

beträgt 84 Prozent, während die Vergleichssysteme nur zwölf beziehungsweise neun Prozent ermöglichen. Nähere Untersuchungen zeigen, dass die räumliche Nähe der Phosphorsäuren im Catenan verantwortlich für die exzellenten Stereoselektivitäten ist: Die beiden Phosphorsäuregruppen können kooperativ agieren und dabei aufgrund der Flexibilität des Gesamtsystems die dafür am besten geeignete räumliche Orientierung annehmen. Unser selbst-einstellendes Werkzeug funktioniert also tatsächlich!

Diese Beispiele zeigen, dass die nichtkovalente, mechanische Verknüpfung von Komponenten einen neuen und vielversprechenden Ansatz zur Herstellung von kooperativ agierenden Katalysatorsystemen darstellt. Die Entwicklung solcher verzahnter Katalysatoren ist ein konzeptionell vollkommen neuer Forschungsansatz, der langfristig auch Anwendungsmöglichkeiten in der Herstellung wichtiger chemischer Zwischenprodukte in der universitären Forschung, aber auch der industriellen Produktion bietet.

Zusammenfassung

Nichtkovalente Interaktionen sind einzeln gesehen sehr schwach, werden jedoch durch die Summe multipler einzelner Interaktionen erstaunlich stark. Das Verständnis über die Nutzung dieser Interaktionen bildet die Basis für das hochaktuelle und interdisziplinäre Forschungsfeld der supramolekularen Chemie. In diesem Artikel wurden die Arbeiten von drei Nachwuchsgruppen in der Organischen Chemie der Universität Duisburg-Essen zusammengefasst und vorgestellt. Die drei Gruppen fokussieren ihre Arbeiten in unterschiedlichen Bereichen der supramolekularen Chemie, angefangen von Materialwissenschaften (AG Giese), biosupramolekularer Chemie (AG Voskuhl) und mechanisch verzahnten Molekülen (AG Niemeyer). Nach einer kurzen Einleitung über nicht-kovalente

Kräfte wurde die aktuelle Forschung der Arbeitsgruppe Giese auf dem Weg zu einem modularen Design für intelligente Materialien vorgestellt. Ähnlich wie die farbigen Klemmbausteine aus Dänemark, können molekulare Bausteine zusammengebracht werden, die zu einer Vielzahl neuer Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften führen. Die Eigenschaften der so erhaltenen Materialien können durch Bestrahlung mit Licht, Änderung der Temperatur sowie durch Chemikalien beeinflusst werden. Die Forschung der AG Voskuhl basiert unter anderem auf der Nutzung von nichtkovalenten Interaktionen zwischen Molekülen für den Transport von Erbinformation sowie der Nachverfolgung durch Lichtemission – welches ein interessantes Werkzeug in der Diagnostik und Therapie sein könnte. Die AG Niemeyer generiert neuartige Katalysatorsysteme basierend auf mechanisch verzahnten Molekülen. Die mechanische Bindung unterstützt die Kooperativität der Einzelkomponenten und erhöht signifikant die Effizienz des Katalysatorsystems.

Summary

Non-covalent forces are weak when they act individually; however, in a well-orchestrated interplay of dozens, they become relevant and can yield astonishing results. The understanding and use of non-covalent forces for the creation of functional entities is the playground of supramolecular chemistry – a highly interdisciplinary and timely field of research. Herein we summarize the research efforts of the three junior research groups in the department of Organic Chemistry at the University of Duisburg-Essen. The three groups focus on different aspects of supramolecular chemistry ranging from materials science (AG Giese), to biomedical research (AG Voskuhl), to the development of functional entities connected via mechanical bonds

(AG Niemeyer). After a short introduction to the world of non-covalent forces, the recent research efforts of the Giese group towards a modular design for smart materials are presented. Like the colourful toy bricks from Denmark, a series of molecular building blocks allows the creation of a plethora of structures, which can reversibly change their orientation. The properties of the resulting materials can be switched by irradiation with light, temperature changes or the exposure to chemical compounds. The research of the Voskuhl group focuses on biomedical applications and uses a complex interplay of non-covalent forces to infiltrate biological cells with fluorescent molecules – a technique which is interesting as a diagnosis tool as well as for therapeutic applications. The Niemeyer group creates novel catalytic entities through the employment of mechanical bonds. Thereby, the mechanical bond supports the cooperativity of the sub-components and increases the efficiency of catalytic systems – a first step towards a new design for catalysts.

Anmerkungen

- 1) Pfletscher et al., 2016
- 2) Kappelt and Giese, 2020
- 3) Kinoshita, 2008
- 4) Mattia und Otto, 2015
- 5) Voskuhl und Ravoo, 2009
- 6) Watson und Crick, 1953
- 7) Lafontaine und Tollervey, 2001
- 8) Englander und Mayne, 2014
- 9) Kerr und Mulé, 1994
- 10) Riebe et al., 2017
- 11) Riebe et al., 2020
- 12) Pairault et al., 2020
- 13) Jansen et al., 2020; Mitra et al., 2017

Literatur

- Englander, S. Walter, Mayne, Leland: The nature of protein folding pathways, in Proceedings of the National Academy of Science 111/2014, 15873–15880.
- Jansen, Dennis, Gramüller, Johannes, Niemeyer, Felix, Schaller, Torsten., Letzel, Matthias C., Grimme, Stephan, Zhu, Hui, Gschwind, Ruth M., Niemeyer, Jochen: What



Jens Voskuhl. Foto: Vladimir Unkovic

is the role of acid-acid interactions in asymmetric phosphoric acid organocatalysis? A detailed mechanistic study using interlocked and non-interlocked catalysts, in *Chemical Science* 11/2020, 4381–4390.

– Kappelt, Alexander, Giese, Michael, Photo-switchable Fluorescence in Hydrogen-bonded Liquid Crystals, in *Chemistry a European Journal*, 2020, doi.org/10.1002/chem.202001696.

– Kerr, William G., Mulé, James J.: Gene therapy: current status and future prospects, in *Journal of Leukocyte Biology* 56/1994, 210–214.

– Kinoshita, Shuichi: Structural Colors in the Realm of Nature, 2008, 1–367.

– Lafontaine, Denis L.J., Tollervy, David: The function and synthesis of ribosomes, in *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 2/2001, 514–520.

– Mattia, Elio, Otto, Sijbren: Supramolecular systems chemistry, in *Nature Nanotechnology* 10/2015, 111–119.

– Mitra, Raja, Zhu, Hui, Grimme, Stephan, Niemeyer, Jochen: Functional Mechanically Interlocked Molecules: Asymmetric Organocatalysis with a Catenated Bifunctional Bronsted Acid, in *Angewandte Chemie International Edition in English* 56/2017, 11456–11459.

– Pairault, Noel, Zhu, Hui, Jansen, Dennis, Huber, Alexander, Daniliuc, Constantin G., Grimme, Stephan, Niemeyer, Jochen: Heterobifunctional Rotaxanes for Asymmetric Catalysis, in *Angewandte Chemie International Edition in English* 59/2020, 5102–5107.

– Pfltscher, Michael, Wölper, Christoph, Gutmann, Jochen S., Mezger, Markus, Giese, Michael: A modular approach towards functional supramolecular aggregates – subtle structural differences inducing liquid crystallinity, in *Chemical Communications* 52/2016, 8549–8552.

– Riebe, Steffen, Vallet, Cecilia, van der Vight, Felix, Gonzalez-Abra delo, Dario, Wölper, Christoph, Strassert, Cristian A., Jansen, Georg, Knauer, Shirley K., Voskuhl, Jens: Aromatic Thioethers as Novel Luminophores with Aggregation-Induced Fluorescence and Phosphorescence, in *Chemistry a European Journal* 23/2017, 13660–13668.

– Riebe, Steffen, Zimmermann, Alexander, Koch, Johannes, Vallet, Cecilia, Knauer, Shirley K., Sowa, Andrea, Wölper, Christoph, Voskuhl, Jens: Lipofection with estrone-based luminophores featuring aggregation-induced emission properties, in *RSC Advances* 10/2020, 19643–19647.

– Voskuhl, Jens, Ravoo, Bart J.: Molecular recognition of bilayer vesicles, in *Chemical Society Reviews* 38/2009, 495–505.

– Watson, James D., Crick, Francis H. C.: Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, in *Nature* 171/1953, 737–38.

Die Autoren

Michael Giese studierte Chemie an der RWTH Aachen, wo er im Jahr 2011 in der Arbeitsgruppe von Prof. Markus Albrecht zum Thema „Relevanz und Nutzen von Anion- π Wechselwirkungen“ promovierte. Danach führte ihn ein Forschungsstipendium des Deutschen Akademischen Auslandsdiensts (DAAD) nach Vancouver, Kanada. Hier entdeckte er seine Begeisterung für supramolekulare Materialien in der Arbeitsgruppe von Prof. Mark MacLachlan. 2014 startete er seine unabhängige wissenschaftliche Karriere als Stiftungs juniorprofessor der Professor Werdelmann Stiftung an der Universität Duisburg-Essen. Mit seiner Arbeitsgruppe entwickelt er neue supramolekulare Materialien. Seit Oktober 2019 vertritt er den Lehrstuhl für Organische Chemie II an der Fakultät für Chemie der Universität Duisburg-Essen. Privat teilt er mit seinen beiden Kindern die Leidenschaft für die farbenfrohen Klemmbausteine aus Dänemark.

Jens Voskuhl studierte Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (2002–2007). Ab 2008 provierte er in der Arbeitsgruppe von Prof. Ravoo zum Thema „Molekulare Erkennung von Cyclodextrinen und Cyclodextrinvesikeln“. Im Anschluss absolvierte er insgesamt drei Postdoktorate in unterschiedlichen Gruppen: Prof. Alexander Kros (2011–2013, Leiden, NL) – Artifizelle SNARE Proteine, Prof. Pascal Jonkheijm (2013–2015, Twente, NL) – Biosupramolekulare Chemie auf Oberflächen und Prof. Bart Jan Ravoo (2015, Münster, D) – Neuartige lichtresponsive Materialien. Seit 2015 arbeitet er als Juniorprofessor an der Universität Duisburg-Essen. Seine Arbeit beschäftigt sich mit der Synthese, Charakterisierung und Anwendung neuartiger Luminophore mit aggregations-induzierter Emission sowie der Entwicklung neuer Konzepte für die photodynamische Therapie.

Jochen Niemeyer studierte Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (2000–2005). In seiner Promotion, die er von 2005 bis 2009 unter Anleitung von Prof. Gerhard Erker anfertigte, beschäftigte er sich mit der Herstellung metallorganischer Liganden für die Katalyse. Im Anschluss (2010–2011) absolvierte er ein Postdoktorat an der Universität Oxford (UK) und erforschte in der Arbeitsgruppe von Prof. Simon Aldridge die Chemie niedervalenter Bor-Verbindungen. Nach einer Tätigkeit als Laborleiter bei der Evonik Industries AG in Marl (2011–2014) gründete er im Jahr 2014 seine eigene Forschungsgruppe an der Universität Duisburg-Essen und habilitierte sich im Jahr 2020. In seiner Forschung beschäftigt sich Jochen Niemeyer mit organischer und supramolekularer Chemie, mit einem Fokus in der Entwicklung von Chemosensoren und verzahnten Molekülen für die Katalyse.



Jochen Niemeyer. Foto: Vladimír Unkovič