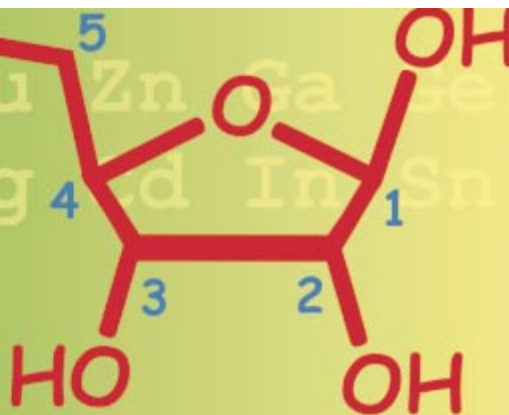


Kohlenhydrate und Metalle: Grundlagenforschung für Medizin und Technik



Kohlenhydrate haben wie kaum eine andere Naturstoffklasse aktuelles Forschungsinteresse auf sich gezogen – und das aus völlig unterschiedlichen Motiven. In der Glycobiologie geht es um die Wechselwirkung komplexer Kohlenhydrat-Strukturbausteine („Glycokonjugate“) mit Proteinen, zum Beispiel bei Immunreaktionen. Für die Chemie ergibt sich daraus die Aufgabe, derartig komplexe Kohlenhydratstrukturen herzustellen – als Werkzeuge für die biochemische Forschung, aber auch als Therapeutika. Ist eine Synthese im Gramm-Maßstab hier schon ein Erfolg, so denkt man in einem anderen Teilgebiet der Kohlenhydratforschung in Tonnen: Kohlenhydrate wie Cellulose, Stärke, Rohrzucker oder Traubenzucker sind nachwachsende Rohstoffe, welche die Natur uns in beliebigen Mengen rein und kostengünstig zur Verfügung stellt. Im Sinne einer ressourcenschonenden Chemie, zu der sich die Industriestaaten im Rahmen einer „nachhaltigen Entwicklung“ bekannt haben, könnten Kohlenhydrate als mengenmäßig bedeutendste biogene Rohstoffe als Basis dienen. Jede Synthese mit Kohlenhydraten aber – ob im Gramm- oder Tonnenmaßstab – wird durch die enorme Vielfalt möglicher Reaktionen dieser polyfunktionellen Moleküle erschwert. Der Ausweg heißt Katalyse, dies bedeutet in der Regel Metallkatalyse. Wie aber binden Zucker an Metallatome? Gibt es definierte Kohlenhydrat-Metall-Verbindungen? Lassen sich für diese neuen Stoffe eigene Anwendungen erschließen? – Hier ist Grundlagenforschung gefragt.

Kohlenhydrate sind variabel oder:
Was genau ist Traubenzucker?

Kohlenhydrate bilden die mengenmäßig bedeutendste Stoffgruppe unter den nachwachsenden Rohstoffen. Unter ihnen findet sich mit Cellulose die von der belebten Natur in der größten Menge synthetisierte Einzelsubstanz – allein Holz besteht etwa zur Hälfte aus Cellulose. Auch Nahrungsbestandteile wie die der Cellulose eng verwandte Stärke aus Getreide und Kartoffeln oder Rohrzucker sind Kohlenhydrate. Gerade Rohrzucker (Saccharose) ist dabei ein Beispiel für eine Substanz, die – in großer Menge produziert – sowohl in hoher Reinheit als auch kostengünstig zur Verfügung steht.

Saccharosemoleküle sind aus zwei Untereinheiten zusammengesetzt – Rohrzucker ist ein Disaccharid. Die beiden Bausteine des Disaccharids sind die Monosaccharide D-Glucose („Traubenzucker“) und D-Fructose („Fruchtzucker“). Die Probleme, die bei einer Nutzung von Kohlenhydraten als Chemierohstoffe zu beherrschen sind, sollen am Beispiel der D-Glucose dargestellt werden (Kasten 1). Kurz zusammengefaßt: Hinter dem Namen eines Monosaccharids – neben D-Glucose und D-Fructose sind D-Mannose, D-Galactose und D-Ribose weitere bekannte Vertreter – steht kein eindeutiger Aufbau der Moleküle. Schon wenn D-Glucose lediglich in Wasser aufgelöst wird, lassen sich zwei Hauptbestandteile nachweisen, nämlich

α - und β -D-Glucopyranose. In kleinen Mengen kommen weitere Formen vor, die alle miteinander in einem dynamischen Gleichgewicht stehen. Dies bedeutet, dass eine chemische Reaktion, die bevorzugt an einer Minderkomponente abläuft, trotzdem zu einem Produkt führen kann, das sich hauptsächlich von dieser Form ableitet. Der Grund ist, dass während der Reaktion ständig die gerade verbrauchte Molekülform nachgeliefert wird, weil sich in der Lösung die nicht beteiligten Formen in die reaktive Form umwandeln, um deren Menge konstant zu halten. Welche Form mit einem zugesetzten Reagenz reagieren wird, ist dabei oft unklar. Damit nicht genug: Jede einzelne Molekülform enthält eine Ansammlung sehr ähnlicher reaktiver

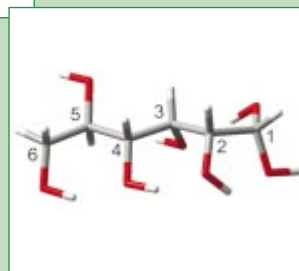
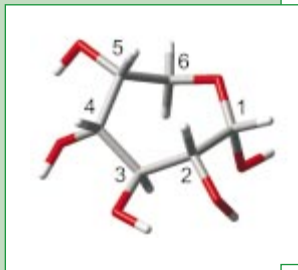
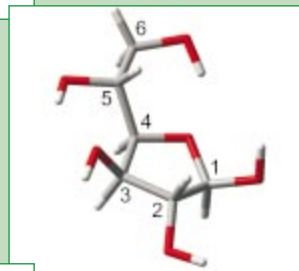
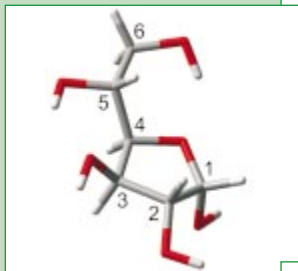
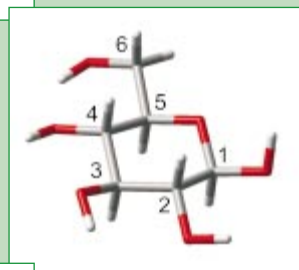
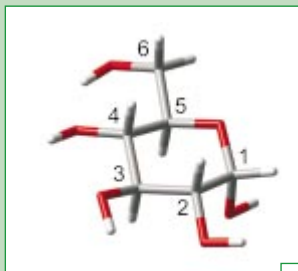
tiver Positionen („funktionelle Gruppen“), die bei der Herstellung eines definierten Produkts gezielt angesprochen werden müssen. Das Problem wird durch den Ausdruck „Überfunktionalisierung“ umrissen.

Deren Folge sind teilweise aufwändige Reaktionssequenzen, bei denen zuerst der nicht anzugreifende Molekülteil inaktiviert wird, dann die gewünschte Reaktion ausgeführt wird, und schließlich die

Inaktivierung wieder aufgehoben wird. Das Stichwort zu dieser Strategie heißt „Schutzgruppentechnik“. Wie die Schwierigkeiten eleganter zu beherrschen sind, wird der Chemie durch die Natur vorge-

Traubenzucker

Alle hier abgebildeten Moleküle sind D-Glucose (Traubenzucker). Sie sind verschiedene „Isomere“, in denen die meisten Atome dieselbe Verknüpfung mit ihren Nachbarn haben. Man betrachte als Beispiel das mit „2“ gekennzeichnete Kohlenstoffatom (Kohlenstoffatome liegen an den Punkten, von denen vier Bindungen ausgehen und wo eine Zahl steht) und vergleiche in allen Formeln die Art und Anordnung der nächsten Nachbarn – man sieht immer dieselbe Umgebung. Rote Zentren, von denen zwei Bindungen ausgehen, sind übrigens Sauerstoffatome, die weißen Enden aller Stäbe sind Wasserstoffatome; beim Abzählen ergibt sich die Formel $C_6H_{12}O_6$ – außer beim Bild unten rechts, bei dem das Ergebnis $C_6H_{14}O_7$ ist. Die Formeln folgen dem Schema $C_6H_{12}O_6 = C_6(H_2O)_n$, im Beispiel mit $n = 6$, woraus im 19. Jahrhundert – irreführend – der Name „Kohlenhydrat“ = Verbindung von Kohlenstoff (C) mit Wasser (H_2O) abgeleitet wurde. Die hier gezeigte Strukturvielfalt beruht auf einer Stelle mit besonderer Reaktivität, nämlich der Umgebung des Kohlenstoffatoms mit der Nummer 1 – dem „anomeren“ C-Atom. Dieses ist als einziges in allen hier gezeigten Formeln an zwei Sauerstoffatome gebunden. Dasjenige der beiden Sauerstoffatome, an das noch ein Wasserstoffatom gebunden ist, weist in den Raum, das zweite macht den Unterschied. Je nachdem ob es mit dem Kohlenstoffatom 5 (oberes und zweites Bild), 4 (drittes und viertes Bild) oder 6 (fünftes Bild) verknüpft ist, entstehen die verschiedenen Isomere: Oben die beiden D-Glucopyranosen (links α -, rechts β -D-Glucopyranose), die in einer Traubenzuckerlösung die beiden Hauptisomere sind, darunter α - (links) und β -D-Glucofuranose (rechts), die sich in chemischen Reaktionen anreichern können. Unten zwei Formen, die in einer wässrigen Lösung kaum nachzuweisen sind: links α -D-Glucosepantose, rechts die offenkettige Form (hier nicht als Aldehyd, sondern als Aldehyd-Hydrat gezeigt, weshalb dieses kein Isomer im engeren Sinn ist – dann müsste die Formel dieselbe sein, sie ist aber um ein Wassermolekül reicher). Ob ein α - oder β -Isomer vorliegt, hängt davon ab, wohin die OH-Gruppe an C1 zeigt: Schaut man so auf den Ring aus fünf, sechs oder sieben Atomen, dass die Zahlen im Uhrzeigersinn laufen, so liegt beim α -Isomer die C1-OH-Gruppe nach unten; das andere Isomer ist dann die β -Form. Reagiert eine dieser Formen bei einer bestimmten chemischen Reaktion schneller als eine andere – entweder als naturgegebene Eigenheit oder weil die Reaktion dieser Form katalysiert ist –, so reichert sich in der Reaktionslösung das Reaktionsprodukt an, das sich von dieser Form ableitet – es entsteht ein „Derivat“ dieser Form. ■



macht. Der Auf- und Abbau von Kohlenhydraten stellt einen wesentlichen Teil des Stoffwechsels eines jeden Lebewesens dar. Die Fülle möglicher Reaktionen ist dabei bis auf die eine beabsichtigte eingeschränkt, indem dieser ein besonders energie günstiger Weg eröffnet wird – es findet Katalyse statt. Natürliche Katalysatoren sind die Enzyme. Gelingt deren Isolierung, so können diese auch außerhalb der Organismen katalytisch wirken. Für die Synthese komplexer Glycokongulate ist die – meist kostspielige – enzymatische Synthese akzeptabel, da die Produkte nur in kleinen Mengen benötigt werden. In besonderen Fällen, wenn zum Beispiel keine teuren Reaktionspartner („Co-faktoren“) benötigt werden, werden Enzyme auch in der technischen Synthese von Massenprodukten eingesetzt. Ein Beispiel aus der Kohlenhydratchemie ist die D-Fructose-Herstellung aus D-Glucose mit Hilfe des Enzyms Xylose-Isomerase. Dieses Enzym zeigt besonders deutlich, dass Katalyse in Natur und Technik von der Grundidee her oft sehr ähnlich abläuft. Technische Katalysatoren sind meist Metalle oder Metallverbindungen. In der Xylose-Isomerase sind es ebenfalls Metallatome, und zwar zwei Manganatome, die im aktiven Zentrum des Enzyms die Glucose-Umwandlung steuern. Warum also noch Schutzgruppentechnik, warum nicht auch in der Kohlenhydratchemie nach dem Vorbild der Natur die bewährte Metallkatalyse? ■

Nachhaltige Chemie als Teil einer nachhaltigen Entwicklung („Sustainable Development“)

Bevor auf diese Frage eingegangen wird, soll das Grundkonzept einer verstärkten Kohlenhydratnutzung angesprochen werden. Die Industrienationen sehen sich der Idee einer „nachhaltigen Entwicklung“ („Sustainable Development“) verpflichtet, bei welcher der gesamte Kreislauf eines Produktes vom

Rohstoff bis zur Entsorgung im Einklang mit einer dauerhaften Umweltverträglichkeit und Ressourcenschonung ist. Für ein Produkt der Chemischen Industrie lässt sich Ressourcenschonung besonders konsequent betreiben, indem nachwachsende Rohstoffe

Metallbindungsstellen der Kohlenhydrate

Um Metallkatalyse rational planen zu können, sollte bekannt sein, wie ein Molekül eines Ausgangsstoffes (eines „Edukts“) an die betreffenden Metallzentren bindet, welche Reaktionen dort ablaufen, wie das

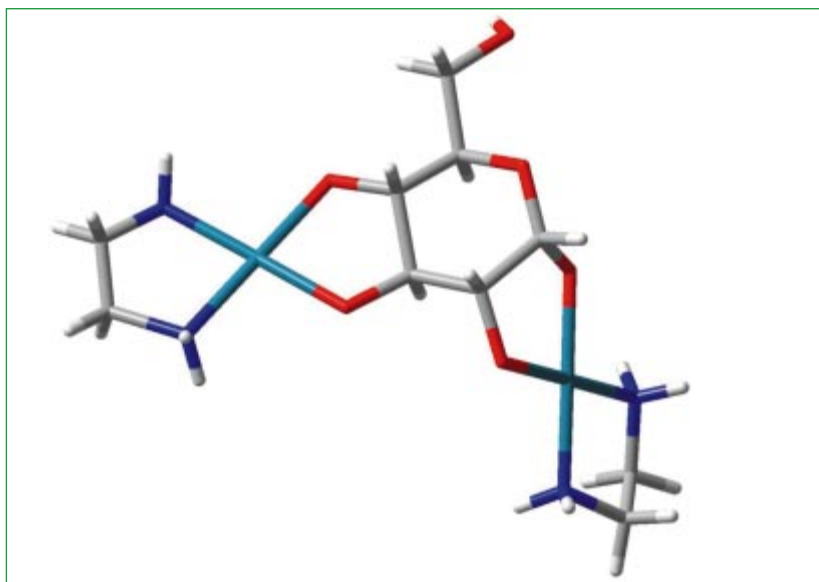


Abb. 1: Ein Glucose-Palladium-Komplex. Die abgebildete Verbindung entsteht bei der Reaktion von D-Glucose mit $[(en)Pd(OH)_2]$, einem Palladiumkomplex, in dem an einem Palladiumatom ein Ethylendiamin-Ligand (en) mit seinen beiden Stickstoffatomen (blau) sowie zwei OH-Gruppen gebunden sind. Die OH-Gruppen verbinden sich mit Wasserstoffatomen des Zuckers zu Wasser, zurück bleibt die zweifach metallierte Glucose. Es handelt sich um die a-Glucopyranose-Form – man vergleiche mit Kasten 1. Die Palladiumatome liegen am Ausgangspunkt der türkisfarbenen Bindungen. ■

eingesetzt werden, die dann unter möglichst geringem Einsatz an Hilfschemikalien und Energie zu den gewünschten Produkten umgesetzt werden. Die Oxidation eines Zuckers mit Luftsauerstoff unter Katalyse mit kleinen Mengen eines ökologisch unbedenklichen Metalls zu einer Waschmittelkomponente entspräche diesem Ziel. Verursacht die Herstellung desselben Produkts auf einem anderen Reaktionsweg zum Beispiel pro Tonne Waschmittel zwei Tonnen Salze als Nebenprodukte, so wäre das Ziel einer nachhaltigen Chemie trotz des Einsatzes eines nachwachsenden Rohstoffs jedoch verfehlt. Mehr als 90 % aller Grundstoffe der organischen Chemie werden in metallkatalysierten Reaktionen hergestellt – warum gibt es bei den Kohlenhydraten hier ein Problem für die Reaktionsplanung? ■

Produkt nach der Reaktion bindet und wie es vom Metall abgelöst werden kann. (Viele technische Katalysatoren wurden ohne solche Kenntnisse oder gar mit falschen Modellvorstellungen in langen Versuchsreihen entwickelt. Je komplexer aber ein Eduktmolekül ist, um so geringer ist die Wahrscheinlichkeit, durch blosses Optimieren zum Ziel zu gelangen.) Bereits die erste dieser Fragen ist in der Regel nicht zu beantworten. Dies schließt Enzyme ein. Bei der Xylose-Isomerase ist zwar bekannt, dass im aktiven Zentrum zwei Manganatome zusammenspielen, über den Ablauf der Reaktion kann jedoch nur spekuliert werden. Bei technisch interessierenden Metallzentren ist der Kenntnisstand ähnlich. Wie ein bewährtes Katalysmetall wie Palladium zum Beispiel an D-Glucose bindet, wurde gerade erst

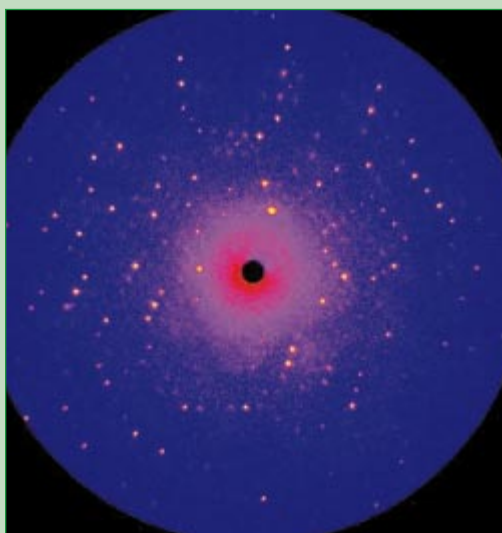
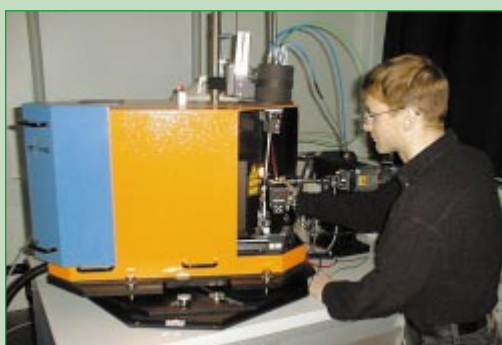
publiziert. *Abbildung 1* informiert über den Aufbau eines Glucose-Palladium-Komplexes, der der erste strukturell charakterisierte Übergangsmetallkomplex der Glucose überhaupt ist und damit das große Informationsdefizit auf diesem Gebiet besonders beleuchtet. Warum hat es so lange gedauert, bis die Grundlagenforschung begonnen hat, den potentiellen Anwendern solche Basisdaten zur Verfügung zu stellen? Hier ist vor allem die beeindruckende methodische Entwicklung der letzten Jahre zu nennen. Dass sehr leistungsfähige

Werkzeuge zur Strukturaufklärung für diese Fragestellung notwendig sind, ergibt sich aus dem bisher Beschriebenen fast zwangsläufig. Denn alle Eigenschaften, die die Reaktionen an Kohlenhydraten unübersichtlich machen, treffen natürlich auch für die Bindung an Metalle zu. Die Bindung an das als Katalysator gedachte Metallatom ist zuerst auch einmal eine chemische Reaktion, die durch die Polyfunktionalität der Zucker schwer überschaubar ist. Unter den heute verfügbaren Methoden sind zwei Werk-

zeuge hervorzuheben, die es seit etlichen Jahren „im Prinzip“ schon gibt, die sich aber erst in der jüngsten Vergangenheit so weiterentwickelt haben, dass sich das Feld der Metallverbindungen der Kohlenhydrate erschließt. Es handelt sich um die Strukturanalyse an Einkristallen (*Kasten 2*) und die NMR-Spektroskopie. Um die Regeln der Metallbindung an Kohlenhydrate aufzustellen, ist dabei die Vernetzung der Methoden wichtig. Erfolgreich war es, zuerst durch Einkristallstrukturanalyse zu zeigen, wie einzelne isolierbare

Einkristallstrukturanalyse

Die Strukturanalyse an Einkristallen gehört zu den schlagkräftigsten Methoden der Strukturaufklärung. Sie bildet das Rückgrat des Faches Strukturbiologie, das sich mit der Strukturaufklärung großer Biomoleküle befasst. In der Chemie dient die Kristallstrukturanalyse meist zur Strukturaufklärung kleinerer Kristallbausteine, die dafür mit höherer Präzision (höherer „Auflösung“) charakterisiert werden können. Voraussetzung ist ein Einkristall von einigen Zehntel Millimetern Kantenlänge (oberes Bild). An einem „Diffraktometer“ – im mittleren Bild Dr. H. Piotrowski an einem Stoe-IPDS – wird der meist auf ca. $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ gekühlte Kristall mit Röntgenlicht durchstrahlt. Da die Wellenlänge der Strahlung und die periodischen Abstände der mit der Strahlung wechselwirkenden Elektronenwolken der Atome in der gleichen Größenordnung liegen, kommt es zum Phänomen der „Beugung“. Im unteren Bild ist ein Beugungsmuster dargestellt, das ein Kristall – je nach Größe – nach ca. 1–5 min Belichtungsdauer ergibt. Die Lage der Beugungspunkte enthält die Information, in welchem Abstand sich gleiche Kristallbausteine im Raum wiederholen, in der Intensität der Beugungsflecken ist die wichtige Information über die Struktur der einzelnen Moleküle enthalten, die den Kristall aufbauen. Der schwarze Fleck in der Mitte ist der Schatten eines kleinen Bleizylinders, mit dem die nicht gebeugte Hauptintensität des Röntgenstrahls abgefangen wird. ■



Zielverbindungen im festen Zustand aufgebaut sind, um anschließend durch NMR-Spektroskopie Gleichgewichte in Lösung zu untersuchen. Es zeichnet sich ab, dass künftig auch die Computerverchemie zu den Standardmethoden gehören wird. Aus der Dichtefunktionaltheorie abgeleitete Rechenmethoden erlauben es zunehmend, auch mit kostengünstigen Rechnern Moleküle wie den Palladiumkomplex aus *Abbildung 1* ohne Vorabinformation aus Experimenten in vernünftiger Zeit am Bildschirm entstehen zu

Kohlenhydrat-Rhenium-Komplexe im tumor targeting

Komplexe des seltenen Metalls Rhenium haben in den vergangenen Jahren Interesse in der Nuklearmedizin geweckt. Dort werden radioaktive Verbindungen eingesetzt, um Tumore zu diagnostizieren und zu therapieren. Rhenium bietet hierzu die Isotope ^{186}Re und ^{188}Re . Die Haupt- und Nebenwirkungen können entscheidend optimiert werden, wenn das radioaktive Element gezielt in einem Tumor angereichert werden

sollte Information vorhanden sein, in welcher Form Rhenium welche Verbindung aufbaut – wieder aber war in der Literatur kein einziges Beispiel für eine solche Verbindung zu finden. Durch die Kombination der beschriebenen Methoden gelang die Synthese eines ersten Rhenium-Kohlenhydrat-Komplexes (*Abbildung 2*). Besonders günstig für solche Entwicklungsarbeiten ist bei Rhenium, dass auch nichtradioaktive („kalte“) Isotope zur Verfügung stehen, so dass die Suche nach neuen Verbindungen nicht durch den Aufwand beim Strahlenschutz erschwert werden. Von diesem ersten Ergebnis aus kann nun in Zusammenarbeit mit Nuklearmedizinern weiter geforscht werden. ■

Siliciumtransport in Organismen und Biomineralisation von Kieselsäure

Silicium scheint für den Aufbau tierischen und pflanzlichen Gewebes notwendig zu sein. Die molekularen Grundlagen für diese aus Fütterungs- und Düngeversuchen abgeleitete Erfahrung sind unbekannt. Besonders augenfällig ist die Bedeutung des Siliciums bei hochverkießelten Organismen wie den Kieselalgen, aber auch bei Gräsern oder Schachtelhalmen. Während es vage Vorstellungen gibt, wie herantransportiertes Silicium in das Biomineral umgewandelt wird, gibt es keine Erkenntnisse über die Silicium-Transportform. Trotz der bekannten Vorliebe von Siliciumatomen für Sauerstoffatome als Bindungspartner wurde lange ausgeschlossen, dass Kohlenhydrate mit Silicium Verbindungen bilden können, die sich in Wasser nicht sofort zum freien Kohlenhydrat und Kieselsäure zersetzen würden. In Ermangelung anderer Reaktionspartner wird daher die Kieselsäure selbst als Transportform angesehen – obwohl deren Angebot in einem silicathaltigen Boden sehr gering ist. Die Parallele aus der Medizin hierzu ist die schlechte Bioverfüg-

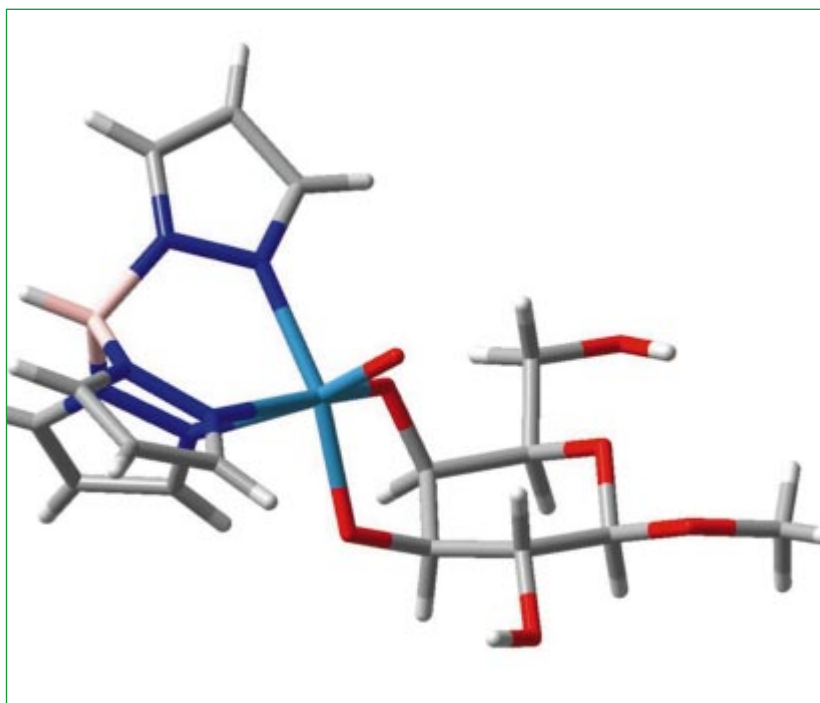


Abb. 2: Die erste strukturell aufgeklärte Rhenium-Kohlenhydrat-Verbindung. Das Rhenium-Zentralmetallatom liegt am Ausgangspunkt der türkisfarbenen Bindungen. Der Kohlenhydrat-Ligand ist β -Methyl-D-galactopyranosid. Man vergleiche mit β -D-Glucopyranose in Kasten 1. Das Sauerstoffatom an der Position 4 ist nun nach oben gerichtet, wodurch aus Glucose Galactose wird. Die Position 1 trägt außerdem nicht mehr eine OH-Gruppe, sondern das H-Atom ist durch eine CH_3 -Gruppe ersetzt, es liegt ein Glycosid vor – daher: Methyl...id. Durch diese Modifikation kann sich das Kohlenhydrat nicht mehr ohne weiteres in eine andere Form umwandeln. Das Rheniumatom trägt weitere Liganden: nach rechts oben weist ein Sauerstoffatom, nach links ein Tris-pyrazolyl-hydridoborat-Ligand (blau: Stickstoff, rosa: Bor) ■

lassen, um im nächsten Schritt dann dessen Reaktionen zu modellieren.

Der wohldefinierte Aufbau des Palladiumkomplexes wirft die Frage auf, ob über die Katalysatorentwicklung hinaus eine eigenständige Bedeutung von Kohlenhydrat-Metall-Komplexen gibt. Hierzu zwei Beispiele. ■

kann. Hierzu bietet sich die Koppelung an solche Biomoleküle an, die ihrerseits beim Tumorwachstum angereichert werden. Viele hier interessierende, komplexe Biomoleküle weisen Kohlenhydratabschnitte auf, dies trifft zum Beispiel auf Glycoproteine und Glycopeptide zu. Um Rheniumatome selektiv an den Kohlenhydratteil zu binden,

barkeit von Silicium in Kieselsäurepräparaten, die zu enorm hohen Dosierungsempfehlungen führt. Die Ansicht aber, Kohlenhydrate

ciumatoms oder stabilisierend als Teil von „Wasserstoffbrückenbindungen“, die sich zwischen OH-Gruppen und siliciumbindenden

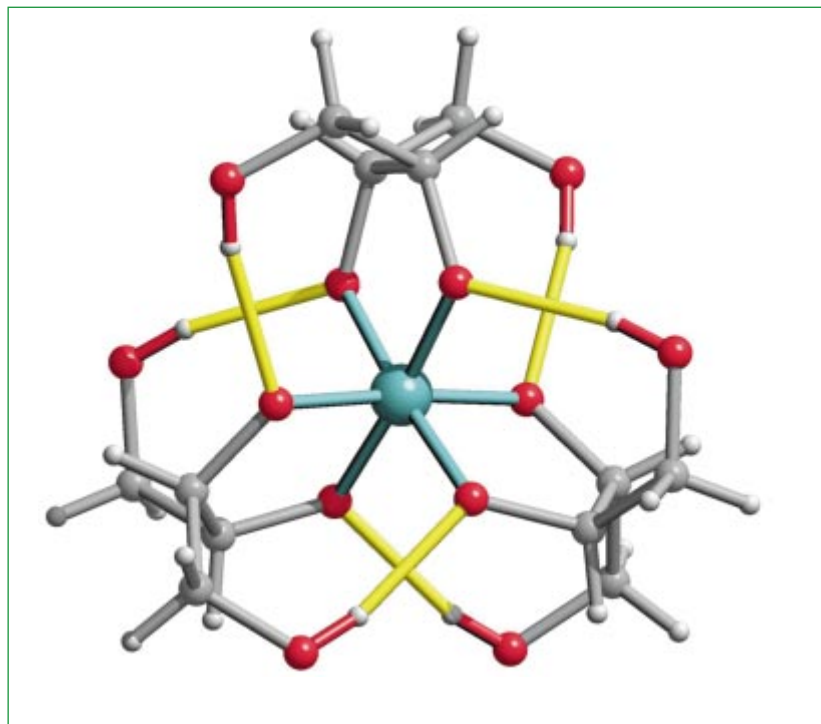


Abb. 3: Wässrige Lösungen von Cäsiumhydroxid und D-Threit lösen Siliciumdioxid auf. Aus solchen Lösungen kann das Cäsiumsalz des komplexen Silicats kristallisiert werden, das im Bild dargestellt ist. Die Atome sind hier als Kugeln hervorgehoben, die Farben sind die gleichen wie in den Stabmodellen der übrigen Abbildungen. Sechs Wasserstoffbrückenbindungen sind gelb eingezeichnet ■

könnten Silicium nicht in wasserbeständigen („hydrolysestabilen“) Formen binden, ist falsch. Reduzierte Formen von Monosacchariden, die Zuckeralkohole, sind durchaus in der Lage, solche Verbindungen aufzubauen. *Abbildung 3* zeigt einen Komplex aus einem Siliciumatom und drei D-Threit-Molekülen. D-Threit ist die reduzierte Form des seltenen, nur vier Kohlenstoffatome enthaltenden Zuckers D-Threose. Die Polyfunktionalität der Kohlenhydrate zeigt sich hier nicht als Störung, sondern als Voraussetzung für die unerwartete Stabilisierung des für Silicium ungewöhnlichen Bindungszustandes (in den geläufigen Silicaten sind die Siliciumatome von nur vier Sauerstoffatomen umgeben): Alle funktionellen Gruppen sind in den Aufbau des komplexen Silicats eingebunden – sei es als unmittelbare Bindungspartner des zentralen Sili-

O-Atomen ausbilden. Die gezeigte Verbindung ist hydrolysestabil, die Lösungen aber müssen eine unphysiologische Menge an Lauge enthalten. Die enorme Zahl verschiedener Kohlenhydrate lässt aber die Hoffnung zu, in weiteren Arbeiten Bindungspartner für Silicium zu finden, die dieses Element auch in neutral-wässriger Lösung binden – als Siliciumpräparat mit hoher Bioverfügbarkeit, oder als Lösungsform auf dem Weg zu technisch nutzbaren SiO_2 -Formen nach dem Vorbild der Biominerale. ■

Literatur

Die hier beschriebenen eigenen Arbeiten wurden ausgeführt von Dr. T. Kunte (Palladiumkomplexe), M. Oßberger (Rhenium) und M. Vogt (Silicium). Die Ergebnisse einschließlich weiterer Literaturhinweise sind ausführlicher publiziert in:

- P. Klüfers, T. Kunte:
Polyol-Metall-Komplexe,
37. – Ein Übergangsmetallkomplex von D-Glucose.
Angewandte Chemie **2001**,
113, 4356–4358;
Angewandte Chemie, International Edition in English. **2001**, 40,
4210–4212.
- P. Klüfers, O. Krotz,
M. Oßberger:
Polyol Metal Complexes.
40. – Oxo-rhenium(v) Complexes
of Carbohydrate Ligands.
European Journal of Inorganic Chemistry
2002, 6, 1919–1923.
- K. Benner, P. Klüfers,
M. Vogt:
Polyol-Metall-Komplexe,
41. – Wasserstoffverbrückte
Zuckeralkohol-Trimere als
sechszählige Chelatliganden
für Silicium in wässriger
Lösung.
Angewandte Chemie **2003**, 115,
1088–1093 ■

Autor:



Prof. Dr.
P. Klüfers

Department Chemie der
Ludwig-Maximilians-Universität,
Lehrbereich Anorganische Chemie

Butenandtstraße 4-13
81377 München
Fax: +49 (0) 89 - 21 80 - 74 07
E-mail: kluef@cup.uni-muenchen.de