

titrationen wurden bei  $298 \pm 0.05$  K mit einem Philips PW 9527-Leitfähigkeits-Meßgerät in einer Philips PW 9550/60-Meßzelle durchgeführt.<sup>[9]</sup>

Eingegangen am 5. August 1996 [Z 9424]  
Auf Wunsch der Autoren erst jetzt veröffentlicht

**Stichworte:** Alkalimetalle · Festkörperstrukturen · Kronenether · NMR-Spektroskopie

- [1] C. J. Pedersen, *J. Am. Chem. Soc.* **1967**, *89*, 2495–2496, 7017–7036.
- [2] R. M. Izatt, *Chem. Rev.* **1991**, *91*, 1721–2085, insbesondere 1858–1867.
- [3] B. G. Cox, H. Schweiger, *Coordination and Transport Properties of Macrocyclic Compounds in Solution*, Elsevier, Amsterdam, **1992**, S. 298–301, zit. Lit.
- [4] A. Merz, A. Karl, T. Futterer, N. Stacherdinger, O. Schneider, J. Lex, E. Luboch, F. Biernat, *Liebigs Ann. Chem.* **1994**, 1199–1209.
- [5] Wegen einer Fehlordnung im Kristall bezüglich einer um  $180^\circ$  gedrehten Lage der Moleküle **1a** ist die anisotrope Verfeinerung der Struktur bislang nicht möglich. Die Strukturformel im Formelschema gibt die Form von **1a** richtig wieder. Dr. Johann Lex, unveröffentlicht.
- [6] Röntgenstrukturanalysen: Die Messung der Reflexintensitäten erfolgte auf einem Enraf-Nonius CAD4-Diffraktometer (Raumtemperatur,  $M_{K\alpha}$ -Strahlung,  $\lambda = 0.71069$  Å). Die Strukturen wurden mit direkten Methoden gelöst und mit  $F^2$  für alle unabhängigen Reflexe verfeinert (Schweratome mit anisotropen, H-Atome mit isotropen Temperaturfaktoren);  $wR2 = [\sum w(F_o^2 - F_c^2)^2]/[\sum w(F_o^2)]^{1/2}$ . Benutzte Programme: zur Strukturbestimmung: MolEN (Enraf-Nonius) und zur Verfeinerung SHELXL-93 (G. M. Sheldrick, Universität Göttingen). Gerechnet wurde auf Computern des Regionalen Rechenzentrums der Universität zu Köln. Kristallstrukturdaten von **1**:  $C_{22}H_{26}O_5$ ,  $M = 370.43$ , Kristalle aus Methanol, Schmp. 64–65 °C; Kristallabmessungen  $0.45 \times 0.25 \times 0.22$  mm; monoklin, Raumgruppe  $P2_1/n$ ,  $a = 8.786(2)$ ,  $b = 13.332(3)$ ,  $c = 16.713(4)$  Å,  $\beta = 92.24(2)^\circ$ ;  $V = 1956.2$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{ber.} = 1.258$  g cm $^{-3}$ ;  $F(000) = 792$ ;  $\mu_{Mo} = 0.88$  cm $^{-1}$ ;  $\theta_{max} = 27^\circ$ ; 4777 gemessene, 4138 unabhängige, 2830 beobachtete Reflexe ( $F_o^2 > 2\sigma F_c^2$ );  $R1 = 0.049$ ,  $wR2 = 0.104$ , GOF ( $F^2$ ) = 1.08 für 350 Parameter, Restelektronendichte 0.154 und  $-0.161$  e Å $^{-3}$ . – Kristallstrukturdaten von **2**:  $C_{22}H_{26}O_5 \cdot LiClO_4 \cdot C_4H_8O$ ;  $M = 548.92$ , Kristalle aus Tetrahydrofuran, Schmp. 194–195 °C; Kristallabmessungen  $0.35 \times 0.28 \times 0.25$  mm; orthorhomatisch, Raumgruppe  $Cmc2_1$ ,  $a = 15.170(3)$ ,  $b = 9.319(2)$ ,  $c = 19.124(4)$  Å;  $V = 2703.5$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{ber.} = 1.349$  g cm $^{-3}$ ;  $F(000) = 1160$ ;  $\mu_{Mo} = 1.96$  cm $^{-1}$ ;  $\theta_{max} = 27^\circ$ ; 2961 gemessene, 1576 unabhängige, 1299 beobachtete Reflexe ( $F_o^2 > 2\sigma F_c^2$ );  $R1 = 0.052$ ,  $wR2 = 0.134$ , GOF ( $F^2$ ) = 1.09 für 241 Parameter, Restelektronendichte 0.402 und  $-0.309$  e Å $^{-3}$ . – Kristallstrukturdaten von **3**:  $C_{22}H_{26}O_5 \cdot NaClO_4 \cdot CH_3COCH_3$ ;  $M = 550.95$ , Kristalle aus Aceton/Wasser (1/1), Schmp. 182–185 °C; Kristallabmessungen  $0.32 \times 0.22 \times 0.20$  mm; orthorhomatisch, Raumgruppe  $Cmc2_1$ ,  $a = 14.676(4)$ ,  $b = 9.567(2)$ ,  $c = 19.608(6)$  Å;  $V = 2753.1$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{ber.} = 1.329$  g cm $^{-3}$ ;  $F(000) = 1160$ ;  $\mu_{Mo} = 2.07$  cm $^{-1}$ ;  $\theta_{max} = 28^\circ$ ; 2195 gemessene, 1589 unabhängige, 1291 beobachtete Reflexe ( $F_o^2 > 2\sigma F_c^2$ );  $R1 = 0.057$ ,  $wR2 = 0.158$ , GOF ( $F^2$ ) = 1.13 für 236 Parameter, Restelektronendichte 0.450 und  $-0.280$  e Å $^{-3}$ . (Die Wasserstoffatome im  $CH_3COCH_3$  sind fühlgeordnet). – Kristallstrukturdaten von **4**:  $C_{22}H_{26}O_5 \cdot KCIO_4 \cdot CH_3COCH_3$ ;  $M = 567.06$ , Kristalle aus Aceton/Wasser (1/10), Schmp. 168–170 °C; Kristallabmessungen  $0.25 \times 0.22 \times 0.20$  mm; orthorhomatisch, Raumgruppe  $Cmc2_1$ ,  $a = 14.472(3)$ ,  $b = 9.648(2)$ ,  $c = 20.173(4)$  Å;  $V = 2816.7$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{ber.} = 1.337$  g cm $^{-3}$ ;  $F(000) = 1192$ ;  $\mu_{Mo} = 3.35$  cm $^{-1}$ ;  $\theta_{max} = 27^\circ$ ; 1751 gemessene, 1639 unabhängige, 1395 beobachtete Reflexe ( $F_o^2 > 2\sigma F_c^2$ );  $R1 = 0.039$ ,  $wR2 = 0.118$ , GOF ( $F^2$ ) = 0.834 für 258 Parameter, Restelektronendichte 0.200 und  $-0.323$  e Å $^{-3}$ . – Kristallstrukturdaten von **5**:  $C_{22}H_{26}O_5 \cdot RbClO_4 \cdot CH_3COCH_3$ ;  $M = 613.43$ , Kristalle aus Aceton/Wasser (1/1), Schmp. 80–90 °C; Kristallabmessungen  $0.25 \times 0.22 \times 0.20$  mm; orthorhomatisch, Raumgruppe  $Cmc2_1$ ,  $a = 14.490(3)$ ,  $b = 9.622(2)$ ,  $c = 20.412(4)$  Å;  $V = 2845.9$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{ber.} = 1.432$  g cm $^{-3}$ ;  $F(000) = 1264$ ;  $\mu_{Mo} = 18.85$  cm $^{-1}$ ;  $\theta_{max} = 27^\circ$ ; 1645 gemessene, 1631 unabhängige, 1298 beobachtete Reflexe ( $F_o^2 > 2\sigma F_c^2$ );  $R1 = 0.039$ ,  $wR2 = 0.095$ , GOF ( $F^2$ ) = 1.11 für 350 Parameter, Restelektronendichte 0.341 und  $-0.303$  e Å $^{-3}$ . Die kristallographischen Daten (ohne Struktur faktoren) der in dieser Veröffentlichung beschriebenen Strukturen wurden als „supplementary publication no. CCDC-179-153 beim Cambridge Crystallographic Data Centre hinterlegt. Kopien der Daten können kostenlos bei folgender Adresse angefordert werden: The Director, CCDC, 12 Union Road, GB-Cambridge, CB2 1 EZ (Telefax: Int. +1223/336033; E-mail: deposit@chemcrys.cam.ac.uk).
- [7] Siehe z.B. im Kristall: P. R. Mallinson, M. R. Truter, *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2* **1972**, 1818–1823; in Lösung: D. Live, S. I. Chan, *J. Am. Chem. Soc.* **1976**, *98*, 3769–3778.
- [8] Es behält auch in Komplexen mit primären organischen Ammoniumsalzen die gleiche Konformation bei; das *cis*-Epoxid von **1** bildet analoge Komplexe: A. Merz, T. Futterer, J. Lex – unveröffentlicht.
- [9] Zur Methode siehe: Y. Takeda in *Cation Binding by Macrocycles* (Hrsg.: Y. Inoue, G. W. Gokel), Marcel Dekker, New York, **1990**, 133–178. Die experimentellen Einzelheiten werden gesondert publiziert. H. Inerowicz et al., Technische Universität Gdansk.

- [10] Daten für  $\lg K_{ass}$  für den Na-Komplex von Dibenzo[18]kronen-6 zum Vergleich mit anderen Lösungsmitteln: 6.70 (CH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub>), [13] 5.20 (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), [2] 4.37 (CH<sub>3</sub>OH), [2] vgl. auch Lit. [13].
- [11] C. Reichardt, *Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry*, VCH, Weinheim, 1988.
- [12] W. Rosen, D. Busch, *Inorg. Chem.* **1970**, *9*, 262–265; H.-J. Drexler, H. Reinke, H.-J. Holdt, *Chem. Ber.* **1996**, *129*, 807–814.
- [13] M. K. Amini, M. Shamsipur, *Inorg. Chem. Acta* **1991**, *183*, 65–69.
- [14] M. Shamsipur, A. I. Popov, *J. Chem. Phys.* **1988**, *92*, 147–151.

## Ein azentrisches, dreidimensionales Koordinationspolymer: Synthese und Struktur von $[Cu(pyrimidin)_2]BF_4$ \*\*

Steven W. Keller\*

Das Kristall-Engineering,<sup>[11]</sup> ein aufstrebendes Gebiet, hat das intelligente Design ausgedehnter Festkörper durch die Verknüpfung molekularer Bausteine mit spezifischer Funktionalität und Geometrie zum Ziel. Moleküle, die beim Lösen in organischen oder wässrigen Lösungsmitteln bei Raumtemperatur intakt bleiben, könnten in vorhersagbarer Weise aggregieren und so eine Vielzahl metastabiler Strukturen bilden, die in der Katalyse, der nichtlinearen Optik und in der Molekularelektronik angewendet werden könnten.

Erste Erfolge wurden mit nichtkovalenten intermolekularen Wechselwirkungen wie der elektrostatischen Anziehung<sup>[2]</sup> und der Wasserstoffbrückenbindung erzielt.<sup>[3]</sup> Die Arbeiten von Fischer et al. mit metallorganischen Einheiten<sup>[4]</sup> ergaben, daß mit kovalenten Bindungen eine zusätzliche Richtungskontrolle und größere Bindungsstärke möglich sind; so wurden zunehmend Metallkationen als Bausteine eingesetzt.<sup>[1b, 5]</sup> Durch Lernen am Beispiel der Natur und Nutzen der wohldefinierten Koordinationsgeometrien an Metallzentren gelang es mehreren Arbeitsgruppen, die Strukturen einfacher Minerale wie Perovskit,<sup>[6]</sup> Rutil<sup>[7]</sup> und PtS<sup>[8]</sup> nachzuahmen, indem einatomige Anionen (O<sup>2-</sup> und S<sup>2-</sup>) durch mehratomige, polyfunktionelle neutrale oder anionische Liganden ersetzt wurden. Selbst kompliziertere Koordinationspolymere mit großen Hohlräumen und Kanälen wurden hergestellt<sup>[9]</sup> sowie einander durchdringende Netzwerke, die kein mineralisches Analogon aufweisen.

Silicate, einschließlich Quarz (Piezoelektrika), Tone (Ionenaustauscher für die Wasserenthärtung) und Zeolithe (heterogene Katalysatoren) bilden technologisch wichtige Minerale, die hinsichtlich des Gebiets der Koordinationspolymere nicht untersucht worden sind. Die Vielfalt der Strukturen und Eigenschaften steht im Widerspruch zur Ähnlichkeit der Bausteine dieser Materialien; die Siliciumatome sind fast ausschließlich tetraedrisch koordiniert. Die Strukturunterschiede ergeben sich daraus, daß die Tetraeder auf unterschiedliche Art zusammengefügt werden können. Charakteristisch für die Koordinationschemie des einwertigen Kupfers ist häufig eine tetraedrische Ligandenumgebung;<sup>[10]</sup> in der Tat wurden Koordinationspolymere mit Kupfer(I)-Zentrum beschrieben, bei denen diese Koordination auch im festen Zustand erhalten ist. In früheren Bei-

[\*] Prof. S. W. Keller  
Department of Chemistry  
University of Missouri-Columbia  
Columbia, MO 65211 (USA)  
Telefax: Int. +573/882-2754  
E-mail: chemsk@mizzou1.missouri.edu

[\*\*] Ich danke Dr. C. Barnes und K. T. Holmann für ihre wertvolle Unterstützung bei der Kristallographie.

spielen waren die Metallzentren durch lineare, stabförmige<sup>[11]</sup> oder tetraedrische Liganden<sup>[12]</sup> verbrückt, so daß diamantartige Netzwerke mit unterschiedlichem Durchdringungsgrad gebildet wurden. In Silicaten wie Quarz und Zeolithen liegt der Si-O-M-Winkel ( $M = \text{Si}$  oder  $\text{Al}$ ) mit ca.  $145^\circ$  zwischen denen bei linearer und tetraedrischer Anordnung. Wir beschreiben hier das Kristallwachstum und die Strukturaufklärung von  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4$ , in dem durch einen nichtchelatisierenden, gewinkelt verbrückenden Liganden (Pyrimidin) ein azentrisches dreidimensionales Gerüst von Kupfer(I)-Zentren mit tetraedrischer Umgebung aufgebaut wird.

Einkristalle von  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4$  für eine Röntgenbeugung<sup>[13]</sup> wurden durch langsames Eindiffundieren von Tetrahydrofuran in eine Lösung von  $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CN})_4]\text{BF}_4$  und Pyrimidin in Nitrobenzol/Acetonitril erhalten. Die Elementarzelle enthält zwei unabhängige Kupferzentren, die jeweils durch vier Stickstoffatome (von vier verschiedenen Pyrimidinmolekülen) verzerrt tetraedrisch koordiniert sind. Jeder der Pyrimidinliganden verbrückt zwei Kupfer(I)-Kationen; der kleinste Cu(1)-Cu(2)-Abstand liegt bei  $6.02 \text{ \AA}$ . Diese zweizähnige, nichtchelatisierende Koordination führt zu dem in Abbildung 1 dargestellten dreidimensionalen Gerüst. Die zu diesem Gerüst benachbarten Tetrafluorborat-Ionen sind über kurze  $\text{F} \cdots \text{H}-\text{C}_{(\text{Ring})}$ -Wasserstoffbrückenbindungen ( $2.313 \text{ \AA}$  und  $2.422 \text{ \AA}$ ) an diesem „verankert“.

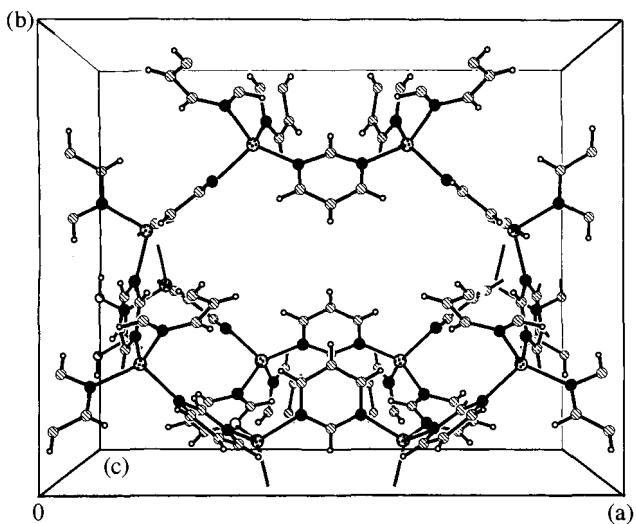


Abb. 1. Struktur der Elementarzelle von  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4$  (Blick entlang der  $c$ -Achse). Kupferatome: große punktierte Kreise, Stickstoffatome: dunkel schattiert, Kohlenstoff- und Wasserstoffatome: schraffierte bzw. weiße Kreise; die Anionen wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Der Aufbau dieses Koordinationspolymers läßt sich noch besser veranschaulichen, wenn man die Flächenmittelpunkte der Pyrimidinringe als Spitzen der verzerrten Tetraeder mit den Kupferatomen im Zentrum darstellt. Dieses eckenverknüpfte Netzwerk (Abb. 2a) aus Achterringen von Tetraedern, die über Viererringe miteinander verbunden sind, bildet elliptische Kanäle (senkrecht zur Papierebene). Die Struktur ist nicht mit einer der polymorphen Modifikationen von  $\text{SiO}_2$  wie Quarz oder Cristobalit verwandt, da keine von diesen größere als Sechsringe aufweisen. Die Feldspäte (Alumosilicate, die fast 60% der Erdkruste ausmachen) enthalten tatsächlich über Viererringe verknüpfte elliptische Achterringe,<sup>[14]</sup> wenn auch mit etwas anderer Orientierung. In Abb. 2b ist eine Schicht aus der

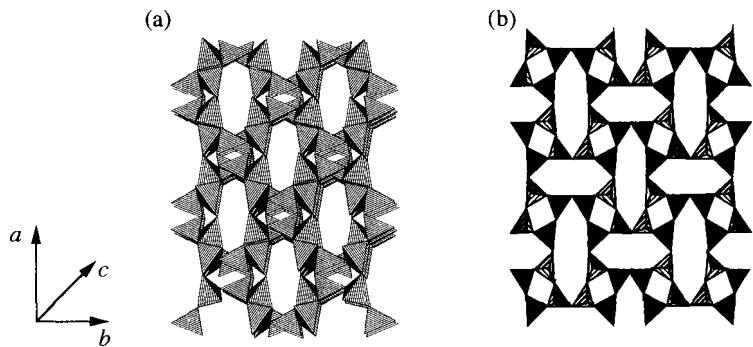


Abb. 2. a) Polyederpackungsdiagramm von  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4$ . Die Flächenmittelpunkte der Pyrimidinringe sind als Spitzen der Polyeder definiert. Die Kupfer(I)-Kationen (in der Mitte jedes Tetraeders) wurden – ebenso wie die Anionen – der Übersichtlichkeit halber weggelassen. b) Ansicht der Feldspatstruktur entlang der  $a$ -Achse. Die großen Kationen (Na, K, Ca oder Ba) befinden sich in den Achterring-Hohlräumen.

Feldspatstruktur dargestellt: Benachbarte Schichten sind versetzt angeordnet, so daß die Kanäle stark verengt sind und daher kein Hohlräum vorliegt. Bei der Mehrzahl dieser Minerale ist es bei isomorpher Substitution eines Viertels der  $\text{SiO}_4$ -durch  $\text{AlO}_4$ -Tetraeder erforderlich, daß zum Ladungsausgleich Alkalikationen eingebaut werden (z.B. Orthoklas:  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ); diese befinden sich in den Achterring-Hohlräumen (Abb. 2b).  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4$  mit einem 1:1-Verhältnis von Gerüstkationen (Kupfer(I)) zu außerhalb des Gerüsts liegenden Anionen ( $\text{BF}_4^-$ ) kann daher – zumindest im topologischen Sinn – als „gefüllter“ Feldspat angesehen werden; die Bezeichnung unterstreicht das Vorliegen zusätzlicher Ionen zum Ladungsausgleich, ähnlich wie bei „gefüllten“ Quarzstrukturen (z.B.  $\text{LiAlSi}_4\text{O}_8$  und  $\text{Mg}[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_10]$ ).<sup>[15]</sup>

Das intrakristalline Porenvolumen kann folgendermaßen abgeschätzt werden: Das Gerüst macht etwa 70% des Gesamtvolumens der Elementarzelle aus, wenn man für alle Nichtwasserstoffatome als Volumen  $19 \text{ \AA}^3$  annimmt. Zusammen mit den Anionen ist das Volumen zu 90% ausgefüllt; es bleiben also etwa 10% für fehlgeordnete Lösungsmittelmoleküle. Durch Untersuchung der Differenz-Fourier-Peaks konnten keine definierten Moleküle erkannt werden; offenbar verhält sich das eingeschlossene Lösungsmittel in den durch das Gerüst gebildeten Hohlräumen nahezu wie eine Flüssigkeit.<sup>[12]</sup> Durch NMR-spektroskopische Untersuchung von Einkristallen in  $[\text{D}_6]$ -DMSO wurden Nitrobenzol und THF nachgewiesen (stöchiometrisches Verhältnis zu Pyrimidin etwa 1:2).

Bemerkenswert ist, daß die Raumgruppe weder chiral noch zentrosymmetrisch ist; daher könnten einige der ungewöhnlichen physikalischen Eigenschaften von Quarz wie Piezoelektrizität oder nichtlineares optisches Verhalten nachgeahmt werden. Ziel der laufenden Untersuchungen ist auch, durch Verlängerung der Spacerliganden, die die Metallzentren verbinden, das Volumen der Kanäle unter Erhaltung der azentrischen Umgebung zu vergrößern. Mit verschiedenen Anionen, die als Template fungieren (analog zu denen bei hydrothermalen Zeolithsynthesen), könnten unterschiedliche Kristallstrukturen aus identischen Bausteinen erhalten werden, indem diese auf unterschiedliche Weise verknüpft werden.

## Experimentelles

Eine Lösung von  $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CN})_4]\text{BF}_4$  (0.032 g, 0.1 mmol) [16] in Nitrobenzol (3 mL) und Acetonitril (0.5 mL) wurde mit Pyrimidin (0.132 g, 1.7 mmol) versetzt. Langsame Eindiffusion von Tetrahydrofuran führte nach einigen Tagen zur Bildung gelber nadelförmiger Kristalle.

Eingegangen am 12. August,  
veränderte Fassung am 26. September 1996 [Z 9445]

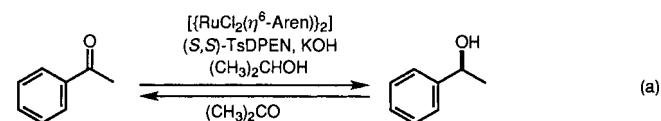
**Stichworte:** Kanalstrukturen · Koordinationspolymere · Kupferverbindungen · Selbstorganisation

- [1] a) G. R. Desiraju, *Crystal Engineering. The Design of Organic Solids*, Elsevier, Amsterdam, 1989; b) M. J. Zaworotko, *Chem. Soc. Rev.* **1994**, 24, 283.
- [2] a) P. J. Fagan, M. D. Ward, *Scientific American* **1992**, 267, 28; b) M. D. Ward, P. J. Fagan, J. C. Calabrese, D. C. Johnson, *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 1719.
- [3] a) M. C. Etter, *Acc. Chem. Res.* **1990**, 29, 120; b) C. B. Aakeroy, K. R. Seddon, *Chem. Soc. Rev.* **1993**, 22, 397; c) G. R. Desiraju, *Angew. Chem.* **1995**, 107, 2541; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1995**, 34, 2311.
- [4] a) K. Yünlü, N. Höck, R. D. Fischer, *Angew. Chem.* **1985**, 97, 863; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1985**, 24, 879; b) U. Behrens, A. K. Brimah, T. M. Sollman, R. D. Fischer, D. C. Apperley, N. A. Davies, R. K. Harries, *Organometallics* **1992**, 11, 1718.
- [5] a) B. F. Hoskins, R. Robson, *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 5932; b) *ibid.* **1990**, 112, 1546; c) J. S. Moore, S. Lee, *Chem. Ind.* **1994**, 556.
- [6] a) C. M. Bell, S. W. Keller, V. M. Lynch, T. E. Mallouk, *Mater. Chem. Phys.* **1993**, 35, 225; b) L. Carlucci, G. Ciani, D. M. Proserpio, A. Sironi, *Angew. Chem.* **1995**, 107, 2037; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1995**, 34, 1895; c) F. A. Mautner, R. Cortes, L. Lezema, T. Rojo, *ibid.* **1996**, 108, 96 bzw. **1996**, 35, 78.
- [7] S. R. Batten, B. F. Hoskins, R. Robson, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1991**, 445.
- [8] R. W. Gable, B. F. Hoskins, R. Robson, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1990**, 762.
- [9] a) O. M. Yaghi, H. Li, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, 117, 10401; b) *ibid.* **1996**, 118, 295; c) D. Venkataraman, S. Lee, J. Zhan, J. S. Moore, *Nature* **1994**, 371, 591; d) B. F. Abrahams, B. F. Hoskins, D. M. Mitchail, R. Robson, *ibid.* **1994**, 369, 727; e) L. Carlucci, G. Ciani, D. M. Proserpio, A. Sironi, *Angew. Chem.* **1996**, 108, 1170; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1996**, 35, 1088.
- [10] N. N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemie der Elemente*, VCH, Weinheim, **1988**, S. 1530.
- [11] a) L. R. MacGillivray, S. Subramanian, M. J. Zaworotko, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1994**, 1325; b) T. Otieno, S. J. Rettig, R. C. Thompson, J. Trotter, *Inorg. Chem.* **1993**, 32, 1607.
- [12] R. Robson, B. F. Abrahams, S. R. Batten, R. W. Gable, B. F. Hoskins, J. Liu in *Supermolecular Architecture: Synthetic Control in Thin Films and Solids* (Hrsg.: T. Bein), ACS Symp. Series, **1993**, S. 258.
- [13] Gelbe Einkristalle von  $[\text{Cu}(\text{pyrimidin})_2]\text{BF}_4 \cdot n$  Solvens wurden mit Epoxidharz in einer Glaskapillare fixiert; Datensammlung bei Raumtemperatur mit einem Siemens-SMART-CCD-Diffraktometer; Kristalldaten: orthorhomatisch, Raumgruppe  $Cmc_2_1$  mit  $a = 20.417(1)$ ,  $b = 16.598(1)$ ,  $c = 15.912(1)$  Å,  $V = 5392.3(6)$  Å<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{ber.}} = 1.717$  g cm<sup>-3</sup> und  $\mu(\text{MoK}\alpha) = 1.683$  mm<sup>-1</sup>. Vollständige Datensammlung ergab 5838 unabhängige Reflexe, die für die Absorptionskorrektur mit simulierten  $\Psi$ -Scans verwendet wurden; Strukturlösung mit Direkten Methoden, Programm SHELXS (G. M. Sheldrick, SHELXS-90, Universität Göttingen, 1991); Verfeinerung mit der Volle-Matrix-kleine-Fehlerquadrate-Methode gegen  $F^2$  mit SHELXL (G. M. Sheldrick, SHELXL-93, Universität Göttingen, 1994). Die Raumgruppe wurde ursprünglich aus statistischen Gründen zu  $Cmc_2_1$  bestimmt und die Struktur entsprechend gelöst. Mit dem Programm MISSYM (Y. LePage, *J. Appl. Cryst.* **1988**, 21, 983) wurden keine weiteren Symmetrieelemente festgestellt. Alle Gerüstatome wurden vor Berücksichtigung der  $\text{BF}_4^-$ -Ionen lokalisiert und verfeinert. Allen Nichtwasserstoffatomen wurden anisotrope thermische Parameter zugeordnet. Es konnten keine definierten Moleküle in den Restelektronendichte-Peaks identifiziert werden. Nach dem gewählten Modell wurden den sechs größten Peaks ( $1.0 - 1.2$  e Å<sup>-3</sup>) die Kohlenstoffatome zugeordnet; nach isotoper Verfeinerung betrug ihre Lagenausbildung etwa 0.25, was qualitativ mit den NMR-Ergebnissen in Einklang ist.  $R_1 [I > 2\sigma(I)] = 0.0849$  für 341 Parameter. Weitere Einzelheiten zur Kristallstrukturuntersuchung können beim Fachinformationszentrum Karlsruhe, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, unter der Hinterlegungsnummer CSD-405495 angefordert werden.
- [14] D. T. Griffen, *Silicate Crystal Chemistry*, Oxford University Press, New York, **1992**, S. 37.
- [15] a) H. Schulz, W. Hoffmann, G. M. Muchow, *Z. Krist.* **1971**, 134, 1; b) H. Schulz, V. Tscherry, *Acta Cryst. B* **1972**, 28, 2174.
- [16] G. J. Kubas, *Inorg. Synth.* **1979**, 19, 90;  $\text{HBF}_4$  (40 Gew.-%) wurde statt  $\text{HPF}_6$  verwendet.

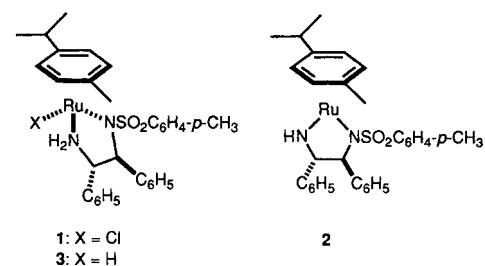
## Katalysatorvorstufe, Katalysator und Zwischenstufe des Ru<sup>II</sup>-katalysierten, asymmetrischen Wasserstofftransfers zwischen Alkoholen und Ketonen\*\*

Karl-Josef Haack, Shohei Hashiguchi, Akio Fujii, Takao Ikariya und Ryoji Noyori\*

Maßgeschneiderte chirale Ru<sup>II</sup>-Aren-Komplexe katalysieren die asymmetrische Transferhydrierung von Ketonen oder Iminen mit stabilen organischen Wasserstoffdonoren wie 2-Propanol<sup>[1, 2]</sup> oder Ameisensäure.<sup>[3]</sup> Hierbei lassen sich Reaktivität und Enantioselektivität hervorragend durch Derivate bestimmter 1,2-Diamine oder β-Aminoalkohole modifizieren. Läßt man beispielsweise eine 0.1 M Lösung von Acetophenon in 2-Propanol, die  $[(\text{RuCl}_2(\text{Aren})_2)_2, (S,S)\text{-TsDPEN}, \text{KOH}, (\text{CH}_3)_2\text{CHOH}]$  enthält (Keton:Ru:Diamin:KOH im Verhältnis 200:1:1:2), bei 28 °C für 10 h stehen, so erhält man (*S*)-1-Phenylethanol in bis zu 97% ee und einer Ausbeute von 98% [Gl. (a)].<sup>[1a]</sup> Wir zeigen



nun die Molekülstrukturen einer vorgebildeten Katalysatorvorstufe **1**, des eigentlichen Katalysators **2** und einer reaktiven Zwischenstufe **3** für diese asymmetrische Transferhydrierung mit



2-Propanol. Die Rolle von Zusätzen von KOH und damit einhergehend die der NH-Einheit im TsDPEN-Auxiliar wurde ebenfalls aufgeklärt.

Wir präsentieren den äußerst seltenen Fall eines Katalysatorsystems für asymmetrische Synthesen, in dem sowohl der eigentliche Katalysator als auch die reaktive Zwischenstufe in reiner Form isoliert wurden.<sup>[4]</sup> Dieser Erfolg kann auf die Reversibilität der Reaktionen und deren ähnliche Energieprofile zurückgeführt werden.

[\*] Prof. Dr. R. Noyori,<sup>[1+]</sup> Dr. K.-J. Haack, Dr. S. Hashiguchi, Dr. A. Fujii, Dr. T. Ikariya  
ERATO Molecular Catalysis Project  
Research Development Corporation of Japan  
1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-03 (Japan)  
Telefax: Int. +565/48-4909

[+] Ständige Adresse:  
Department of Chemistry, Nagoya University  
Chikusa, Nagoya 464-01 (Japan)  
Telefax: Int. +52/783-4177

[\*\*] Die Autoren danken Professor Masashi Yamakawa von der Kinjo Gakuin University, Dr. Philip Jessop und Herrn Kazuhiko Matsumura für wertvolle Diskussionsbeiträge. Unser Dank gilt ebenso Mieko Kunieda von der Research Development Corporation of Japan für ihre Hilfe bei den Analysen.