

# MOFs: Metall-organische Gerüstverbindungen – die neuen Tausendsassas der Anorganiker

Roland A. Fischer\*



Roland A. Fischer  
Professor für Anorganische Chemie, Ruhr-Universität Bochum

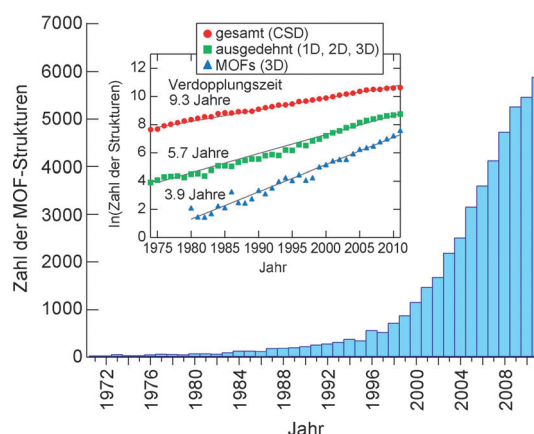
Was sagt Ihnen der Begriff Metall-organisches Gerüst (englisch: Metal–Organic Framework, kurz „MOF“)? Haben Sie, ganz spontan, ein Bild davon im Kopf? Ich jedenfalls, das muss ich zugeben, hatte kein richtiges und wohl eher einen blinden Fleck in meiner Wahrnehmung, bis mir beim Blättern in der *Angewandten Chemie* von 2004 auf Seite 2388 der Übersichtsartikel „Funktionelle poröse Koordinationspolymere“ von Susumu Kitagawa et al. auffiel und die Augen öffnete. Die Rede ist von Festkörpern, die hinsichtlich der Struktur Zeolithen ähneln und alle bekannten Materialien an Porosität um Größenordnungen übertreffen. Zugleich bieten MOFs faszinierende Möglichkeiten der molekularen Funktionalisierung der enormen inneren Oberflächen und Räume. Mögliche Anwendungen umfassen daher nicht nur die Speicherung von Wasserstoff und Methan oder die Katalyse, sondern auch Biomedizin, Sensorik, Mikroelektronik und mehr. MOFs entstehen bei der Verknüpfung anorganischer und organischer Baueinheiten zu Koordinationsverbindungen mit Netzwerkstrukturen. Die Kunst der planvollen Synthese von Netzwerkverbindungen (reticular structures) ist inzwischen sehr hoch entwickelt. Allein in der letzten Dekade wurden mehr als 20000 MOFs beschrieben, wie einer Graphik in einer Arbeit von O. M. Yaghi et al. (*Science*, **2013**, 341, 974) zu entnehmen ist (Ab-

bildung 1), und es gibt kaum eine Ausgabe der *Angewandten Chemie*, in der nicht auch etwas Neues über MOFs zu finden wäre. Seit 2008 finden internationale MOF-Konferenzen regelmäßig statt: so in diesem Jahr in Kobe (28. September bis 1. Oktober). Rund 3.6 Millionen Treffer liefert der Begriff „Metal–Organic Framework“ bei einer Google-Suche, „Zeolite“ bringt es „nur“ auf 1.5 Millionen, und der eingangs erwähnte Aufsatz von S. Kitagawa et al. ist seit diesem Jahr übrigens der meistzitierte Artikel, der bislang in der *Angewandten Chemie* veröffentlicht wurde.

Soweit zur Relevanz des inzwischen etablierten Begriffs. Jedoch, was ist von seinem fachsprachlichen Wert zu halten? Wie sähe eine präzise Definition aus, die sich sinnvoll in den Gesamtkontext der Koordinationschemie einfügt? Die IUPAC-Arbeitsgruppe „Coordination Polymers and Metal–Organic Frameworks: Terminology and Nomen-

clature Guidelines“ dokumentierte und analysierte ab 2009 den (englischen) Sprachgebrauch und legte unlängst ihren Abschlussbericht vor (*Pure Appl. Chem.* **2013**, 85, 1715–1724), dessen Übersetzung in Kürze in der *Angewandten Chemie* erscheinen wird (siehe DOI: 10.1002/ange.201400619). Die Autoren empfehlen eine hierarchische Terminologie, ausgehend vom Koordinationspolymer als Oberbegriff. Dabei sind Koordinationsverbindungen mit Netzwerkstrukturen eine Untergruppe der Koordinationspolymere und Metall-organische Gerüstverbindungen wiederum eine Untergruppe der Koordinationsverbindungen mit Netzwerkstrukturen. Von der Bezeichnung organisch-anorganische Hybridverbindungen wird abgeraten.

Die vorgeschlagene Definition lautet: „Eine Metall-organische Gerüstverbin-



**Abbildung 1.** Metall-organische Gerüststrukturen (1D, 2D und 3D), die in der Cambridge Structural Database 1971–2011 hinterlegt wurden. Das größte Wachstum gab es bisher bei den 3D-MOFs mit einer Verdoppelung der dokumentierten Strukturen alle vier Jahre.

[\*] Prof. Dr. R. A. Fischer  
Lehrstuhl für Anorganische Chemie II  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150  
44780 Bochum (Deutschland)  
E-Mail: roland.fischer@rub.de

**„... ist eine Koordinationsverbindung mit organischen Liganden und potenziellen Hohlräumen.“** Was ist potenzielle Porosität? Die Strukturen zahlreicher dieser Koordinationsverbindungen sind dynamisch und ändern sich und damit gegebenenfalls auch die Hohlräume unter dem Einfluss von äußeren Stimuli und/oder infolge der Einlagerung oder der Abgabe von Gastmolekülen. Da diese Responsivität zu den besonders reizvollen und wohl einzigartigen Eigenschaften dieser Materialien zählt, wird starre kristalline Ordnung und permanente (unveränderliche) Porosität nicht als notwendiges Kriterium für eine MOF angesehen.

Ist mit dieser Anregung zum Nachlesen des Originaltextes oder seiner Übersetzung (siehe auch *CrystEngComm* **2012**, *14*, 3001–3004) und dem Verweis auf die Autorität der IUPAC-Arbeitsgruppe das Wesentliche zum Thema gesagt? Im strengen Sinne ließe sich dies wohl bejahen, denn selbstverständliche Bestandteile von Wissenschaft sind Entdeckung und Begriffsprägung, Ausdifferenzierung, Verwendungspraxis, kritisch-diskursive Reflexion und Einordnung des Neuen in den Bestand des Alten und Bekannten, welche in Präzisierungen, (mehr oder weniger vorläufige) Definitionen und Abgrenzungen der Begriffe münden. Bemerkenswerterweise hebt die IUPAC-Arbeitsgruppe jedoch hervor, ihr sei bewusst, dass es unter den Fachleuten zwei sich gegenseitig ausschließende Ansichten gebe: „MOF“ sei nur für Carboxylatverbindungen begrifflich sinnvoll gültig ist die eine, die neue Bezeichnung sei überflüssig und sollte überhaupt nicht verwendet werden die andere. Diese Diskussion hätte vor etwa zehn Jahren glaubwürdig geführt werden können und hätte dann vielleicht die uneinheitliche Verwendung in vielen tausenden wissenschaftlichen Artikeln verhindert.

Die hier angedeutete Spannung nehme ich zum Anlass für einen abschließenden Kommentar: Der Begriff Metal–Organic Framework tauchte vereinzelt schon in den frühen 1990er Jahren auf. Seine Prägung und Etablierung als MOF ist allerdings sehr eng mit Omar M. Yaghi und Michael O’Keeffe verbunden, und spätestens mit der 1999 in *Nature* (Band 402, S. 276) erschienenen Arbeit über MOF-5,  $[\text{Zn}_4\text{O}(\text{bdc})_3]$  (bdc = 1,4-Benzoldicarboxylat), mit dem Titel „Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal–organic framework“ wurden die faszinierenden Perspektiven des Konzepts und dessen ernsthafte Realisierungsmöglichkeit klar. MOF beansprucht(e) also Originalität und Vision. Weil der Familienname für die neuen Stoffe fachsprachlich unscharf ist, kann er auch jenseits der chemischen Fach- oder Fremdsprache Vorstellung, konzeptionelles Interesse und Neugier wecken, wobei sich „Metall“, „organisch“ und „Gerüst“ sicherlich besser eignen als „Koordination“, „Polymer“ und „Netzwerk“. Sprache und ihr Gebrauch sind kreativ, und die Sprachverwirrung seit dem Turmbau zu Babel, (um)gedeutet als Geschenk, meint vielleicht nicht zuletzt inspirierende Vielfalt und Ringen um das Verstehen, ist Auftrag für das produktive Überwinden von Missverständnissen.

Heute sind die Forschungskontexte, in denen die Arbeiten über MOFs platziert sind oder werden, enorm vielgestaltig und vielsprachig, und ebenso breit gefächert entwickeln sich die fachlichen Hinter- und Beweggründe aller Beteiligten, manchmal auch mit sehr weit hergeholtem Bezug zum Original. Daher sind Unterscheidungen und Sorgfalt im wissenschaftlichen Sprachgebrauch und Ausdruck wichtig. Welche MOFs können miteinander sinnvoll in Beziehung gesetzt werden? Welche konzeptionellen Aspekte der Forschung an und mit einer MOF-Sorte sind auf andere MOFs und/oder (poröse) Koordinationsverbindungen und -polymere übertragbar? Welche Bedeutung haben Konstitution und Topologie, spezifische Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und Funktionen von MOFs als Abgrenzungskriterium? Antworten auf solche Fragen sind relevant. Sie können jedoch nur unzureichend aus Nomenklaturregeln abgeleitet werden und folgen auch nicht aus einer präzisen Übersetzung von akzeptierten Fachbegriffen und Definitionen aus dem Englischen ins Deutsche oder in eine andere Sprache. Vielmehr sind sie in jedem Einzelfall eine Angelegenheit überzeugender Argumentation: Die Bedeutung einer Arbeit über ein Koordinationspolymer wird kaum größer dadurch, dass das Material möglicherweise zutreffend als MOF deklariert ist oder, die Urheber-schaft hervorhebend, als XYZ-123 bezeichnet oder mit einem Präfix oder neuen Akronym ausgestattet wird. Reduziert sich der Inhalt des Begriffs MOF zu stark auf konstitutionelle und Strukturmerkmale, ob enger oder weiter gefasst, verliert er wesentliche Aspekte seines ursprünglichen Kontextes. Zu diesem gehört die Idee, hochporöse Koordinationsverbindungen als attraktives, herausforderndes Synthesziel im Übergangsfeld der Molekül- und Festkörperchemie zu begreifen, in Netzwerktopologien zu denken und im Blick auf interessante supramolekulare chemische und physikalische Funktionen entsprechend robuste kristalline Materialien kontrolliert und präzise aufzubauen, zu modifizieren, zu charakterisieren und zu verstehen. Insofern bleibt für mich die Frage, mit welchem Anspruch im konkreten Fall von einer Metall-organischen Gerüstverbindung gesprochen wird, grundsätzlich spannend.

tionellen Aspekte der Forschung an und mit einer MOF-Sorte sind auf andere MOFs und/oder (poröse) Koordinationsverbindungen und -polymere übertragbar? Welche Bedeutung haben Konstitution und Topologie, spezifische Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und Funktionen von MOFs als Abgrenzungskriterium? Antworten auf solche Fragen sind relevant. Sie können jedoch nur unzureichend aus Nomenklaturregeln abgeleitet werden und folgen auch nicht aus einer präzisen Übersetzung von akzeptierten Fachbegriffen und Definitionen aus dem Englischen ins Deutsche oder in eine andere Sprache. Vielmehr sind sie in jedem Einzelfall eine Angelegenheit überzeugender Argumentation: Die Bedeutung einer Arbeit über ein Koordinationspolymer wird kaum größer dadurch, dass das Material möglicherweise zutreffend als MOF deklariert ist oder, die Urheber-schaft hervorhebend, als XYZ-123 bezeichnet oder mit einem Präfix oder neuen Akronym ausgestattet wird. Reduziert sich der Inhalt des Begriffs MOF zu stark auf konstitutionelle und Strukturmerkmale, ob enger oder weiter gefasst, verliert er wesentliche Aspekte seines ursprünglichen Kontextes. Zu diesem gehört die Idee, hochporöse Koordinationsverbindungen als attraktives, herausforderndes Synthesziel im Übergangsfeld der Molekül- und Festkörperchemie zu begreifen, in Netzwerktopologien zu denken und im Blick auf interessante supramolekulare chemische und physikalische Funktionen entsprechend robuste kristalline Materialien kontrolliert und präzise aufzubauen, zu modifizieren, zu charakterisieren und zu verstehen. Insofern bleibt für mich die Frage, mit welchem Anspruch im konkreten Fall von einer Metall-organischen Gerüstverbindung gesprochen wird, grundsätzlich spannend.